



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

### ANÁLISES DINÂMICAS NÃO-LINEAR E LINEAR DE REDES ELÉTRICAS CONTENDO FACTS E PROJETO DE STABFACTS

LUCIANO DE OLIVEIRA DANIEL; YAN LUCAS DE ARAÚJO PINHEIRO  
UFF

#### RESUMO

Neste trabalho, pretende-se explorar alguns aspectos importantes das análises dinâmicas não-linear e linear de redes elétricas contendo equipamentos FACTS através de simulações de um sistema teste de 15 barras nos programas ANATEM e PacDyn do CEPEL. Além disto, pretende-se apresentar o projeto de um estabilizador ("StabFACTS") acoplado ao sistema de controle dos equipamentos FACTS presentes na rede de modo a amortecer modo eletromecânico com baixo amortecimento. Será feita também uma análise crítica dos resultados obtidos com o StabFACTS em comparação com a forma tradicional de amortecimento de modos eletromecânicos, realizada através do uso de PSS acoplado ao regulador de tensão de máquina síncrona do sistema.

#### PALAVRAS-CHAVE

Estabilidade Eletromecânica, FACTS, Nyquist, Sistemas de Potência, StabFACTS.

#### 1.0 INTRODUÇÃO

Os sistemas de potência são compostos de diversos elementos de característica dinâmica lenta (poucas unidades de Hertz) como os geradores e sistemas de controle associados (reguladores de tensão, velocidade e estabilizadores). Os distúrbios considerados podem ser curtos-circuitos severos, perda de unidades geradoras de usinas, perda de grandes cargas, desligamento de linha de transmissão (LT), operações indevidas da proteção, dentre outros. Também podem ser considerados equipamentos com dinâmicas de frequências mais elevadas como elos HVDC (*High-Voltage Direct Current*), equipamentos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) [1], [2], [3] e outros equipamentos chaveados incluindo seus respectivos controladores.

Os programas computacionais de simulação de transitórios eletromecânicos disponíveis geralmente baseiam-se em métodos de integração numérica para solucionar um grande conjunto de equações diferenciais e algébricas não-lineares que modelam matematicamente o sistema, os quais geram como resultado uma série de curvas em função do tempo para diversas variáveis de interesse, as quais são posteriormente avaliadas pelos engenheiros analistas. Um outro tipo de análise de estabilidade bastante utilizada é a chamada Análise Modal, onde todas as equações não-lineares que regem o comportamento da rede são linearizadas em torno de um ponto de operação de modo a obter-se um modelo matricial em sistemas descritores [4], [5]. Por considerar sistemas lineares invariantes no tempo, esta análise contempla as diversas técnicas de teoria de controle clássica como cálculo dos polos e zeros (ou polos e resíduos), diagrama do Lugar das Raízes (LR), diagrama de bode (módulo e ângulo), diagrama polar, fatores de participação, observabilidade e controlabilidade, dentre outras.

Neste trabalho serão realizadas simulações dinâmicas de um sistema teste de 15 barras [6] (denominado neste trabalho de LD15) nas versões acadêmicas dos programas ANATEM [7] e PacDyn [8] do CEPEL. O programa ANAREDE [9] do CEPEL também será utilizado para prover os casos de fluxo de potência, que são os pontos de partida necessários para rodar as simulações dinâmicas. Inicialmente, serão apresentados resultados de projetos de PSSs (*Power System Stabilizers*) inseridos nos reguladores de tensão das máquinas síncronas, que é a forma tradicional de amortecimento de modos eletromecânicos. Além disto, serão projetadas malhas de controle estabilizadoras, denominada neste trabalho de "StabFACTS", que serão conectadas ao sistema de controle dos equipamentos FACTS presentes na rede de modo a amortecer modos eletromecânicos com baixo amortecimento presente no sistema [10], como forma alternativa de melhoria das características dinâmicas de resposta do mesmo.

No escopo das análises lineares utilizando-se o programa PacDyn, será utilizado o Método de Nyquist modificado para estabilização envolvendo alocação de pares de polos complexos conjugados. Este método de projeto de controle no domínio da frequência utiliza um diagrama de Nyquist modificado com uma capacidade de posicionamento de polos onde a função de transferência de malha aberta (FTMA) é avaliada ao longo de uma reta de coeficiente de amortecimento constante e oferece uma ferramenta gráfica interessante para projetar estabilizadores de sistema de potência. Simulações no domínio do tempo também serão realizadas para verificar a efetividade do estabilizador projetado e comparar o comportamento dinâmico do sistema com e sem a presença do estabilizador na malha de controle.

## 2.0 SISTEMA TESTE DE 15 BARRAS

### 2.1 Dados de Regime Permanente

Utilizou-se o sistema teste LD15 cujo diagrama unifilar com o caso base de fluxo de potência do ANAREDE [9] convergido é mostrado na Figura 1. Este sistema é constituído de: 15 barras; 7 geradores (barras 1, 2, 3, 6, 8, 12 e 14) sendo 3, 8 e 12 compensadores síncronos; 2 motores de indução (barra 5); 1 trafo de 2 enrolamentos (barras 4 e 9); 1 trafo de 3 enrolamentos (barras 4, 8 e 9); 1 trafo OLTC; 1 capacitor série controlado a tiristores (TCSC) entre as barras 14 e 15; 1 compensador estático (SVC) na barra 11; 16 LTs e 10 cargas estáticas.

