

ANÁLISE DO REGIME DINÂMICO A PEQUENAS PERTURBAÇÕES

8.1. INTRODUÇÃO

Nos sistemas de potência são consideradas como pequenas perturbações as variações de carga e geração que acontecem a todo o momento no sistema, quase na totalidade do tempo real de operação. Estas perturbações causam uma mudança pequena no ponto de operação, levando o sistema a operar em uma nova condição, cujo comportamento deseja-se analisar.

Os estudos de estabilidade realizados neste enfoque são feitos através da análise modal do sistema, que consiste na determinação dos seus autovalores a partir de um ponto de operação indicado na simulação do caso de fluxo de potência. Essa análise fornece informações que permitem inferir sobre o estado da estabilidade desse sistema. Se todos os autovalores do sistema tiverem parte real negativa, isso indica que esse ponto de operação é estável. Caso algum autovalor tenha parte real positiva, isso indica a presença de um modo instável, que pode acarretar situações inconvenientes nesse sistema.

Através desse estudo, são definidos ajustes nos controladores das máquinas buscando aumentar seu amortecimento com relação aos modos locais, intra-planta, inter-áreas e multi-máquinas. Estes valores de ajustes definidos nos estudos, são testados e avaliados no campo e, se resultarem em ganhos para o sistema, sua implantação é recomendada.

A otimização dos controladores das usinas se constitui num requisito importante, pois permite uma operação totalmente interligada dos sistemas, proporcionando maior segurança e flexibilidade operativa.

8.2. FERRAMENTA COMPUTACIONAL

O programa de estabilidade a pequenas perturbações utilizado para análise dos sistemas-teste foi o PACDYN, desenvolvido pelo CEPEL [33], que é voltado à realização de estudos de estabilidade frente a pequenas perturbações.

O PACDYN explora diversos métodos de cálculo de autovalores, autovetores, zeros e resíduos de função de transferência, resposta no tempo para pequenas perturbações no sistema linearizado, torques sincronizante e de amortecimento, equivalentes dinâmicos de sistemas externos no domínio da frequência, sendo utilizado em aplicações como:

- Identificação dos locais mais adequados para a instalação de ESP e dispositivos FACTS para amortecimento de oscilações locais e inter-áreas;
- Identificação dos controladores do sistema (RAV, ESP, RAV, elo HVDC e dispositivos FACTS) cujos ajustes são inadequados;
- Projeto de controladores utilizando técnicas de resposta em frequência, *root-locus* (lugar das raízes) e alocação de pólos;
- Determinação das barras e dos circuitos do sistema mais adequados à instalação de dispositivos FACTS, com o objetivo de amortecer oscilações inter-áreas;
- Determinação das malhas de controle e combinação de sinais mais propícios para estabilização do sistema de potência. Determinação das margens de ganho e de fase das várias malhas de controle;
- Resposta no tempo para distúrbios nas referências de controladores ou incrementos de carga aplicados em qualquer parte do sistema. Análise da estabilidade de tensão a pequenas perturbações.

O programa emprega um modelo dinâmico linearizado, que em termos de representação significa utilizar modelos reduzidos, onde por exemplo, os limitadores de sub e sobre-excitação são desconsiderados, porque não atuam em pequenas perturbações.

Essa linearização é feita a partir do ponto de operação do caso convergido de fluxo de potência.

8.3. PROCEDIMENTOS

Para uso do programa são necessários os seguintes arquivos de entrada:

- Arquivo com os dados da rede elétrica e do fluxo de potência convergido no ANAREDE ou FLUPOT;
- Arquivo com os dados de modelos dos controladores dos equipamentos. Esses dados são os equivalentes aos utilizados pelo ANATEM, porém existem algumas diferenças no formato utilizado. O PACDYN faz análise linear e apenas os modelos da malha principal de controle são linearizados.

Em seguida, são calculados os principais modos de oscilação presentes no sistema elétrico de potência [15,34] e avaliado o grau de amortecimento. Normalmente é considerado nos estudos, um fator mínimo de amortecimento de 10%, embora seja difícil o estabelecimento de um número absoluto para isso. O melhor amortecimento é sempre o máximo possível que se pode obter, usando os recursos disponíveis do sistema, podendo em determinados casos serem aceitos valores menores que 10%. Valores abaixo desse limite, normalmente implicam numa avaliação de um reajuste nos ESP, ou mesmo a instalação desse equipamento. Os modos de oscilações passíveis de investigação são os seguintes [15,34]:

- **Modos locais:** São aqueles relacionados às máquinas que apresentam oscilação local, numa mesma área elétrica, localizadas principalmente em uma usina, com o restante do sistema sendo pouco afetado. As frequências naturais dos modos locais ficam na faixa de 0,7 a 2 Hz;
- **Modos intra-planta ou inter-máquinas:** São aqueles relacionados a máquinas que oscilam em relação a outras máquinas da mesma usina, com o restante do sistema sendo pouco afetado. As frequências ficam na faixa de 2 a 3 Hz;

- **Modos inter-áreas:** São aqueles relacionados a máquinas de uma área oscilando contra outras máquinas de outra área do sistema interligadas por ligações fracas. As frequências desse tipo de oscilação ficam na faixa de 0,1 a 0,6 Hz;
- **Modos multi-máquinas ou inter-plantas:** São aqueles relacionados a máquinas oscilando em diversos pontos do sistema, sem um padrão definido;
- **Modos de controle:** Associados, em geral, aos controles dos sistemas de excitação, reguladores de velocidade, conversores HVDC e compensadores estáticos;
- **Modos torsionais:** Associados aos componentes rotacionais dos eixos da turbina e do gerador.

A Figura 8.1 mostra de forma gráfica respostas típicas para as diferentes naturezas dos autovalores [34, 35]. A parte real de um autovalor fornece o amortecimento do modo associado ao mesmo, enquanto que a parte imaginária fornece a frequência de oscilação. Assim, se um dado autovalor não possui componente imaginária (autovalor real) e está no semi-plano esquerdo do plano complexo (negativo), haverá um modo aperiódico (frequência de oscilação nula) decrescente ao longo do tempo. Da mesma forma, se um dado autovalor não possui componente imaginária e está no semi-plano esquerdo do plano complexo (positivo), haverá um modo aperiódico crescente ao longo do tempo. No caso de um par de autovalores complexos conjugados com parte real negativa, existirá um modo de oscilação amortecido. Por outro lado, para um par de autovalores complexos conjugados com parte real positiva, haverá um modo de oscilação com amplitude crescente ao longo do tempo. Se a componente real do autovalor é nula, não há amortecimento das oscilações, o que dá origem a um modo de oscilação com amplitude constante.

