

## 5. RESULTADOS NUMÉRICOS E DISCUSSÕES

Para validar os algoritmos de controle robusto propostos, foram realizados diversos testes e simulações. Os resultados numéricos serão apresentados da seguinte forma: na seção 5.1, mostraremos os resultados do sistema teste New England, formado por 39 barras e 9 unidades geradoras. Temos dois modelos deste sistema: um deles foi o mesmo utilizado em (Zanetta Jr. e da Cruz, 2005), e o outro foi montado no MATLAB. Os modelos são baseados nas mesmas equações, mas têm algumas diferenças em relação às características dos pontos de operação considerados, ganhos de reguladores de tensão e outros detalhes de modelagem. Para cada um desses modelos, apresentaremos os resultados da aplicação da primeira técnica de controle proposta no capítulo 4 (primeiro método para controle robusto descentralizado). Serão apresentados também os resultados da aplicação do método homotópico de controle robusto ao primeiro modelo do sistema New England de 9 máquinas. Ainda nesta seção, apresentaremos simulações não-lineares para validar os controladores obtidos. Na seção 5.2, mostraremos os resultados do sistema teste New England expandido, composto por 69 barras e 16 unidades geradoras. São apresentados quatro resultados diversos: utilizando-se dois modelos diferentes para a máquina síncrona, ambos descritos no capítulo 3, aplicamos as duas técnicas de controle descritas no capítulo 4. Na seção 5.3, apresentaremos os resultados da aplicação da primeira técnica de controle descrita no capítulo 4 a um sistema de potência que contém máquinas térmicas. Na seção 5.4, apresentaremos os resultados da aplicação da técnica de controle centralizado - hierarquizado proposta no capítulo 4 ao sistema New England de 9 máquinas montado no MATLAB. Para modelar os atrasos no sistema, utilizamos as aproximações de Padé de ordens 1 e 2 e, para cada aproximação, realizamos simulações para atrasos de 10 e 50 ms. Finalmente, na seção 5.5 apresentaremos as discussões finais acerca dos resultados obtidos.

## 5.1. Sistema Teste New England de 39 barras

### 5.1.1. Modelo utilizado em (Zanetta Jr. e da Cruz, 2005)

O caso apresentado aqui é o sistema New England de 39 barras, que contém nove máquinas síncronas com estabilizadores de sistemas de potência e uma máquina (número 39) modelada como um barramento infinito (Zanetta Jr. e da Cruz, 2005). As cargas foram representadas como impedâncias constantes; mais detalhes podem ser encontrados em (Byerley, Sherman e Bernnon, 1978). Os reguladores automáticos de tensão IEEE tipo I foram alterados para reguladores estáticos com constantes de tempo fixas (0.05s). Os ganhos dos reguladores foram escolhidos de acordo com as relações das constantes de tempo de cada gerador, com os seguintes valores de ganho para os geradores 30 a 38, respectivamente: 102, 65.6, 57, 56.9, 54, 73, 56.6, 67 e 47.9. A tabela 5.1 apresenta as 8 condições de operação utilizadas neste trabalho. A figura 5.1 apresenta o diagrama unifilar do sistema elétrico New England, composto por 10 máquinas (uma das quais é o barramento infinito) e 39 barras. O modelo montado está baseado nas equações (3.16), (3.17), (3.18), (3.19), (3.20), (3.28), (3.37), (3.38), (3.41) e (3.42).

CONDIÇÕES	CARACTERÍSTICAS
1	Caso Base
2	Saída das linhas: 3-18 e 25-26
3	Saída das linhas: 4-14 e 16-17
4	Saída da linha 6-11
5	Aumento de carga de 360 MW
6	Redução de carga de 30 %
7	Redução de carga de 20 %
8	Aumento de carga de 50 % na barra 16 e 50 % na barra 21 e saída da linha 21-22

**TABELA 5.1 – CONDIÇÕES E CARACTERÍSTICAS DOS 8 PONTOS DE OPERAÇÃO PARA O SISTEMA NEW ENGLAND DE 39 BARRAS**

Os autovalores do sistema de potência antes da aplicação dos controladores são mostrados na figura 5.2. Como pode ser notado, há muitos autovalores instáveis, bem como autovalores fracamente amortecidos.

Para aplicar a metodologia descrita na seção 4.4 a esse sistema de potência, consideraremos as condições de operação dadas na tabela 5.1 (essas condições foram utilizadas para construir 8 modelos diferentes do sistema de potência no espaço de estados, de acordo com as equações descritas no capítulo 3) e o seguinte índice de desempenho (amortecimento mínimo dos autovalores do sistema em malha fechada):

$$\xi = \cos \theta = 0.1$$

Além disso, os dois pólos dos controladores foram fixados em  $s = -100$  (ver equação (4.1)); seus dois zeros foram deixados livres, bem como seu ganho estático, de acordo com a equação (4.1). O problema de minimização robusta é aquele definido na seção 4.4, sujeito a (4.39), (4.40), (4.41) e (4.42).

Neste caso, a igualdade (4.27) não pôde ser exatamente estabelecida. Para que ela fosse exatamente estabelecida, dever-se-ia impor uma estrutura particular à matriz  $Q$ . Em primeiro lugar, ela deve ser bloco diagonal, de modo a originar controladores descentralizados. Além disso, para que (4.27) fosse satisfeita, alguns elementos internos a cada bloco da matriz  $Q$  deveriam valer zero. Esta última restrição, neste caso, tornou o problema LMI infactível. Contudo, foi possível obter uma boa aproximação da matriz de ganhos do controlador sem zerar esses elementos internos aos blocos da matriz  $Q$ .

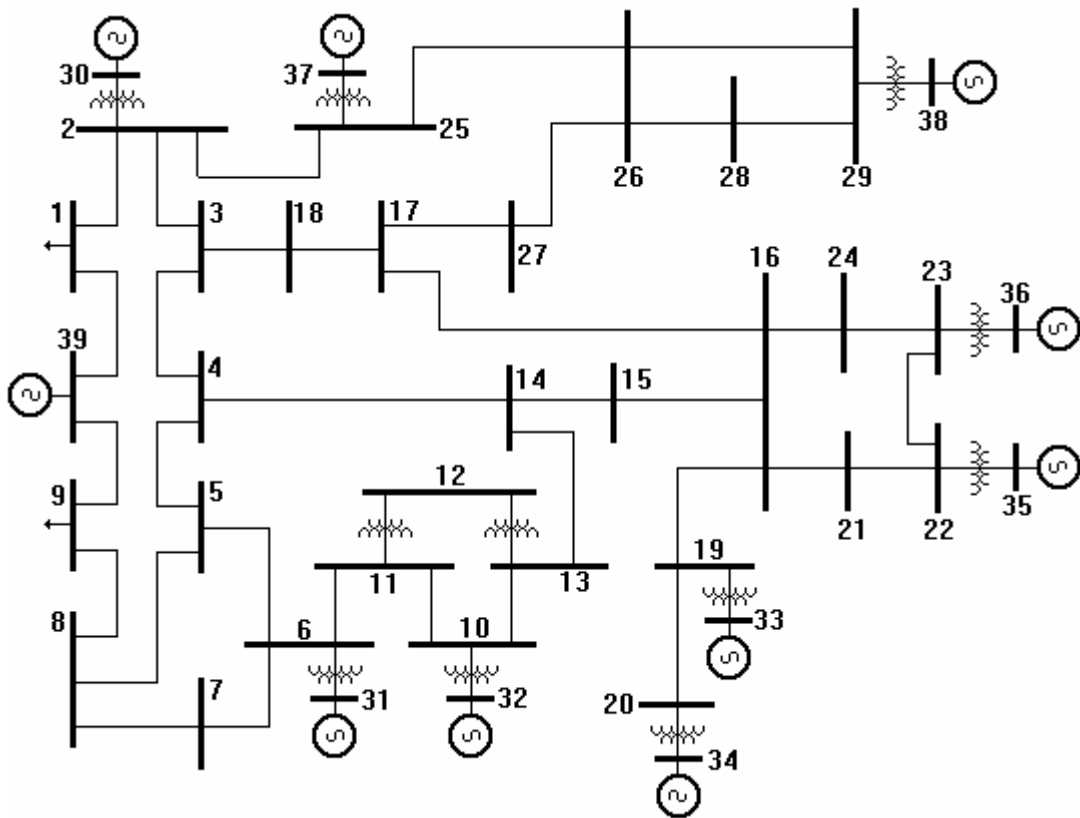
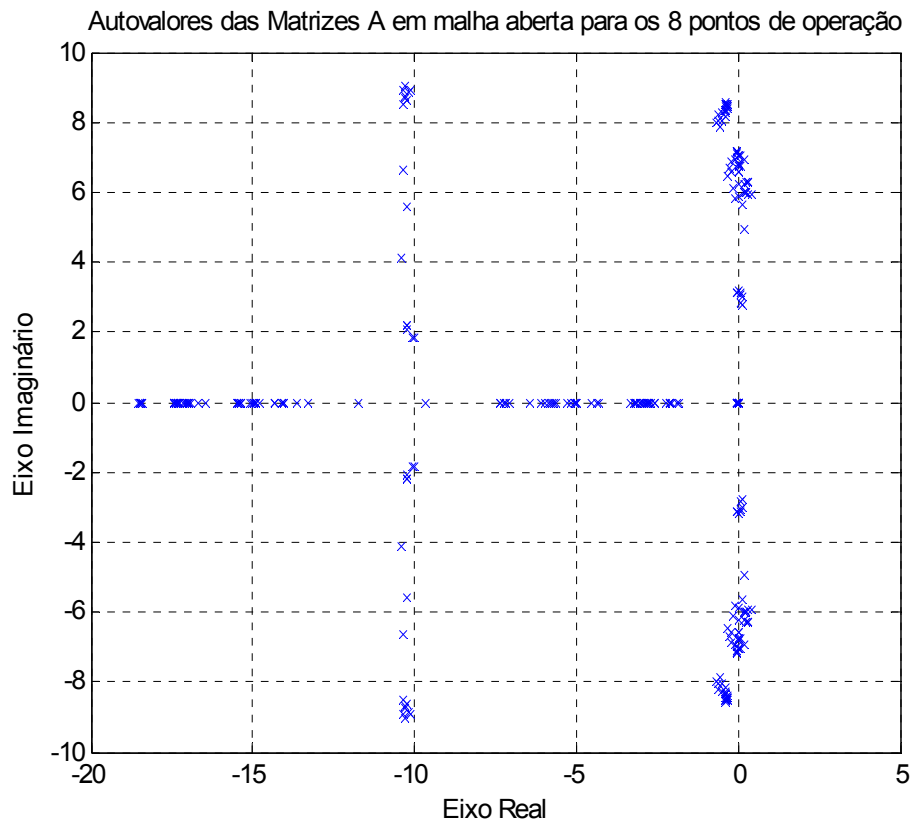


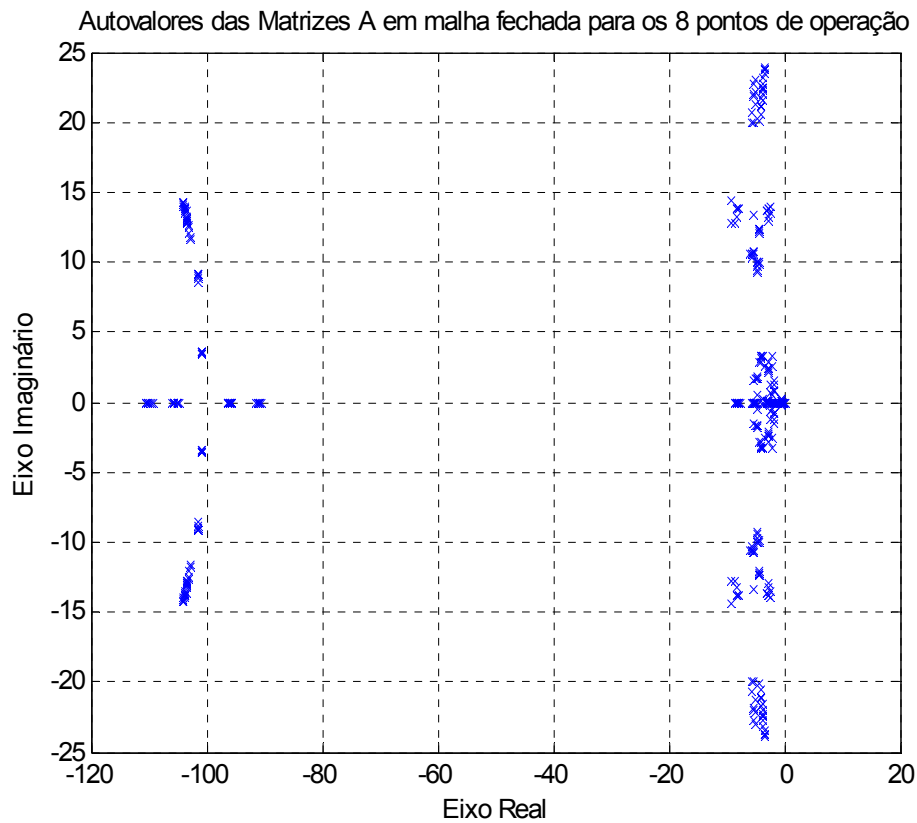
Figura 5.1 - Diagrama Unifilar do Sistema New England de 39 barras

O software usado para executar o algoritmo de minimização foi o LMI Toolbox do MATLAB; para resolver problemas de minimização envolvendo LMI's, foi usada a função **mincx**. Essa função atingiu a convergência em aproximadamente 500 iterações (o que equivale a 4 horas de processamento num computador equipado com processador Pentium 4 2.4 GHz e 1 GB de memória RAM). Para avaliar o desempenho do sistema em malha fechada, foram plotados todos os autovalores das matrizes A em malha fechada (ver equação (4.18)) para os 8 pontos de operação, conforme se pode observar na figura 5.3.



**Figura 5.2 - Autovalores do sistema New England de 39 barras em malha aberta para as 8 condições de operação**

Detalhando essa figura nas proximidades do eixo imaginário, obtemos a figura 5.4 (Campos, da Cruz e Zanetta Jr., 2006). Pode-se perceber que a especificação de desempenho foi satisfeita, para todos os pontos de operação, e a figura 5.4 mostra ainda que o sistema atingiu um fator de amortecimento mínimo de 15%. Esse fator de amortecimento pode ser considerado bom se comparado a valores obtidos na literatura de sistemas de potência (10% a 15%, em geral - por exemplo, ver (Zanetta Jr. e da Cruz, 2005), (Ramos, Martins e Bretas, 2005) e (Werner, Korba e Yang, 2003)).



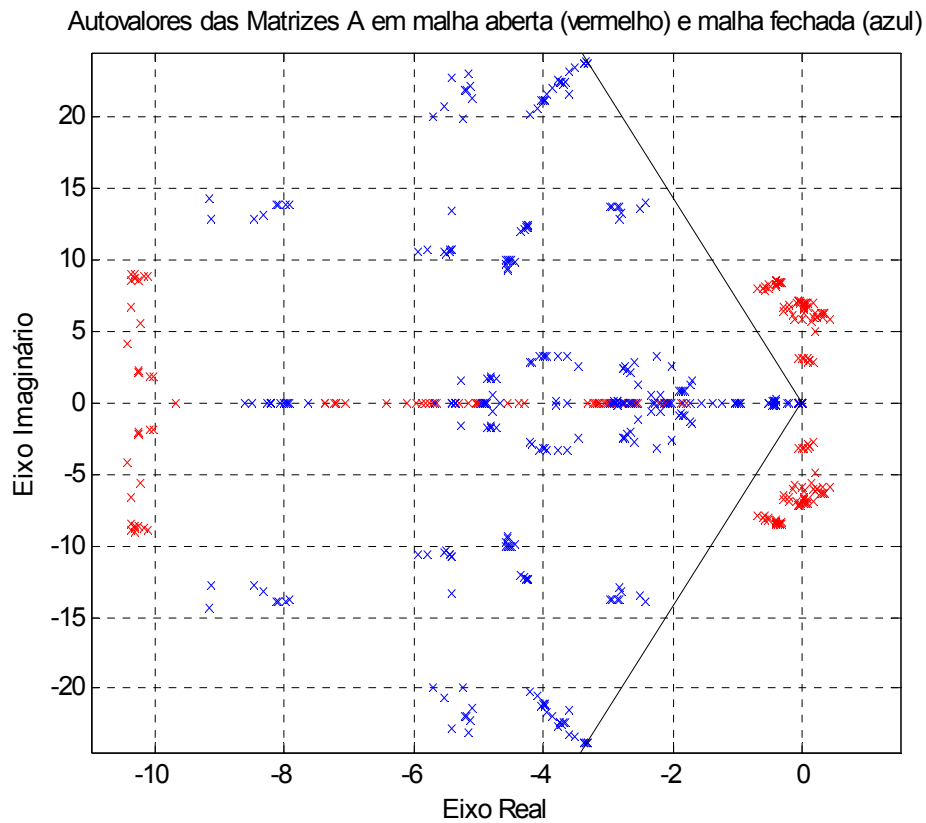
**Figura 5.3 – Autovalores do sistema New England de 39 barras em malha fechada para todos os pontos de operação**

Os diagramas de Bode para os nove controladores obtidos são mostrados na figura 5.5. Note-se que os controladores obtidos têm um comportamento típico de compensadores por avanço de fase, o que é comumente feito nos sistemas de potência atualmente.

Os parâmetros das funções de transferência dos 9 controladores são apresentados na tabela 5.2.

O formato da função de transferência dos controladores descentralizados apresentados na tabela 5.2 é o seguinte:

$$K_i(s) = \frac{a_i s^2 + b_i s + c_i}{(0.01s + 1)(0.01s + 1)} \quad (5.1)$$

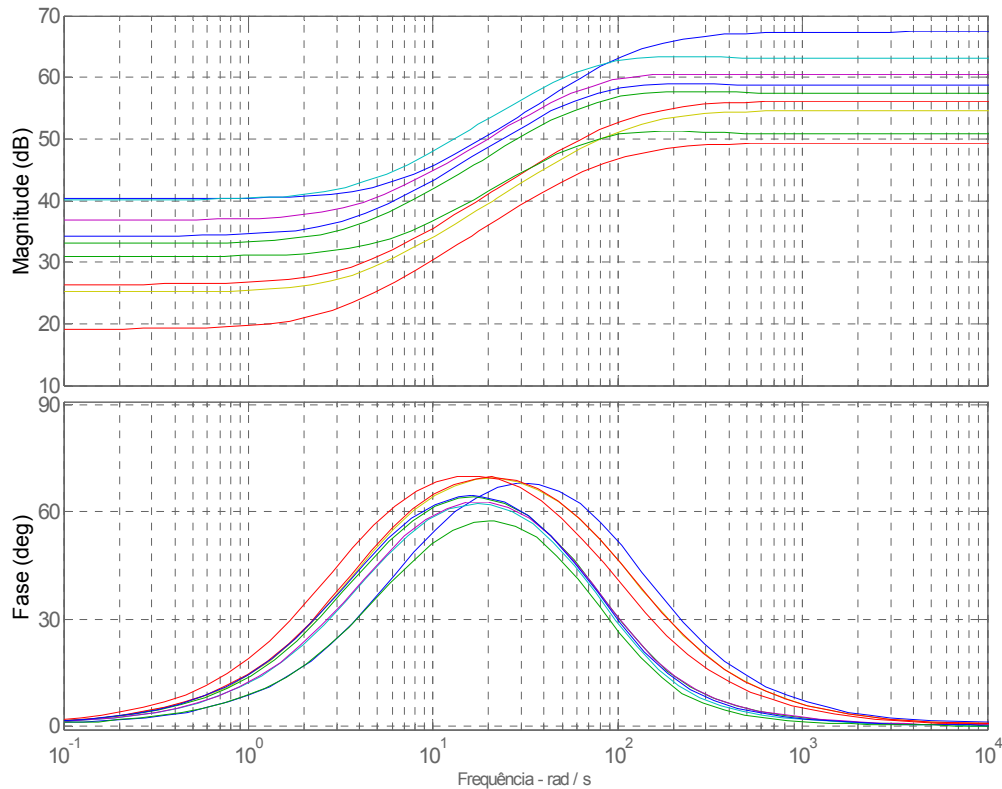


**Figura 5.4 – Autovalores do sistema New England de 39 barras em malha aberta (vermelho) e malha fechada (azul) para os 8 pontos de operação (detalhe nas proximidades do eixo imaginário)**

Gerador	parâmetro $a_i$	parâmetro $b_i$	parâmetro $c_i$
30	0.23380	17.630	103.10
31	0.05390	4.942	18.02
32	0.06427	5.868	20.88
33	0.07471	11.900	44.86
34	0.14270	24.000	101.80
35	0.10570	16.650	69.61
36	0.08636	14.190	51.420
37	0.02937	3.286	9.085
38	0.03466	6.128	35.150

**TABELA 5.2 – PARÂMETROS DOS CONTROLADORES ROBUSTOS PARA O SISTEMA NEW ENGLAND DE 39 BARRAS**

Comparando os valores dos parâmetros dos controladores com outros reportados na literatura (por exemplo, ver (Scavoni et al., 2001) e (Zanetta Jr. e Cruz, 2005)), pode-se concluir que eles não estão distantes dos valores praticados em aplicações de sistemas de potência, ou seja, os valores dos parâmetros dos controladores obtidos são praticáveis.



**Figura 5.5 – Diagramas de Bode de Ganho e Fase dos 9 controladores robustos obtidos para o sistema New England de 39 barras**

Além disso, a norma da matriz de ganhos do controlador ( $K_C$ ) obtida foi 291288. Os valores das variáveis  $k_Q$  e  $k_N$  otimizadas foram 5513 e 2791, respectivamente.

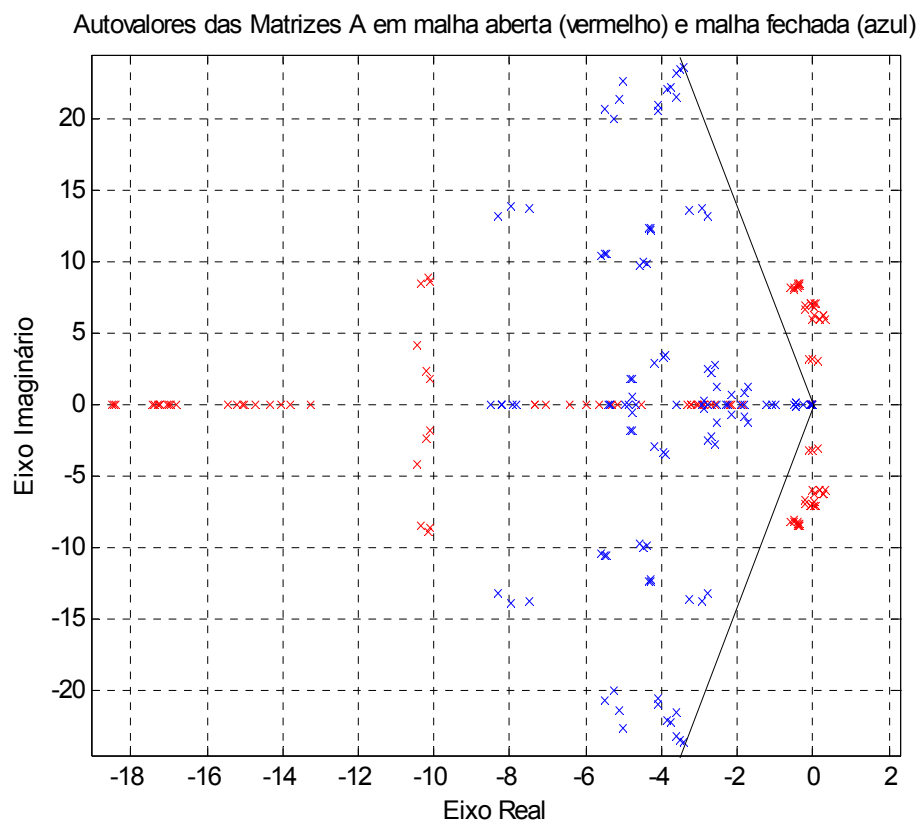
Uma vez que os controladores robustos foram obtidos, realizaram-se testes com o objetivo de verificar seu funcionamento em pontos de operação não considerados na fase de projeto. Esses novos pontos de operação são dados na tabela abaixo:



CONDIÇÕES	CARACTERÍSTICAS
9	Aumento de carga de 15 %
10	Aumento de carga de 20 %
11	Saída das linhas 4-14, 16-17 e 25-26

**TABELA 5.3 – CONDIÇÕES E CARACTERÍSTICAS DOS 3 NOVOS PONTOS DE OPERAÇÃO PARA O SISTEMA NEW ENGLAND DE 39 BARRAS**

Simulando o sistema em malha fechada com os controladores robustos obtidos previamente, para os 3 modelos obtidos através dos pontos de operação dados acima, temos os autovalores dados na figura 5.6. Pode-se perceber que o amortecimento mínimo obtido para estas novas condições operativas foi de 14 %, o que é considerado bom para sistemas elétricos de potência. Além disso, este amortecimento está bem próximo daquilo que foi especificado inicialmente para os outros oito pontos de operação considerados na fase de projeto (15 %).



**Figura 5.6 – Autovalores do sistema New England de 39 barras em malha aberta (vermelho) e malha fechada (azul) para os 3 novos pontos de operação (detalhe nas proximidades do eixo imaginário). As duas linhas delimitam a região do plano complexo na qual o amortecimento dos autovalores do sistema é de 14 %**

A este mesmo modelo do sistema New England foi aplicado outro algoritmo de controle robusto, dado na seção 4.5. Para aplicar o método descrito na seção 4.5 a esse sistema de potência, consideramos novamente as condições de operação dadas na tabela 5.1 (essas condições foram utilizadas para construir 8 modelos diferentes do sistema de potência no espaço de estados, de acordo com as equações descritas no capítulo 3) e o seguinte índice de desempenho (amortecimento mínimo dos autovalores do sistema em malha fechada):

$$\xi = \cos \theta = 0.15$$

Além disso, os dois pólos dos controladores foram fixados em  $s = -100$  (ver equação (4.1)); seus dois zeros foram deixados livres, bem como seu ganho estático, de acordo com a equação (4.1). O algoritmo de controle robusto para solução de BMI's através do método homotópico é aquele definido na seção 4.5.

O software utilizado para implementar o algoritmo de controle robusto foi o LMI Toolbox do MATLAB; para resolver problemas de viabilidade envolvendo LMI's, foi usada a função **feasp**. O algoritmo atingiu a convergência em 30 iterações (para cada iteração do algoritmo de controle, são necessárias em média 200 iterações da função **feasp**). Os valores de entrada do algoritmo de controle foram os seguintes:

$$\varepsilon = 0.001 \quad e \quad \Delta\theta = 0.05$$

Foi aplicado um fator de ajuste multiplicativo de 0.1 nas atualizações da matriz de ganhos do controlador ( $\Delta K$ ). A utilização deste fator de ajuste permitiu a convergência do algoritmo, uma vez que os incrementos de atualização da matriz de ganhos do controlador não podem ser muito grandes no método homotópico. Para avaliar o desempenho do sistema em malha fechada, foram plotados todos os autovalores das matrizes A em malha fechada (ver equação (4.18)) para os 8 pontos de operação, conforme se pode observar na figura 5.7.