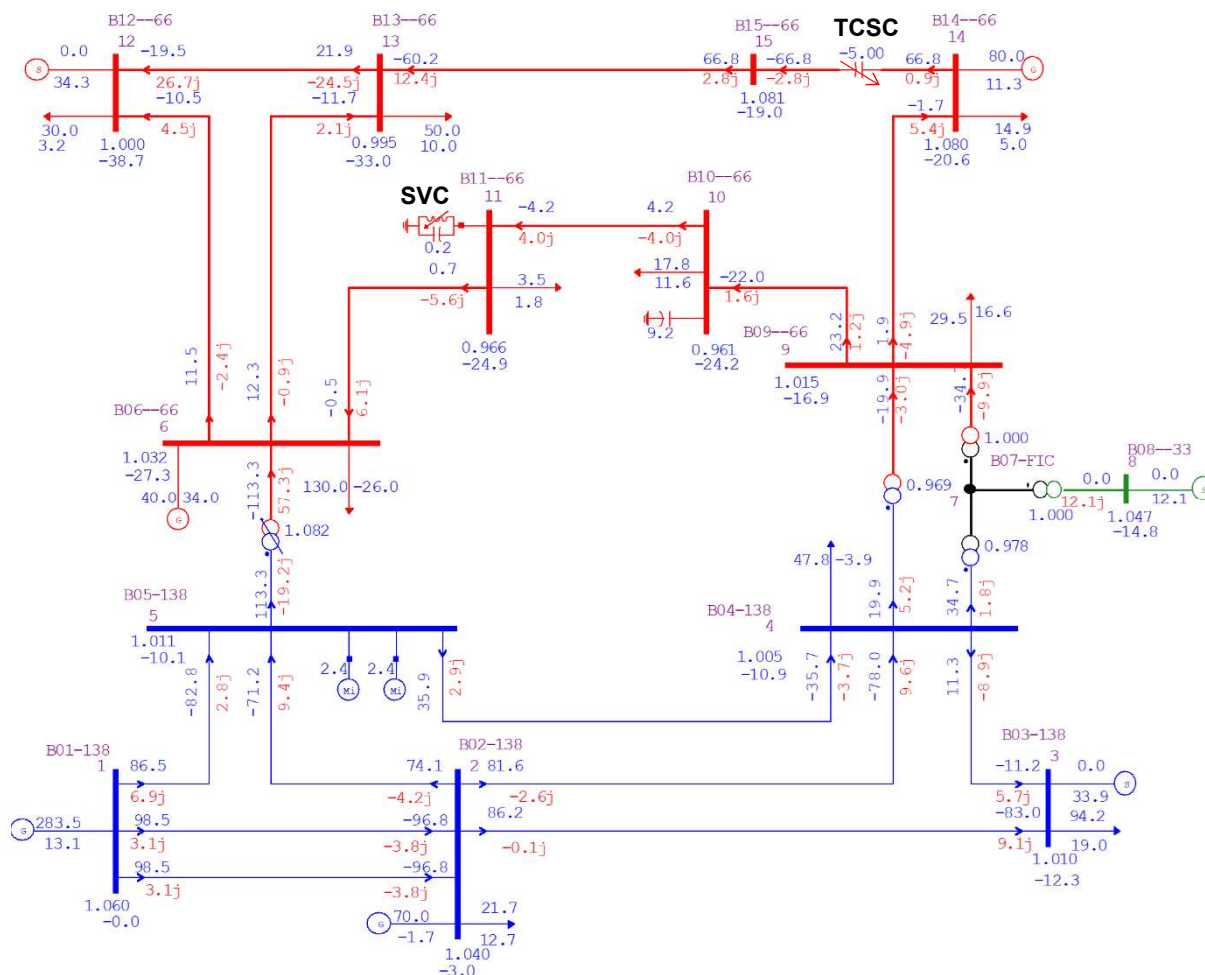


Figura 1 – Diagrama unifilar e fluxo de potência (caso base) do sistema teste de 15 Barras.

No caso de fluxo de potência (Figura 1), os geradores são tratados como injeções de potências ativa e reativa constantes. As cargas são representados por modelos ZIP (percentuais de Z, I e P constantes somando 100%). As LTs são representadas por modelos “ $\pi$ ” constituído de impedâncias série e shunt na frequência nominal do sistema que possui representação fasorial.

Tabela 1 - Parâmetros dos modelos das LTs do sistema LD15.

Barra DE	Barra PARA	R série (%)	X série (%)	shunt (Mvar)
1	2	1,94	5,92	5,28
1	2	1,94	5,92	5,28
1	5	5,40	22,30	4,92
2	3	4,70	19,80	4,38
2	4	5,81	17,63	3,75
2	5	5,69	17,39	3,40
3	4	6,70	17,10	3,46
4	5	1,34	4,21	1,28
6	11	60,00	120,00	0
6	12	80,00	160,00	0
6	13	42,00	80,00	0
9	10	24,00	54,00	0
9	14	80,00	160,00	0
10	11	8,20	19,21	0

12	13	22,09	19,99	0
13	15	17,09	39,80	0

Tabela 2 -Parâmetros dos transformadores do sistema LD15.

Barra DE	Barra PARA	X (%)	Tap	Tap mín	Tap máx	V <sub>ESPECIF</sub> (pu)	Barra controlada	MVA
4	7	20,91	0,978	-	-	-	-	100
4	9	55,62	0,969	-	-	-	-	100
5	6	25,02	1,082	0,9	1,1	1,011	5	200
7	8	17,62	1,000	-	-	-	-	30
7	9	11,00	1,000	-	-	-	-	100

Tabela 3 - Parâmetros dos modelos de SVC e TCSC do sistema LD15, respectivamente.

Barra (SVC)	Inclinação (%)	Q (Mvar)	Q <sub>MIN</sub> (Mvar)	Q <sub>MAX</sub> (Mvar)	Barra controlada	Controle
11	3,0	0,1865	-0,2	0,2	11	Icte
Barra DE (TCSC)	Barra PARA (TCSC)	Controle	X <sub>ESPECIF</sub> (%)	X (%)	X <sub>MIN</sub> (%)	X <sub>MAX</sub> (%)
15	14	Xcte	-5,0	-5,0	-10,	-,01

Tabela 4 - Parâmetros dos modelos ZIP das cargas do sistema LD15.

Barra	P (MW)	Zcte MW (%)	Pcte MW (%)	Q (Mvar)	Icte Mvar (%)	Zcte Mvar (%)	Pcte Mvar (%)
10	18,0	0	65	12,0	4	46	50
12	30,0	0	80	3,2	0	10	90

Os parâmetros dos elementos (LTs, trafos; cargas; SVC; TCSC) estão listados da Tabela 1 até a Tabela 4.

Tabela 5 - Tensões e potências nas barras do sistema LD15.