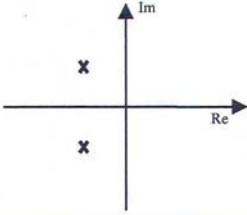
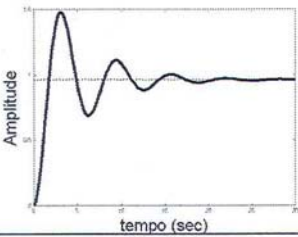
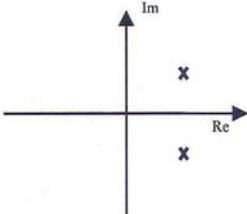
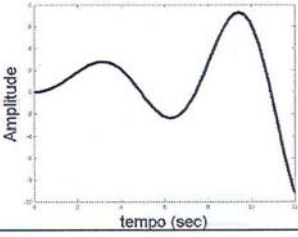
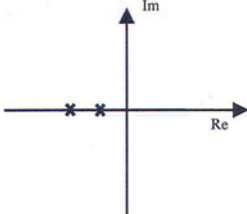
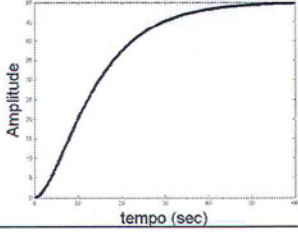
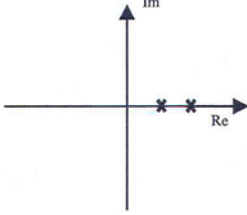
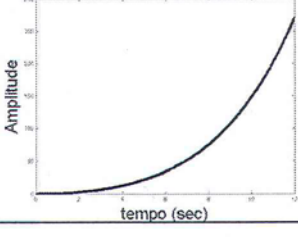
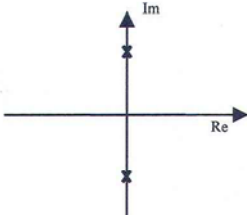
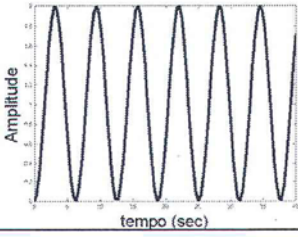
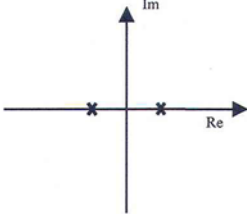
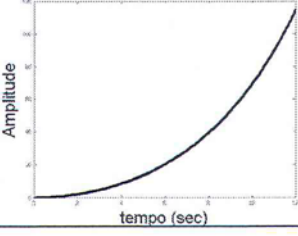
Localização dos autovalores no plano complexo	Resposta Típica	Modo de oscilação
		Estável Oscilatório amortecido
		Instável Oscilatório crescente com o tempo
		Estável Não oscilatório
		Instável Não oscilatório crescente com o tempo
		Estável Oscilatório de amplitude constante
		Instável Não oscilatório crescente com o tempo

Figura 8.1 – Resposta transitória para diferentes localizações de autovalores

A resposta do sistema a uma pequena perturbação depende de diversos fatores, nos quais se incluem: a condição inicial do sistema, a robustez do sistema de transmissão e os sistemas de controle.

8.4. ESTUDOS DE PROBLEMAS TÍPICOS

Foram feitas nesta seção as seguintes análises, com a utilização dos sistemas-teste elaborados:

- *Avaliação do sistema-teste de 9 barras;*
- *Identificação dos modos eletromecânicos;*
- *Análise do melhor local para instalação de estabilizador.*

8.4.1. Avaliação do sistema-teste de 9 barras

O objetivo desta avaliação é verificar as condições de estabilidade do caso utilizado no item 7.4.4 do Capítulo 7, considerando a rede completa e os parâmetros dos controladores apresentados no Adendo I do Capítulo 3.

A simulação será feita inicialmente sem os controladores, em seguida eles serão acrescentados um a um, até que todos os controladores estejam representados. A cada simulação, o efeito sobre o amortecimento do sistema será mostrado. Também serão obtidos todos os autovalores do sistema, usando o método QR [36, 37] com seus fatores de participação.

A Tabela 8.1 apresenta os autovalores obtidos na simulação sem uso de controladores, mostrando a frequência de oscilação e o percentual de amortecimento de cada modo.

Tabela 8.1 – Autovalores do sistema-teste de 9 barras sem controlador

Nº	Pólo	Módulo	Frequência (Hz)	Amortecimento (%)	Fator de Participação
1	$-0,00051 + j 0,04812$	0,04812	0,00766	1,0659	DELT BAR-1 GER1
2	$-0,00051 - j 0,04812$	0,04812	$-0,00766$	1,0659	
3	$-0,8672 + j 7,5355$	7,5853	1,1993	11,433	DELT BAR-2 GER2
4	$-0,8672 - j 7,5355$	7,5853	$-1,1993$	11,433	
5	$-14,413 + j 0,0$	14,413	0,0	100,00	EQ" BAR-1 GER1
6	$-12,547 + j 0,0$	12,547	0,0	100,00	EQ" BAR-2 GER2
7	$-10,708 + j 0,0$	10,708	0,0	100,00	ED" BAR-1 GER1
8	$-5,2427 + j 0,0$	5,2427	0,0	100,00	ED" BAR-2 GER2
9	$-0,5505 + j 0,0$	0,5505	0,0	100,00	EQ' BAR-2 GER2
10	$-0,4190 + j 0,0$	0,4190	0,0	100,00	EQ' BAR-1 GER1

Nesta condição, não se observou a presença de nenhum par de pólos complexo conjugado instável, e o menor fator de amortecimento verificado foi de 1,0659 %, conforme destacado, indicando que o modo associado tem baixo amortecimento. O fator de participação indicado na última coluna da tabela, corresponde a uma medida da participação de uma variável de estado em um determinado modo presente no sistema [34].

Na Tabela 8.2 são apresentados os resultados encontrados considerando a presença dos reguladores de tensão das máquinas 1 e 2, e na Figura 8.2 é mostrado o posicionamento no plano complexo, dos pólos que estão mais próximos da origem dos eixos.

Tabela 8.2 – Autovalores do sistema-teste de 9 barras após inclusão do RAT

Nº	Pólo	Módulo	Frequência (Hz)	Amortecimento (%)	Fator de Participação
1	$-0,00002 + j 0,04962$	0,04962	0,00790	0,04303	DELT BAR-1 GER1
2	$-0,00002 - j 0,04962$	0,04962	$-0,00790$	0,04303	
3	$-0,8662 + j 7,5352$	7,5848	1,1993	11,420	WW BAR-2 GER2
4	$-0,8662 - j 7,5352$	7,5848	$-1,1993$	11,420	
5	$-0,3452 + j 0,1831$	0,3908	0,02914	88,346	VR RT GER1
6	$-0,3452 - j 0,1831$	0,3908	$-0,02914$	88,346	
7	$-333,32 + j 0,0$	333,32	0,0	100,00	VM RT GER1
8	$-333,31 + j 0,0$	333,31	0,0	100,00	VM RT GER2
9	$-14,390 + j 0,0$	14,390	0,0	100,00	EQ" BAR-1 GER1
10	$-12,507 + j 0,0$	12,507	0,0	100,00	EQ" BAR-2 GER2
11	$-10,709 + j 0,0$	10,709	0,0	100,00	ED" BAR-1 GER1
12	$-5,2416 + j 0,0$	5,2416	0,0	100,00	ED" BAR-2 GER2
13	$-0,4727 + j 0,0$	0,4727	0,0	100,00	EQ' BAR-2 GER2
14	$-0,3112 + j 0,0$	0,3112	0,0	100,00	VR RT GER2