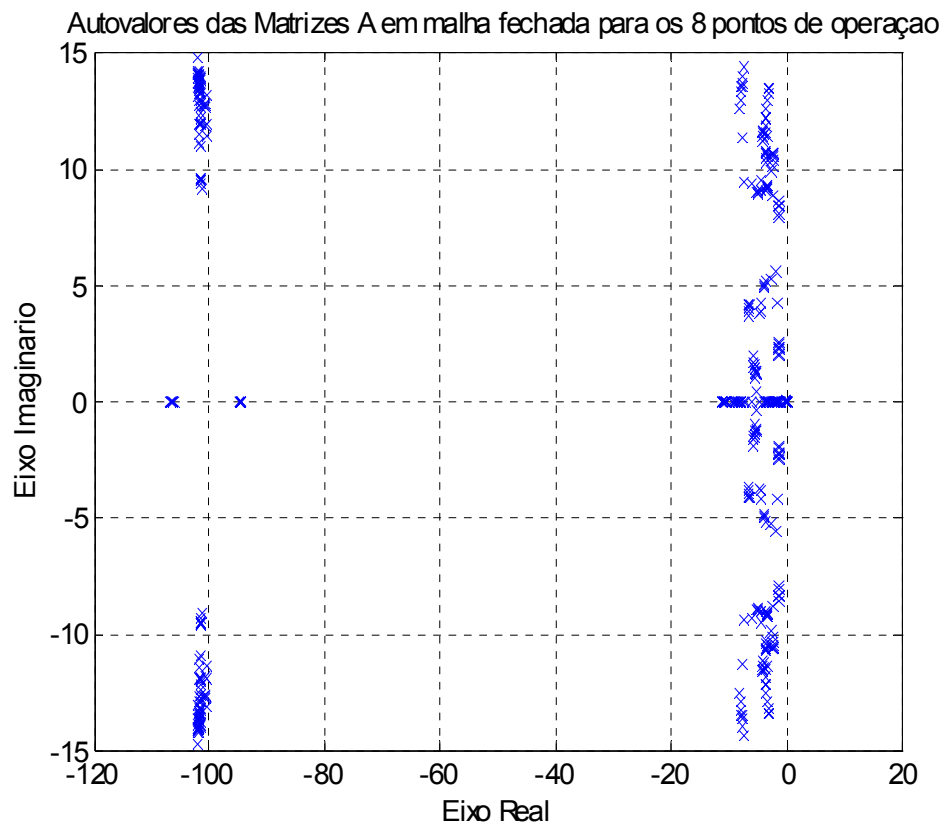
Detalhando essa figura nas proximidades do eixo imaginário, obtemos a figura 5.8. Pode-se perceber que a especificação de desempenho foi satisfeita, para todos os pontos de operação, uma vez que o sistema atingiu um fator de amortecimento mínimo de 15%.

Os diagramas de Bode para os nove controladores obtidos são mostrados na figura 5.9.

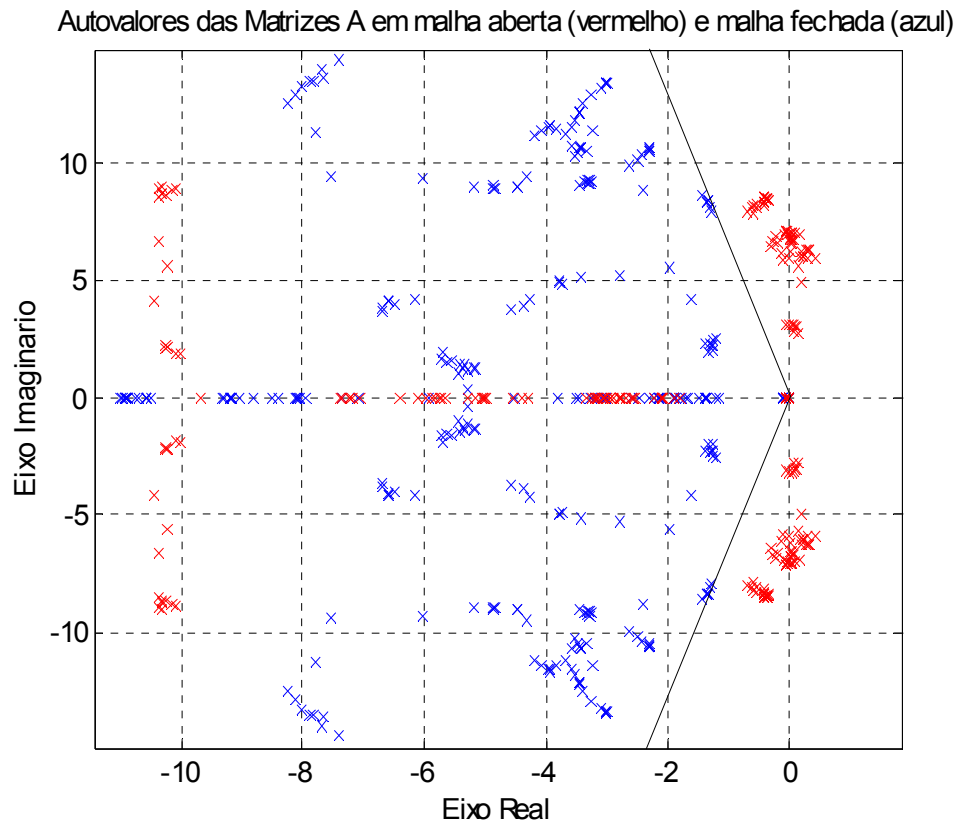
Os parâmetros das funções de transferência dos 9 controladores são apresentados na tabela 5.4. O formato da função de transferência dos controladores descentralizados apresentados na tabela 5.4 é aquele dado na equação (5.1).

Gerador	parâmetro $a_i$	parâmetro $b_i$	parâmetro $c_i$
30	-0.07935	3.007	17.84
31	-0.01861	4.270	22.20
32	-0.02029	3.831	23.22
33	0.03935	3.392	16.36
34	-0.02250	6.105	28.24
35	-0.009901	4.464	24.30
36	0.006063	4.228	18.40
37	0.01431	3.301	8.661
38	-0.02413	3.398	14.75

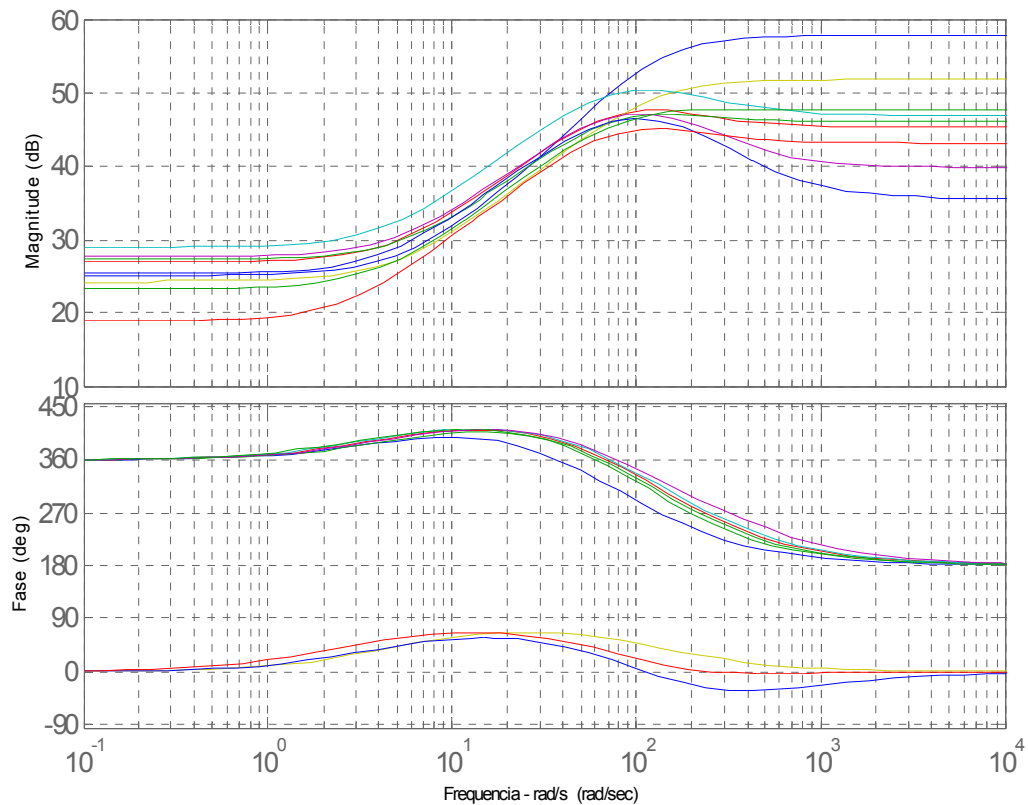
**TABELA 5.4 – PARÂMETROS DOS CONTROLADORES ROBUSTOS PARA O SISTEMA NEW ENGLAND DE 39 BARRAS – MÉTODO HOMOTÓPICO**



**Figura 5.7 – Autovalores do sistema New England de 39 barras em malha fechada para os 8 pontos de operação (método homotópico)**



**Figura 5.8 – Autovalores do sistema New England de 39 barras em malha aberta (vermelho) e malha fechada (azul) para os 8 pontos de operação (detalhe nas proximidades do eixo imaginário). As duas linhas delimitam a região do plano complexo na qual o amortecimento dos autovalores do sistema é de 15 % (método homotópico).**



**Figura 5.9 – Diagramas de Bode de Ganho e Fase dos 9 controladores robustos obtidos para o sistema New England de 39 barras (método homotópico de controle robusto)**

A norma da matriz de ganhos do controlador ( $K_C$ ) é 188770. A norma da matriz de incrementos  $\Delta K$  na última iteração é 87606. Note-se que a norma da correção utilizada para a matriz de ganhos do controlador corresponde a 4.6 % da norma da matriz de ganhos original, ou seja, os incrementos a cada iteração são de fato pequenos (considerando a aplicação do fator de ajuste multiplicativo de 0.1 na matriz  $\Delta K$ ).

Comparando os resultados da aplicação da segunda técnica com os resultados obtidos com a primeira técnica, pode-se concluir que a execução do algoritmo do segundo método é mais lenta (ou seja, exige mais iterações para a convergência); contudo, para o segundo método conseguimos obter uma matriz de ganhos do controlador com norma inferior à do primeiro método.

Pode-se estabelecer uma correlação entre a norma da matriz de ganhos do controlador ( $K_C$ ) e o fator de amortecimento do sistema de potência em malha fechada. Para determinar tal relação, executamos 17 experimentos variando o fator de amortecimento do sistema em malha fechada e resolvendo o problema de minimização descrito na seção 4.4. Esses experimentos foram feitos para um conjunto de 3 pontos de operação (linhas 1, 2 e 3 da tabela 5.1). Para cada experimento, fixamos o valor do fator de amortecimento desejado para o sistema; o resultado final são os parâmetros ótimos  $k_Q$  e  $k_N$ , assim como a norma da matriz de ganhos do controlador. Esses resultados são apresentados na tabela 5.5. Eles mostram que:

1. Obviamente, quanto maior for o fator de amortecimento especificado para o sistema, maior será a norma da matriz de ganhos do controlador, ou seja, maior deverá ser o esforço de controle;
2. Além disso, há uma região na qual a norma da matriz de ganhos aumenta rapidamente com o aumento do fator de amortecimento (ou seja, a região na qual o fator de amortecimento é maior que 0.23). Isso significa que o ganho de pelo menos um controlador está aumentando muito para que o critério de amortecimento seja satisfeito.

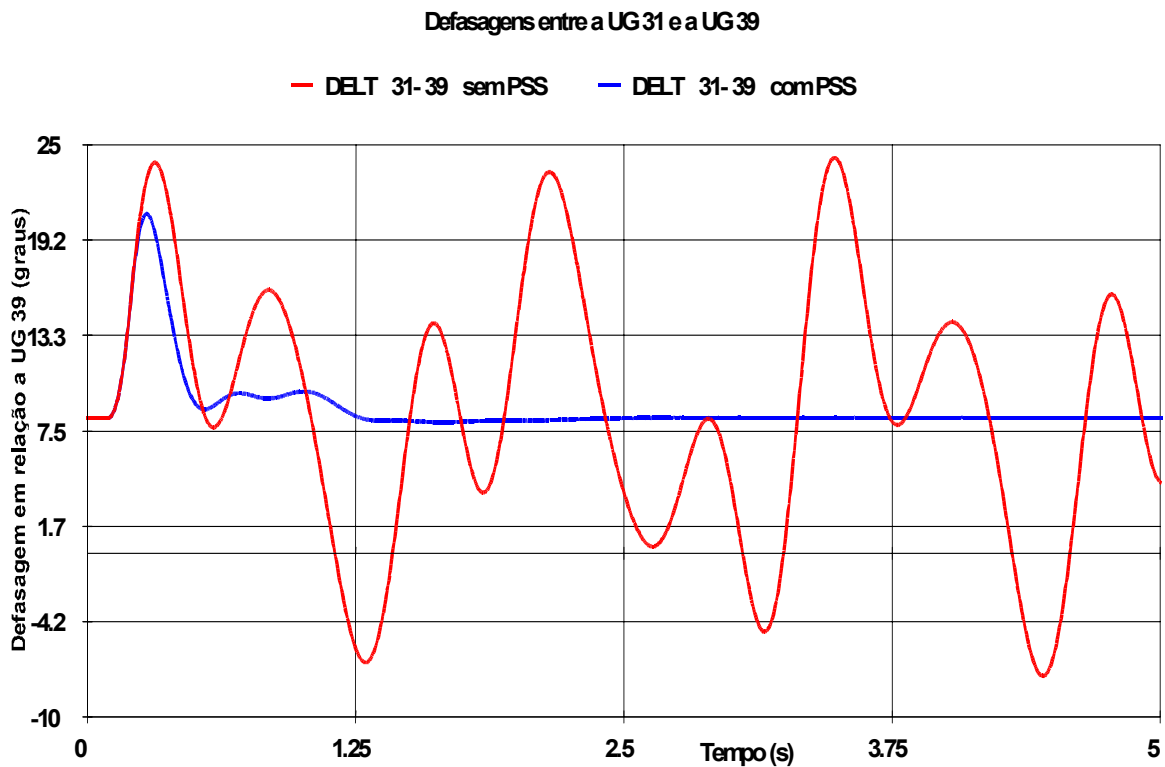
Esse tipo de análise pode ser útil quando estamos tentando estabelecer uma relação entre o fator de amortecimento do sistema (ou seja, desempenho do sistema em malha fechada) e a magnitude dos ganhos dos controladores.

Nº	amortecimento	$k_N$	$k_Q$	Norma de K
1	0.008	30.57	60.24	333.04
2	0.010	32.00	62.87	355.65
3	0.046	42.53	83.81	526.49
4	0.063	50.89	99.62	642.48
5	0.084	60.37	119.01	856.58
6	0.095	66.37	130.71	1005.80
7	0.114	77.12	152.28	1288.60
8	0.138	91.75	180.82	1674.80
9	0.157	104.63	206.92	2081.40
10	0.184	122.14	242.87	2655.00
11	0.204	134.33	264.14	3025.90
12	0.232	184.87	364.42	4934.00
13	0.247	1929.20	3853.50	169260.00
14	0.270	3373.30	6736.80	391270.00
15	0.304	5012.60	9867.40	665130.00
16	0.330	8085.30	16152.00	760490.00
17	0.350	12528.00	24864.00	864240.00

**TABELA 5.5 – RELAÇÃO ENTRE NORMA DA MATRIZ DE GANHOS DO CONTROLADOR E AMORTECIMENTO MÍNIMO DO SISTEMA**

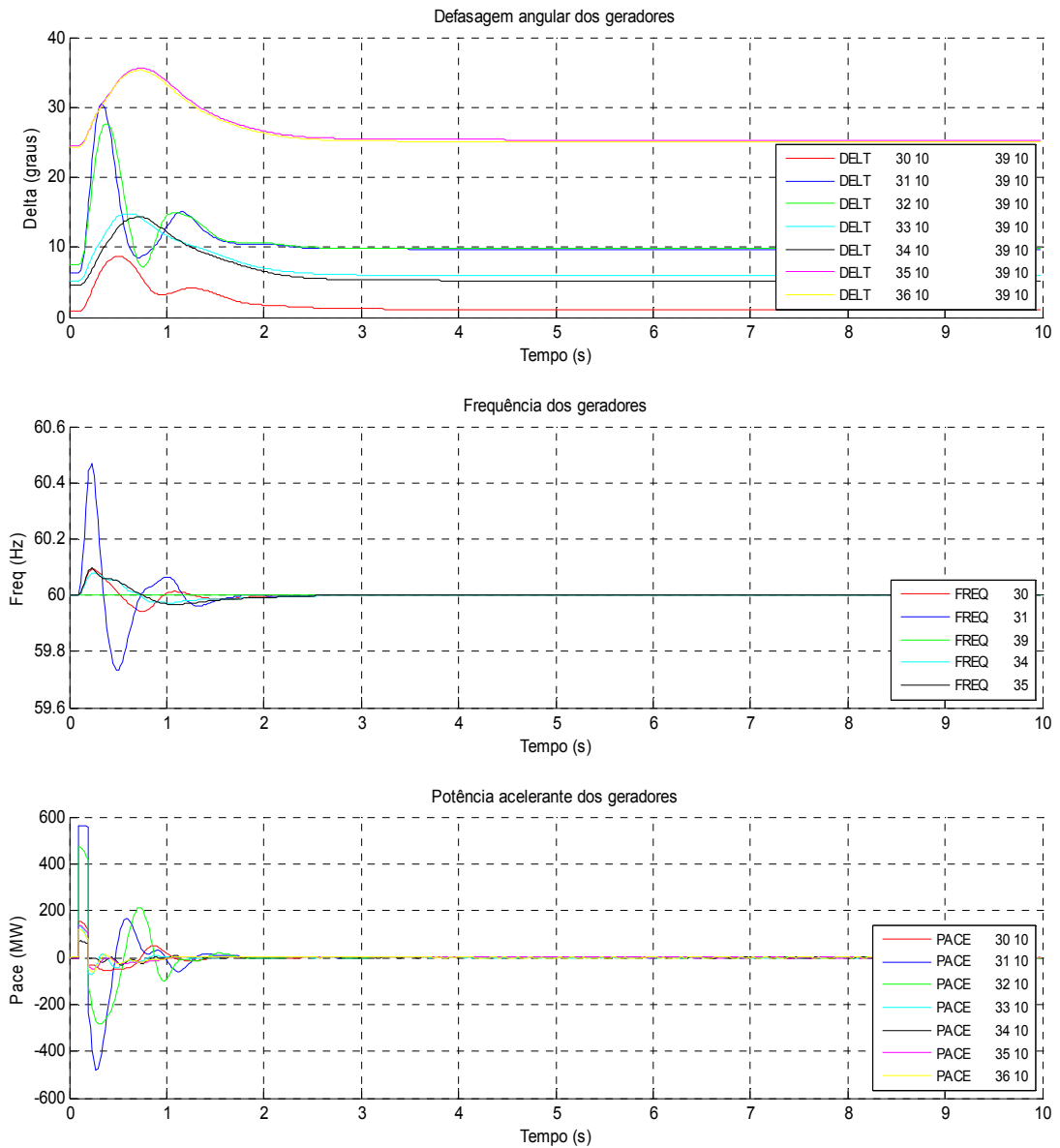
Para validar o controlador obtido pelo primeiro método de controle robusto proposto na seção 4.4, algumas simulações não-lineares foram feitas. Uma delas é dada na figura 5.10, onde temos a resposta temporal da diferença de fase entre os geradores 31 e 39 (barramento infinito) para a condição operativa número 6 (ver tabela 5.1). Os resultados mostram que os estabilizadores robustos, além de estabilizarem o sistema de potência, fizeram com que o tempo de acomodação da resposta temporal fosse de 1.5 s.



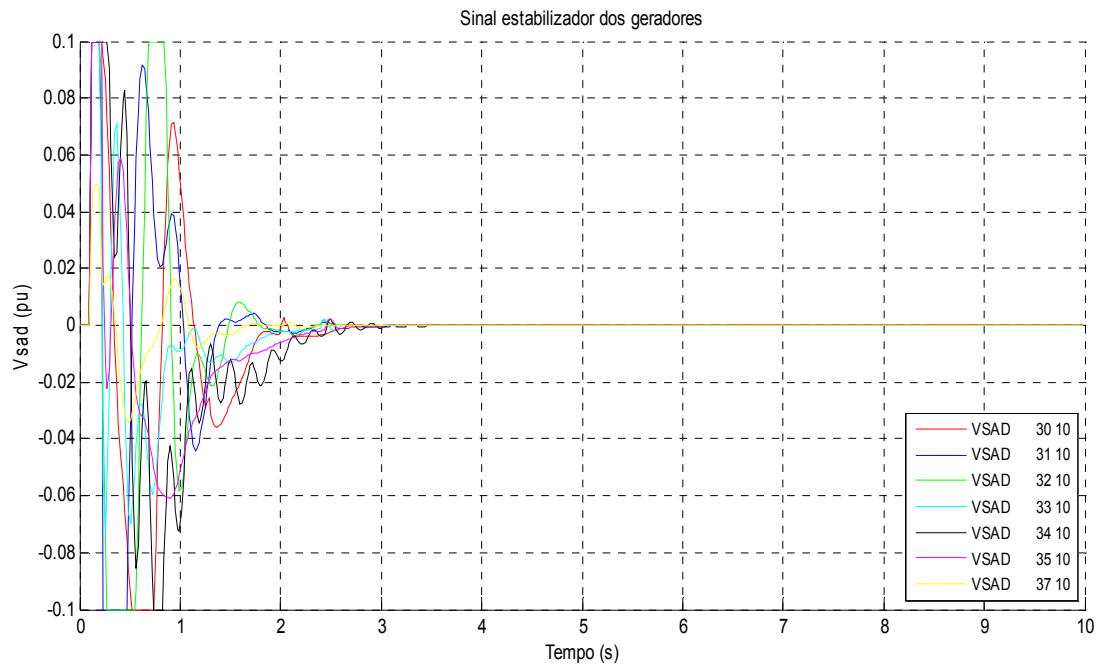


**Figura 5.10 – Evolução temporal da diferença de fase entre os geradores 31 e 39. A linha vermelha corresponde ao sistema nominal, sem estabilizadores, e a linha azul corresponde ao sistema em malha fechada, com os estabilizadores robustos.**

Utilizando ainda o controlador obtido pelo primeiro método de controle robusto proposto na seção 4.4, realizamos outras simulações não-lineares. Na figura 5.11, temos a resposta temporal da diferença de fase entre os geradores 30-36 e 39 (barramento infinito) para a condição operativa número 8 (ver tabela 5.1). Além disso, temos ainda a resposta temporal da frequência dos geradores 30, 31, 34, 35 e 39 e a resposta temporal da potência acelerante dos geradores 30-36. Nesse caso, foi aplicado um curto trifásico na barra 6 em 0.1 s, seguido da abertura da linha 6-5 após 0.1 s. Os resultados mostram que os estabilizadores robustos fizeram com que o tempo de acomodação das respostas temporais do sistema fosse inferior a 3 s. Considerando estas mesmas condições operativas, apresentamos na figura 5.12 a evolução temporal dos sinais de tensão estabilizante dos geradores 30-35 e 37. Nota-se que a atuação dos ESP's robustos é interrompida após 3 s (tempo necessário para que a estabilidade operativa do sistema seja restaurada), e os sinais de tensão são restringidos algumas vezes pelos limitadores de tensão (os limites são fixados em - 0.1 p.u. e 0.1 p.u.), mas isso não afetou o desempenho geral do sistema em malha fechada.

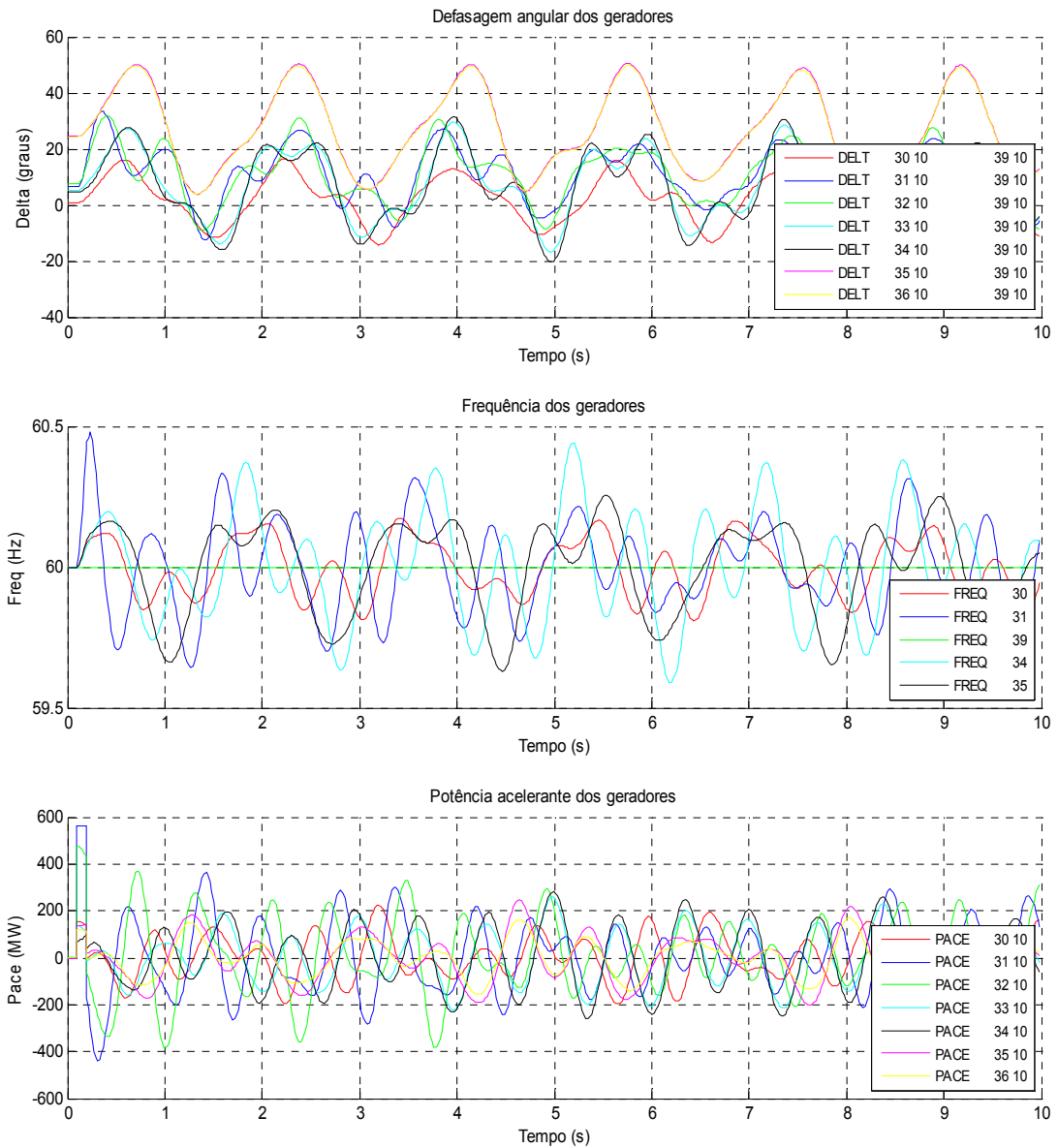


**Figura 5.11 – Evolução temporal da diferença de fase entre os geradores 30-36 e 39 para o sistema New England em malha fechada com ESP's robustos (primeiro gráfico). Evolução temporal da frequência dos geradores 30, 31, 34, 35 e 39 (segundo gráfico). Evolução temporal da potência acelerante dos geradores 30-36 (terceiro gráfico). Nas simulações, foi utilizada a condição operativa no. 8, com um curto trifásico na barra 6 em 0.1 s seguido de abertura da linha 6-5 após 0.1 s.**