Barra	V (pu)	$\theta$ (graus)	P <sub>G</sub> (MW)	Q <sub>G</sub> (Mvar)	P <sub>C</sub> (MW)	Q <sub>C</sub> (Mvar)	Shunt (Mvar)
1	1,060	0,0	-	-	0,0	0,0	0,0
2	1,040	-	70,0	-	21,7	12,7	0,0
3	1,010	-	0,0	-	94,2	19,0	0,0
4	-	-	0,0	0,0	47,8	-3,9	0,0
5	1,011	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	1,040	-	40,0	-	130,0	-26,0	0,0
7	-	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	-	-	0,0	-	0,0	0,0	0,0
9	1,015	-	0,0	0,0	29,5	16,6	0,0
10	-	-	0,0	0,0	18,0	12,0	10,0
11	0,966	-	0,0	0,0	3,5	1,8	0,0
12	1,000	-	0,0	-	30,0	3,2	0,0
13	-	-	0,0	0,0	50,0	10,0	0,0
14	1,080	-	80,0	-	14,9	5,0	0,0
15	-	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Na Tabela 5 são apresentados os valores especificados do problema de fluxo de potência para todas as 15 barras. Os valores de P, Q, V e  $\theta$  que não estão especificados serão calculados pelo ANAREDE através do método iterativo de Newton Raphson utilizado na solução das equações não-lineares de fluxo de potência [11]. A única geração que não controla a tensão de sua própria barra terminal é aquela conectada na barra 8 (síncrono), a qual controla a tensão da barra 9 (tipo PQV). A barra 5 também tem a tensão especificada (tipo PQV) porque o trafo OLTC entre as barras 5-6 controla sua tensão. O mesmo ocorre com a barra 11 (tipo PQV), a qual é controlada pelo SVC.

## 2.2 Dados Dinâmicos

Neste trabalho, todos os geradores são modelados pelo “modelo 2” do ANATEM [7] de máquina síncrona de polos salientes com um enrolamento de campo, dois enrolamentos amortecedores (um no eixo direto e outro no eixo em quadratura) e a saliência sub-transitória é desprezada.

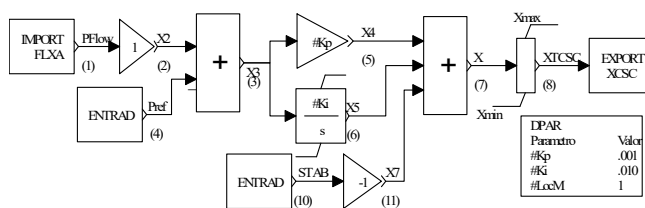


Figura 2 – Controle de potência do TCSC.

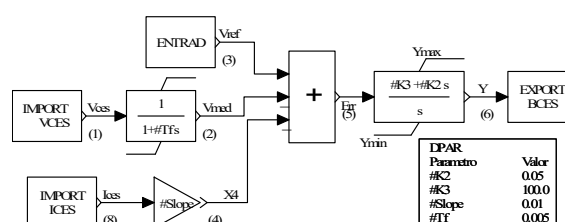


Figura 3 – Controle de tensão do SVC.

Com relação aos modelos dinâmicos dos equipamentos FACTS (SVC e TCSC) no ANATEM, suas malhas de controle são modeladas através de Controladores Definidos pelo Usuário (CDUs), que são compostos por diversos blocos para as expressões lineares, funções não-lineares e várias outras operações matemáticas no domínio do tempo [12], [13]. Na Figura 2 e na Figura 3 são apresentadas as malhas de controle de tais equipamentos FACTS. O passo de integração ( $\Delta t$ ) do método trapezoidal implícito utilizado neste trabalho foi de 5 milissegundos.

### 3.0 ESTABILIZADORES CONECTADOS EM GERADORES

O método de projeto automático de PSS do PacDyn baseia-se no Método de Nyquist com Fator de Amortecimento (MNFA) [14]. Este método, baseia-se na utilização do diagrama de Nyquist onde o lugar geométrico de  $G(s)$  no plano complexo é avaliado com  $s$  variando ao longo de uma reta de fator de amortecimento constante. No referido projeto automático, escolhe-se um valor de amortecimento  $\xi$  (reta) e a frequência  $\omega$  de um polo já conhecido.

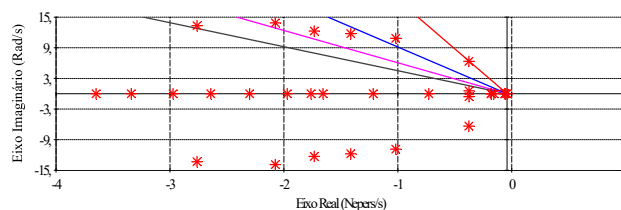


Figura 4 - Polos (QR) para o sistema teste LD15.

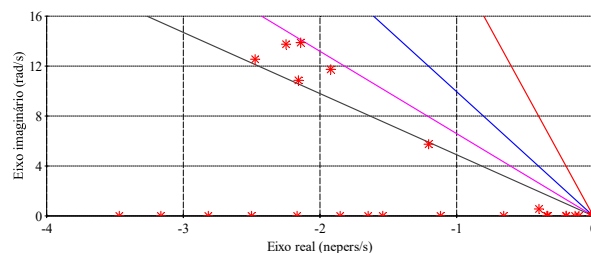


Figura 5 - Polos LD15 com PSSs nas máquinas.

Na Figura 4 temos parte do mapa de polos (conjunto menos amortecido) calculado pelo algoritmo QR no PacDyn [15], onde o modo  $-0,32+j6,34$  é o que possui menor amortecimento (5,1%). Após os projetos sequenciais de estabilizadores no PacDyn para as máquinas 14, 12, 6, 1 respectivamente, foi ainda necessário fazer um reajuste do ganho proporcional do PSS da máquina 14 de 5,3 para o valor 13,2 utilizando o diagrama do Lugar das Raízes.

A Figura 5 apresenta o novo mapa de polos do sistema com todos os estabilizadores projetados conectados nas malhas dos reguladores de tensão das máquinas síncronas. Verifica-se que todos os modos têm amortecimento maior que 15%.