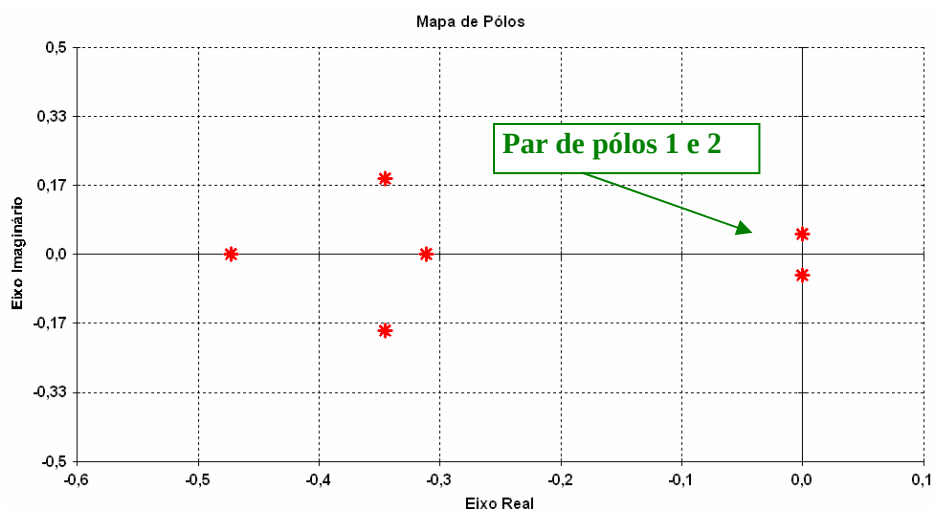


Figura 8.2 – Mapa de pólos do sistema com RAT

A inclusão deste controlador provocou um modo pouco amortecido, com frequência de 0,00790 Hz e fator de amortecimento igual a 0,04303 %. Seu fator de participação refere-se a ângulo (DELTA), porém como o regulador de velocidade não está presente, isto é um indicativo que este modo está relacionado a esta ausência. Quanto ao posicionamento dos pólos, não é observado nenhum no lado direito do gráfico. O mais próximo é o par de pólos 1 e 2, que está praticamente sobre o eixo imaginário.

Na Figura 8.3 é mostrada a resposta no domínio do tempo, considerando os dois geradores do sistema oscilando um contra o outro, sendo aplicado um degrau de 2% na tensão de referência (+ VREF) do gerador ligado na barra 1 e (-VREF) no gerador ligado a barra 2, que são as entradas do regulador de tensão. Como saída, foi observado a potência elétrica (+PT) nos geradores ligados nas barras 1 e 2.

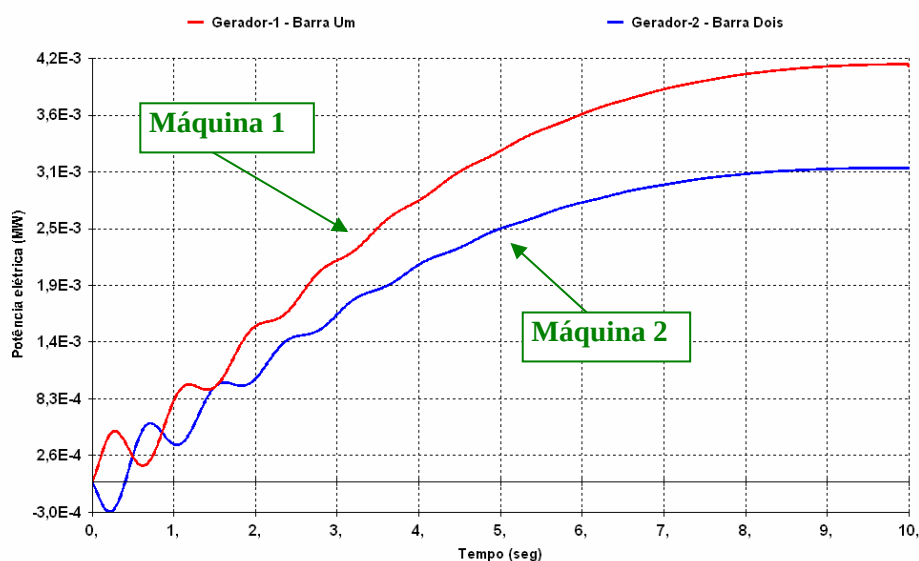


Figura 8.3 – Resposta no domínio do tempo: máquina 1 e máquina 2

Esta resposta da potência elétrica a um degrau de 2% na referência VREF, mostra uma exponencial crescente, com baixo amortecimento, mas estável.

Observando os pólos número 1 e 2 mostrados nas Tabelas 8.1 e 8.2, percebe-se que eles apresentam praticamente o mesmo comportamento, causado possivelmente pela falta do regulador de velocidade. Com o intuito de verificar essa influência, foi incluído nas máquinas 1 e 2, um amortecimento de 0,1, 0,2 e 0,3 e os resultados obtidos estão mostrados resumidamente nas Tabelas 8.3, 8.4 e 8.5 respectivamente.

Tabela 8.3 – Autovalores do sistema-teste de 9 barras com RAT e amortecimento de 0,1

Nº	Pólo	Módulo	Frequência (Hz)	Amortecimento (%)	Fator de Participação
1	$-0,0020 + j 0,04958$	0,04962	0,00789	4,0375	WW BAR-1 GER1
2	$-0,0020 - j 0,04958$	0,04962	$-0,00789$	4,0375	
3	$-0,8684 + j 7,5352$	7,5851	1,1993	11,449	WW BAR-2 GER2
4	$-0,8684 - j 7,5352$	7,5851	$-1,1993$	11,449	

Tabela 8.4 – Autovalores do sistema-teste de 9 barras com RAT e amortecimento de 0,2

Nº	Pólo	Módulo	Frequência (Hz)	Amortecimento (%)	Fator de Participação
1	$-0,00399 + j 0,04946$	0,04962	0,00787	8,0319	WW BAR-1 GER1
2	$-0,00399 - j 0,04946$	0,04962	$-0,00787$	8,0319	
3	$-0,8707 + j 7,5352$	7,5851	1,1993	11,449	WW BAR-2 GER2
4	$-0,8707 - j 7,5352$	7,5851	$-1,1993$	11,449	

Tabela 8.5 – Autovalores do sistema-teste de 9 barras com RAT e amortecimento de 0,3

Nº	Pólo	Módulo	Frequência (Hz)	Amortecimento (%)	Fator de Participação
1	$-0,8730 + j 7,5352$	7,5856	1,1993	11,509	WW BAR-2 GER2
2	$-0,8730 - j 7,5352$	7,5856	$-1,1993$	11,509	
3	$-0,00597 + j 0,04926$	0,04962	0,00784	12,026	WW BAR-1 GER1
4	$-0,00597 - j 0,04926$	0,04962	$-0,00784$	12,026	

Os resultados obtidos para os pólos nº 1 e nº 2 confirmam que os baixos valores de amortecimento desse modo estão associados à não existência do regulador de velocidade, pois o uso de um pequeno valor de amortecimento associado aos parâmetros da máquina, conduziu a um aumento significativo no fator de amortecimento do modo.

A seguir, a Tabela 8.6 mostra o resultado obtido com a inclusão dos reguladores de velocidade das máquinas 1 e 2, e a Figura 8.4 seu respectivo mapa de pólos no plano complexo.

Tabela 8.6 – Autovalores do sistema-teste de 9 barras com RAT após inclusão do RAV