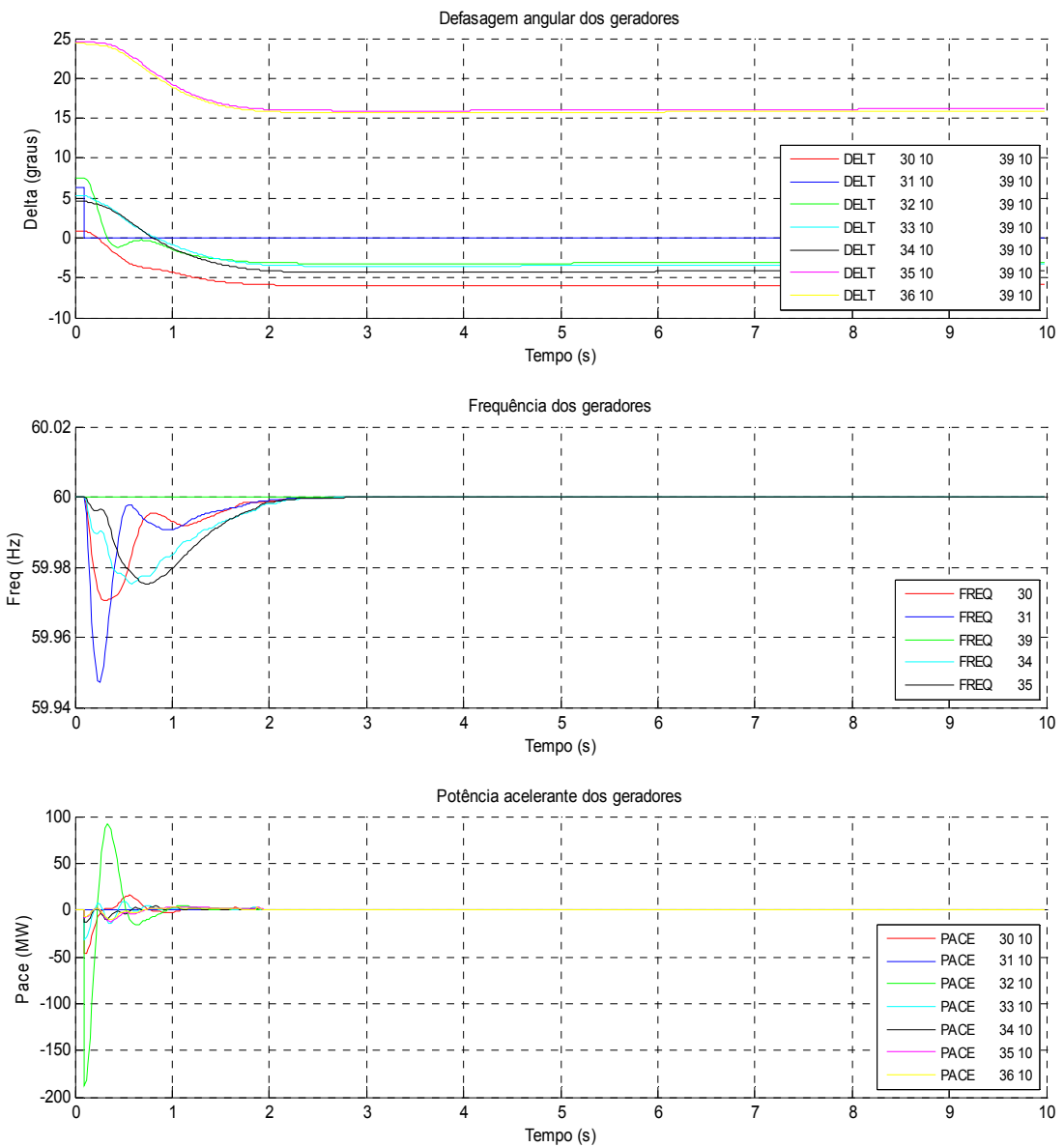
**Figura 5.12 - Evolução temporal do sinal de tensão estabilizante dos geradores 30-35 e 37, todos equipados com ESP's robustos, para a condição operativa no. 8, com um curto trifásico na barra 6 em 0.1 s seguido de abertura da linha 6-5 após 0.1 s.**

Se realizarmos estas mesmas simulações com o sistema de potência em malha aberta (sem os ESP's), teremos respostas temporais instáveis, conforme podemos observar na figura 5.13:

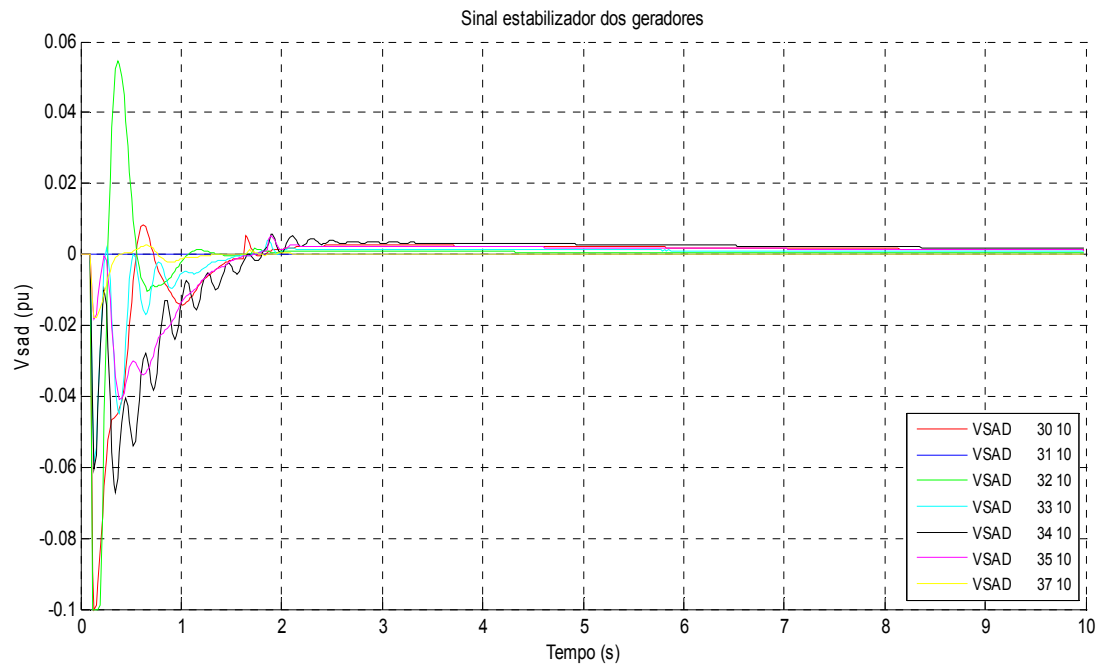


**Figura 5.13 – Evolução temporal da diferença de fase entre os geradores 30-36 e 39 para o sistema New England em malha aberta (primeiro gráfico). Evolução temporal da frequência dos geradores 30, 31, 34, 35 e 39 (segundo gráfico). Evolução temporal da potência acelerante dos geradores 30-36 (terceiro gráfico). Nas simulações, foi utilizada a condição operativa no. 8, com um curto trifásico na barra 6 em 0.1 s seguido de abertura da linha 6-5 após 0.1 s.**

Para verificar o funcionamento dos ESP's robustos (dados na tabela 5.2) quando ocorre a saída de um gerador do sistema, foram realizadas outras simulações não-lineares. Na figura 5.14, temos a resposta temporal da diferença de fase entre os geradores 30-36 e 39 (barramento infinito) para a condição operativa número 8 (ver tabela 5.1). Além disso, temos também a resposta temporal da frequência dos geradores 30, 31, 34, 35 e 39 e a resposta temporal da potência acelerante dos geradores 30-36. Nesse caso, foi considerada a abertura do gerador 31 em 0.1 s. Os resultados mostram que os estabilizadores robustos fizeram com que o tempo de acomodação das respostas temporais do sistema fosse inferior a 2 s. Considerando estas mesmas condições operativas, apresentamos na figura 5.15 a evolução temporal dos sinais de tensão estabilizante dos geradores 30-35 e 37. Nota-se que a atuação dos ESP's robustos é interrompida após 2.5 s (tempo necessário para que a estabilidade operativa do sistema seja restaurada), e os sinais de tensão estabilizante dos geradores 30 e 32 são restringidos uma vez pelos limitadores de tensão (os limites são fixados em - 0.1 p.u. e 0.1 p.u.), mas isso não afetou o desempenho geral do sistema em malha fechada.

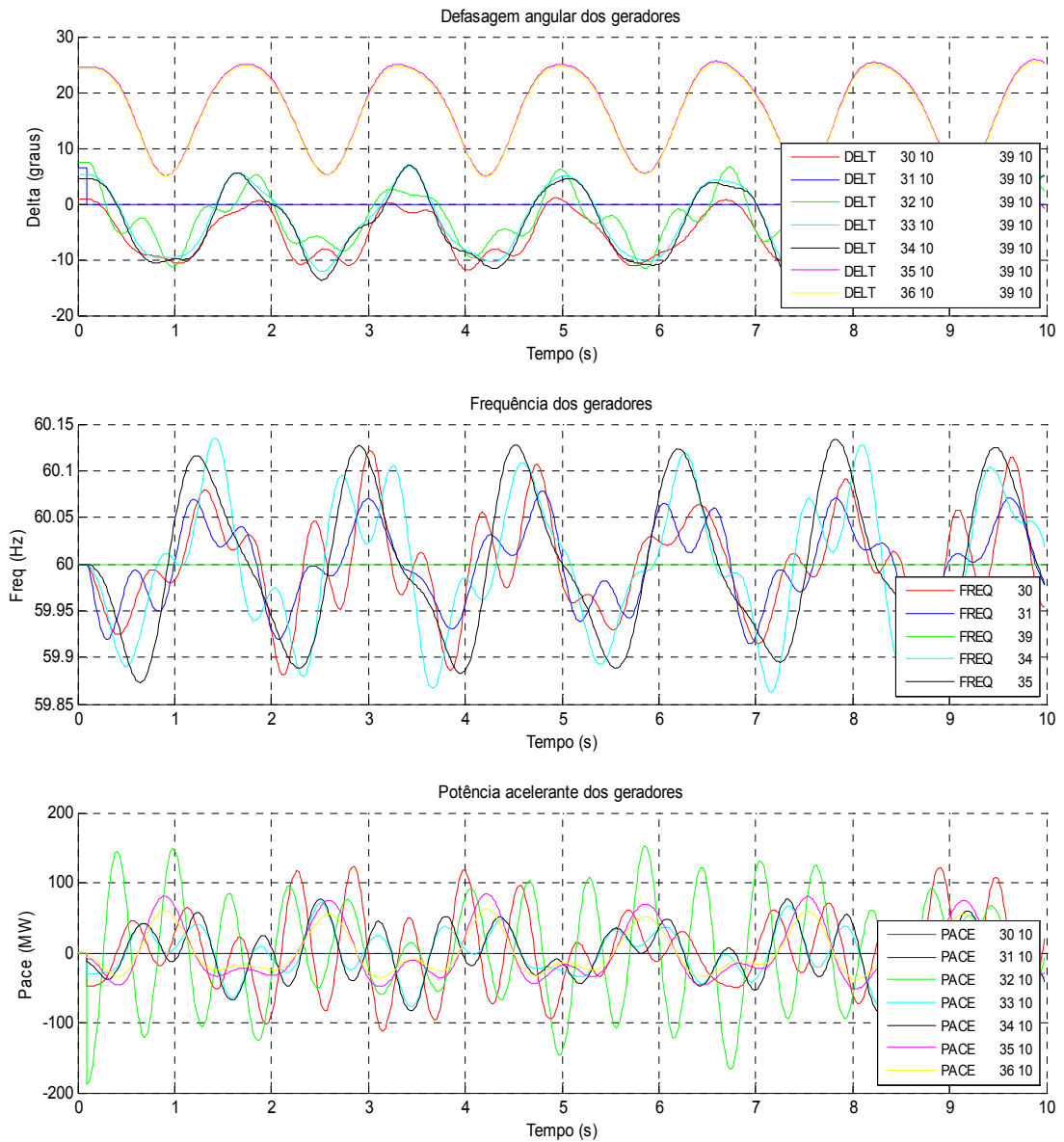


**Figura 5.14 – Evolução temporal da diferença de fase entre os geradores 30-36 e 39 para o sistema New England em malha fechada com ESP's robustos (primeiro gráfico). Evolução temporal da frequência dos geradores 30, 31, 34, 35 e 39 (segundo gráfico). Evolução temporal da potência acelerante dos geradores 30-36 (terceiro gráfico). Nas simulações, foi utilizada a condição operativa no. 8, com abertura do gerador 31 em 0.1 s.**



**Figura 5.15 - Evolução temporal do sinal de tensão estabilizante dos geradores 30-35 e 37, todos equipados com ESP's robustos, para a condição operativa no. 8, com abertura do gerador 31 em 0.1 s.**

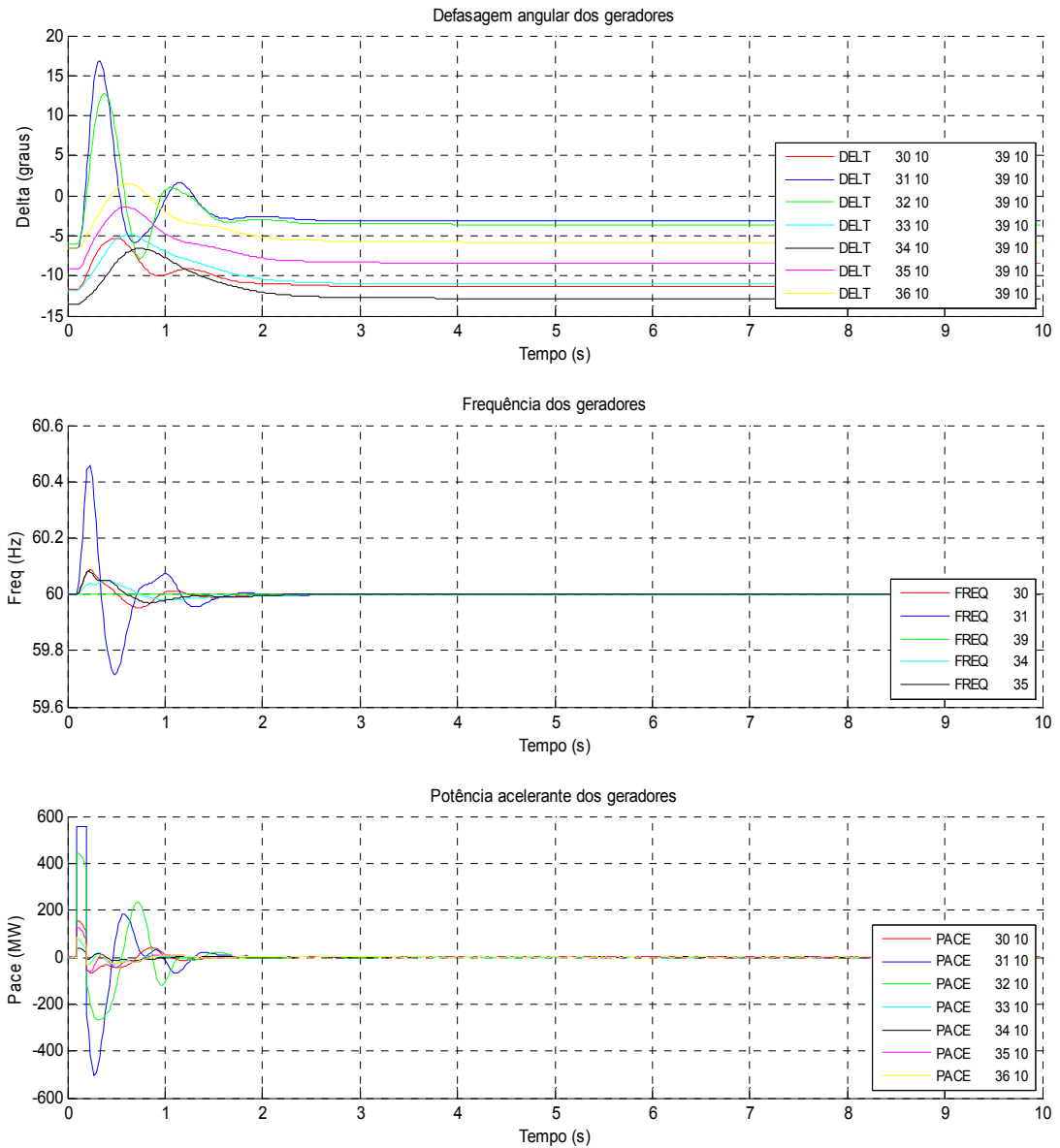
Se realizarmos estas mesmas simulações com o sistema de potência em malha aberta (sem os ESP's), teremos respostas temporais oscilatórias e instáveis, conforme podemos observar na figura 5.16:



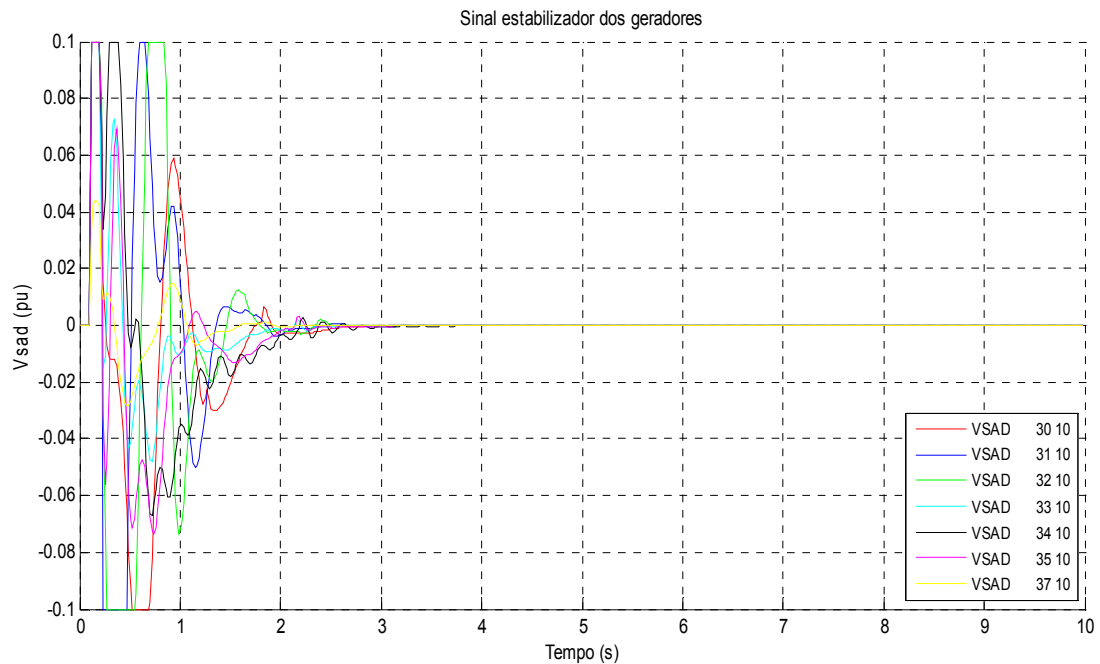
**Figura 5.16 – Evolução temporal da diferença de fase entre os geradores 30-36 e 39 para o sistema New England em malha aberta (primeiro gráfico). Evolução temporal da frequência dos geradores 30, 31, 34, 35 e 39 (segundo gráfico). Evolução temporal da potência acelerante dos geradores 30-36 (terceiro gráfico). Nas simulações, foi utilizada a condição operativa no. 8, com abertura do gerador 31 em 0.1 s.**



Outro teste feito com o objetivo de avaliar o funcionamento dos ESP's robustos (dados na tabela 5.2) consiste em verificar as respostas temporais do sistema em malha fechada para condições operativas não consideradas na fase de projeto. Considerando então a condição operativa número 10 (ver tabela 5.3), foram realizadas algumas simulações não-lineares para o sistema de potência equipado com os ESP's robustos. Na figura 5.17, temos a resposta temporal da diferença de fase entre os geradores 30-36 e 39 (barramento infinito). Além disso, temos também a resposta temporal da frequência dos geradores 30, 31, 34, 35 e 39 e a resposta temporal da potência acelerante dos geradores 30-36. Nesse caso, foi aplicado um curto circuito trifásico na barra 6 em 0.1 s seguido de abertura da linha 6-5 após 0.1 s. Os resultados mostram que os estabilizadores robustos fizeram com que o tempo de acomodação das respostas temporais do sistema fosse inferior a 3 s. Considerando estas mesmas condições operativas, apresentamos na figura 5.18 a evolução temporal dos sinais de tensão estabilizante dos geradores 30-35 e 37. Nota-se que a atuação dos ESP's robustos é interrompida após 3 s (tempo necessário para que a estabilidade operativa do sistema seja restaurada), e os sinais de tensão estabilizante são restringidos algumas vezes pelos limitadores de tensão, o que não afetou o desempenho geral do sistema em malha fechada. Assim, conclui-se que o desempenho do sistema de potência em malha fechada é satisfatório para diversas condições operativas e perturbações.

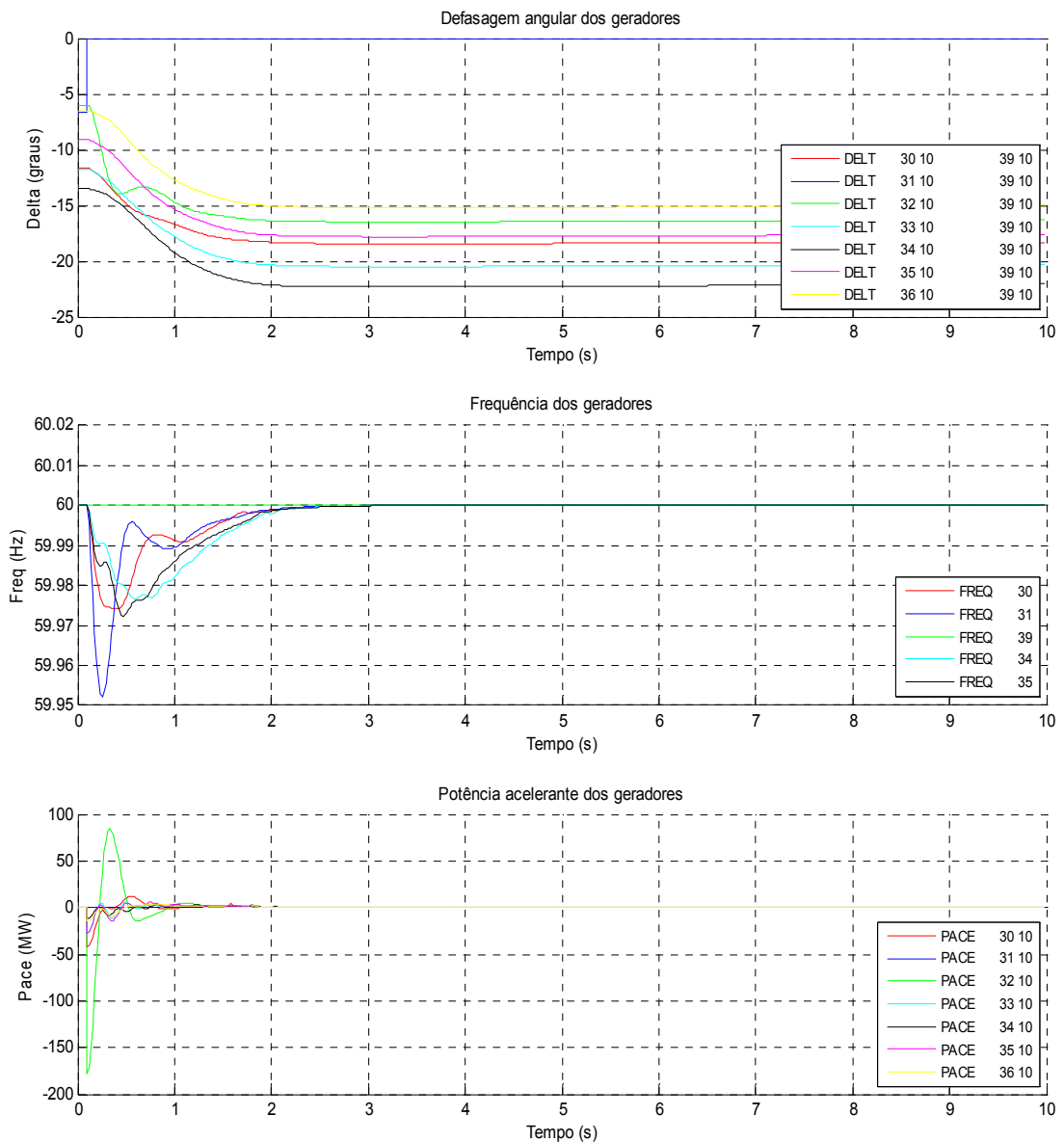


**Figura 5.17 – Evolução temporal da diferença de fase entre os geradores 30-36 e 39 para o sistema New England em malha fechada com ESP's robustos (primeiro gráfico). Evolução temporal da frequência dos geradores 30, 31, 34, 35 e 39 (segundo gráfico). Evolução temporal da potência acelerante dos geradores 30-36 (terceiro gráfico). Nas simulações, foi utilizada a condição operativa no. 10, com um curto trifásico na barra 6 em 0.1 s seguido de abertura da linha 6-5 após 0.1 s.**

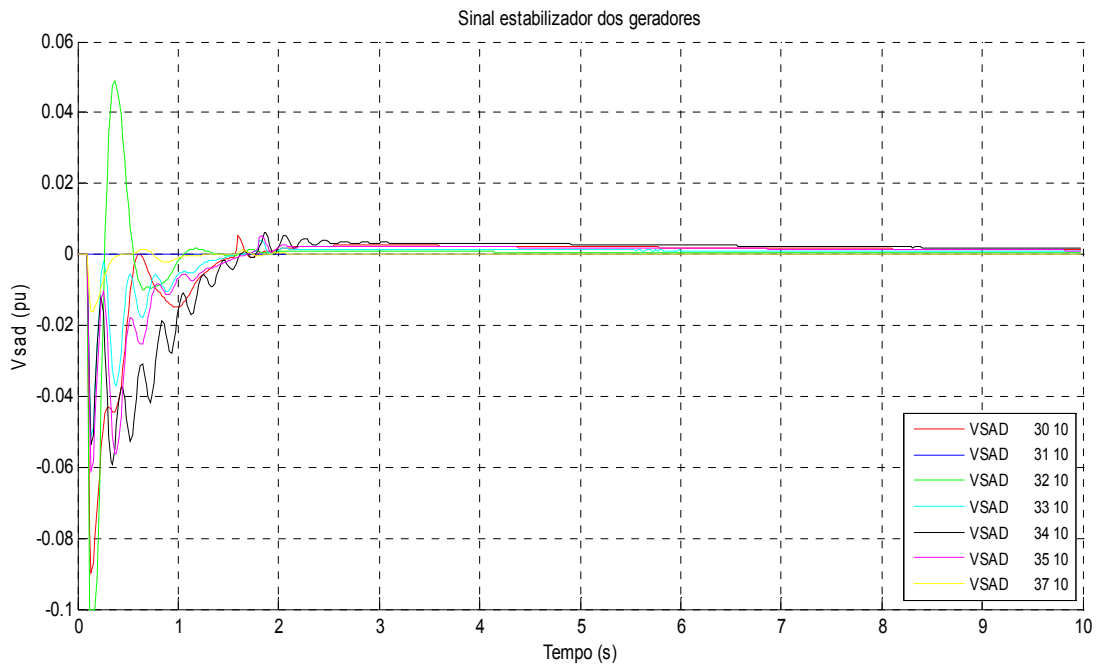


**Figura 5.18 - Evolução temporal do sinal de tensão estabilizante dos geradores 30-35 e 37, todos equipados com ESP's robustos, para a condição operativa no. 10, com um curto trifásico na barra 6 em 0.1 s seguido de abertura da linha 6-5 após 0.1 s.**

O último teste feito com os ESP's robustos (dados na tabela 5.2) consiste em verificar as respostas temporais do sistema em malha fechada para a condição operativa número 10 (ver tabela 5.3), com abertura do gerador 31 no instante 0.1 s. As simulações não-lineares são apresentadas na figura 5.19, na qual temos a resposta temporal da diferença de fase entre os geradores 30-36 e 39 (barramento infinito). Nesta figura, temos também a resposta temporal da frequência dos geradores 30, 31, 34, 35 e 39 e a resposta temporal da potência acelerante dos geradores 30-36. Os resultados mostram que os estabilizadores robustos fizeram com que o tempo de acomodação das respostas temporais do sistema fosse inferior a 2.5 s. Considerando estas mesmas condições operativas, apresentamos na figura 5.20 a evolução temporal dos sinais de tensão estabilizante dos geradores 30-35 e 37. Fica evidente que a atuação dos ESP's robustos é interrompida após 2.5 s (tempo necessário para que a estabilidade operativa do sistema seja restaurada), e o sinal de tensão estabilizante do gerador 32 é restringido apenas uma vez pelos limitadores de tensão, o que não afetou o desempenho global do sistema em malha fechada. Desse modo, conclui-se que o desempenho do sistema de potência em malha fechada é satisfatório para diversas condições operativas e perturbações.