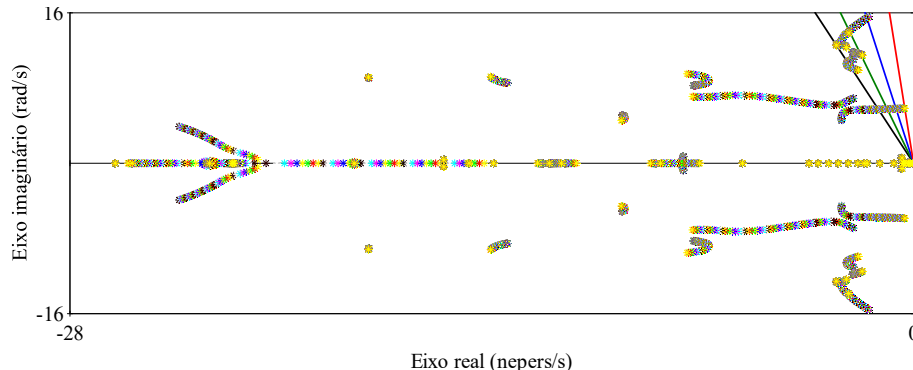


Figura 6 - LR para a variação do ganho  $K_p$  do PSS da máquina 14.

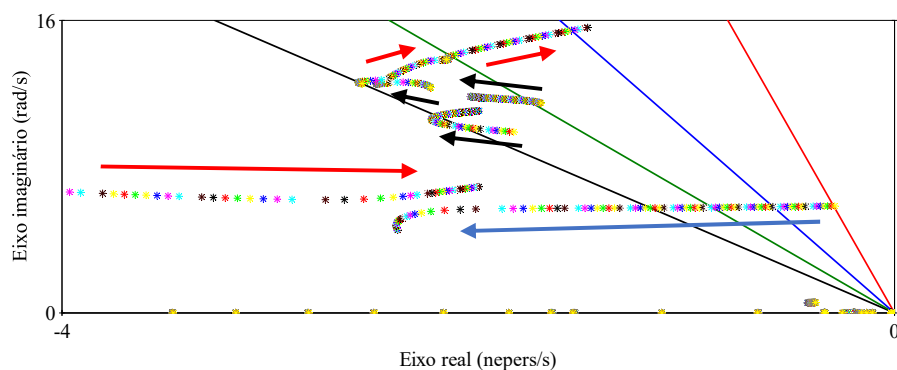


Figura 7 - LR para a variação do ganho  $K_p$  do PSS da máquina 14 (ZOOM 1).

Na Figura 6 é apresentado o Lugar das Raízes no plano complexo para uma variação do ganho  $K_p$  do PSS da máquina 14 variando de 10% a 500% de seu valor original (5,3013). Aplicando-se um *zoom* na região mais próxima dos polos de interesse (menos amortecidos) temos na Figura 7 que, na medida em que  $K_p$  aumenta, o ganho-alvo (5,8 rad/s) caminha ao longo de um ramo na direção esquerda (seta azul) aumentando cada vez mais seu amortecimento, contudo outros polos caminha em sentido contrário (setas vermelhas).

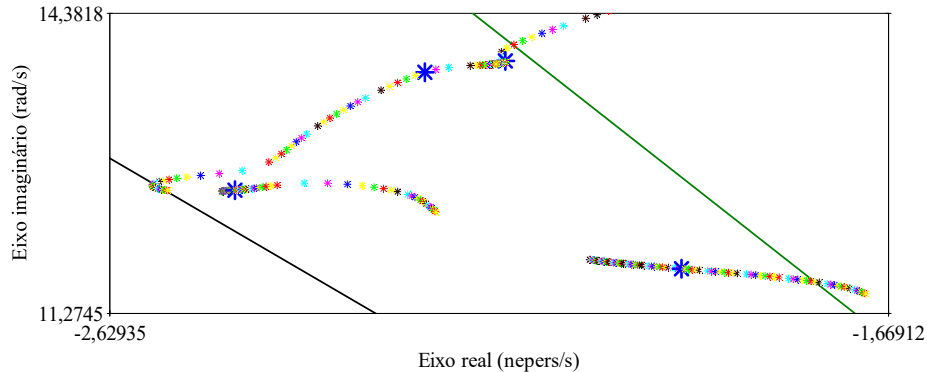


Figura 8 - LR para a variação do ganho  $K_p$  do PSS da máquina 14 (ZOOM 2).

Na Figura 8 temos um novo zoom aplicado na região do plano complexo que define o ganho  $K_p$  escolhido. Os polos em azul (asteriscos grandes) são aqueles pertencentes aos ramos do Lugar das Raízes para  $K_p = 13,22$ . Este é o valor otimizado que maximiza o amortecimento mínimo do sistema.

#### 4.0 ESTABILIZADORES CONECTADOS EM FACTS

Partindo-se do mesmo sistema teste cujos polos são apresentados na Figura 4, será aqui apresentado um exemplo de projeto de um StabFACTS a ser conectado posteriormente no TCSC do Sistema LD15 para amortecer o modo  $-0,32+j6,34$ . Em seguida, apresenta-se os resultados dos projetos de StabFACTS para o SVC e TCSC presentes no sistema LD15.

##### 4.1 Projeto do StabFACTS para o TCSC

Para este projeto via MNFA, o cálculo dos fatores de observabilidade são os mais indicados para se definir qual máquina do sistema possui a melhor velocidade (sinal remoto) para servir como entrada no estabilizador.

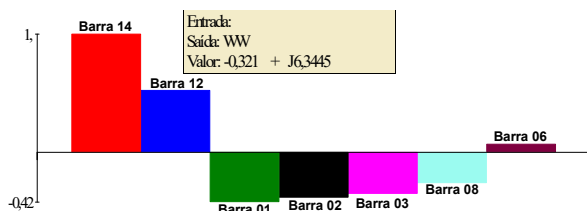


Figura 9 – Histograma - fator de observabilidade de  $\omega$ .

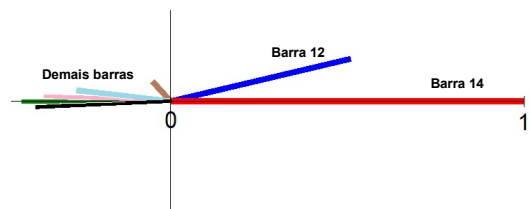


Figura 10 – Diagrama do *mode-shape* de  $\omega$ .

Na Figura 9 e na Figura 10 são apresentados respectivamente os cálculos dos fatores de observabilidade e *mode-shapes* de velocidade para o modo em questão. Observa-se que a velocidade da máquina na barra 14 ( $\omega_{14}$ ) é a melhor variável para compor a função de transferência do projeto e, como o TCSC nesse caso é o equipamento FACTS mais próximo a esta barra, projetaremos para ele a malha estabilizadora. O mode-shape nos indica que as máquinas 14 e 12 oscilam contra o resto do sistema, caracterizando que o modo a ser amortecido é inter-áreas.