Nº	Pólo	Módulo	Frequência (Hz)	Amortecimento (%)	Fator de Participação
1	$-0,8075 + j 7,4933$	7,5367	1,1926	10,714	DELT BAR-2 GER2
2	$-0,8075 - j 7,4933$	7,5367	$-1,1926$	10,714	
3	$-0,4040 + j 0,4211$	0,5836	0,06702	69,232	WW BAR-1 GER1
4	$-0,4040 - j 0,4211$	0,5836	$-0,06702$	69,232	
5	$-7,1905 + j 5,2451$	8,9002	0,8348	80,790	EQ' BAR-1 GER1
6	$-7,1905 - j 5,2451$	8,9002	$-0,8348$	80,790	
7	$-11,052 + j 0,7308$	11,076	0,1163	99,782	ED" BAR-1 GER1
8	$-11,052 - j 0,7308$	11,076	$-0,1163$	99,782	
9	$-331,94 + j 0,0$	331,94	0,0	100,00	VM RT_GER1
10	$-330,89 + j 0,0$	330,89	0,0	100,00	VM RT_GER2
11	$-22,574 + j 0,0$	22,574	0,0	100,00	X4 RV_MOD10
12	$-22,566 + j 0,0$	22,566	0,0	100,00	VR RV_MOD10
13	$-5,7897 + j 0,0$	5,7897	0,0	100,00	ED" BAR-2 GER2
14	$-3,7907 + j 0,0$	3,7907	0,0	100,00	EQ' BAR-2 GER2
15	$-3,1444 + j 0,0$	3,1444	0,0	100,00	VM RV_MOD10
16	$-2,3785 + j 0,0$	2,3785	0,0	100,00	X9 RV_MOD10
17	$-1,6436 + j 0,0$	1,6436	0,0	100,00	X 17 RV_MOD10
18	$-1,1608 + j 0,0$	1,1608	0,0	100,00	VR RT_GER1
19	$-1,0742 + j 0,0$	1,0742	0,0	100,00	VR RT_GER2
20	$-0,1583 + j 0,0$	0,1583	0,0	100,00	VM RV_MOD10
21	$-0,01661 + j 0,0$	0,01661	0,0	100,00	X6 RV_MOD10
22	$-0,00100 + j 0,0$	0,00100	0,0	100,00	DELT BAR-1 GER1

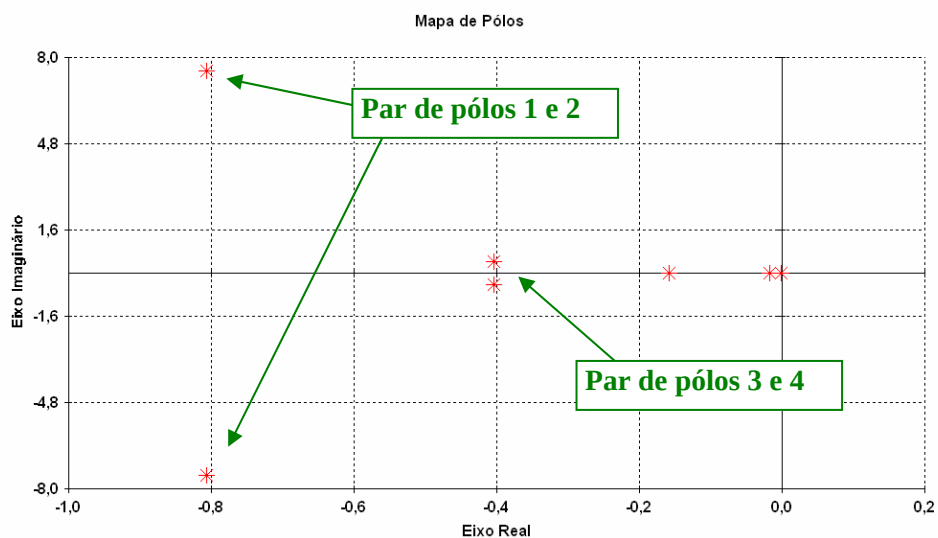


Figura 8.4 – Mapa de pólos do sistema com RAT e RAV

Incluindo o regulador de velocidade, o sistema fica com fator de amortecimento mínimo de 10,714 %.

A Figura 8.5 mostra a resposta no domínio do tempo, para as mesmas condições da Figura 8.3, considerando a presença do regulador de velocidade.

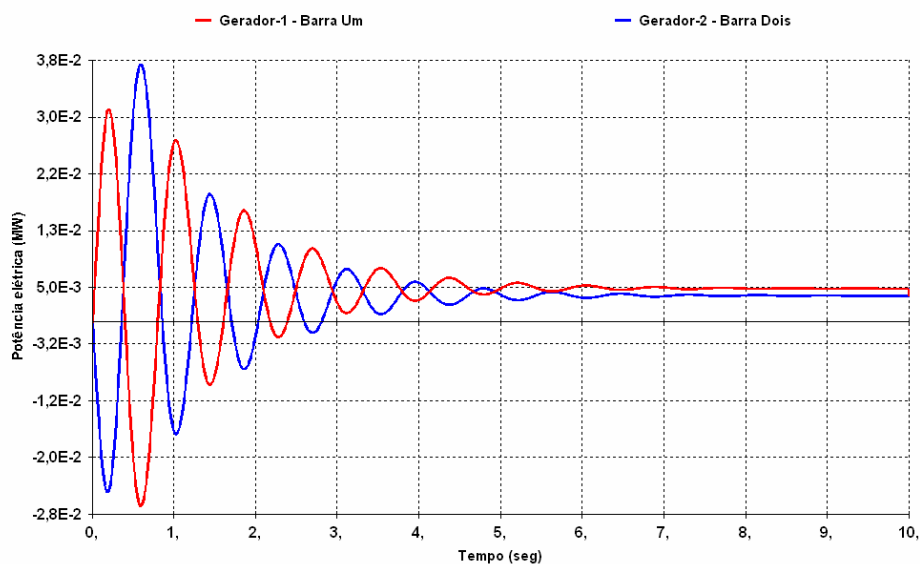


Figura 8.5 – Resposta no domínio do tempo: máquina 1 x máquina 2

Verifica-se um comportamento estável após as máquinas oscilarem em oposição de fase, amortecendo em aproximadamente 7 segundos. Em seguida, a Tabela 8.7 apresenta o resultado obtido quando é incluído os estabilizadores.

Tabela 8.7 – Autovalores do sistema-teste de 9 barras com RAT, RAV e ESP

Nº	Pólo	Módulo	Frequência (Hz)	Amortecimento (%)	Fator de Participação
1	$-1,6098 + j 7,6837$	7,8505	1,2229	20,506	WW BAR-2 GER2
2	$-1,6098 - j 7,6837$	7,8505	$-1,2229$	20,506	
3	$-0,04621 + j 0,07398$	0,08722	0,01177	52,975	VM RV_MOD10
4	$-0,04621 - j 0,07398$	0,08722	$-0,01177$	52,975	
5	$-7,1508 + j 5,7781$	9,1935	0,9196	77,781	EQ' BAR-1 GER1
6	$-7,1508 - j 5,7781$	9,1935	$-0,9196$	77,781	
7	$-1,1597 + j 0,8471$	1,4361	0,1348	80,753	X 17 RV_MOD10
8	$-1,1597 - j 0,8471$	1,4361	$-0,1348$	80,753	
9	$-98,194 + j 19,826$	100,18	3,1555	98,022	VM PSS_GER2
10	$-98,194 - j 19,826$	100,18	$-3,1555$	98,022	
11	$-98,548 + j 16,442$	99,911	2,6169	98,637	VR PSS_GER1
12	$-98,548 - j 16,442$	99,911	$-2,6169$	98,637	
13	$-11,051 + j 0,7402$	11,076	0,1178	99,776	ED" BAR-1 GER1
14	$-11,051 - j 0,7402$	11,076	$-0,1178$	99,776	
15	$-333,78 + j 0,0$	333,78	0,0	100,00	VM RT_GER2
16	$-333,01 + j 0,0$	333,01	0,0	100,00	VM RT_GER1
17	$-22,573 + j 0,0$	22,573	0,0	100,00	X4 RV_MOD10
18	$-22,565 + j 0,0$	22,565	0,0	100,00	VR RV_MOD10
19	$-5,8365 + j 0,0$	5,8365	0,0	100,00	ED" BAR-2 GER2
20	$-3,4997 + j 0,0$	3,4997	0,0	100,00	VM RV_MOD10
21	$-3,2469 + j 0,0$	3,2469	0,0	100,00	EQ' BAR-2 GER2
22	$-2,4939 + j 0,0$	2,4939	0,0	100,00	X9 RV_MOD10
23	$-1,6140 + j 0,0$	1,6140	0,0	100,00	X17 RV_MOD10
24	$-1,1801 + j 0,0$	1,1801	0,0	100,00	VR RT_GER1
25	$-1,0258 + j 0,0$	1,0258	0,0	100,00	VR RT_GER2
26	$-0,3382 + j 0,0$	0,3382	0,0	100,00	VM PSS_GER2
27	$-0,01661 + j 0,0$	0,01661	0,0	100,00	X6 RV_MOD10
28	$-0,00100 + j 0,0$	0,00100	0,0	100,00	DELT BAR-1 GER1

Observa-se que a inclusão do estabilizador, neste caso, aumentou significativamente o fator de amortecimento do sistema para 20,506 %.