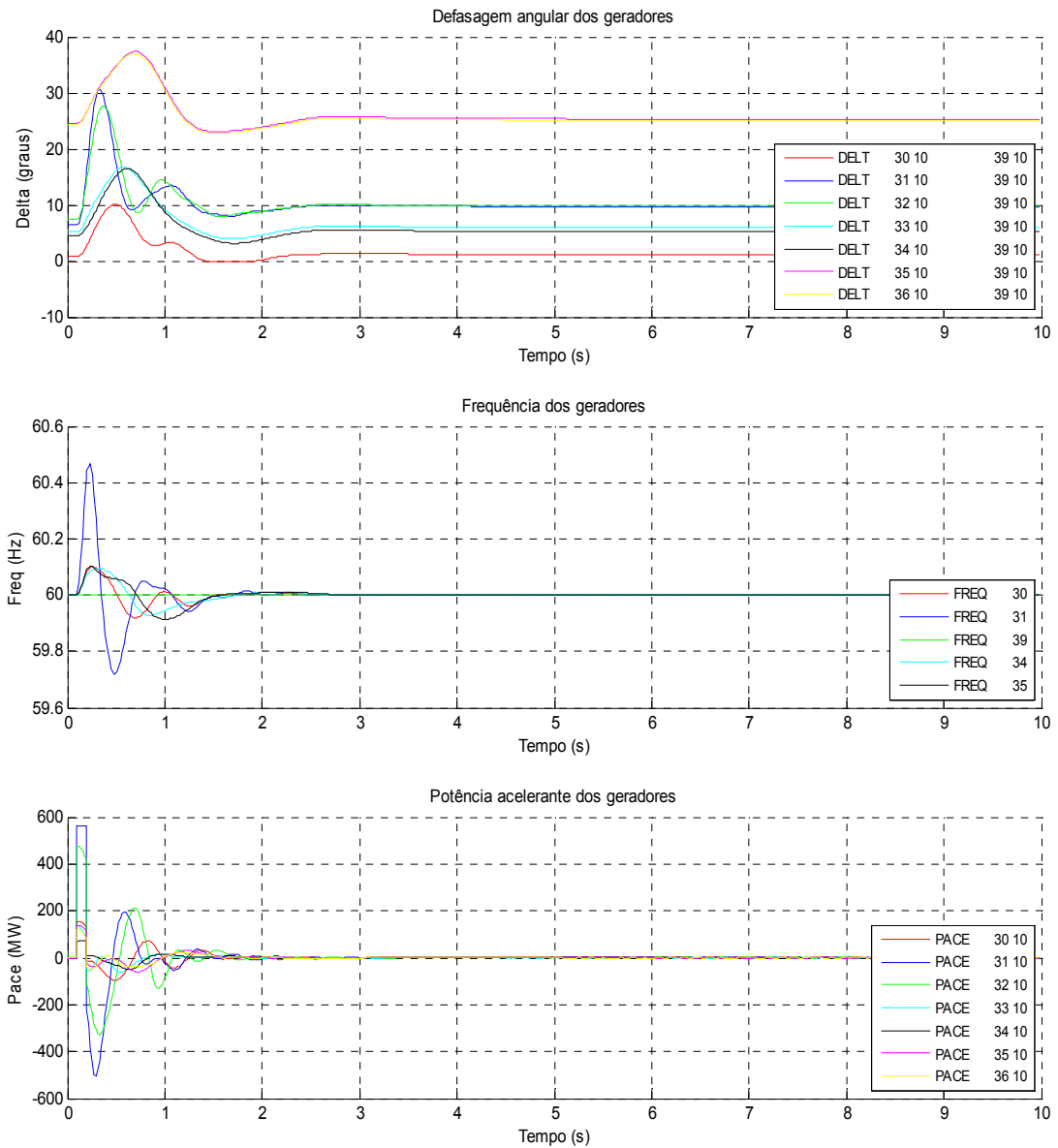
**Figura 5.19 – Evolução temporal da diferença de fase entre os geradores 30-36 e 39 para o sistema New England em malha fechada com ESP's robustos (primeiro gráfico). Evolução temporal da frequência dos geradores 30, 31, 34, 35 e 39 (segundo gráfico). Evolução temporal da potência acelerante dos geradores 30-36 (terceiro gráfico). Nas simulações, foi utilizada a condição operativa no. 10, com abertura do gerador 31 em 0.1 s.**



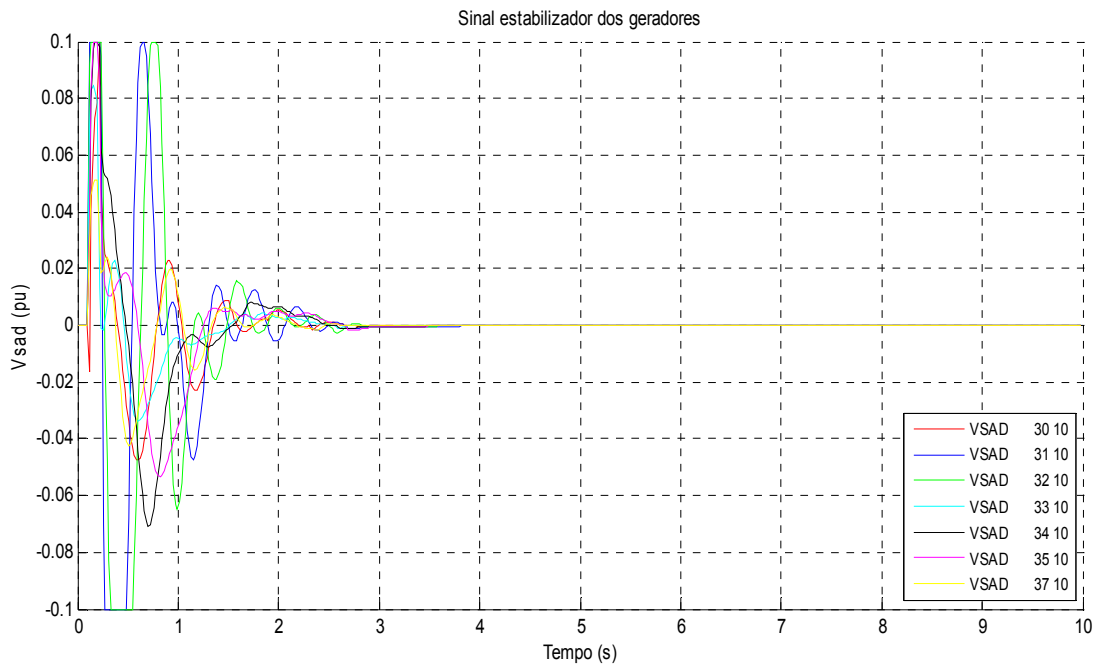
**Figura 5.20 - Evolução temporal do sinal de tensão estabilizante dos geradores 30-35 e 37, todos equipados com ESP's robustos, para a condição operativa no. 10, com abertura do gerador 31 em 0.1 s.**

Os mesmos testes e simulações não-lineares realizados para os controladores robustos obtidos pelo primeiro método foram realizados para os controladores obtidos através do método homotópico (ver tabela 5.4). Na figura 5.21, temos a resposta temporal da diferença de fase entre os geradores 30-36 e 39 (barramento infinito) para a condição operativa número 8 (ver tabela 5.1). Além disso, temos ainda a resposta temporal da frequência dos geradores 30, 31, 34, 35 e 39 e a resposta temporal da potência acelerante dos geradores 30-36. Nesse caso, foi aplicado um curto trifásico na barra 6 em 0.1 s, seguido da abertura da linha 6-5 após 0.1 s. Os resultados mostram que os estabilizadores robustos fizeram com que o tempo de acomodação das respostas temporais do sistema fosse inferior a 3 s. Considerando estas mesmas condições operativas, apresentamos na figura 5.22 a evolução temporal dos sinais de tensão estabilizante dos geradores 30-35 e 37. Nota-se que a atuação dos ESP's robustos é interrompida após 3 s (tempo necessário para que a estabilidade operativa do sistema seja restaurada), e os sinais de tensão são restringidos algumas vezes pelos limitadores de tensão (os limites são fixados em -0.1 p.u. e 0.1 p.u.), mas isso não afetou o desempenho geral do sistema em malha fechada. Alguns controladores obtidos através do método homotópico apresentaram parâmetros negativos, o que não é comum em aplicações práticas de sistemas de potência; contudo, as

simulações não-lineares realizadas sugerem que isso não constitui um problema nos casos considerados.

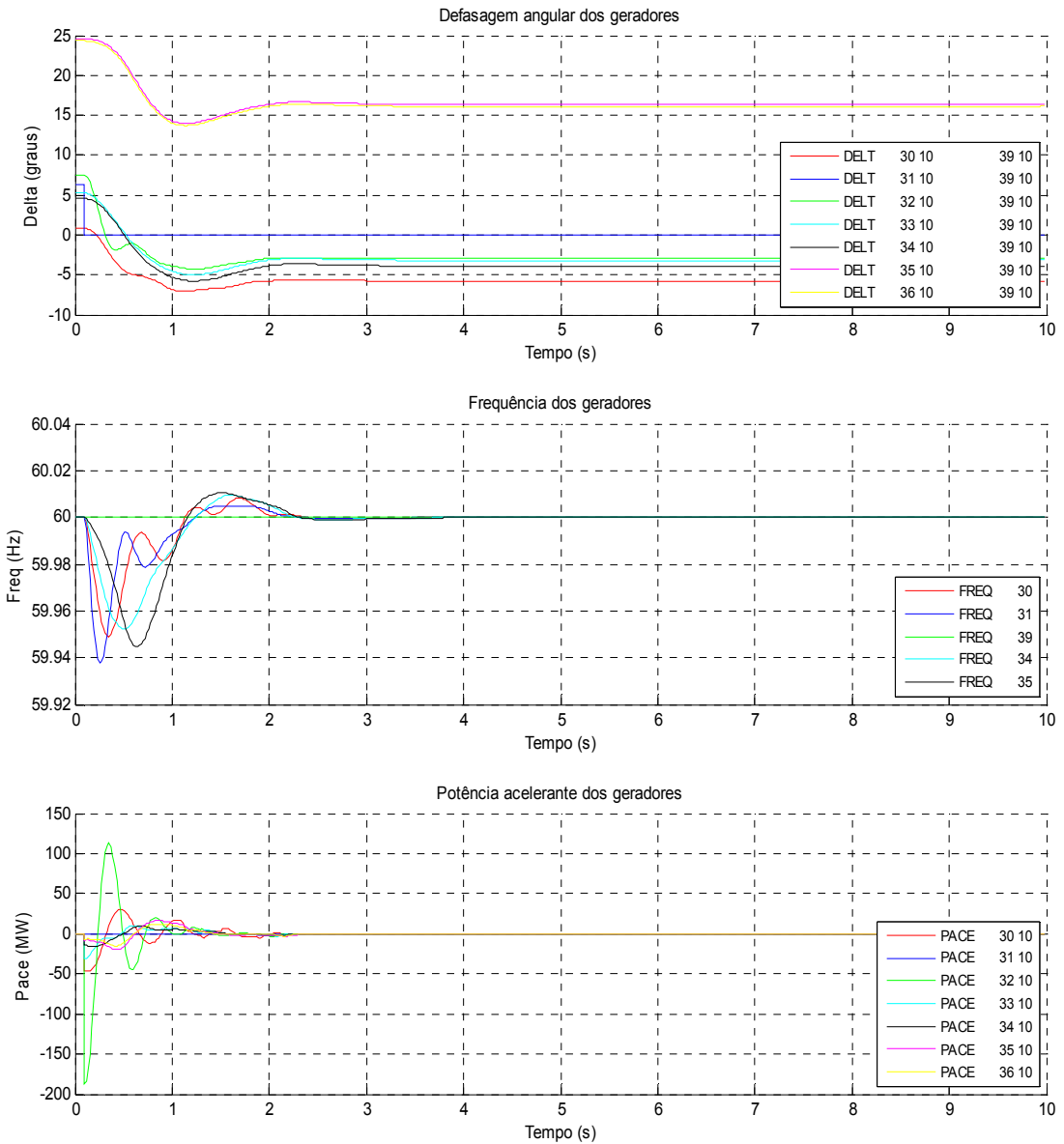


**Figura 5.21 – Evolução temporal da diferença de fase entre os geradores 30-36 e 39 para o sistema New England em malha fechada com ESP's robustos (primeiro gráfico). Evolução temporal da frequência dos geradores 30, 31, 34, 35 e 39 (segundo gráfico). Evolução temporal da potência acelerante dos geradores 30-36 (terceiro gráfico). Nas simulações, foi utilizada a condição operativa no. 8, com um curto trifásico na barra 6 em 0.1 s seguido de abertura da linha 6-5 após 0.1 s (método homotópico de controle robusto).**



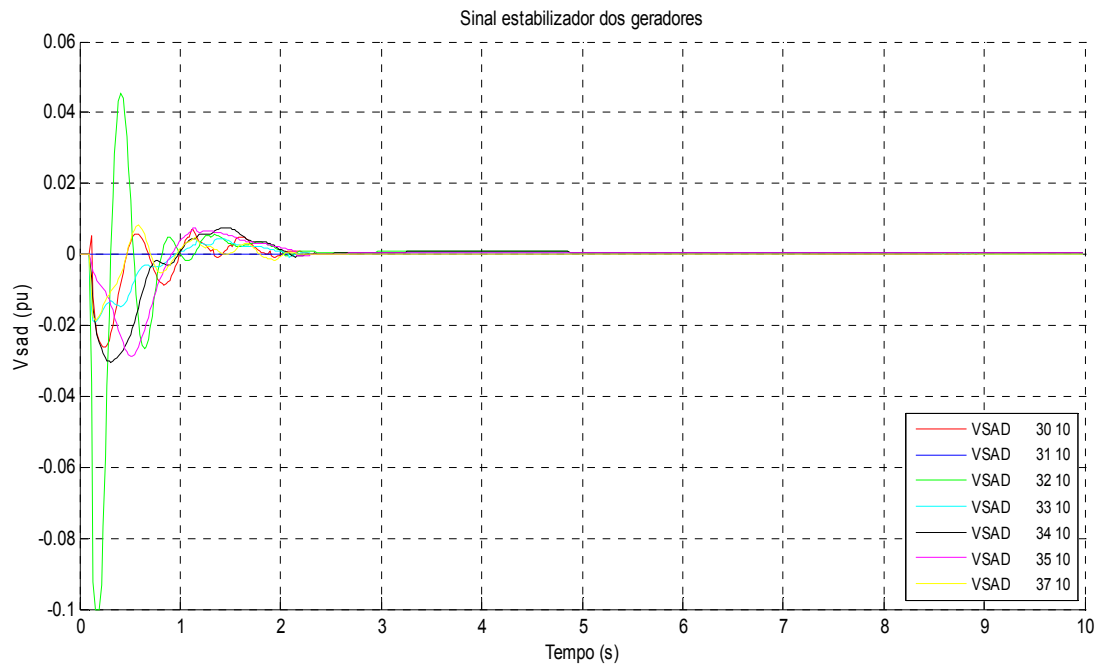
**Figura 5.22 - Evolução temporal do sinal de tensão estabilizante dos geradores 30-35 e 37, todos equipados com ESP's robustos (método homotópico), para a condição operativa no. 8, com um curto trifásico na barra 6 em 0.1 s seguido de abertura da linha 6-5 após 0.1 s.**

Para verificar o funcionamento dos ESP's robustos (dados na tabela 5.4) quando ocorre a saída de um gerador do sistema, foram realizadas outras simulações não-lineares. Na figura 5.23, temos a resposta temporal da diferença de fase entre os geradores 30-36 e 39 (barramento infinito) para a condição operativa número 8. Além disso, temos também a resposta temporal da frequência dos geradores 30, 31, 34, 35 e 39 e a resposta temporal da potência acelerante dos geradores 30-36. Nesse caso, foi considerada a abertura do gerador 31 em 0.1 s. Os resultados mostram que os estabilizadores robustos fizeram com que o tempo de acomodação das respostas temporais do sistema fosse inferior a 2.5 s. Considerando estas mesmas condições operativas, apresentamos na figura 5.24 a evolução temporal dos sinais de tensão estabilizante dos geradores 30-35 e 37. Nota-se que a atuação dos ESP's robustos é interrompida após 2.5 s (tempo necessário para que a estabilidade operativa do sistema seja restaurada), e o sinal de tensão estabilizante do gerador 32 é restringido apenas uma vez pelos limitadores de tensão, mas isso não afetou o desempenho geral do sistema em malha fechada.



**Figura 5.23 – Evolução temporal da diferença de fase entre os geradores 30-36 e 39 para o sistema New England em malha fechada com ESP's robustos (primeiro gráfico). Evolução temporal da frequência dos geradores 30, 31, 34, 35 e 39 (segundo gráfico). Evolução temporal da potência acelerante dos geradores 30-36 (terceiro gráfico). Nas simulações, foi utilizada a condição operativa no. 8, com abertura do gerador 31 em 0.1 s (método homotópico).**

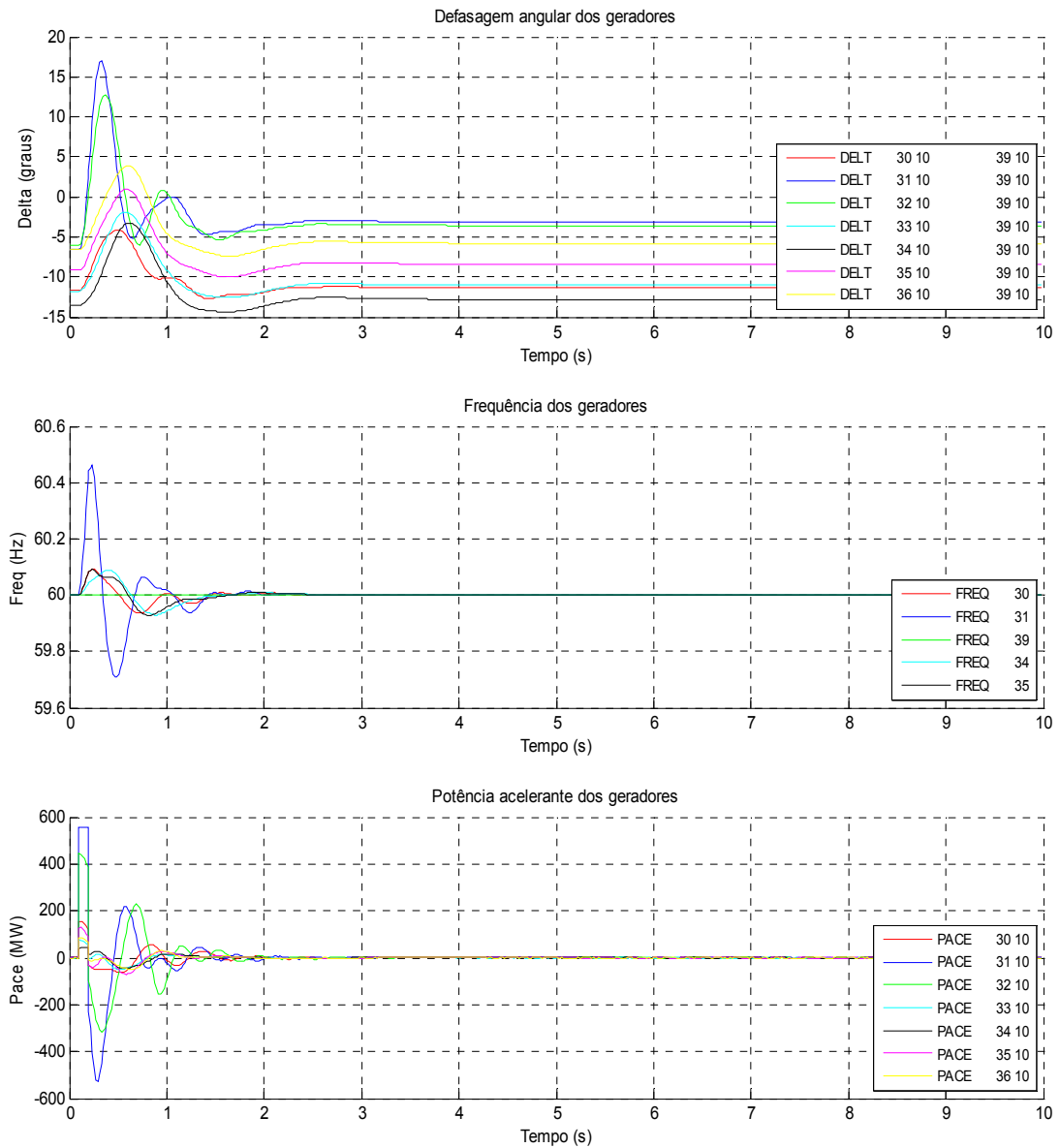




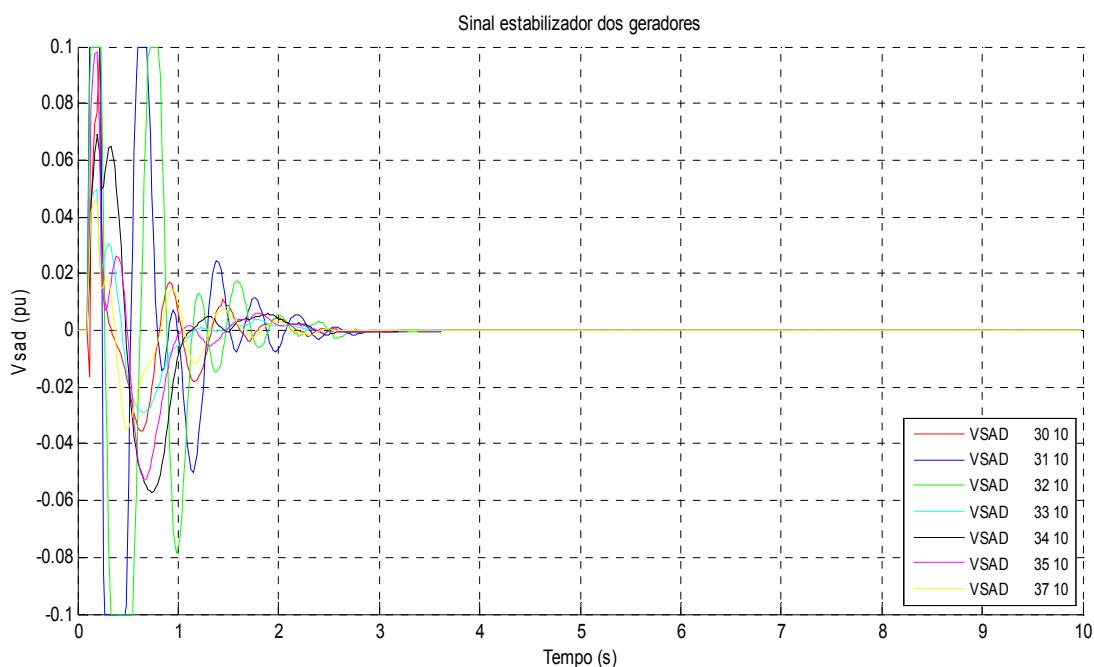
**Figura 5.24 - Evolução temporal do sinal de tensão estabilizante dos geradores 30-35 e 37, todos equipados com ESP's robustos (método homotópico), para a condição operativa no. 8, com abertura do gerador 31 em 0.1 s.**

Outros testes foram realizados com o objetivo de avaliar o funcionamento dos ESP's robustos (dados na tabela 5.4) em condições operativas não consideradas na fase de projeto. Considerando então a condição operativa número 10, foram realizadas algumas simulações não-lineares para o sistema de potência equipado com os ESP's robustos. Na figura 5.25, temos a resposta temporal da diferença de fase entre os geradores 30-36 e 39 (barramento infinito). Além disso, temos também a resposta temporal da frequência dos geradores 30, 31, 34, 35 e 39 e a resposta temporal da potência acelerante dos geradores 30-36. Nesse caso, foi aplicado um curto circuito trifásico na barra 6 em 0.1 s seguido de abertura da linha 6-5 após 0.1 s. Os resultados mostram que os estabilizadores robustos fizeram com que o tempo de acomodação das respostas temporais do sistema fosse inferior a 3 s. Considerando estas mesmas condições operativas, apresentamos na figura 5.26 a evolução temporal dos sinais de tensão estabilizante dos geradores 30-35 e 37. Nota-se que a atuação dos ESP's robustos é interrompida após 3 s (tempo necessário para que a estabilidade operativa do sistema seja restaurada), e os sinais de tensão estabilizante são restringidos algumas vezes pelos limitadores de tensão, o que não afetou o desempenho geral do sistema em malha fechada. Assim, conclui-se que o desempenho do sistema de potência em malha fechada (com os

controladores gerados pelo método homotópico) é satisfatório para diversas condições operativas e perturbações.