Para projetar e inserir o estabilizador no TCSC, foi necessário criar um sinal do tipo "ENTRAD" no ANATEM para permitir a definição de uma FT ( $\omega_{14} / STAB$ ) no PacDyn. A Figura 2 mostra o local onde foi inserido o sinal *STAB* como entrada no somador que recebe os sinais do controlador proporcional-integral (PI) do controle do TCSC.

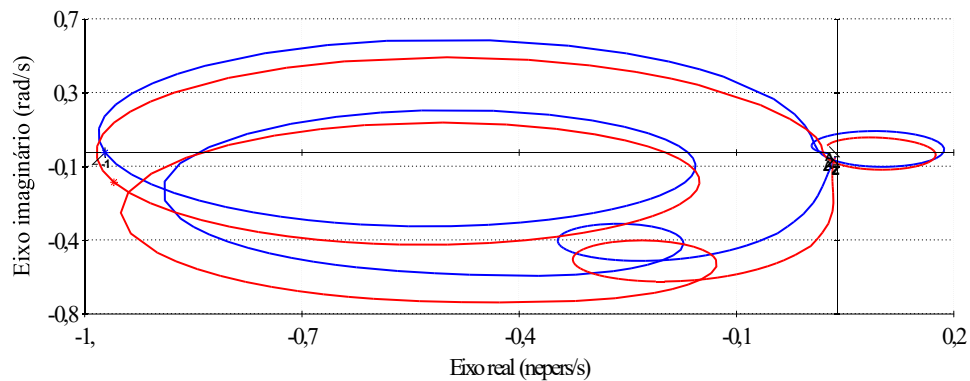


Figura 11 – Nyquist com e sem StabFACTS no TCSC.

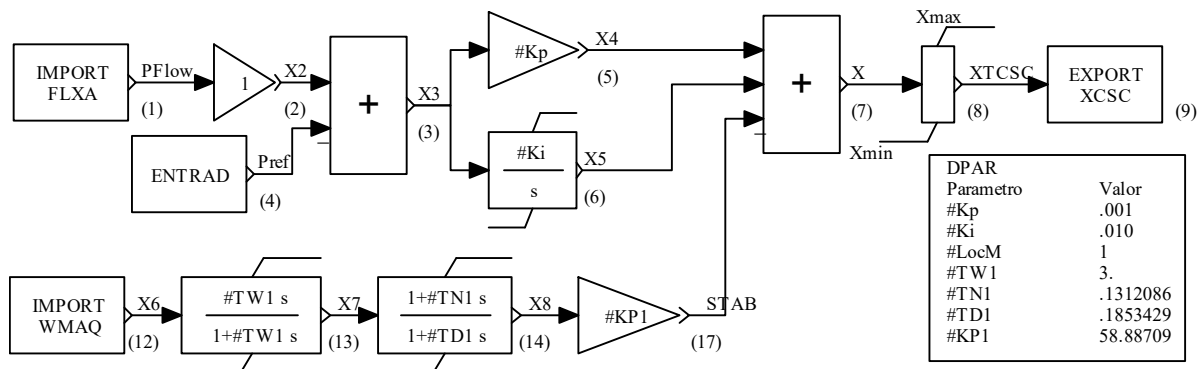


Figura 12 – Diagrama de blocos com StabFACTS no TCSC.

Através da ferramenta de ajuste automático de estabilizadores presente no PacDyn, a qual é baseada no MNFA, escolheu-se um amortecimento 15% para o polo  $-0,32+j6,34$  e traçou-se a resposta em frequência (conhecida como diagrama Polar ou diagrama de Nyquist) do sistema ajustada para uma variação de 0,1 rad/s até 200 rad/s (Figura 11) sem o StabFACTS (vermelho) e com StabFACTS (azul). A Figura 12 mostra o diagrama do controle do TCSC com a malha projetada conectada.

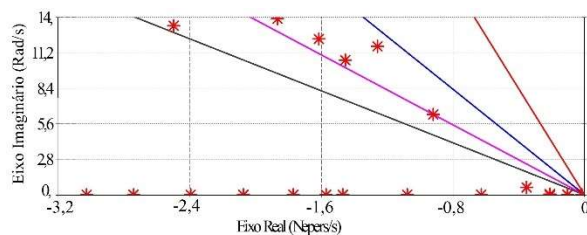


Figura 13 – Mapa de polos do LD15 com StabFACTS.

Tabela 6 – Lista de polos com 1 StabFACTS.

	Real	Imag.	Módulo	Frequência (Hz)	Amortecimento (%)
1	-1,3169	11,71400	11,7870	1,86430	11,172
2	-1,3169	-11,71400	11,7870	-1,86430	11,172
3	-1,6896	12,29100	12,4070	1,95620	13,619
4	-1,6896	-12,29100	12,4070	-1,95620	13,619
5	-1,9527	13,88700	14,0230	2,21010	13,925
6	-1,9527	-13,88700	14,0230	-2,21010	13,925
7	-1,5216	10,62500	10,7330	1,69100	14,176
8	-1,5216	-10,62500	10,7330	-1,69100	14,176
9	-0,9619	6,34000	6,4126	1,00900	15,000
10	-0,9619	-6,34000	6,4126	-1,00900	15,000
11	-2,6131	13,33000	13,5830	2,12150	19,238

A Figura 13 mostra o mapa de polos (conjunto menos amortecido) do sistema com o StabFACTS adicionado no TCSC, onde verifica-se que o modo de frequência 6,34 rad/s está com amortecimento de exatamente 15%. Observa-se ainda na Tabela 6 que o modo menos amortecido do sistema LD15 passou a ser o de frequência 11,714 rad/s.

#### 4.2 Projetos de StabFACTS para o SVC

Uma vez projetado um StabFACTS para o TCSC, neste item pretende-se melhorar ainda mais as características dinâmicas de amortecimento das oscilações do sistema LD15 projetando-se com o MNFA um novo StabFACTS a ser adicionado na malha do controle do SVC. Para este projeto foi necessário criar um sinal STAB como entrada no somador que recebe os sinais “Vref” (sinal de referência do controle de tensão do SVC) e “Vmed” (sinal filtrado da tensão na barra terminal do SVC) na malha de controle da Figura 3.