A Figura 8.6 visualiza o efeito da inclusão do estabilizador, mostrando através da comparação da resposta no tempo com e sem o estabilizador, a eficácia deste equipamento sobre o amortecimento do sistema.

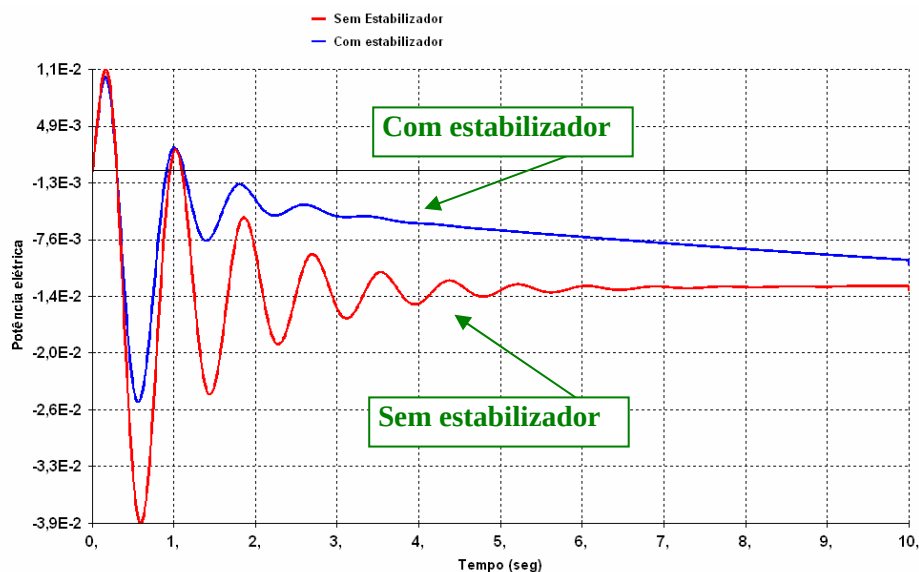


Figura 8.6 – Comparação da resposta no domínio do tempo com e sem o estabilizador nas máquinas 1 e 2

Os resultados obtidos para este sistema-teste, tanto em malha aberta (sem o estabilizador) quanto em malha fechada (com o estabilizador), não indicaram nenhum modo instável. O menor fator de amortecimento verificado ficou acima de 10% (sem ESP) e acima de 20% (com ESP), podendo ser considerado bem amortecido. Esse resultado mostra que os parâmetros dos controladores utilizados, estão adequadamente ajustados para este ponto de operação, devendo ser avaliados para outros pontos possíveis de operação.

Observa-se também que, conforme são incluídos controladores nas máquinas do sistema, o número de estados aumenta e consequentemente aumenta o número de pólos e zeros.

8.4.2. Identificação dos modos eletromecânicos

Neste estudo, o objetivo é identificar, a partir dos autovalores, os modos eletromecânicos presentes no sistema, que são caracterizados pelos fatores de participação de velocidade (WW) ou de ângulo (DELTA) e normalmente ocorrem em frequências, na faixa de 0,1 a 3,0 Hz.

O número de modos eletromecânicos de um sistema é numericamente igual ao número de geradores modelados dinamicamente menos um [35]. No caso de grupo de geradores modelados como equivalente, é contado como um único gerador cuja potência é a soma de todas as potências dos geradores despachados.

Para este estudo foi utilizado o caso referente ao sistema-teste de 65 barras, estudado no item 7.4.2 do Capítulo 7. Este sistema possui duas áreas elétricas interligada por duas linhas, com 7 geradores em cada área, totalizando 14 geradores e um compensador síncrono, devendo ser obtidos 14 modos eletromecânicos.

Na Tabela 8.8 são apresentados os modos de oscilação eletromecânicos obtidos para este sistema, que estão na faixa de frequência de 0,1 a 3,0 Hz, calculados através do método QR, considerando todos os controladores do sistema representados.

Tabela 8.8 – Modos de oscilação eletromecânicos

Nº	Pólo	Módulo	Frequência (Hz)	Amortecimento (%)	Fator de Participação
1	$-0,1832 + j 2,1473$	2,1551	0,3418	8,4990	WW ITUMBIARA
3	$-1,0343 + j 7,9289$	7,9961	1,2619	12,935	WW S.OSÓRIO
5	$-0,8844 + j 6,6967$	6,7548	1,0658	13,093	WW MACHADINHO
7	$-1,5206 + j 11,037$	11,141	1,7566	13,649	WW CS IBIUNA
9	$-1,2762 + j 8,4181$	8,5143	1,3398	14,988	DELT JAGUARA
11	$-1,2013 + j 7,1133$	7,2140	1,1321	16,652	DELT ITÁ
13	$-1,9662 + j 10,872$	11,048	1,7303	17,796	WW SSANTIAGO
17	$-1,9509 + j 8,6072$	8,8255	1,3699	22,106	DELT S.CAXIAS
19	$-1,8843 + j 8,2296$	8,4425	1,3098	22,319	DELT A.VERMELHA
21	$-1,9691 + j 8,5262$	8,7506	1,3570	22,502	DELT JAGUARA
23	$-1,8223 + j 6,6124$	6,8589	1,0524	26,568	WW S.SIMÃO
25	$-2,9685 + j 9,2747$	9,7382	1,4761	30,483	WW SEGredo
27	$-3,5373 + j 9,4423$	10,083	1,5028	35,081	WW N.PONTE
65	$-18,375 + j 8,6860$	20,325	1,3824	90,408	WW S.SEGredo

Desses 14 modos de oscilação eletromecânicos, foram selecionados os 6 menos amortecidos para uma análise do perfil modal de velocidade (*mode shape*) e identificação do gerador ou grupo de geradores que têm influência neste modo de oscilação. O perfil modal fornece a observabilidade do modo, ou seja, onde ele é mais observável. Através do módulo identifica-se o grau de influência de determinada máquina e através do ângulo identifica-se o conjunto de máquinas que interagem, permitindo a classificação dos modos em locais, intra-planta, inter-planta e inter-área.

Análise do pólo 1: $-0,1832 + j 2,1473$

A Figura 8.7 mostra o perfil modal deste pólo e a Tabela 8.9 apresenta os módulos e ângulos de cada máquina com influência mais destacada neste modo de oscilação. A frequência deste modo é de 0,3418 Hz. Esta frequência caracteriza um modo inter-área. Ele envolve todas as máquinas do sistema como mostrado na Tabela 8.9.