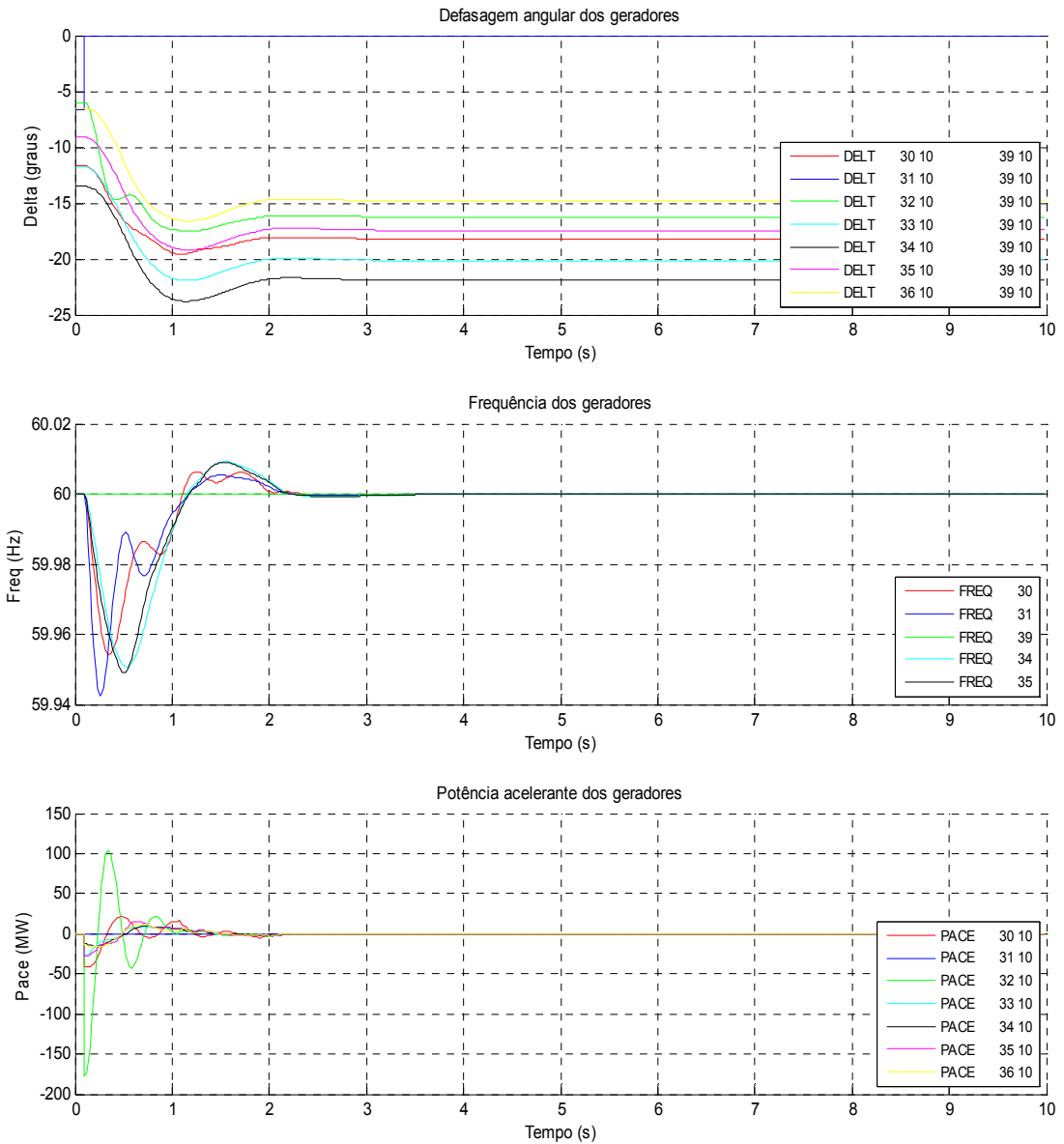


**Figura 5.25 –** Evolução temporal da diferença de fase entre os geradores 30-36 e 39 para o sistema New England em malha fechada com ESP's robustos (primeiro gráfico). Evolução temporal da frequência dos geradores 30, 31, 34, 35 e 39 (segundo gráfico). Evolução temporal da potência acelerante dos geradores 30-36 (terceiro gráfico). Nas simulações, foi utilizada a condição operativa no. 10, com um curto trifásico na barra 6 em 0.1 s seguido de abertura da linha 6-5 após 0.1 s (método homotópico de controle robusto).

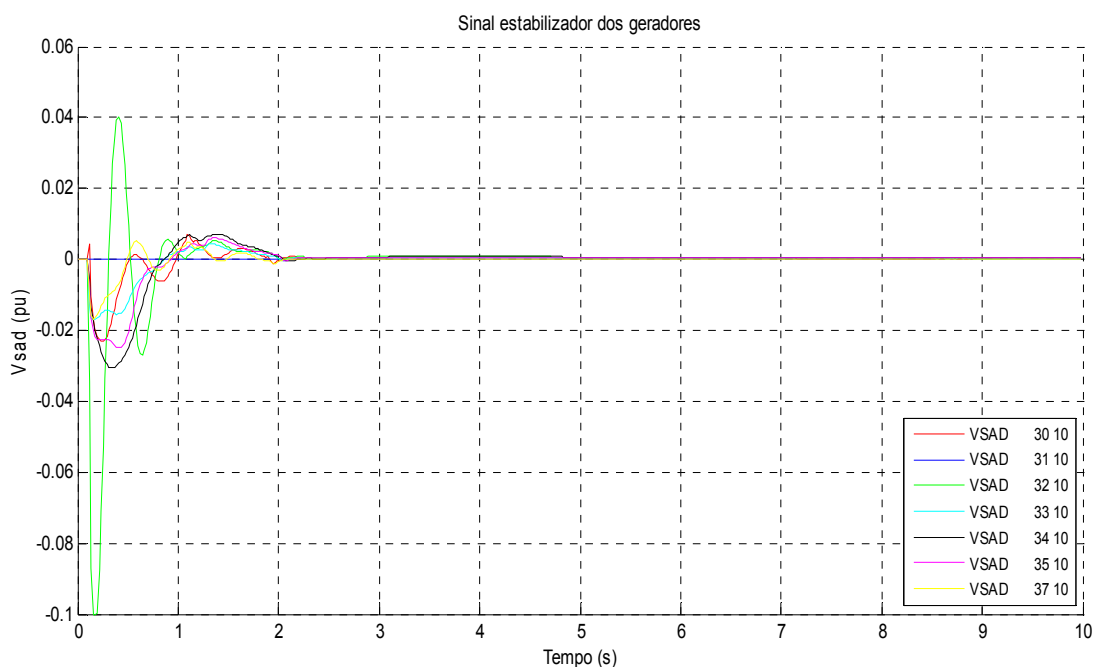


**Figura 5.26 - Evolução temporal do sinal de tensão estabilizante dos geradores 30-35 e 37, todos equipados com ESP's robustos (método homotópico), para a condição operativa no. 10, com um curto trifásico na barra 6 em 0.1 s seguido de abertura da linha 6-5 após 0.1 s.**

O último teste feito com os ESP's robustos (dados na tabela 5.4) consiste em verificar as respostas temporais do sistema em malha fechada para a condição operativa número 10, com abertura do gerador 31 no instante 0.1 s. As simulações não-lineares são apresentadas na figura 5.27, na qual temos a resposta temporal da diferença de fase entre os geradores 30-36 e 39 (barramento infinito). Nesta figura, temos também a resposta temporal da frequência dos geradores 30, 31, 34, 35 e 39 e a resposta temporal da potência acelerante dos geradores 30-36. Os resultados mostram que os estabilizadores robustos fizeram com que o tempo de acomodação das respostas temporais do sistema fosse inferior a 2.5 s. Considerando estas mesmas condições operativas, apresentamos na figura 5.28 a evolução temporal dos sinais de tensão estabilizante dos geradores 30-35 e 37. Fica evidente que a atuação dos ESP's robustos é interrompida após 2.5 s (tempo necessário para que a estabilidade operativa do sistema seja restaurada), e o sinal de tensão estabilizante do gerador 32 é restringido apenas uma vez pelos limitadores de tensão, o que não afetou o desempenho global do sistema em malha fechada.



**Figura 5.27 – Evolução temporal da diferença de fase entre os geradores 30-36 e 39 para o sistema New England em malha fechada com ESP's robustos (primeiro gráfico). Evolução temporal da frequência dos geradores 30, 31, 34, 35 e 39 (segundo gráfico). Evolução temporal da potência acelerante dos geradores 30-36 (terceiro gráfico). Nas simulações, foi utilizada a condição operativa no. 10, com abertura do gerador 31 em 0.1 s (método homotópico).**



**Figura 5.28 - Evolução temporal do sinal de tensão estabilizante dos geradores 30-35 e 37, todos equipados com ESP's robustos (método homotópico), para a condição operativa no. 10, com abertura do gerador 31 em 0.1 s.**

### 5.1.2. Modelo montado no MATLAB

O caso apresentado aqui é novamente o sistema New England de 39 barras, que já foi descrito anteriormente. Contudo, neste caso o modelo linearizado do sistema de potência foi montado através de equações diferenciais descritas e simuladas no MATLAB; aqui, os ganhos dos reguladores de tensão foram os seguintes para os geradores 30 a 38, respectivamente: 5, 6.2, 5, 5, 40, 5, 40, 5 e 40. A tabela 5.6 apresenta as 3 condições de operação utilizadas neste caso. O modelo montado no MATLAB está baseado nas equações (3.16), (3.17), (3.18), (3.19), (3.20), (3.28), (3.37), (3.38), (3.41) e (3.42).

CONDIÇÕES	CARACTERÍSTICAS
1	Caso Base
2	Saída das linhas: 3-18 e 25-26
3	Aumento de carga de 50 % na barra 16 e 50 % na barra 21 e saída da linha 21-22

**TABELA 5.6 – CONDIÇÕES E CARACTERÍSTICAS DOS 3 PONTOS DE OPERAÇÃO PARA O SISTEMA NEW ENGLAND DE 39 BARRAS (II)**

Os autovalores do sistema de potência antes da aplicação dos controladores são mostrados na figura 5.29. Como pode ser notado, há muitos autovalores instáveis e fracamente amortecidos.

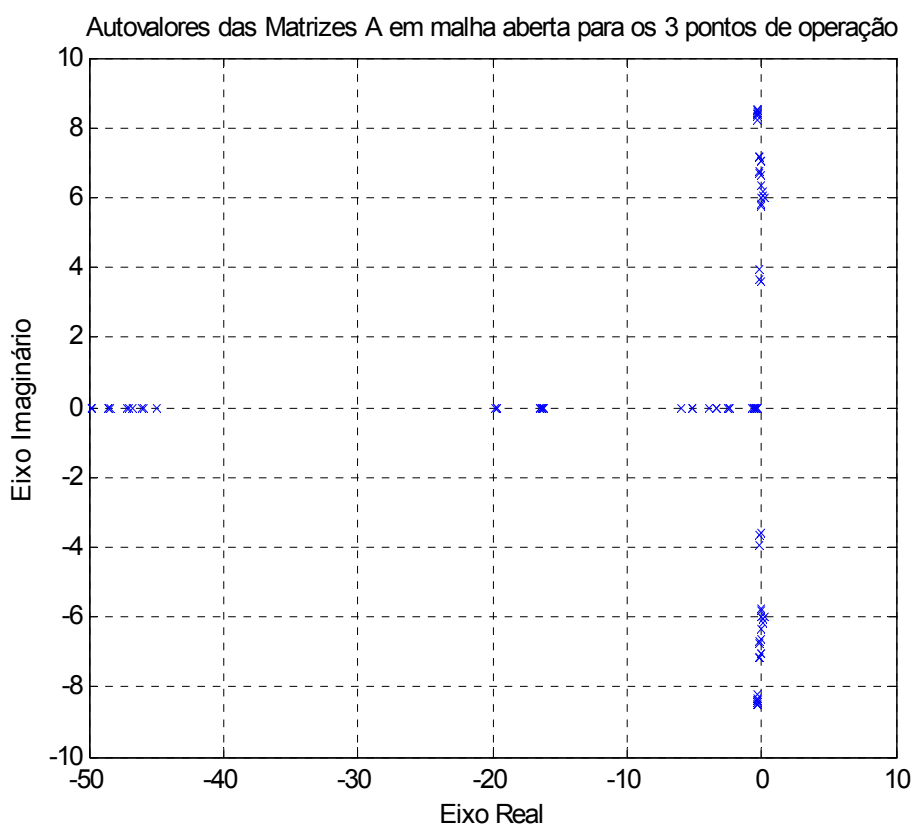
Para aplicar a metodologia descrita na seção 4.4 a esse sistema de potência, consideraremos as condições de operação dadas na tabela 5.6 (essas condições foram utilizadas para construir 3 modelos diferentes do sistema de potência no espaço de estados, de acordo com as equações descritas no capítulo 3) e o seguinte índice de desempenho (amortecimento mínimo dos autovalores do sistema em malha fechada):

$$\xi = \cos \theta = 0.3$$

Além disso, os dois pólos dos controladores foram fixados em  $s = -100$  (ver equação (4.1)); seus dois zeros foram deixados livres, bem como seu ganho estático, de acordo com a equação (4.1). O problema de minimização robusta é aquele definido na seção 4.4, sujeito a (4.39), (4.40), (4.41) e (4.42).

Neste caso, a igualdade (4.27) novamente não pôde ser estabelecida de modo exato. Para que ela fosse exatamente estabelecida, dever-se-ia impor uma estrutura particular à matriz  $Q$ . Em primeiro lugar, ela deve ser bloco diagonal, de modo a originar controladores descentralizados. Além disso, para que (4.27) fosse satisfeita, alguns elementos internos a cada bloco da matriz  $Q$  deveriam valer zero. Essa última restrição, neste caso, tornou o problema LMI infactível. Contudo, foi possível obter uma boa aproximação da matriz de ganhos do controlador sem zerar esses elementos internos aos blocos da matriz  $Q$ .

O software usado para executar o algoritmo de minimização foi o LMI Toolbox do MATLAB. A função **mincx** atingiu a convergência em aproximadamente 400 iterações (o que equivale a 2 horas de processamento num computador equipado com processador Pentium 4 2.4 GHz e 1 GB de memória RAM). Para avaliar o desempenho do sistema em malha fechada, foram plotados todos os autovalores das matrizes A em malha fechada (ver equação (4.18)) para os 3 pontos de operação, conforme se pode observar na figura 5.30.



**Figura 5.29 – Autovalores do sistema New England de 39 barras (II) em malha aberta para os 3 pontos de operação**

Detalhando essa figura nas proximidades do eixo imaginário, obtemos a figura 5.31. Pode-se perceber que a especificação de desempenho foi satisfeita, para todos os pontos de operação, e a figura 5.31 mostra ainda que o sistema atingiu um fator de amortecimento mínimo de 32%.

Uma vez que a matriz de ganhos do controlador foi obtida de modo aproximado, pode-se verificar matematicamente que os controladores robustos gerados posicionam os autovalores do sistema em malha fechada na região adequada do plano complexo (definida pelo fator de

amortecimento de 30 %). Para isso, basta encontrarmos uma matriz  $Q$  positiva definida que satisfaça as LMI's abaixo:

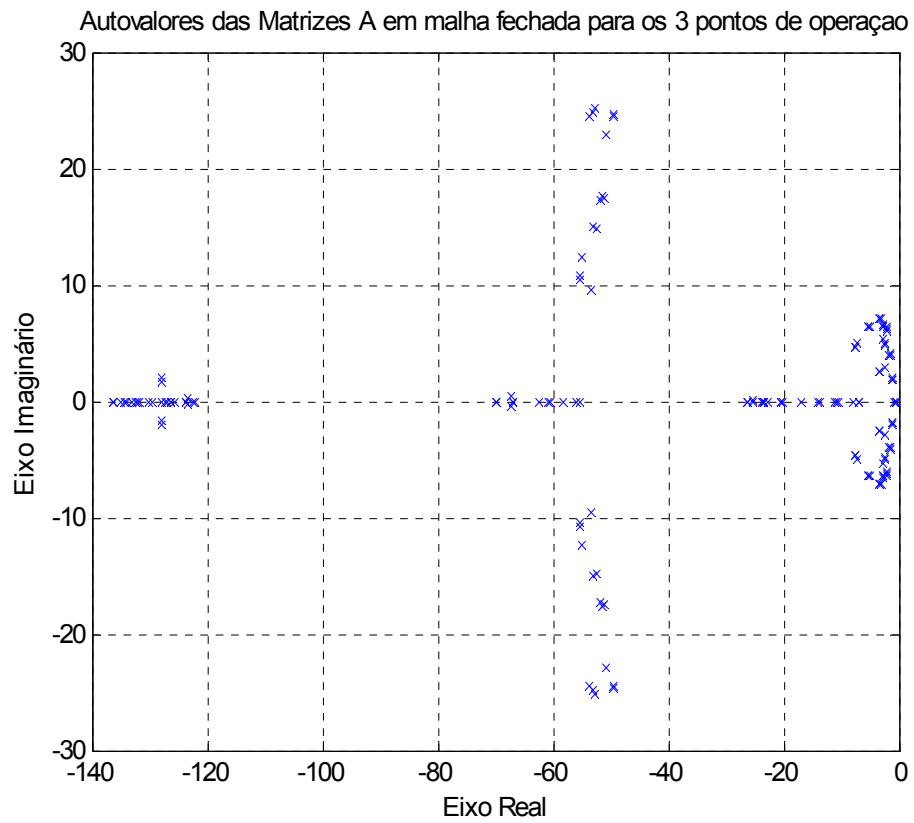
$$\begin{bmatrix} \sin \theta(A_{cl,i} \cdot Q + Q \cdot A_{cl,i}^T) & \cos \theta(A_{cl,i} \cdot Q - Q \cdot A_{cl,i}^T) \\ * & \sin \theta(A_{cl,i} \cdot Q + Q \cdot A_{cl,i}^T) \end{bmatrix} < 0, \text{ para } i = 1, \dots, m.$$

$$A_{cl,i} = A_{m,i} + B_m K_C C_m$$

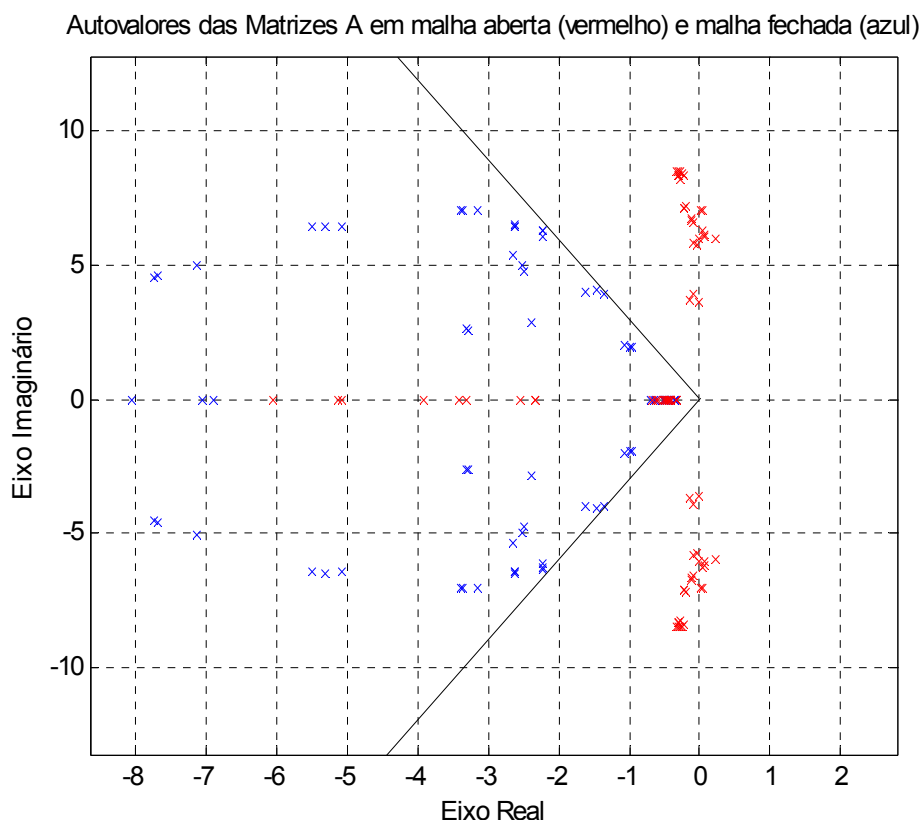
Deve-se substituir a matriz  $K_C$  obtida através do algoritmo de controle robusto nas LMI's acima. Neste caso, resolvemos estas LMI's (através do LMI *toolbox* do MATLAB), para os três pontos de operação, encontrando como solução do problema uma matriz  $Q$  positiva definida (essa matriz não é esparsa). Dessa forma, está verificado que os controladores obtidos posicionam de fato os autovalores do sistema de potência na região especificada do plano complexo (região cônica definida pelo fator de amortecimento mínimo de 30 %).

Os diagramas de Bode para os nove controladores obtidos são mostrados na figura 5.32. Note-se que os controladores obtidos têm um comportamento típico de compensadores por avanço de fase, que são comumente utilizados nos sistemas elétricos de potência atualmente. Os parâmetros das funções de transferência dos 9 controladores são apresentados na tabela 5.7.





**Figura 5.30 – Autovalores do sistema New England de 39 barras (II) em malha fechada para os 3 pontos de operação**

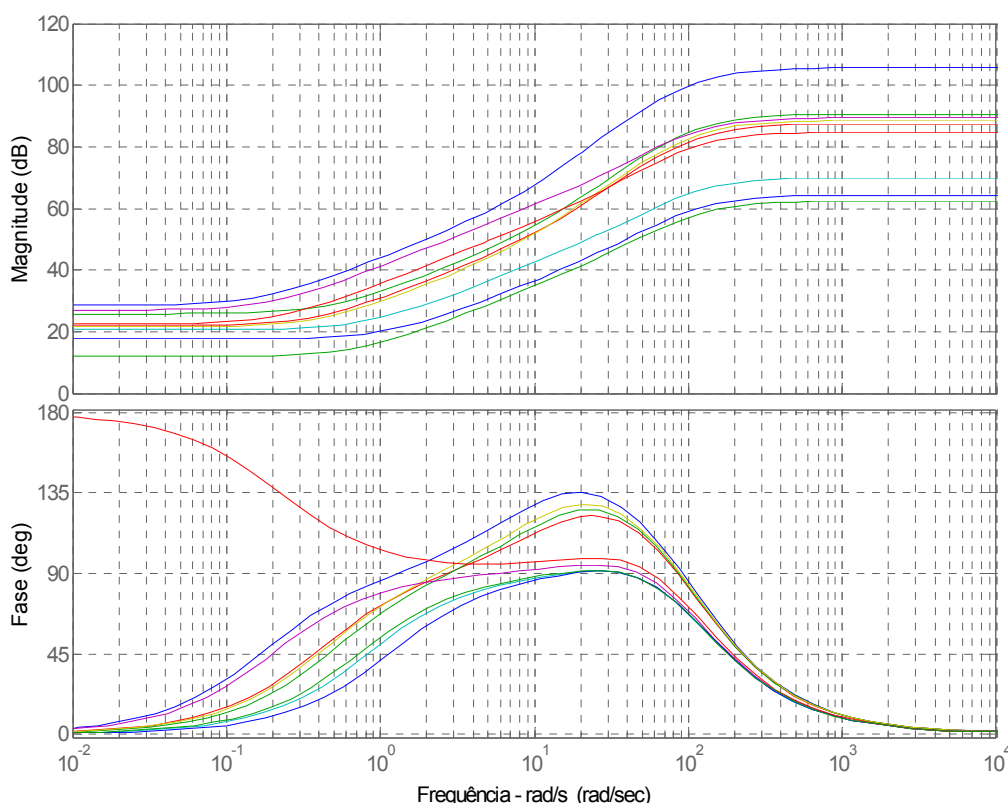


**Figura 5.31 – Autovalores do sistema New England de 39 barras (II) em malha aberta (vermelho) e malha fechada (azul) para os 3 pontos de operação (detalhe nas proximidades do eixo imaginário). As duas linhas delimitam a região do plano complexo na qual o amortecimento dos autovalores do sistema é de 32 %**

O formato da função de transferência dos controladores descentralizados apresentados na tabela 5.7 é dado na equação (5.1).

Gerador	parâmetro $a_i$	parâmetro $b_i$	parâmetro $c_i$
30	19.24	157.90	26.49
31	2.386	33.75	12.58
32	3.389	41.81	19.51
33	2.702	29.42	11.84
34	0.3153	13.21	10.80
35	2.968	113.50	22.40
36	0.1643	6.749	7.571
37	1.738	59.01	-13.21
38	0.1328	5.527	3.943

**TABELA 5.7 – PARÂMETROS DOS CONTROLADORES ROBUSTOS PARA O SISTEMA NEW ENGLAND DE 39 BARRAS (II)**



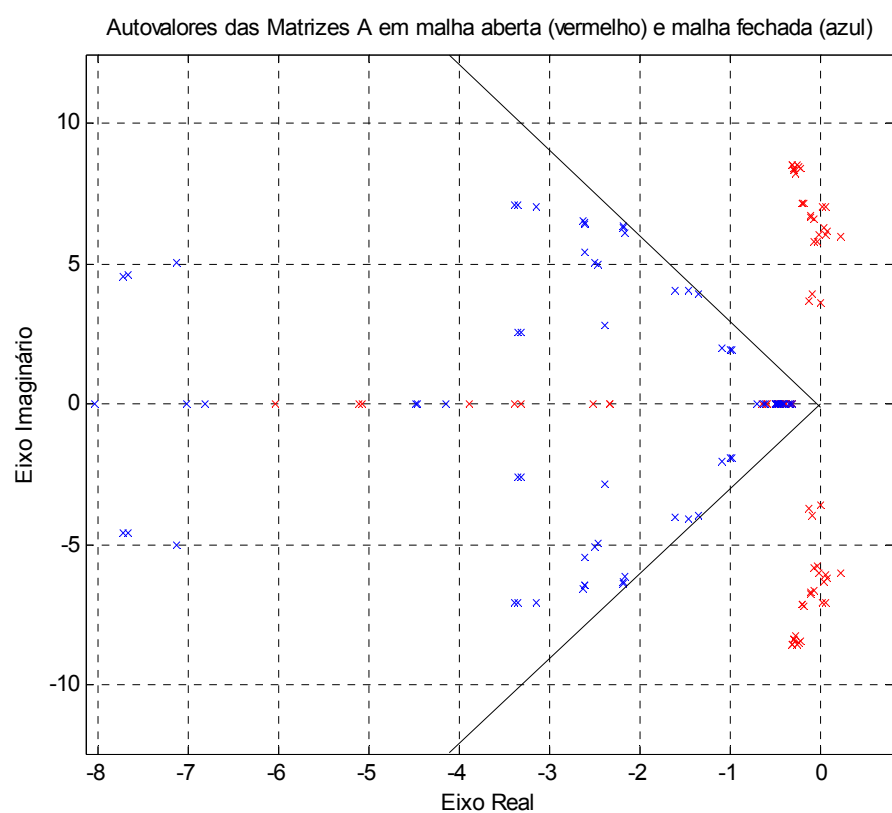
**Figura 5.32 – Diagramas de Bode de Ganho e Fase dos 9 controladores robustos obtidos para o sistema New England de 39 barras (II)**

A norma da matriz de ganhos do controlador ( $K_C$ ) é 36910898. Os valores finais obtidos para as variáveis  $k_Q$  e  $k_N$  foram de 150397 e 76142, respectivamente.