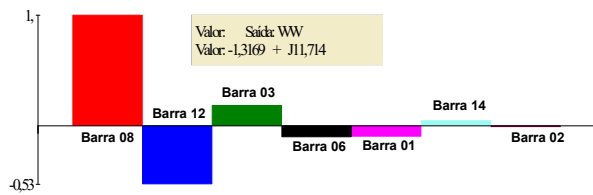


Figura 14 – Histograma - fator de observabilidade de  $\omega$ .

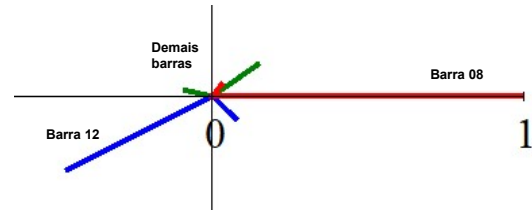


Figura 15 – Diagrama do *mode-shape* de  $\omega$ .

Na Figura 14 e na Figura 15 são apresentados respectivamente os cálculos dos fatores de observabilidade e mode-shapes de velocidade para o modo de frequência 11,714 rad/s. Observa-se que a velocidade da máquina na barra 8 ( $\omega_8$ ) é a melhor variável para compor a função de transferência do projeto. O mode-shape nos indica que neste caso, predominantemente, as máquinas 8 e 12 oscilam entre si. Para projetar e inserir o estabilizador no SVC, foi necessário criar um sinal do tipo “ENTRAD” no ANATEM para permitir a definição de uma FT ( $\omega_8$  / STAB) no PacDyn.

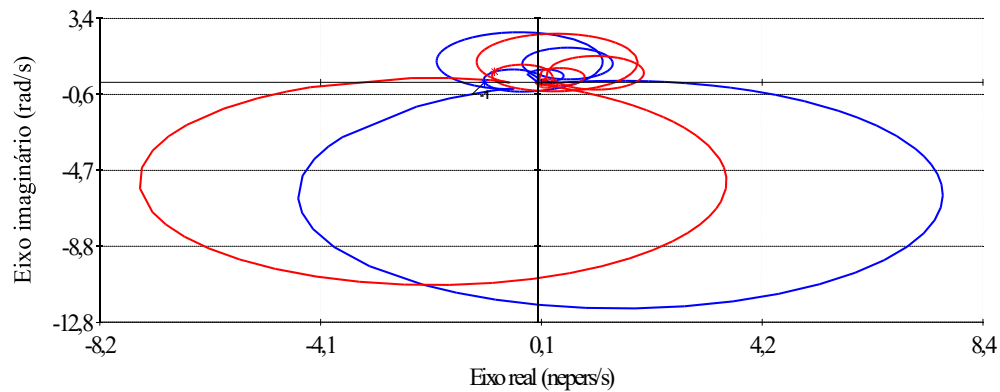


Figura 16 – Nyquist com e sem StabFACTS no SVC.

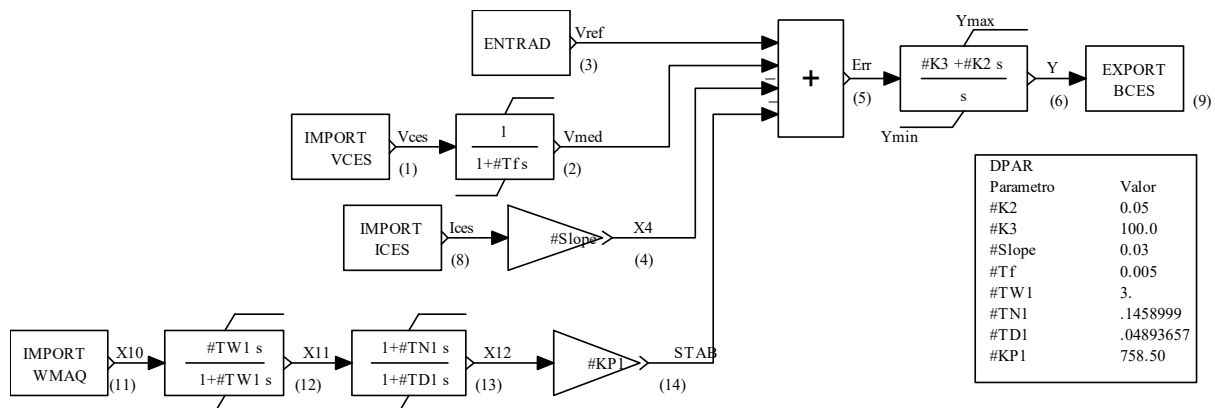


Figura 17 – Diagrama de blocos com StabFACTS no SVC.

Uma vez definida a função de transferência no PacDyn, inicia-se o projeto do estabilizador simulando-se a resposta em frequência ajustada para uma variação de frequência de 0,1 rad/s até 200 rad/s. Foi escolhido um amortecimento 14% para o polo -1,3169 + j11,714. Na Figura 16 é apresentado o diagrama de Nyquist do sistema sem o StabFACTS (vermelho) e com o StabFACTS (azul) conectado no SVC. A Figura 17 mostra o diagrama do controle do SVC com a malha projetada conectada.

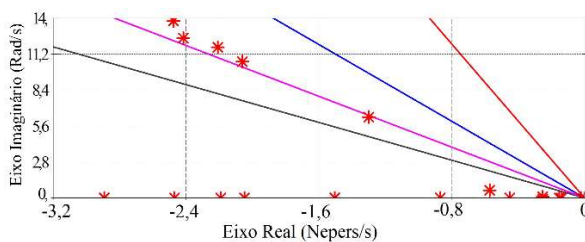


Figura 18 – Mapa de polos do LD15 com StabFACTS.

Tabela 7 – Lista de polos com 2 StabFACTS.