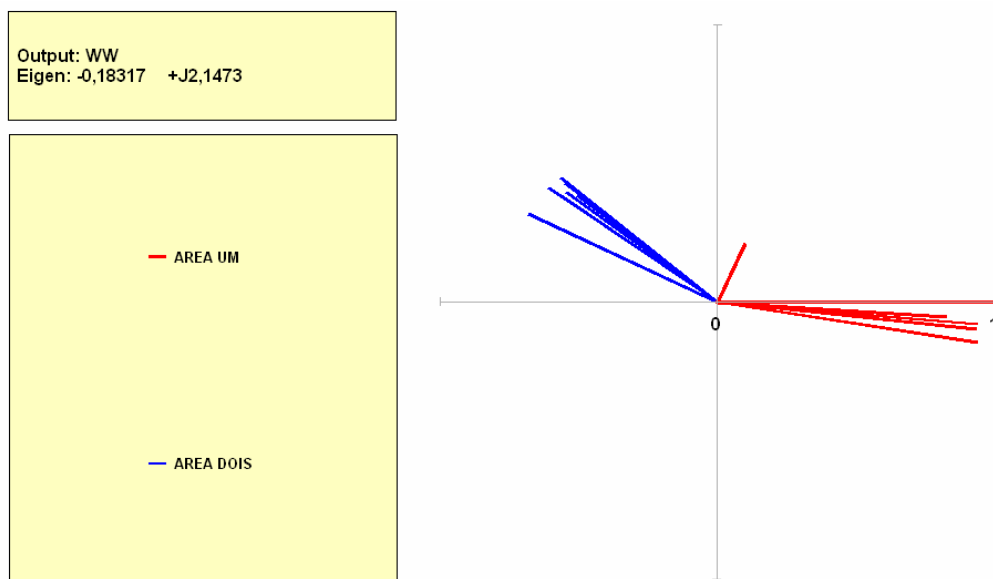


Figura 8.7 – Perfil modal de velocidade do modo de oscilação 1

Tabela 8.9 – Relação das máquinas que influenciam no modo de oscilação 1

Módulo	Ângulo	Máquina Associada	Área
1,0000	0,0	JAGUARA-GER	UM
0,9507	-8,8257	ITUMBIARA-GER	UM
0,9453	-4,7805	EMBORCAÇÃO-GER	UM
0,9402	-5,9713	S.SIMÃO-GER	UM
0,8916	0,1560	N.PONTE-GER	UM
0,8299	-3,6722	MARIMBONDO-GER	UM
0,8209	-0,08456	A.VERMELHA-GER	UM
0,7518	154,96	MACHADINHO-GER	DOIS
0,7359	145,83	S.CAXIAS-GER	DOIS
0,7221	141,57	S.OSÓRIO-GER	DOIS
0,6976	142,02	S.SANTIAGO-GER	DOIS
0,6804	145,69	ITÁ-GER	DOIS
0,6743	144,03	S.SEGREDO-GER	DOIS
0,6321	142,77	G.B.MUNHOZ-GER	DOIS
0,2292	64,797	IBIUNA-CS	UM

Neste modo de oscilação, pode-se observar que as máquinas da área Um (Sudeste) oscilam contra as máquinas da área Dois (Sul) como mostrado na coluna “ângulo” da Tabela 8.9 e no gráfico da Figura 8.7.

Análise do pólo 3: $-1,0343 + j 7,9289$

A Figura 8.8 mostra o gráfico do perfil modal deste pólo e a Tabela 8.10 apresenta os módulos e ângulos de cada máquina mostrando aquelas que têm influência mais destacadas neste modo de oscilação. A máquina de Salto Osório apresenta maior influência neste modo, estando praticamente em oposição de fase com as outras máquinas do sistema. Assim, este modo é caracterizado como um modo de oscilação entre Salto Osório e as demais máquinas do sistema.

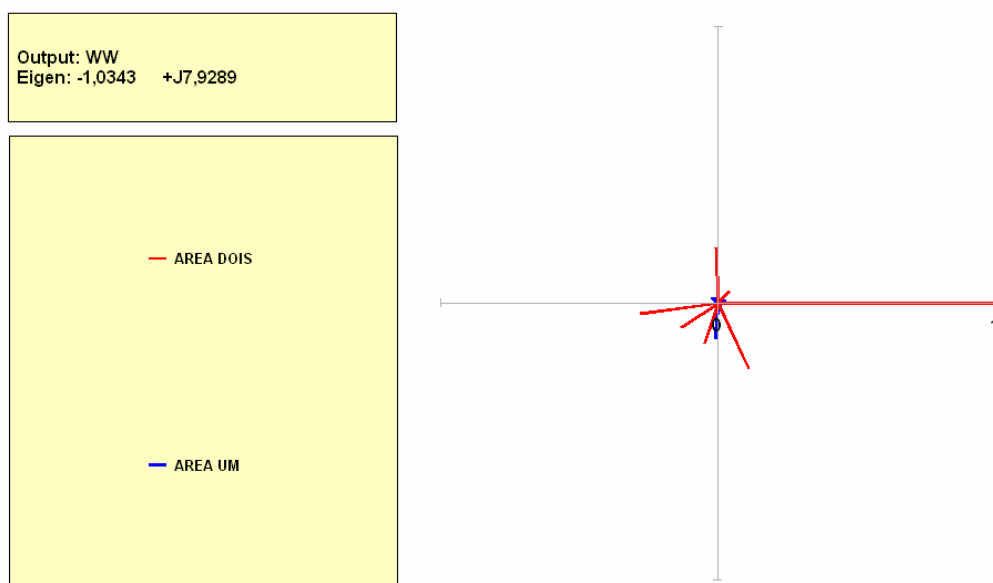


Figura 8.8 – Perfil modal de velocidade do modo de oscilação 3

Tabela 8.10 – Relação das máquinas que influenciam no modo de oscilação 3

Módulo	Ângulo	Máquina Associada	Área
1,0000	0,0	S.OSÓRIO-GER	DOIS
0,2837	187,30	G.B.MUNHOZ-GER	DOIS
0,2619	295,05	S.CAXIAS-GER	DOIS
0,2019	92,332	ITÁ-GER	DOIS
0,1603	213,51	S.SEGREDO-GER	DOIS
0,1536	250,93	S.SANTIAGO-GER	DOIS
0,1325	265,43	IBIUNA-CS	UM
0,05723	45,471	MACHADINHO-GER	DOIS
0,03050	140,41	A.VERMELHA-GER	UM

Módulo	Ângulo	Máquina Associada	Área
0,03039	22,687	JAGUARA-GER	UM
0,02486	125,47	MARIMBONDO-GER	UM
0,01210	-7,7708	S.SIMÃO-GER	UM
0,01137	2,3197	N.PONTE-GER	UM
0,00992	70,669	ITUMBIARA-GER	UM
0,00872	-20,100	EMBORCAÇÃO-GER	UM

Análise do pólo 5: $-0,8844 + j 6,6967$

A Figura 8.9 mostra o gráfico do perfil modal deste pólo e a Tabela 8.11 apresenta os módulos e ângulos de cada máquina mostrando aquelas que têm influência mais destacadas neste modo de oscilação. Observa-se neste modo que as máquinas de Machadinho, Salto Osório, Itá, Salto Caxias, G.B.Munhoz, Salto Segredo e Salto Santiago oscilam entre si, caracterizando como um modo de oscilação entre estas máquinas (modo local).