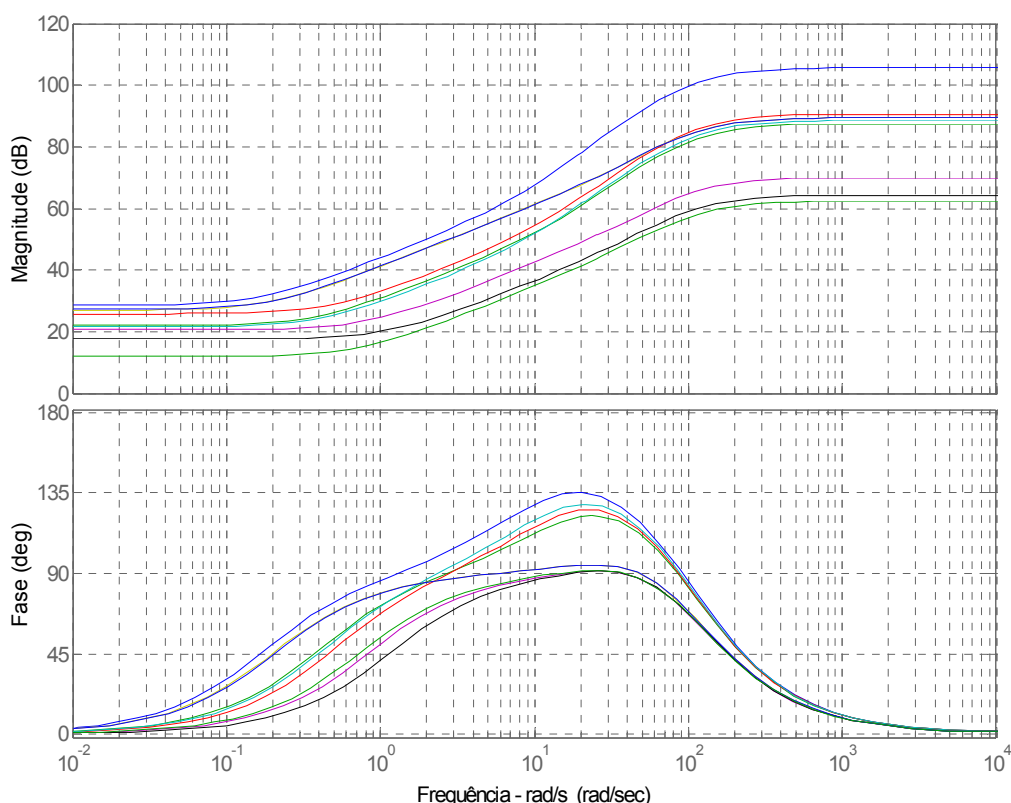
Conforme se pode notar na tabela 5.7, o parâmetro  $c_i$  do controlador associado ao gerador 37 é negativo. Nos sistemas elétricos de potência, não é usual utilizarmos ESP's com parâmetros negativos, o que poderia tornar inviável a aplicação do controlador proposto. Observando ainda a figura 5.32, nota-se que a curva de Bode de fase associada a este controlador assumiu um formato diferente das curvas dos outros controladores. Para contornar este problema, o ESP associado ao gerador 37 foi substituído por um ESP idêntico àquele obtido para o gerador 35 (pois estes controladores possuem curvas de fase semelhantes para frequências acima de 4 rad/s). Considerando esta alteração heurística no sistema de controle, apresentamos os autovalores do sistema em malha fechada na figura 5.33. Pode-se notar que o amortecimento mínimo do sistema caiu para 31.5 %, mas ainda está bem próximo do que foi obtido antes da substituição.

Os diagramas de Bode para o sistema após a substituição do ESP conectado ao gerador 37 são mostrados na figura 5.34. Agora todos os controladores apresentam curvas típicas de avançadores de fase, conforme é feito nos sistemas de potência atualmente quando o sinal de realimentação utilizado nos ESP's é a velocidade de rotação do rotor da máquina síncrona.

Essa etapa adicional de projeto pode ser realizada visando uma aplicação eficaz dos controladores obtidos, e a substituição de um controlador no sistema não afetou de modo significativo o seu desempenho global.



**Figura 5.33 – Autovalores do sistema New England de 39 barras (II) em malha aberta (vermelho) e malha fechada (azul) para os 3 pontos de operação após a substituição do ESP 37 (detalhe nas proximidades do eixo imaginário). As duas linhas delimitam a região do plano complexo na qual o amortecimento dos autovalores do sistema é de 31 %**



**Figura 5.34 – Diagramas de Bode de Ganho e Fase dos 9 controladores robustos obtidos para o sistema New England de 39 barras (II) após a substituição do ESP 37**

## 5.2. Sistema Teste New England de 69 barras

### 5.2.1. Primeiro modelo montado no MATLAB

O caso tratado agora é o sistema New England de 69 barras, que é formado por 16 máquinas síncronas com estabilizadores de sistemas de potência; mais detalhes deste sistema podem ser encontrados em (Pal e Chaudhuri, 2005). Os reguladores automáticos de tensão IEEE tipo I foram alterados para reguladores estáticos com constantes de tempo fixas (0.02s). Os ganhos dos reguladores foram ajustados para 40. A tabela 5.8 apresenta as 3 condições de operação utilizadas neste caso. O primeiro modelo montado para o sistema New England de 69 barras está baseado nas equações (3.16), (3.17), (3.18), (3.19), (3.21), (3.22), (3.28), (3.37), (3.38), (3.41) e (3.42).

CONDIÇÕES	CARACTERÍSTICAS
1	Caso Base
2	Aumento de 100 % na carga da barra 18; aumento de 100 % na carga da barra 41 e saída das linhas 41-40 e 43-44
3	Aumento de 67 % na carga da barra 17; aumento de 80 % na carga da barra 42 e saída das linhas 34-35 e 59-60

**TABELA 5.8 – CONDIÇÕES E CARACTERÍSTICAS DOS 3 PONTOS DE OPERAÇÃO PARA O SISTEMA NEW ENGLAND DE 69 BARRAS**

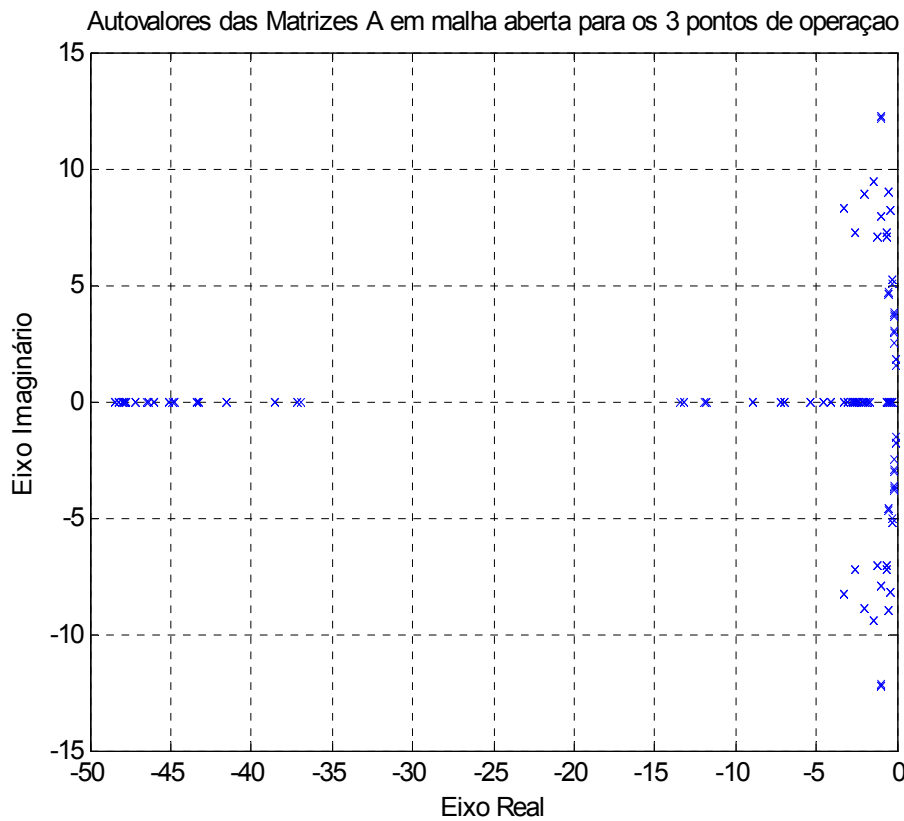
Os autovalores do sistema de potência antes da aplicação dos controladores são mostrados na figura 5.35. Como pode ser notado, todos os autovalores são estáveis, mas há alguns autovalores fracamente amortecidos.

A fim de aplicar o algoritmo de controle robusto descrito na seção 4.4 a esse sistema de potência, consideraremos as condições de operação dadas na tabela 5.8 (essas condições foram utilizadas para construir 3 modelos diferentes do sistema de potência no espaço de estados, de acordo com as equações descritas no capítulo 3) e o seguinte índice de desempenho (amortecimento mínimo dos autovalores do sistema em malha fechada):

$$\xi = \cos \theta = 0.09$$

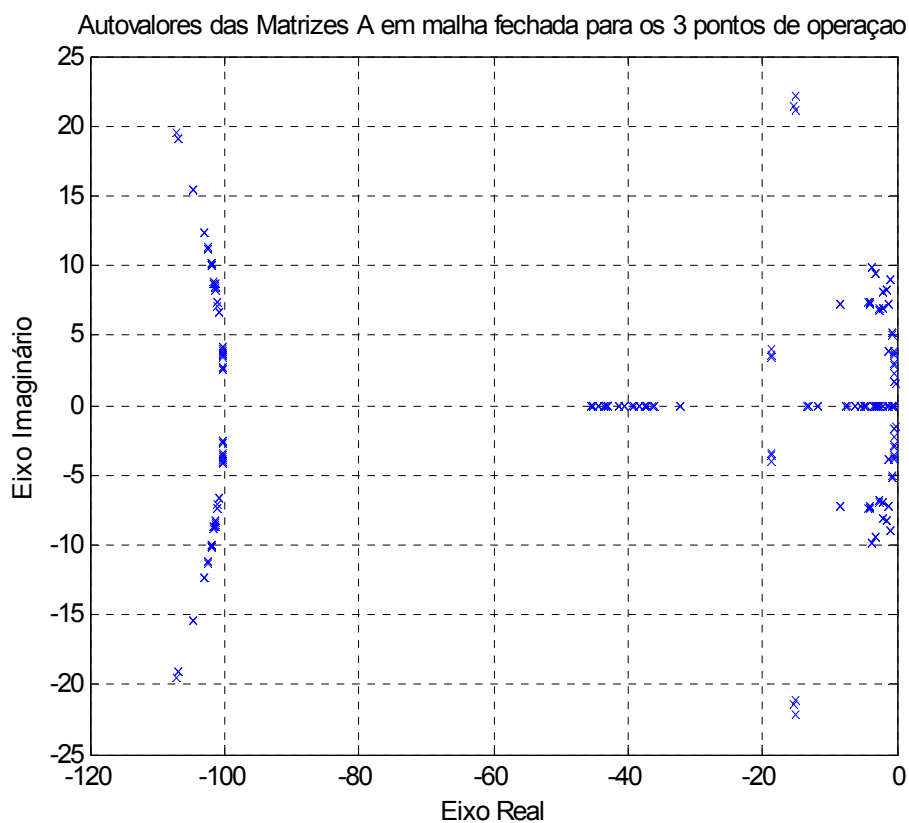
Os dois pólos dos controladores foram fixados em  $s = -100$  (ver equação (4.1)); seus dois zeros foram deixados livres, bem como seu ganho estático. O problema de minimização robusta é aquele definido na seção 4.4, sujeito a (4.39), (4.40), (4.41) e (4.42).

Novamente, a igualdade (4.27) não pôde ser estabelecida de modo exato. Para que (4.27) fosse satisfeita, alguns elementos internos a cada bloco da matriz  $Q$  deveriam valer zero. Essa restrição, neste caso, tornou o problema LMI ineficaz. Contudo, foi possível obter uma boa aproximação da matriz de ganhos do controlador sem zerar esses elementos internos aos blocos da matriz  $Q$ .



**Figura 5.35 - Autovalores do sistema New England de 69 barras em malha aberta para as 3 condições de operação**

O software utilizado para executar o algoritmo de minimização foi o LMI Toolbox do MATLAB. O algoritmo de controle robusto atingiu a convergência em aproximadamente 500 iterações da função **mincx** (o que equivale a 4.5 horas de processamento num computador equipado com processador Pentium 4 2.4 GHz e 1 GB de memória RAM). Para avaliar o desempenho do sistema em malha fechada, foram plotados todos os autovalores das matrizes A em malha fechada (ver equação (4.18)) para os 3 pontos de operação, conforme se pode observar na figura 5.36.



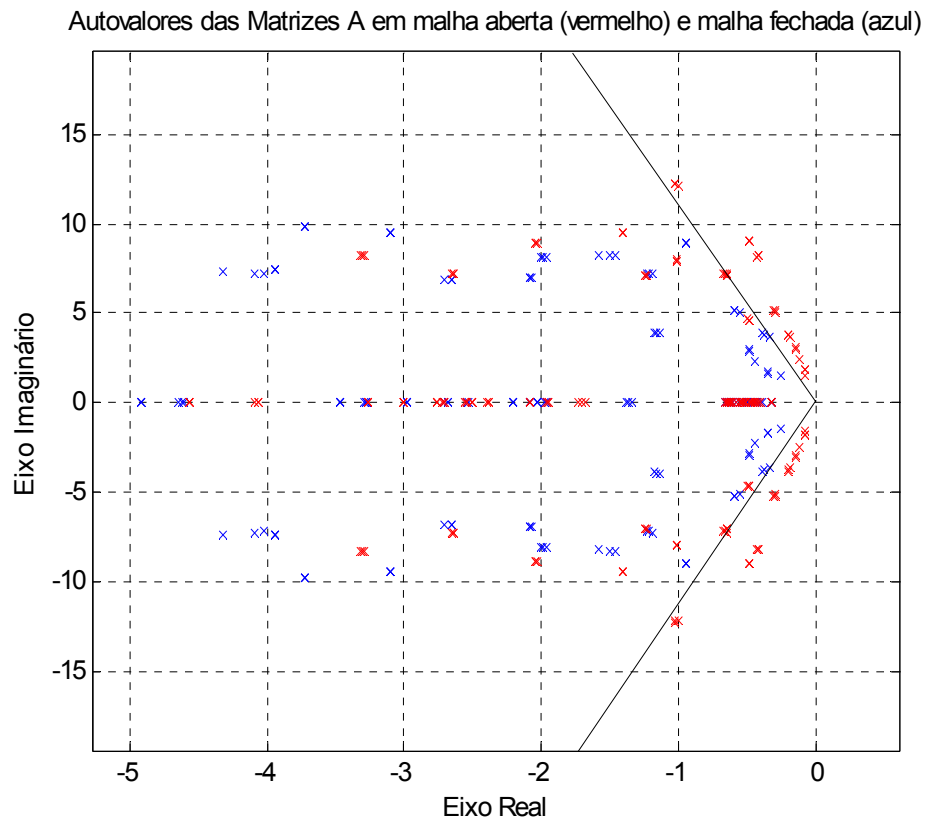
**Figura 5.36 – Autovalores do sistema New England de 69 barras em malha fechada para os 3 pontos de operação**

Detalhando essa figura nas proximidades do eixo imaginário, obtemos a figura 5.37. Pode-se perceber que a especificação de desempenho foi satisfeita, para todos os pontos de operação. O sistema em malha fechada apresenta um fator de amortecimento mínimo de 9.3%.

Os diagramas de Bode para os 16 controladores obtidos são mostrados na figura 5.38. Note-se que os controladores obtidos têm um comportamento típico de compensadores por avanço de fase.

Os parâmetros das funções de transferência dos 16 controladores são apresentados na tabela 5.9. O formato da função de transferência dos controladores descentralizados apresentados nesta tabela é aquele dado na equação (5.1).

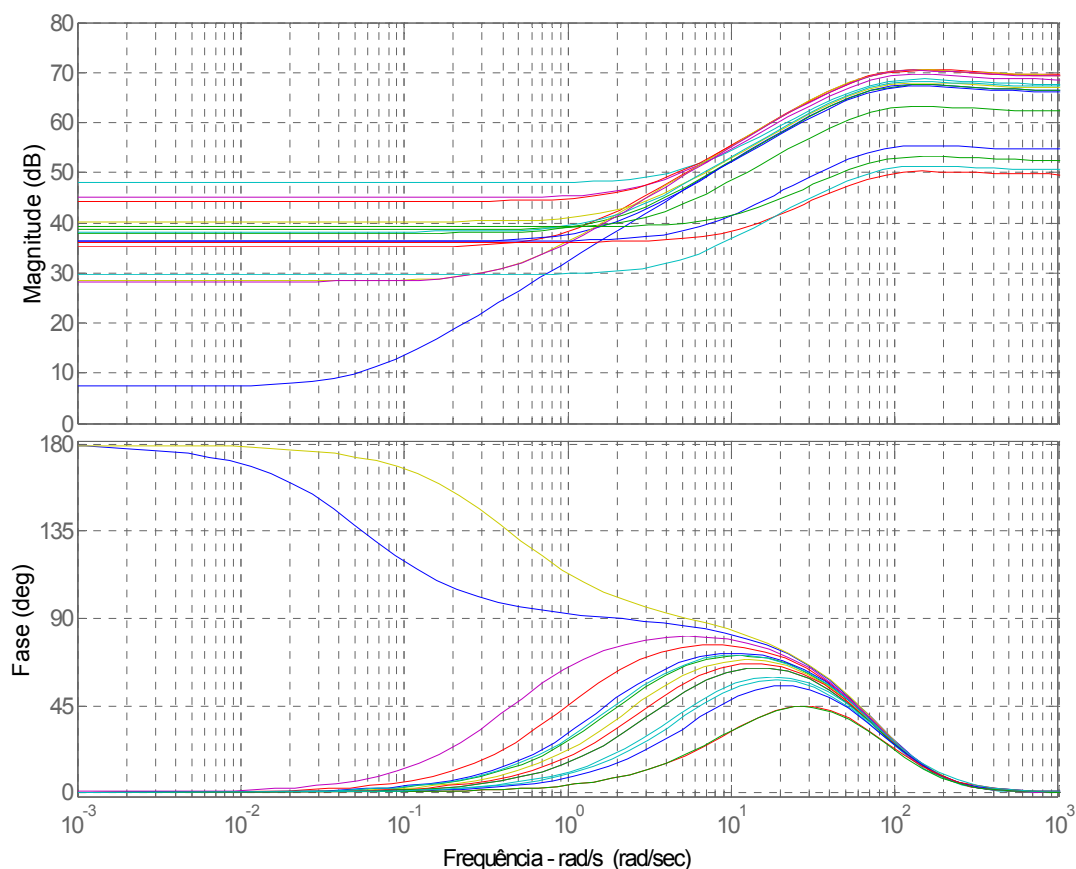




**Figura 5.37 – Autovalores do sistema New England de 69 barras em malha aberta (vermelho) e malha fechada (azul) para os 3 pontos de operação (detalhe nas proximidades do eixo imaginário). As duas linhas delimitam a região do plano complexo na qual o amortecimento dos autovalores do sistema é de 9 %**

Gerador	parâmetro $a_i$	parâmetro $b_i$	parâmetro $c_i$
1	0.2086	41.44	-2.331
2	0.2959	59.17	56.700
3	0.2082	41.42	78.720
4	0.2198	43.81	103.000
5	0.2385	47.67	248.400
6	0.2659	53.18	178.100
7	0.2013	40.09	64.980
8	0.2904	58.09	163.800
9	0.1286	25.54	85.760
10	0.2938	58.76	-26.180
11	0.2266	45.06	81.490
12	0.2882	57.59	26.000
13	0.05351	10.30	65.770
14	0.03011	5.721	63.850
15	0.04178	8.210	91.130
16	0.03375	6.371	30.410

**TABELA 5.9 – PARÂMETROS DOS CONTROLADORES ROBUSTOS PARA O SISTEMA NEW ENGLAND DE 69 BARRAS**



**Figura 5.38 – Diagramas de Bode de Ganho e Fase dos 16 controladores robustos obtidos para o sistema New England de 69 barras**

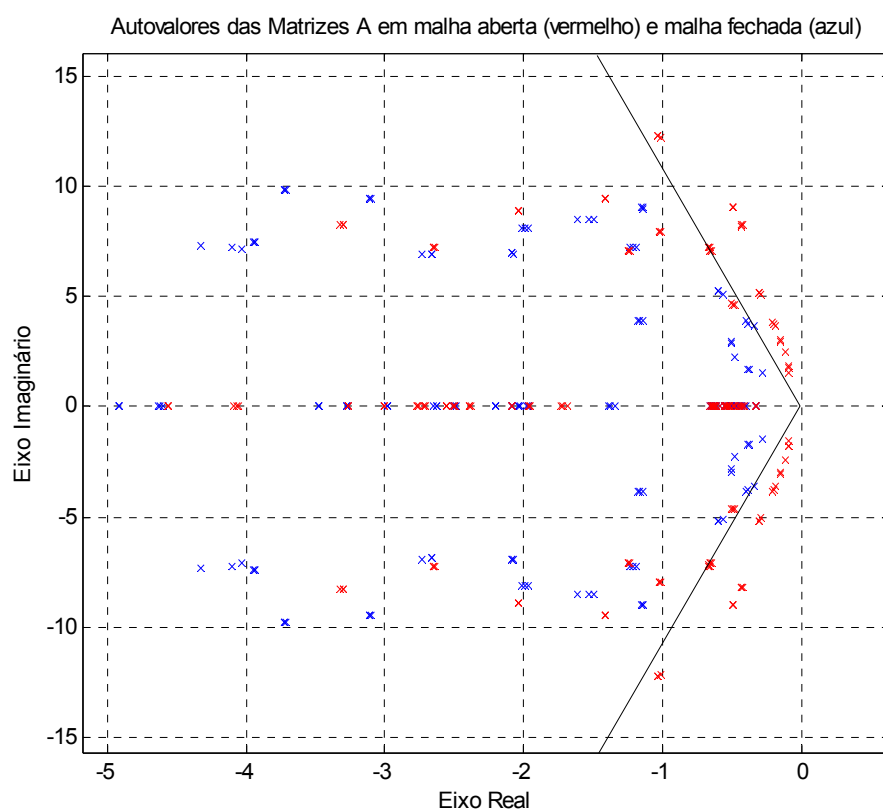
A norma da matriz de ganhos do controlador ( $K_C$ ) é 4173. Os valores finais obtidos para as variáveis  $k_Q$  e  $k_N$  foram de 426.25 e 95.87, respectivamente.

Pode-se notar na tabela 5.9 que os parâmetros  $c_i$  dos controladores associados aos geradores 1 e 10 são negativos. Nos sistemas elétricos de potência, não é usual utilizarmos ESP's com parâmetros negativos, o que poderia tornar inviável a aplicação do controlador proposto. Observando ainda a figura 5.38, nota-se que as curvas de Bode de fase associadas a estes controladores assumiram formatos diferentes das curvas dos outros controladores. Para contornar este problema, os ESP's associados aos geradores 1 e 10 foram substituídos por ESP's idênticos àquele obtido para o gerador 2 (pois estes controladores possuem curvas de fase semelhantes para frequências acima de 4 rad/s). Considerando esta alteração heurística no

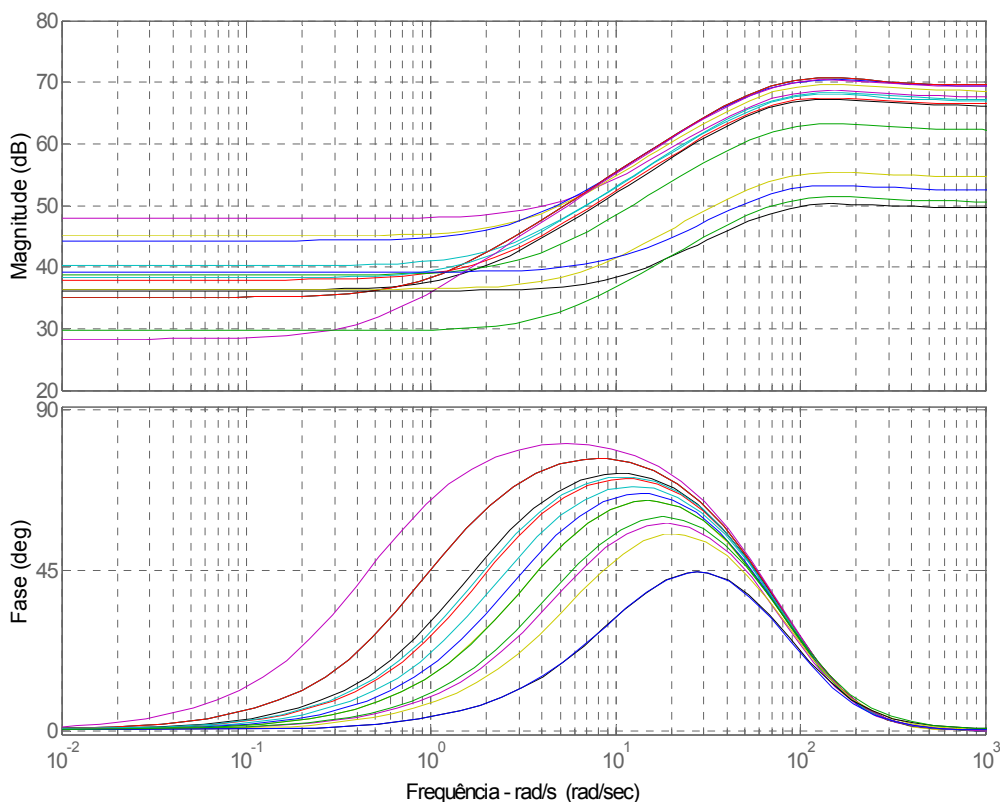
sistema de controle, apresentamos os autovalores do sistema em malha fechada na figura 5.39. Pode-se notar que o amortecimento mínimo do sistema permaneceu em 9 %.

Os diagramas de Bode para o sistema após a substituição dos ESP's conectados aos geradores 1 e 10 são mostrados na figura 5.40. Agora todos os controladores apresentam curvas típicas de avançadores de fase, conforme é feito nos sistemas de potência atualmente.

Essa etapa adicional de projeto pode ser realizada visando uma aplicação eficaz dos controladores obtidos, e a substituição de dois controladores no sistema não afetou o seu desempenho global.



**Figura 5.39 – Autovalores do sistema New England de 69 barras em malha aberta (vermelho) e malha fechada (azul) para os 3 pontos de operação após a substituição dos ESP's 1 e 10 (detalhe nas proximidades do eixo imaginário). As duas linhas delimitam a região do plano complexo na qual o amortecimento dos autovalores do sistema é de 9 %**



**Figura 5.40 – Diagramas de Bode de Ganho e Fase dos 16 controladores robustos obtidos para o sistema New England de 69 barras após a substituição dos ESP's 1 e 10**

A este mesmo modelo do sistema New England foi aplicado outro algoritmo de controle robusto, dado na seção 4.5. Para aplicar o método descrito na seção 4.5 a esse sistema de potência, consideramos novamente as condições de operação dadas na tabela 5.8 e o seguinte índice de desempenho (amortecimento mínimo dos autovalores do sistema em malha fechada):

$$\xi = \cos \theta = 0.09$$

Além disso, os dois pólos dos controladores foram fixados em  $s = -100$ . O algoritmo de controle robusto para solução de BMI's através do método homotópico é aquele definido na seção 4.5.