	Real	Imag.	Módulo	Frequência (Hz)	Amortecimento (%)
1	-1,8572	13,77100	13,8950	2,19170	13,366
2	-1,8572	-13,77100	13,8950	-2,19170	13,366
3	-1,6569	11,71800	11,8350	1,86500	14,000
4	-1,6569	-11,71800	11,8350	-1,86500	14,000
5	-1,8127	12,44000	12,5710	1,97980	14,420
6	-1,8127	-12,44000	12,5710	-1,97980	14,420
7	-1,5456	10,60500	10,7170	1,68780	14,422
8	-1,5456	-10,60500	10,7170	-1,68780	14,422
9	-0,9747	6,29790	6,3729	1,00230	15,295
10	-0,9747	-6,29790	6,3729	-1,00230	15,295
11	-2,6032	13,38800	13,6390	2,13080	19,087

A Figura 18 mostra o mapa de polos (conjunto menos amortecido) do sistema com os StabFACTS adicionados no TCSC e no SVC, onde verifica-se que o modo de frequência 11,718 rad/s está com amortecimento de exatamente 14%. Observa-se ainda na Tabela 7 que o modo menos amortecido do sistema LD15 passou a ser o de frequência 13,771 rad/s, com amortecimento de 13,37%.

Barra 12

Como análise crítica, pode-se afirmar que é possível amortecer modos eletromecânicos utilizando estabilizadores corretamente projetados e inseridos em equipamentos FACTS obtendo-se resultados tão bons quanto aqueles obtidos por meio de estabilizadores projetados e inseridos em máquinas síncronas. Um ponto importante a ser observado é que, no caso dos PSSs em máquinas, os sinais de medição são todos locais, uma vez que o sinal de velocidade está fisicamente próximo ao sistema de controle. Já no caso dos StabFACTS pode ser necessário obter sinais remotos, o que naturalmente representa uma dificuldade adicional.

A análise dos zeros do sistema LD15 não foi diretamente utilizada no projeto dos estabilizadores deste trabalho, mas pode ser útil, por exemplo, para indicar que os zeros não inviabilizam a malha de controle escolhida.

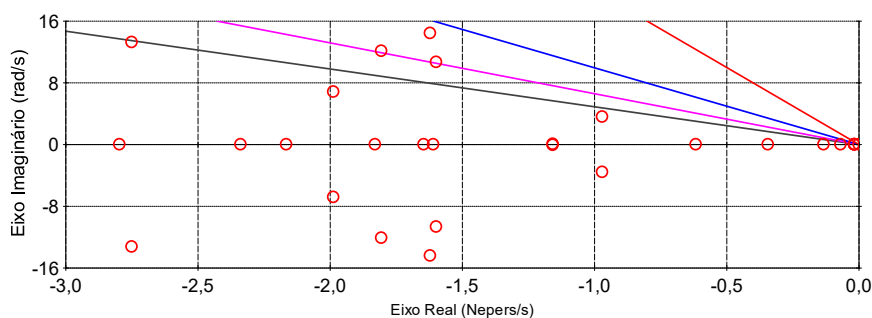


Figura 19 – Mapa de zeros da FT ( $\omega_8$  / STAB) do sistema LD15.

Na Figura 19 temos o mapa de zeros calculados pelo algoritmo QZ do PacDyn [15], [16], [17]. Os zeros correspondem às raízes do polinômio do numerador de uma determinada função de transferência.

#### 4.3 Comparações no Domínio do Tempo para os StabFACTS Projetados

Neste item são apresentados os resultados de simulações não-lineares (ANATEM), as quais são importantes para verificação do comportamento dinâmico do sistema com os estabilizadores perante grandes perturbações.

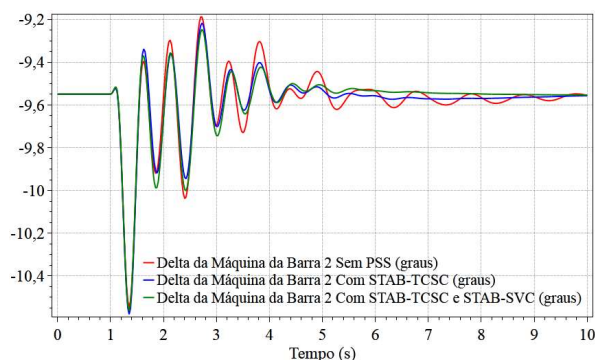


Figura 20 – Comparação dos três casos –  $\delta$  (graus).

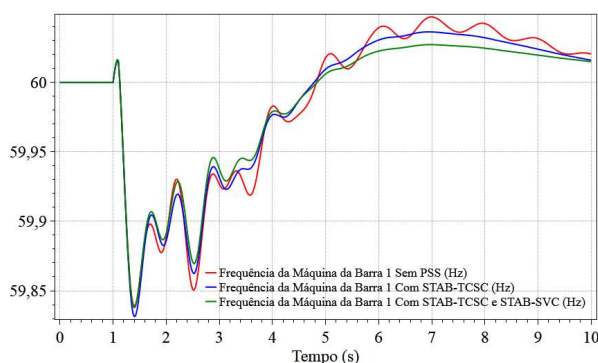


Figura 21 – Comparação dos três casos – Freq. (Hz).



Na Figura 20 é apresentada a comparação entre os ângulos da máquina da barra 2 para um curto-circuito trifásico aplicado na barra 13 do sistema LD15 com duração de 100 ms para o sistema sem estabilizadores, com estabilizador apenas no TCSC e com estabilizador em ambos os FACTS. Na Figura 21 é apresentada a comparação entre as frequências da máquina da barra 1 para um curto-circuito trifásico aplicado na barra 13 com duração de 100 ms. Observa-se que os estabilizadores inseridos nos equipamentos FACTS melhoraram significativamente as características dinâmicas em termos de amortecimento das oscilações.

## 5.0 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi possível aplicar diferentes técnicas de análise e projeto de sistemas de controle voltados para sistemas elétricos de potência envolvendo equipamentos FACTS. Dentre tais análises, destacam-se aquelas baseadas em simulações no domínio do tempo e as que utilizam uma modelagem linearizada do sistema elétrico. Nesta segunda abordagem, foram utilizadas várias ferramentas de análise linear como: cálculo de polos do sistema; cálculo de fatores de observabilidade; *mode-shape*; avaliação dos fatores de participação; diagrama do Lugar das Raízes; resposta em frequência através do diagrama de Nyquist; cálculo dos zeros e resíduos de uma função de transferência e resposta no tempo.