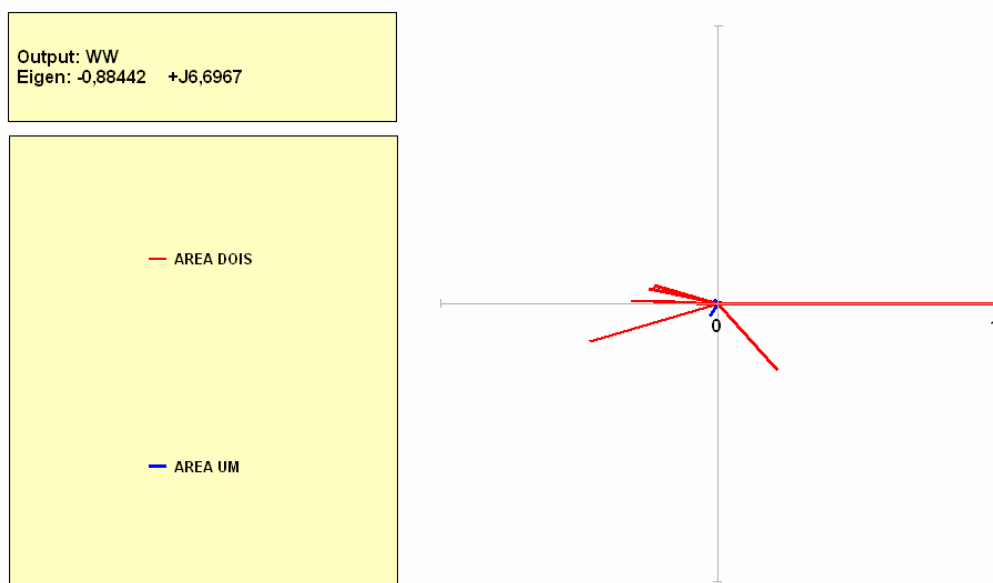


Figura 8.9 – Perfil modal de velocidade do modo de oscilação 5

Tabela 8.11 – Relação das máquinas que influenciam no modo de oscilação 5

Módulo	Ângulo	Máquina Associada	Área
1,0000	0,0	MACHADINHO-GER	DOIS
0,4815	196,34	S.OSÓRIO-GER	DOIS
0,3216	311,92	ITÁ-GER	DOIS
0,3122	177,76	S.CAXIAS-GER	DOIS
0,2542	167,47	G.B.MUNHOZ-GER	DOIS
0,2397	163,86	S.SEGREDO-GER	DOIS

Módulo	Ângulo	Máquina Associada	Área
0,2252	177,04	S.SANTIAGO-GER	DOIS
0,05252	234,99	IBIUNA-CS	UM
0,02066	129,74	MARIMBONDO-GER	UM
0,01714	-2,1827	S.SIMÃO-GER	UM
0,01517	23,265	JAGUARA-GER	UM
0,01370	337,84	EMBORCAÇÃO-GER	UM
0,01302	-9,1341	N.PONTE-GER	UM
0,00945	114,98	A.VERMELHA-GER	UM
0,00797	44,886	ITUMBIARA-GER	UM

Análise do pólo 7: $-1,5206 + j 11,037$

A Figura 8.10 mostra o gráfico do perfil modal deste pólo e a Tabela 8.12 apresenta os módulos e ângulos de cada máquina mostrando aquelas que têm influência mais destacadas neste modo de oscilação. Observa-se neste modo que o compensador síncrono de Ibiúna possui o maior módulo, porém não se analisa o perfil modal de compensador síncrono, pois este elemento não gera potência ativa.

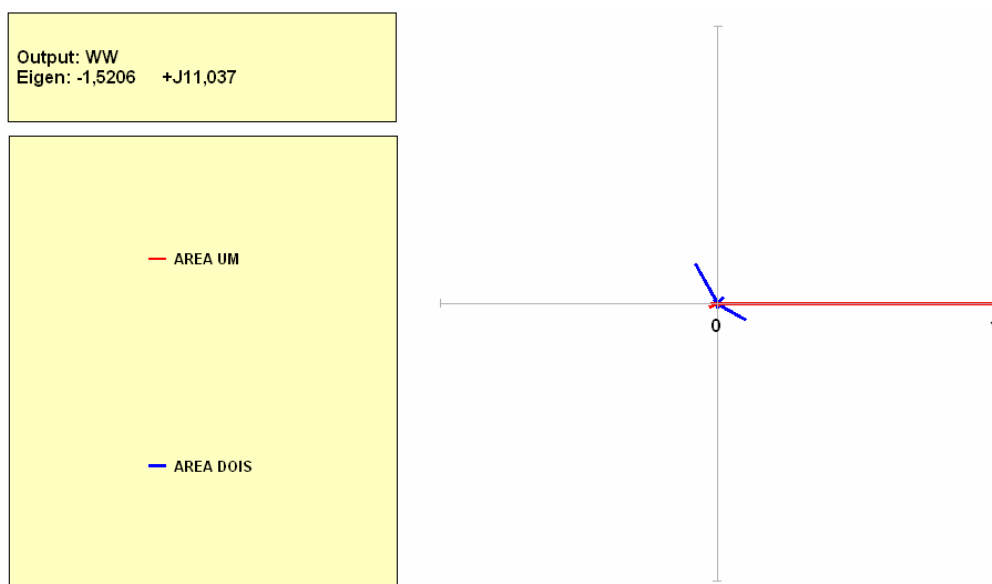


Figura 8.10 – Perfil modal de velocidade do modo de oscilação 7

Tabela 8.12 – Relação das máquinas que influenciam no modo de oscilação 7

Módulo	Ângulo	Máquina Associada	Área
1,0000	0,0	IBIUNA-CS	UM
0,1660	119,85	S.SANTIAGO-GER	DOIS
0,1176	-29,918	S.CAXIAS-GER	DOIS
0,03222	-156,37	MARIMBONDO-GER	UM
0,03199	48,799	S.SEGREDO-GER	DOIS
0,02620	173,21	A.VERMELHA-GER	UM

Módulo	Ângulo	Máquina Associada	Área
0,02180	133,68	S.OSÓRIO-GER	DOIS
0,01926	-90,236	G.B.MUNHOZ-GER	DOIS
0,01492	-21,771	MACHADINHO-GER	DOIS
0,01133	148,02	EMBORCAÇÃO-GER	UM
0,01051	145,35	N.PONTE-GER	UM
0,01009	183,08	ITUMBIARA-GER	UM
0,00957	62,165	ITÁ-GER	DOIS
0,00841	-35,518	JAGUARA-GER	UM

Análise do pólo 9: $-1,2762 + j 8,4181$

A Figura 8.11 mostra o gráfico do perfil modal deste pólo e a Tabela 8.13 apresenta os módulos e ângulos de cada máquina mostrando aquelas que têm influência mais destacadas neste modo de oscilação. Neste modo, as máquinas da UHE Jaguarua possuem o maior módulo, que junto às máquinas da UHE Nova Ponte com menor módulo, oscilam contra as demais, caracterizando um modo de oscilação entre estas máquinas e o restante das máquinas do sistema.