O software utilizado para executar o algoritmo de controle robusto foi o LMI Toolbox do MATLAB; para resolver problemas de viabilidade envolvendo LMI's, foi usada a função

**feasp**. O algoritmo de controle robusto atingiu o critério de parada em 30 iterações (para cada iteração do algoritmo de controle, são necessárias em média 200 iterações da função **feasp**). Os valores de entrada do algoritmo de controle foram os seguintes:

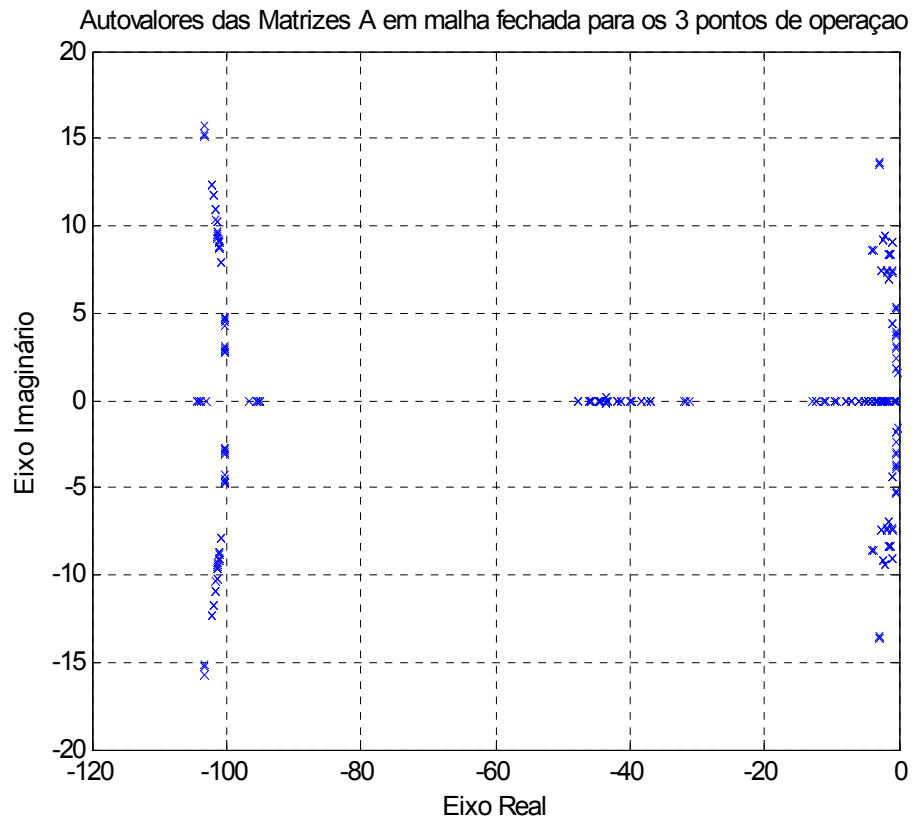
$$\varepsilon = 0.001 \quad \text{e} \quad \Delta\theta = 0.05$$

Foi aplicado um fator de ajuste multiplicativo de 0.1 nas atualizações da matriz de ganhos do controlador ( $\Delta K$ ). A utilização deste fator de ajuste permitiu a convergência do algoritmo, uma vez que os incrementos de atualização da matriz de ganhos do controlador não podem ser muito grandes no método homotópico. Para avaliar o desempenho do sistema em malha fechada, foram plotados todos os autovalores das matrizes A em malha fechada (ver equação (4.18)) para os 3 pontos de operação, conforme se pode observar na figura 5.41.

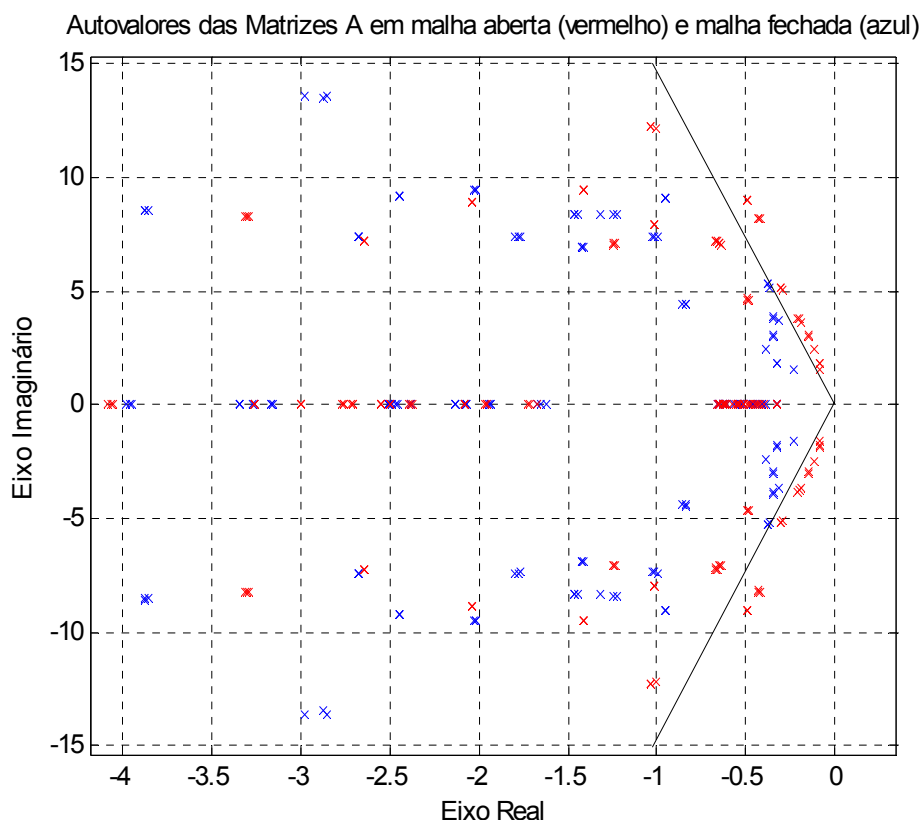
Detalhando essa figura nas proximidades do eixo imaginário, obtemos a figura 5.42. Pode-se notar que o sistema atingiu um fator de amortecimento mínimo de 7% (provavelmente, o algoritmo de controle robusto encontrou um ponto de mínimo local, uma vez que é possível obter fatores de amortecimento maiores do que este).

Os diagramas de Bode para os 16 controladores obtidos são mostrados na figura 5.43. Nota-se que os controladores apresentam um comportamento típico de compensadores atraso-avanço.

Os parâmetros das funções de transferência dos 16 controladores são apresentados na tabela 5.10. O formato da função de transferência dos controladores descentralizados apresentados nesta tabela é aquele dado na equação (5.1). Conforme se pode notar na tabela 5.10, alguns parâmetros dos ESP's obtidos apresentaram valores negativos, o que não é usual nos sistemas elétricos de potência. Além disso, os resultados obtidos para os controladores apresentaram um atraso de fase para frequências mais elevadas, o que não é típico das aplicações existentes na prática. Assim, para que estes controladores sejam aplicados ao sistema de 16 máquinas, são necessários estudos adicionais a fim de avaliar o comportamento do sistema nessas condições.



**Figura 5.41 – Autovalores do sistema New England de 69 barras em malha fechada para os 3 pontos de operação (método homotópico)**



**Figura 5.42 – Autovalores do sistema New England de 69 barras em malha aberta (vermelho) e malha fechada (azul) para os 3 pontos de operação (detalhe nas proximidades do eixo imaginário). As duas linhas delimitam a região do plano complexo na qual o amortecimento dos autovalores do sistema é de 7 %**

Comparando os valores dos parâmetros dos controladores obtidos através deste método com os parâmetros dos controladores obtidos pelo primeiro método, pode-se concluir que eles são bastante diferentes. Os controladores obtidos através do primeiro método apresentam diagramas de Bode típicos de avançadores de fase, enquanto que os controladores obtidos pelo segundo método apresentam curvas de Bode características de compensadores por atraso-avanço de fase. Além disso, a aplicação do primeiro método de controle robusto fez com que o sistema atingisse um desempenho melhor do que o conseguido com o método homotópico.

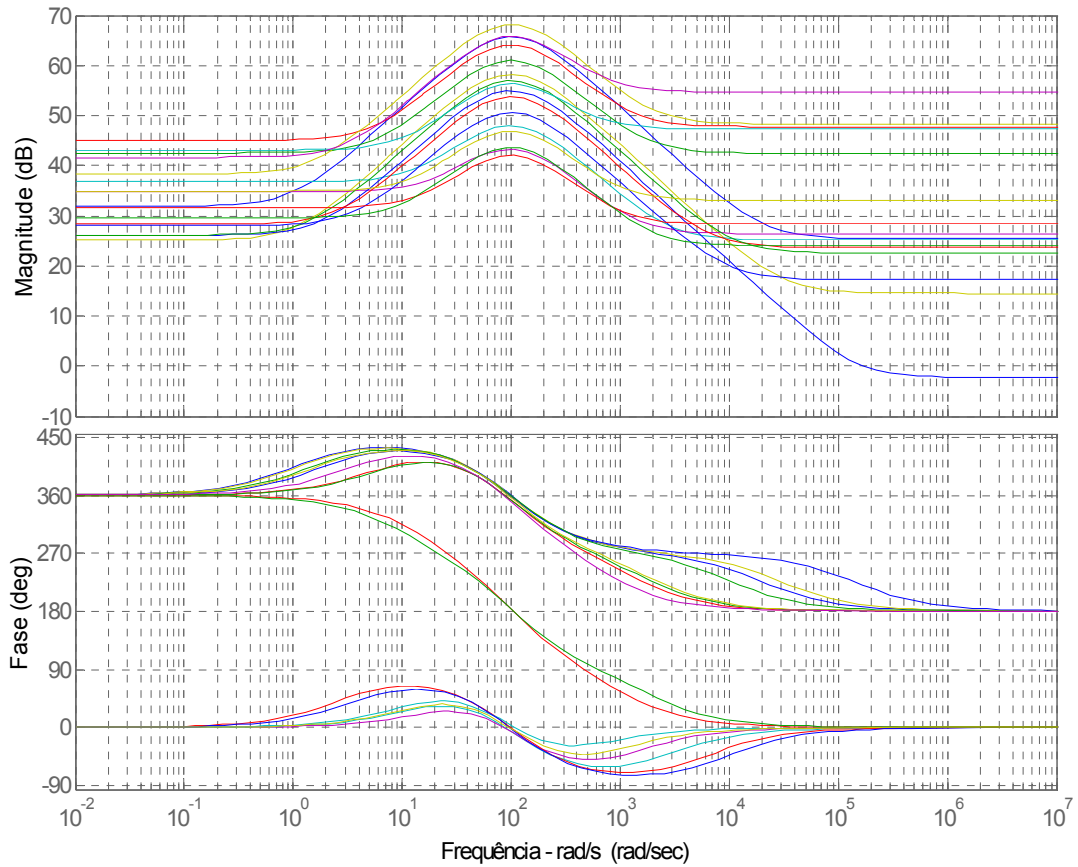
A norma da matriz de ganhos do controlador ( $K_C$ ) é 556958. A norma da matriz de incrementos  $\Delta K$  na última iteração é 295843. Note-se que a norma da correção utilizada para a matriz de ganhos do controlador corresponde a 5.3 % da norma da matriz de ganhos



original, ou seja, os incrementos a cada iteração são de fato pequenos (considerando a aplicação do fator de ajuste multiplicativo de 0.1 na matriz  $\Delta K$ ).

Gerador	parâmetro $a_i$	parâmetro $b_i$	parâmetro $c_i$
1	-0.001858	38.38	39.45
2	-0.024470	31.57	178.40
3	-0.013310	22.25	134.00
4	-0.0005323	16.40	17.91
5	0.001796	5.012	68.81
6	0.002092	2.893	55.33
7	-0.00007687	11.13	20.22
8	0.001528	9.673	25.87
9	-0.001342	14.16	20.29
10	-0.026090	50.48	82.19
11	0.023160	13.11	142.80
12	-0.054310	38.34	121.10
13	0.0007274	6.844	25.03
14	0.0025870	-2.516	37.65
15	0.0015860	-3.037	29.98
16	0.0045140	4.390	55.89

**TABELA 5.10 – PARÂMETROS DOS CONTROLADORES ROBUSTOS PARA O SISTEMA NEW ENGLAND DE 69 BARRAS – MÉTODO HOMOTÓPICO**



**Figura 5.43 – Diagramas de Bode de Ganho e Fase dos 16 controladores robustos obtidos para o sistema New England de 69 barras (método homotópico)**

Em comparação com a primeira técnica de controle robusto, a execução do algoritmo do método homotópico é mais lenta (ou seja, exige mais iterações para a convergência). Neste caso, ainda, o primeiro método possibilitou a obtenção de um fator de amortecimento melhor do que o método homotópico.

### 5.2.2. Segundo modelo montado no MATLAB

O caso tratado ainda é o sistema New England de 69 barras, formado por 16 máquinas síncronas com estabilizadores de sistemas de potência, conforme descrito na seção 5.2.1. Os reguladores automáticos de tensão IEEE tipo I foram alterados para reguladores estáticos com constantes de tempo fixas (0.02s). Os ganhos dos reguladores foram ajustados para 40. A tabela 5.8 apresenta as 3 condições de operação utilizadas também para este caso. A diferença em relação ao item 5.2.1 é que aqui utilizamos um modelo mais sofisticado para a máquina síncrona; as equações do sistema no espaço de estados (linearizadas) foram montadas no MATLAB tendo como base as equações (3.16), (3.17), (3.18), (3.23), (3.24), (3.25), (3.26), (3.28), (3.37), (3.38), (3.41) e (3.42).

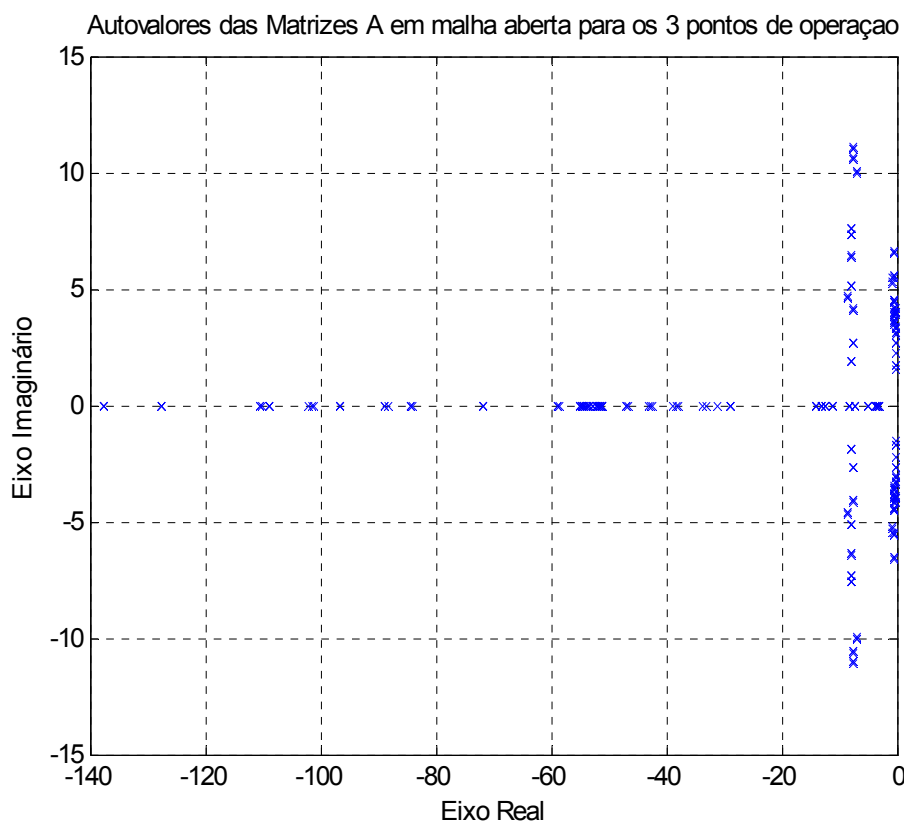
Os autovalores do sistema de potência antes da aplicação dos controladores são mostrados na figura 5.44. Como se pode perceber, todos os autovalores são estáveis, mas há alguns autovalores pouco amortecidos.

Para aplicar o algoritmo de controle robusto descrito na seção 4.4 a esse sistema de potência, consideraremos as condições de operação dadas na tabela 5.8 e o seguinte índice de desempenho (amortecimento mínimo dos autovalores do sistema em malha fechada):

$$\xi = \cos \theta = 0.09$$

Os dois pólos dos controladores foram fixados em  $s = -100$ ; seus dois zeros foram deixados livres, bem como seu ganho estático. O problema de minimização robusta é aquele definido na seção 4.4, sujeito a (4.39), (4.40), (4.41) e (4.42).

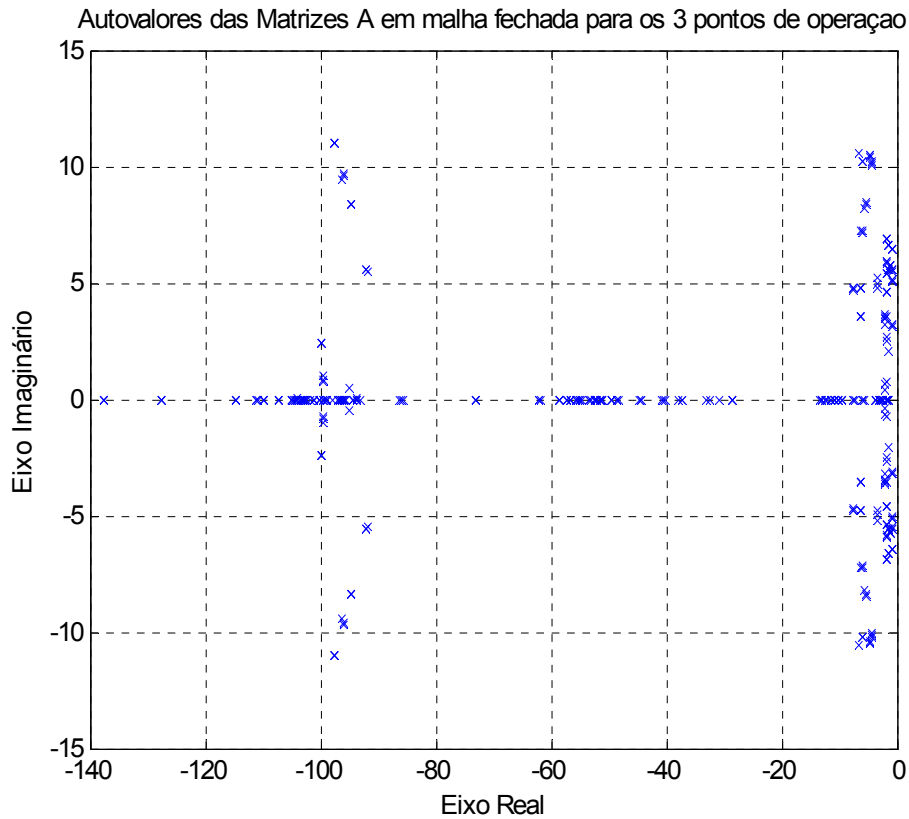
A igualdade (4.27) não pôde ser exatamente estabelecida. Para que (4.27) fosse satisfeita, alguns elementos internos a cada bloco da matriz  $Q$  deveriam valer zero. Essa restrição, neste caso, tornou o problema LMI infactível. Contudo, foi possível obter uma boa aproximação da matriz de ganhos do controlador sem zerar esses elementos internos aos blocos da matriz  $Q$ .



**Figura 5.44 - Autovalores do sistema New England de 69 barras (II) em malha aberta para as 3 condições de operação**

O software utilizado para executar o algoritmo de minimização robusta foi o LMI Toolbox do MATLAB. O algoritmo de controle robusto atingiu a convergência em aproximadamente 500 iterações da função **mincx** (o que equivale a 5 horas de processamento num computador equipado com processador Pentium 4 2.4 GHz e 1 GB de memória RAM). Para avaliar o desempenho do sistema em malha fechada, foram plotados todos os autovalores das matrizes A em malha fechada (ver equação (4.18)) para os 3 pontos de operação, conforme se pode observar na figura 5.45.

Detalhando essa figura nas proximidades do eixo imaginário, obtemos a figura 5.46. Pode-se perceber que a especificação de desempenho foi satisfeita, para todos os pontos de operação. O sistema em malha fechada apresenta um fator de amortecimento mínimo de 10.8 %.



**Figura 5.45 – Autovalores do sistema New England de 69 barras (II) em malha fechada para os 3 pontos de operação**

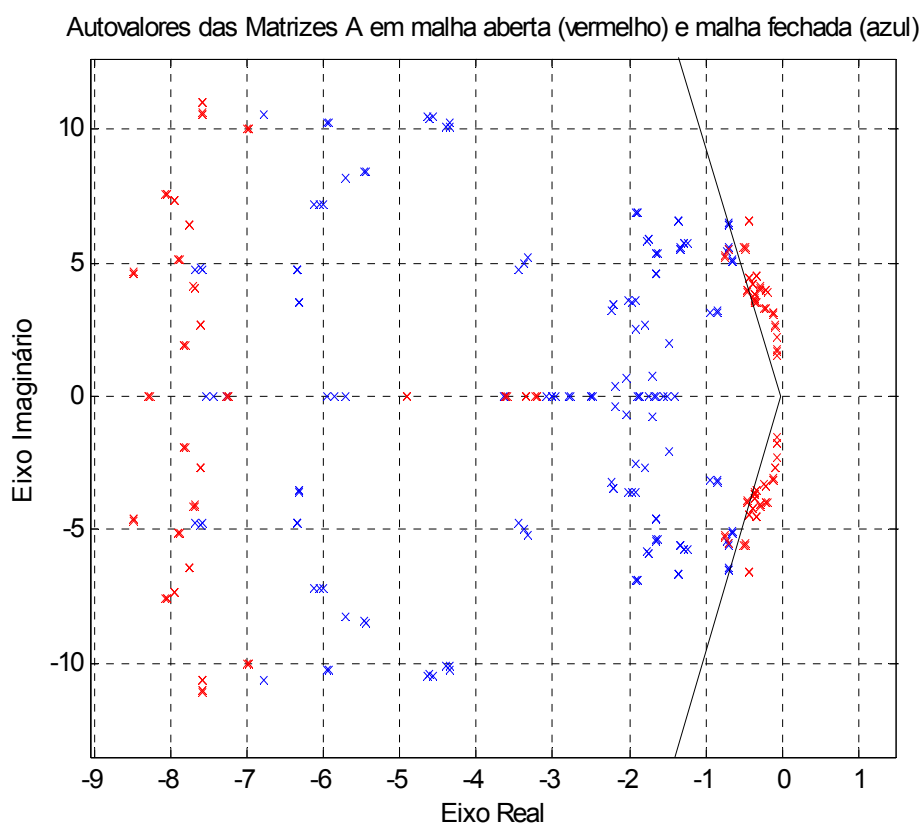
Uma vez que a matriz de ganhos do controlador foi obtida de modo aproximado, pode-se verificar matematicamente que os controladores robustos gerados posicionam os autovalores do sistema em malha fechada na região adequada do plano complexo (definida pelo fator de amortecimento de 10 %). Para isso, basta encontrarmos uma matriz  $Q$  positiva definida que satisfaça as LMI's abaixo:

$$\begin{bmatrix} \sin \theta(A_{cl,i} \cdot Q + Q \cdot A_{cl,i}^T) & \cos \theta(A_{cl,i} \cdot Q - Q \cdot A_{cl,i}^T) \\ * & \sin \theta(A_{cl,i} \cdot Q + Q \cdot A_{cl,i}^T) \end{bmatrix} < 0, \text{ para } i = 1, \dots, m.$$

$$A_{cl,i} = A_{m,i} + B_m K_C C_m$$

Deve-se substituir a matriz  $K_C$  obtida através do algoritmo de controle robusto nas LMI's acima. Neste caso, resolvemos estas LMI's (através do LMI *toolbox* do MATLAB), para os

três pontos de operação do sistema New England de 16 máquinas, encontrando como solução do problema uma matriz  $Q$  positiva definida (essa matriz não é esparsa). Dessa forma, está verificado que os controladores obtidos posicionam de fato os autovalores do sistema de potência na região especificada do plano complexo (região cônica definida pelo fator de amortecimento mínimo de 10 %).



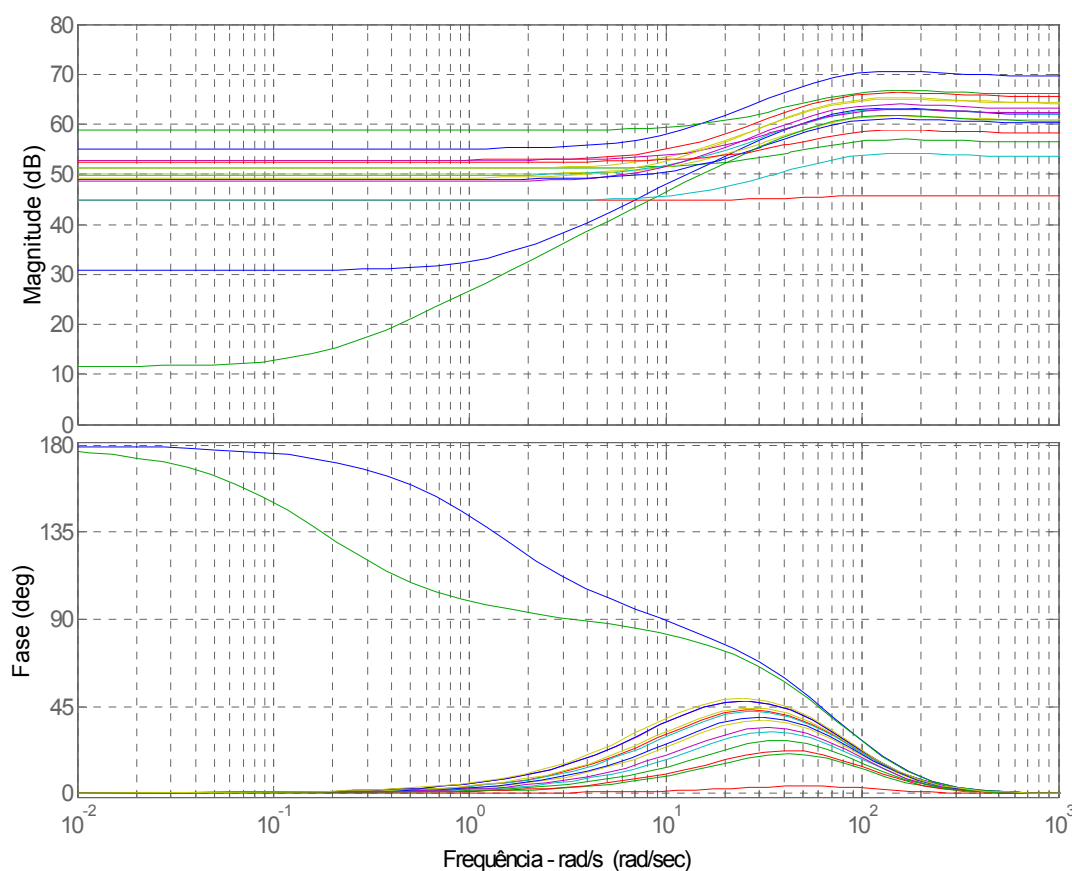
**Figura 5.46 – Autovalores do sistema New England de 69 barras (II) em malha aberta (vermelho) e malha fechada (azul) para os 3 pontos de operação (detalhe nas proximidades do eixo imaginário). As duas linhas delimitam a região do plano complexo na qual o amortecimento dos autovalores do sistema é de 11 %**

Os diagramas de Bode para os 16 controladores obtidos são mostrados na figura 5.47. Os controladores obtidos têm um comportamento típico de compensadores por avanço de fase.

Os parâmetros das funções de transferência dos 16 controladores são apresentados na tabela 5.11. O formato da função de transferência dos controladores descentralizados apresentados nesta tabela é aquele dado na equação (5.1).