Na abordagem de projeto de estabilizadores acoplados nos reguladores de tensão de máquinas síncronas, foram realizados sucessivos projetos no programa PacDyn para obter progressivamente um aumento dos fatores de amortecimento dos polos do sistema através de um método de alocação de par de polos complexos conjugados. Também foi demonstrado que é possível melhorar a característica dinâmica do sistema pelo simples reajuste de um determinado ganho de controle usando o método do Lugar das Raízes para auxiliar na tomada de decisão. Na abordagem de projeto de estabilizadores acoplados nos controles de equipamentos FACTS, neste trabalho demonstrou-se que é perfeitamente possível projetar estabilizadores para tais equipamentos (no caso um SVC e um TCSC) de modo a obter semelhante amortecimento dos modos eletromecânicos do sistema teste utilizado.

Ressalta-se ainda a flexibilidade proporcionada pelos equipamentos FACTS, os quais podem efetuar ações de controle no sistema e ao mesmo tempo acumularem a função de estabilizador. Portanto é significativamente vantajosa a utilização destes equipamentos baseados em eletrônica de potência nas redes elétricas modernas as quais, na medida em que evoluem, impõem frequentemente novos desafios para os engenheiros do Setor.

Neste trabalho utilizou-se as versões acadêmicas dos programas ANAREDE, ANATEM e PacDyn da Eletrobras Cepel. A utilização destes programas, que são amplamente utilizados por diversos agentes do setor elétrico brasileiro, contribuiu para mostrar que eles possuem forte integração entre si (e.g.: exportação de um caso ANATEM para o PacDyn) e possuem ferramentas poderosas e inovadoras para análise da dinâmica de sistemas de potência, incluindo os de grande porte como o Sistema Interligado Nacional. Além disto, estes programas são desenvolvidos por pesquisadores brasileiros em uma empresa brasileira, fato este que enaltece a engenharia nacional.

Outro aspecto a ser destacado é a complementaridade entre as ferramentas de análises linear e não-linear. Os sistemas elétricos de potência em geral são frequentemente submetidos a grandes perturbações, as quais provocam grandes excursões das variáveis do modelo matemático que descreve o comportamento do sistema. Quando as equações são linearizadas, só é possível simular pequenas perturbações devido a premissa adotada na linearização. Por este motivo, após o projeto do sistema de controle na ferramenta linear são necessárias simulações de grandes perturbações na ferramenta não-linear.

## 6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Hingorani, N.G., "High Power Electronics and flexible AC Transmission System", *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 8, nº 7, p. 3–4, 1988.
- [2] Hingorani, N.G. e Gyugyi, L., *Understanding FACTS - Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, 1º ed. New York, 1999.
- [3] Daniel, L.O., "Electromagnetic Transient Simulator Using Dynamic Phasors for Non-Linear Analysis of Electrical Networks with FACTS Equipment", PhD Thesis, COPPE/UFRJ, 2018.
- [4] Luenberger, D.G., "Dynamic Equations in Descriptor Form", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1977.
- [5] Martins, N., "Efficient eigenvalue and frequency response methods applied to power system small-signal stability studies", *IEEE Trans. Power Syst.*, 1986.
- [6] Daniel, L.O., "Repositório com casos do sistema teste LD15", *GitHub*, 2021. Available at: <https://github.com/Iodaniel/LD15>.
- [7] Eletrobras CEPEL, *Manual do Programa ANATEM - Análise de Transitórios Eletromecânicos*. 2019.
- [8] Eletrobras CEPEL, *PacDyn User's Manual*. 2019.
- [9] Eletrobras CEPEL, *Manual do Programa ANAREDE*. 2019.
- [10] Daniel, L.O. e Gomes Jr, S., "Amortecimento de Modos Eletromecânicos Utilizando Estabilizadores em Elos HVDC Considerando-se Diferentes Estratégias de Controle", *XXIV SNPTEE, Curitiba - PR*, 22-out-2017.
- [11] Monticelli, A.J., *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*. 1983.
- [12] Ogata, K., *Engenharia de Controle Moderno*, 5a edição. 2010.
- [13] Dorf, R.C., e Bishop, R.H., *Sistemas de Controle Moderno*, 8a Edição. Addison Wesley Longman, 2001.

- [14] Gomes Jr, S., Guimarães, C.H.C., Martins, N. e Taranto, G.N., "Damped Nyquist Plot for a pole placement design of power system stabilizers", *Electr. Power Syst. Res.*, 2018.
- [15] Martins, N., Lima, L.T.G., Pinto, H.J.C. e Macedo, N.J.P., "The Brazilian Utilities Package for the Analysis and Control of Small-Signal Stability of Large Scale AC/DC Power Systems", *III SEPOPE*, Belo Horizonte, 1992.
- [16] Patel, R.V., Laub, A.J. e Vandooren, P.M., *Numerical Linear Algebra Techniques for Systems and Control*. IEEE Press, 1994.
- [17] Smith, B.T. *et al.*, *Matrix Eigensystem Routines: EISPACK Guide*, 2nd Editio. New York: Springer-Verlag, 1976.

#### DADOS BIOGRÁFICOS



LUCIANO O. DANIEL possui graduação (2004) pela UFJF, mestrado (2011) e doutorado (2018) pela COPPE/UFRJ. Já trabalhou no ONS, no CEPEL e atualmente é professor da UFF. Ele tem 17 anos de experiência em estudos elétricos em sistemas de potência (fluxo de carga, curto-circuito, estabilidade e análise modal), modelagem matemática e análise de equipamentos HVDC e FACTS em programas de transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos e ensino universitário. Ele é membro do CIGRE CE-B4 desde 2006 e CE-C4 desde 2020. Seus principais interesses de pesquisa incluem aplicações VSC (*Voltage Source Converter*), modelagem matemática de transitórios eletromagnéticos e qualidade de energia.

YAN LUCAS DE ARAÚJO PINHEIRO é graduando em engenharia elétrica pela UFF. Seus principais interesses atuais incluem a modelagem matemática e análise de equipamentos FACTS em programas de transitórios eletromecânicos (ANATEM), bem como no projeto de malhas estabilizadoras utilizando ferramentas de análise não-linear (PacDyn). No que diz respeito a transitórios eletromagnéticos, seus interesses de estudos estão voltados para simulações no ATP de energização de linhas de transmissão e transformadores, religamento monopolar e tripolar, rejeição de carga e tensão de restabelecimento transitória (TRT).