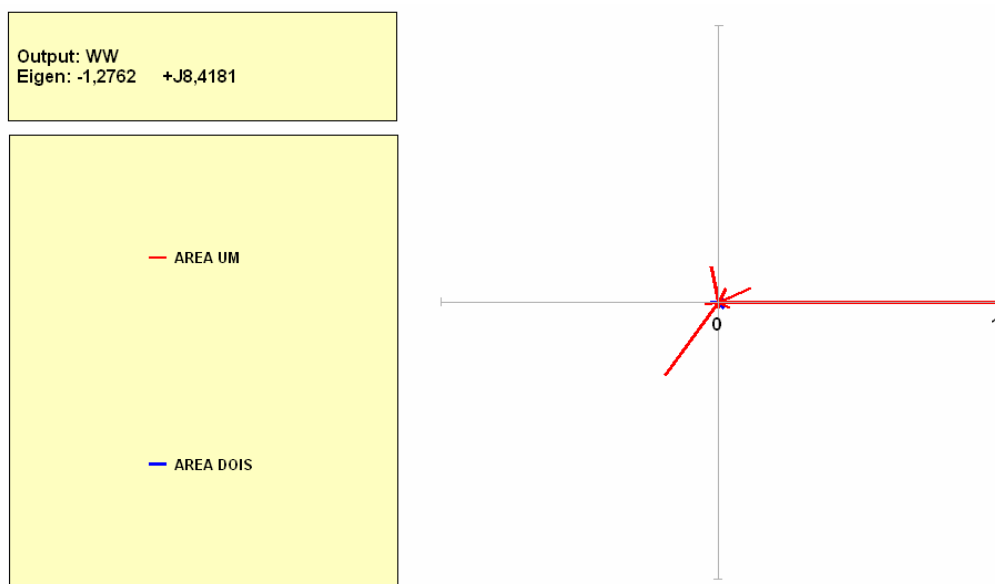


Figura 8.11 – Perfil modal de velocidade do modo de oscilação 9

Tabela 8.13 – Relação das máquinas que influenciam no modo de oscilação 9

Módulo	Ângulo	Máquina Associada	Área
1,0000	0,0	JAGUARA-GER	UM
0,3261	-126,17	ITUMBIARA-GER	UM
0,1322	101,46	EMBORCAÇÃO-GER	UM
0,1266	24,628	N.PONTE-GER	UM
0,05890	62,342	MARIMBONDO-GER	UM
0,05129	-172,71	A.VERMELHA-GER	UM

Módulo	Ângulo	Máquina Associada	Área
0,04646	-24,577	IBIUNA-CS	UM
0,02859	-52,739	G.B.MUNHOZ-GER	DOIS
0,02798	168,98	S.OSÓRIO-GER	DOIS
0,02362	53,489	S.CAXIAS-GER	DOIS
0,01690	-95,052	S.SIMÃO-GER	UM
0,01322	0,2668	S.SEGREDO-GER	DOIS
0,01259	27,402	S.SANTIAGO-GER	DOIS
0,00926	-95,230	MACHADINHO-GER	DOIS
0,00660	-150,73	ITÁ-GER	DOIS

Análise do pólo 11: $-1,2013 + j 7,1133$

A Figura 8.12 mostra o gráfico do perfil modal deste pólo e a Tabela 8.14 apresenta os módulos e ângulos de cada máquina mostrando aquelas que têm influência mais destacadas neste modo de oscilação. Neste modo de oscilação, pode-se observar as máquinas da UHE Itá oscilando contra as outras máquinas da área 2, caracterizando um modo de oscilação local. Aquelas que apresentam maior participação neste modo são Machadinho, Salto Osório, Gov. Bento.Munhoz e Salto.Caxias.

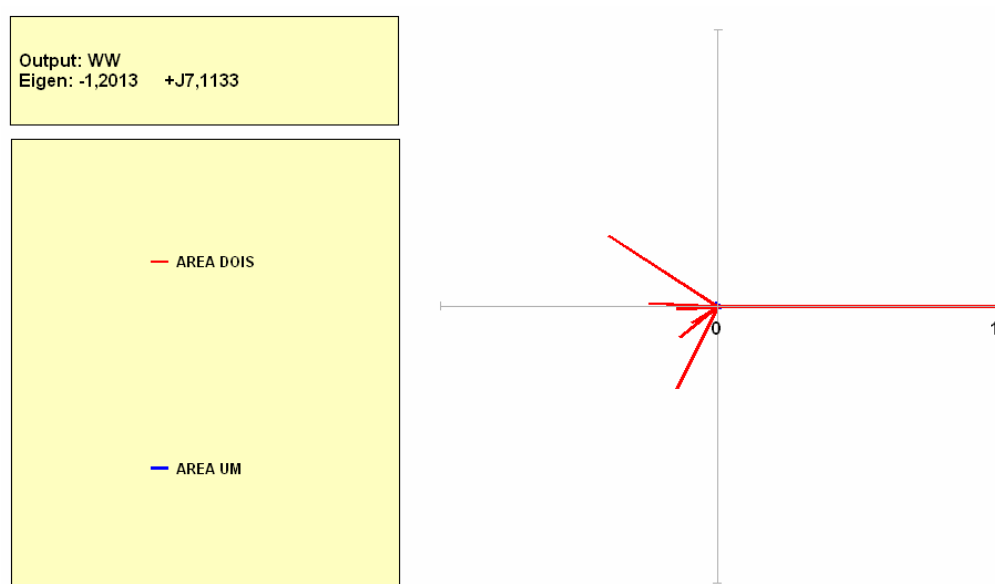


Figura 8.12 – Perfil modal de velocidade do modo de oscilação 11

Tabela 8.14 – Relação das máquinas que influenciam no modo de oscilação 11

Módulo	Ângulo	Máquina Associada	Área
1,0000	0,0	ITÁ-GER	DOIS
0,4702	147,09	MACHADINHO-GER	DOIS
0,3305	243,52	S.OSÓRIO-GER	DOIS
0,2476	177,08	G.B.MUNHOZ-GER	DOIS

Módulo	Ângulo	Máquina Associada	Área
0,1764	219,60	S.CAXIAS-GER	DOIS
0,1499	183,17	S.SEGREDO-GER	DOIS
0,1067	212,62	S.SANTIAGO-GER	DOIS
0,05687	215,84	IBIUNA-CS	UM
0,01916	121,44	MARIMBONDO-GER	UM
0,01825	12,494	JAGUARA-GER	UM
0,01471	-23,756	EMBORCAÇÃO-GER	UM
0,01432	-12,944	N.PONTE-GER	UM
0,01403	-26,011	S.SIMÃO-GER	UM
0,01273	135,44	A.VERMELHA-GER	UM
0,00649	56,739	ITUMBIARA-GER	UM

Não foi calculado o perfil modal de todos os modos apresentados na Tabela 8.8, porém analisando essa Tabela, observa-se que o modo menos amortecido é o modo nº 1, cujo amortecimento é de 8,4990%. Como o interesse recai sobre os modos menos amortecidos, para este modo, uma avaliação mais detalhada poderia ser realizada visando aumentar seu valor.

Foram observados nos perfis modais calculados a presença dos modos inter-área, local e inter-planta. Já o modo intra-planta não foi possível observar, pois seria necessário que as máquinas das usinas estivessem individualizadas.

8.4.3. Análise do melhor local para instalação de estabilizador

Neste item foi realizado um esboço de análise para locação de estabilizadores, mostrado no Apêndice A.

8.5. SUMÁRIO

Estes estudos são importantes para avaliar o comportamento do sistema ao longo do tempo, verificando a influência dos controladores sobre a estabilidade do sistema frente a pequenas perturbações. Entre as aplicações possíveis, as seguintes podem ser citadas: Identificar os modos de oscilação instáveis ou pouco amortecidos; as máquinas que necessitam ajustar os controladores; os principais pontos do sistema elétrico, onde o uso de estabilizadores seria mais eficiente no amortecimento das oscilações eletromecânicas.

Este capítulo apresentou os resultados da análise de estabilidade considerando três aplicações: a primeira sobre o sistema-teste de 9 barras que submeteu os controladores desse sistema a uma avaliação, não indicando nenhum comportamento indesejável. Como os controladores devem ser projetados de forma que atendam aos diversos pontos de operação do sistema, outras condições operativas devem ser exploradas.

Na segunda, foi aplicado o *mode shape* sobre o sistema-teste de 65 barras para exemplificar a identificação dos tipos de modos eletromecânicos presentes no sistema. Na terceira aplicação foi feita uma breve análise sobre o melhor ponto do sistema onde a instalação de um estabilizador seria mais efetiva. As simulações realizadas encontram-se registradas nos arquivos dentro da pasta “Capítulo 8” no CD em apenso.

* * *