Gerador	parâmetro $a_i$	parâmetro $b_i$	parâmetro $c_i$
1	0.1240	24.81	-34.65
2	0.1868	37.37	437.50
3	0.06631	13.26	364.80
4	0.1095	21.90	319.10
5	0.1269	25.38	308.20
6	0.1416	28.32	268.10
7	0.1021	20.42	280.50
8	0.1608	32.15	359.40
9	0.01922	3.842	173.60
10	0.1066	21.31	-3.801
11	0.04682	9.352	173.70
12	0.1280	25.61	435.50
13	0.3009	60.18	568.00
14	0.08165	16.25	420.90
15	0.1997	39.94	871.60
16	0.1639	32.75	289.90

**TABELA 5.11 – PARÂMETROS DOS CONTROLADORES ROBUSTOS PARA O SISTEMA NEW ENGLAND DE 69 BARRAS (II)**



**Figura 5.47 – Diagramas de Bode de Ganho e Fase dos 16 controladores robustos obtidos para o sistema New England de 69 barras (II)**

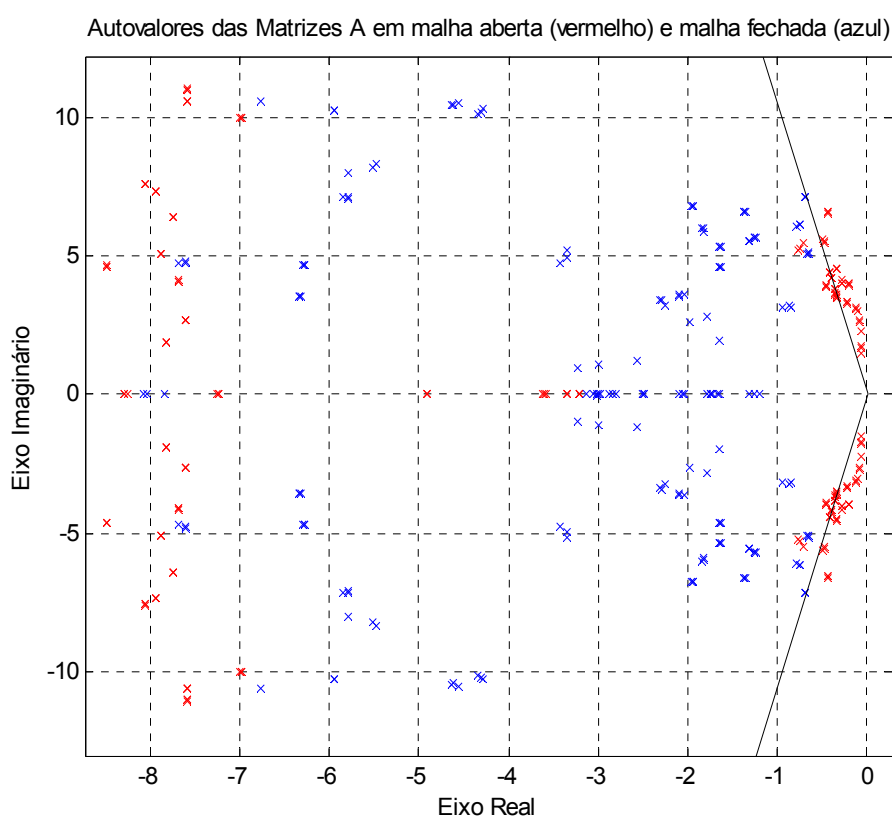
A norma da matriz de ganhos do controlador ( $K_C$ ) é 3874. Os valores finais obtidos para as variáveis  $k_Q$  e  $k_N$  foram de 311.13 e 155.21, respectivamente.

Pode-se notar na tabela 5.11 que os parâmetros  $c_i$  dos controladores associados aos geradores 1 e 10 são negativos. Observando ainda a figura 5.47, nota-se que as curvas de Bode de fase associadas a estes controladores assumiram formatos diferentes das curvas dos outros controladores. Para contornar este problema, os ESP's conectados aos geradores 1 e 10 foram substituídos por ESP's idênticos àquele obtido para o gerador 6. Considerando esta alteração heurística no sistema de controle, apresentamos os autovalores do sistema em malha fechada na figura 5.48. Pode-se notar que o amortecimento mínimo do sistema caiu para 9.5 %.

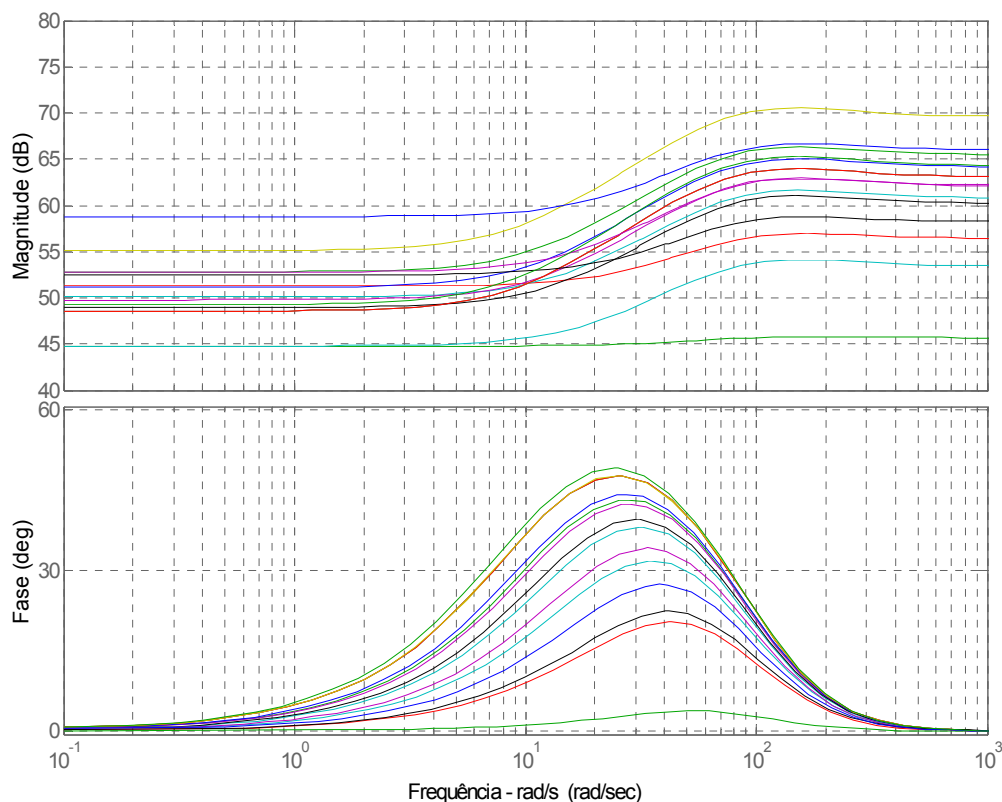


Os diagramas de Bode para o sistema após a substituição dos ESP's conectados aos geradores 1 e 10 são mostrados na figura 5.49. Agora todos os controladores apresentam curvas típicas de avançadores de fase, conforme é feito nos sistemas de potência atualmente.

Assim, a substituição de dois controladores no sistema não afetou de modo significativo o seu desempenho global.



**Figura 5.48 – Autovalores do sistema New England de 69 barras (II) em malha aberta (vermelho) e malha fechada (azul) para os 3 pontos de operação após a substituição dos ESP's 1 e 10 (detalhe nas proximidades do eixo imaginário). As duas linhas delimitam a região do plano complexo na qual o amortecimento dos autovalores do sistema é de 9 %**



**Figura 5.49 – Diagramas de Bode de Ganho e Fase dos 16 controladores robustos obtidos para o sistema New England de 69 barras (II) após a substituição dos ESP's 1 e 10**

A este mesmo modelo do sistema New England foi aplicado outro algoritmo de controle robusto, dado na seção 4.5. Para aplicar o método descrito na seção 4.5 a esse sistema de potência, consideramos novamente as condições de operação dadas na tabela 5.8 para gerar os modelos politópicos do sistema. O seguinte índice de desempenho (amortecimento mínimo dos autovalores do sistema em malha fechada) é adotado:

$$\xi = \cos \theta = 0.09$$

Além disso, os dois pólos dos controladores foram fixados em  $s = -100$ . O algoritmo de controle robusto para solução de BMI's através do método homotópico é aquele definido na seção 4.5.

O software utilizado para executar o algoritmo de controle robusto foi o LMI Toolbox do MATLAB. O algoritmo de controle robusto atingiu o critério de parada em 30 iterações (para cada iteração do algoritmo de controle, são necessárias em média 200 iterações da função **feasp**). Os valores de entrada do algoritmo de controle foram os seguintes:

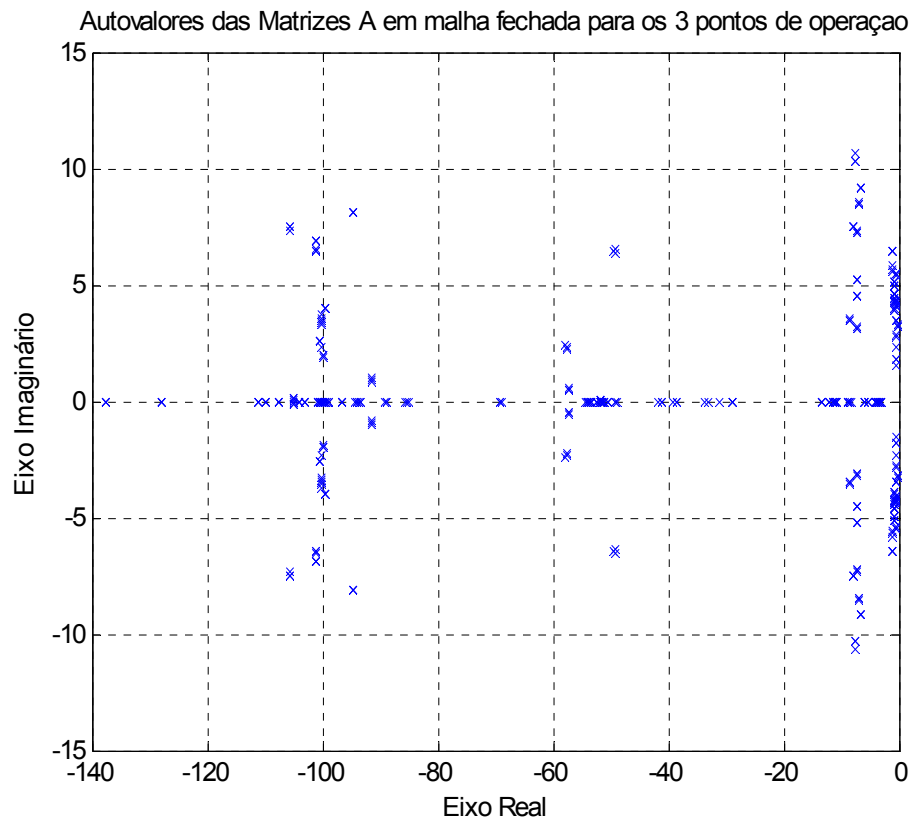
$$\varepsilon = 0.001 \quad e \quad \Delta\theta = 0.05$$

Foi aplicado um fator de ajuste multiplicativo de 0.1 nas atualizações da matriz de ganhos do controlador ( $\Delta K$ ). Para avaliar o desempenho do sistema em malha fechada, foram plotados todos os autovalores das matrizes A em malha fechada (ver equação (4.18)) para os 3 pontos de operação, conforme se pode observar na figura 5.50.

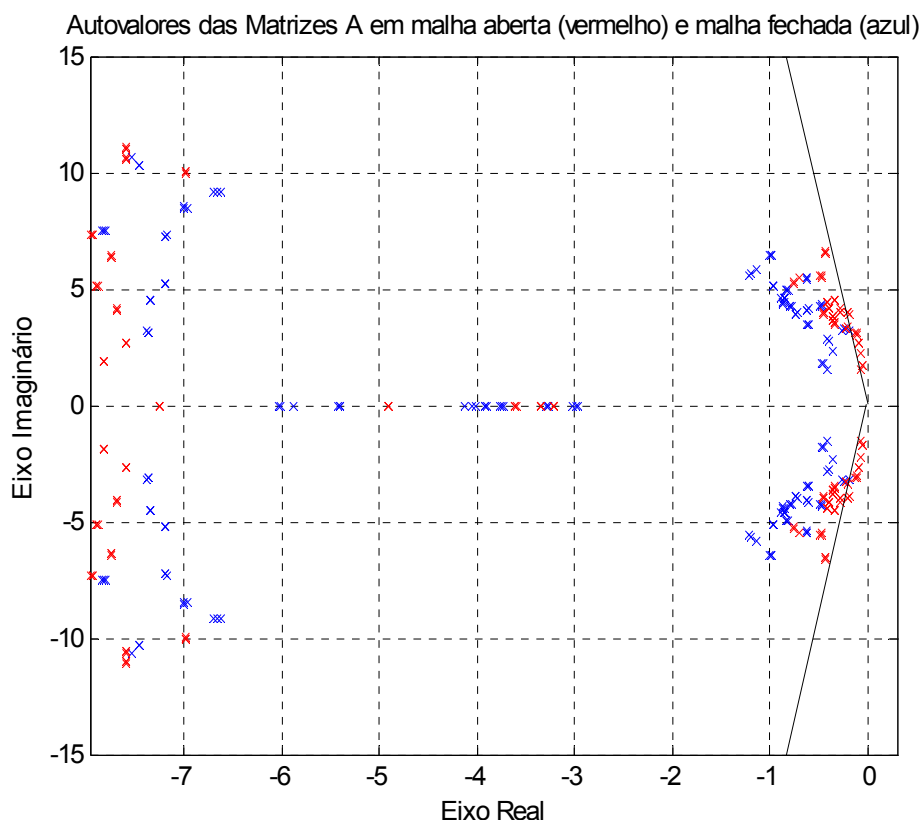
Detalhando essa figura nas proximidades do eixo imaginário, obtemos a figura 5.51. O sistema atingiu um fator de amortecimento mínimo de 6 %. Não foi possível, através do algoritmo homotópico, conseguir um amortecimento melhor que este para o sistema de potência com estabilizadores (provavelmente, o algoritmo de controle robusto encontrou um ponto de mínimo local, uma vez que é possível obter fatores de amortecimento maiores do que este).

Os diagramas de Bode para os 16 controladores obtidos são mostrados na figura 5.52.

Os parâmetros das funções de transferência dos 16 controladores são apresentados na tabela 5.12. O formato da função de transferência dos controladores descentralizados apresentados nesta tabela é aquele dado na equação (5.1). Conforme se pode notar na tabela 5.12, alguns parâmetros dos ESP's obtidos apresentaram valores negativos, o que não é usual nos sistemas elétricos de potência. Além disso, os resultados obtidos para os controladores apresentaram um atraso de fase para frequências mais elevadas, o que não é típico das aplicações existentes na prática. Desse modo, para que estes controladores sejam aplicados ao sistema de 16 máquinas, são necessários estudos adicionais a fim de avaliar o comportamento do sistema nessas condições.



**Figura 5.50 – Autovalores do sistema New England de 69 barras (II) em malha fechada para os 3 pontos de operação (método homotópico)**



**Figura 5.51 – Autovalores do sistema New England de 69 barras (II) em malha aberta (vermelho) e malha fechada (azul) para os 3 pontos de operação (detalhe nas proximidades do eixo imaginário). As duas linhas delimitam a região do plano complexo na qual o amortecimento dos autovalores do sistema é de 6 % (método homotópico)**

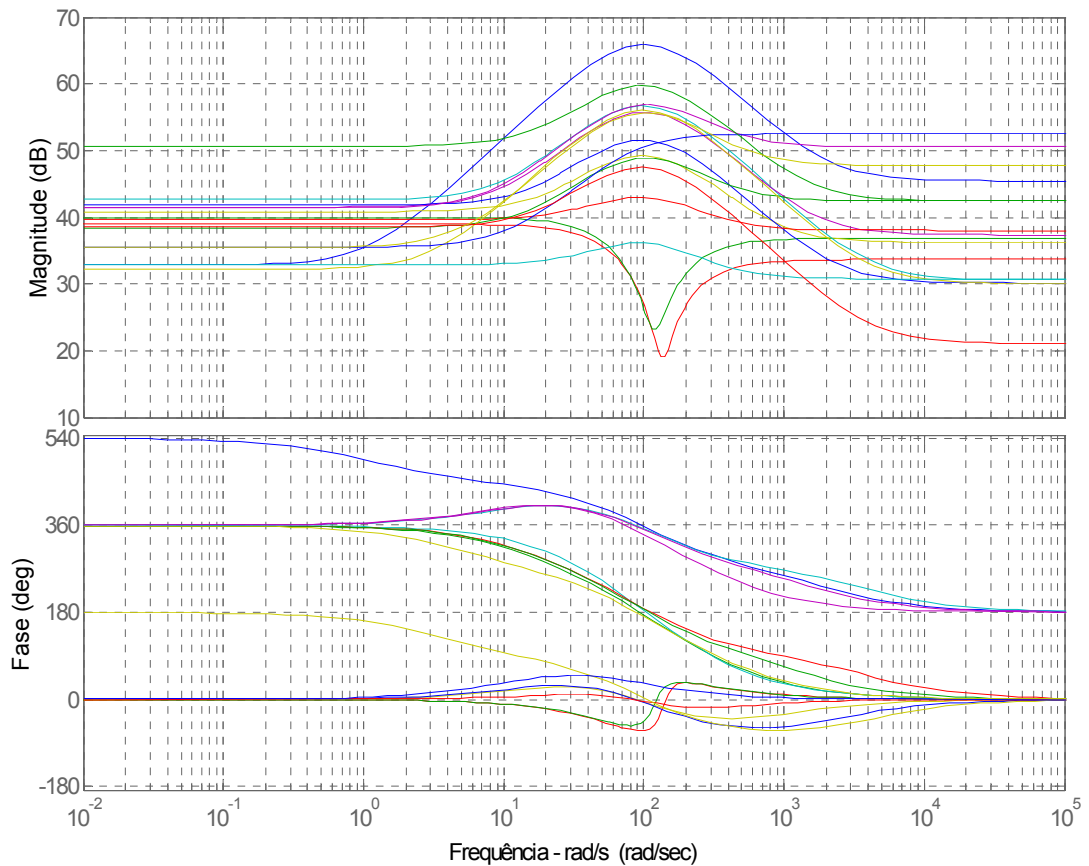
Comparando os valores dos parâmetros dos controladores obtidos através deste método com os parâmetros dos controladores obtidos pelo primeiro método, pode-se concluir que eles são bastante diferentes. Os controladores obtidos através do primeiro método apresentam diagramas de Bode típicos de avançadores de fase, enquanto que alguns dos controladores obtidos pelo segundo método apresentam curvas de Bode características de compensadores por atraso-avanço de fase. Além disso, a aplicação do primeiro método de controle robusto fez com que o sistema atingisse um desempenho melhor do que o conseguido com o método homotópico.

A norma da matriz de ganhos do controlador ( $K_C$ ) obtida é 430718. A norma da matriz de incrementos  $\Delta K$  na última iteração é 159053. Note-se que a norma da correção utilizada para a matriz de ganhos do controlador corresponde a 3.7 % da norma da matriz de ganhos original, ou seja, os incrementos a cada iteração são realmente pequenos, conforme requerido

para o correto funcionamento do método (considerando a aplicação do fator de ajuste multiplicativo de 0.1 na matriz  $\Delta K$ ).

Gerador	parâmetro $a_i$	parâmetro $b_i$	parâmetro $c_i$
1	-0.018720	39.33	-43.78
2	0.004828	0.1842	88.86
3	0.007000	0.2901	99.77
4	0.006461	5.768	110.00
5	-0.003385	13.52	135.70
6	-0.007377	12.12	119.00
7	0.003212	7.532	123.40
8	0.007968	2.829	96.11
9	0.013230	-5.534	83.34
10	0.003193	12.62	-40.81
11	0.003447	-1.279	43.84
12	-0.033560	13.26	116.60
13	0.042260	5.677	59.73
14	0.001132	-4.666	84.91
15	0.013270	-19.32	341.50
16	0.024490	-12.00	59.59

**TABELA 5.12 – PARÂMETROS DOS CONTROLADORES ROBUSTOS PARA O SISTEMA NEW ENGLAND DE 69 BARRAS (II) – MÉTODO HOMOTÓPICO**



**Figura 5.52 – Diagramas de Bode de Ganho e Fase dos 16 controladores robustos obtidos para o sistema New England de 69 barras (II) – método homotópico**

Em comparação com a primeira técnica de controle robusto, a execução do algoritmo do método homotópico é mais lenta (ou seja, exige mais iterações para a convergência). Neste caso, ainda, o primeiro método possibilitou a obtenção de um fator de amortecimento melhor do que o obtido através do método homotópico.

### 5.3. Sistema New England de 39 barras, modelo com termogeradores

O caso tratado nesta seção é novamente o sistema New England de 39 barras, formado por nove geradores com estabilizadores de sistemas de potência e um gerador (número 39) modelado como um barramento infinito. As cargas foram representadas como impedâncias constantes. O modelo utilizado aqui representa os geradores como máquinas térmicas. Foram utilizados reguladores automáticos de tensão IEEE tipo I. O modelo montado está baseado nas equações (3.16), (3.17), (3.18), (3.19), (3.21), (3.22), (3.32), (3.33), (3.34), (3.37), (3.38), (3.41) e (3.42).

Os autovalores do sistema de potência antes da aplicação dos controladores são mostrados na figura 5.53. Como pode ser notado, todos os autovalores são estáveis, mas alguns são pouco amortecidos.

Para aplicar a metodologia descrita na seção 4.4 a esse sistema de potência, consideramos o seguinte índice de desempenho (amortecimento mínimo dos autovalores do sistema em malha fechada):

$$\xi = \cos \theta = 0.1$$

O problema de minimização a ser resolvido é aquele definido na seção 4.4, sujeito a (4.39), (4.40), (4.41) e (4.42).

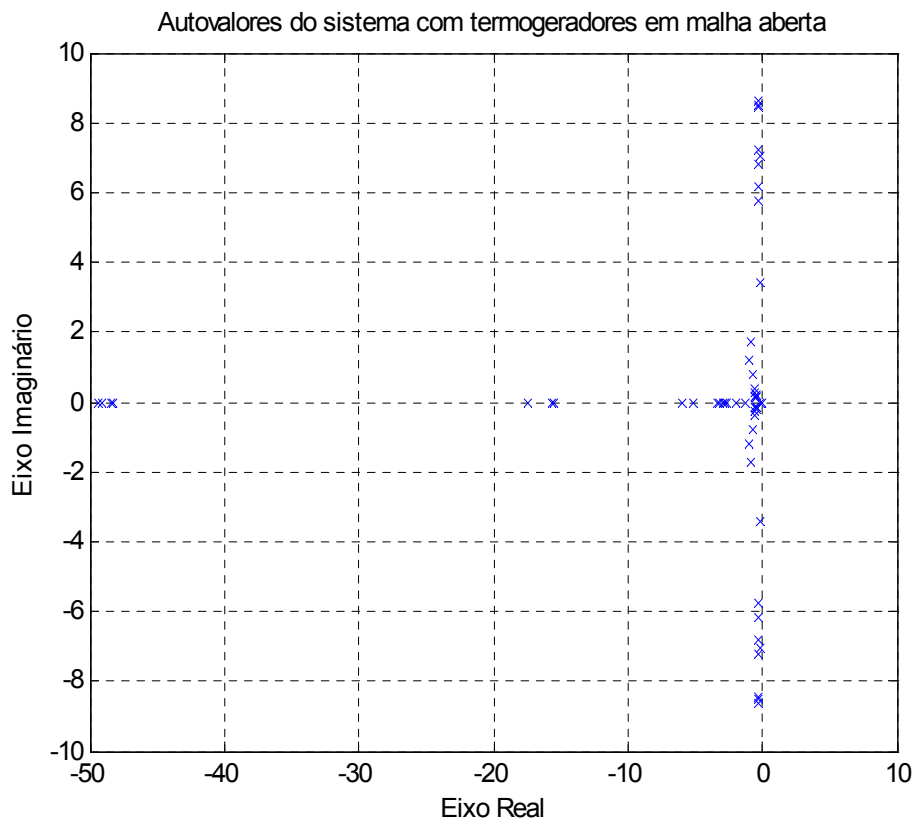
Assim como nos outros casos apresentados, a igualdade (4.27) não pôde ser exatamente estabelecida. Novamente, para que (4.27) fosse satisfeita, alguns elementos internos a cada bloco da matriz  $Q$  deveriam valer zero. Essa restrição tornaria o problema LMI infactível. Contudo, foi possível obter uma boa aproximação da matriz de ganhos do controlador sem zerar esses elementos internos aos blocos da matriz  $Q$ .

A estrutura dos controladores utilizados aqui é diferente da estrutura dos outros controladores definidos anteriormente. Os controladores agora têm três pólos fixos e três zeros livres (esta estrutura é utilizada na prática em sistemas de potência constituídos por máquinas térmicas):



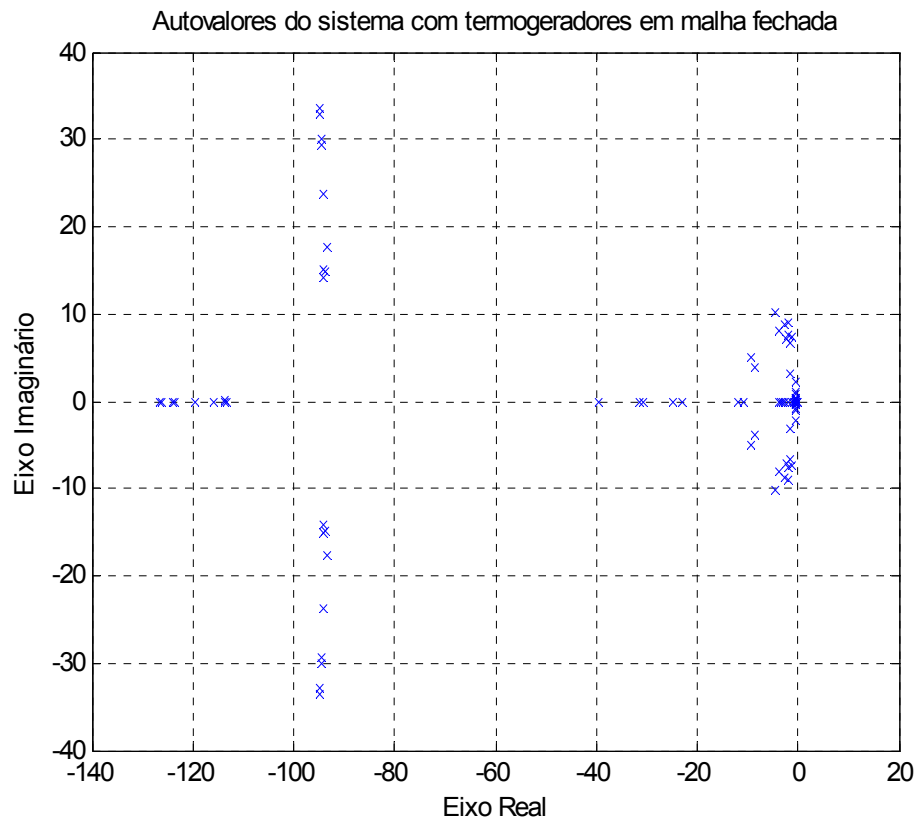
$$K_i(s) = \frac{a_i s^3 + b_i s^2 + c_i s + d_i}{(0.01s + 1)(0.01s + 1)(0.01s + 1)} \quad (5.2)$$

Foi utilizado apenas 1 ponto de operação (caso base). O software usado para executar o algoritmo de minimização foi o LMI Toolbox do MATLAB. O algoritmo de controle atingiu a convergência em aproximadamente 300 iterações da função **mincx**. Para avaliar o desempenho final do sistema, foram plotados todos os autovalores das matrizes A em malha fechada (ver equação (4.18)), conforme se pode observar na figura 5.54.



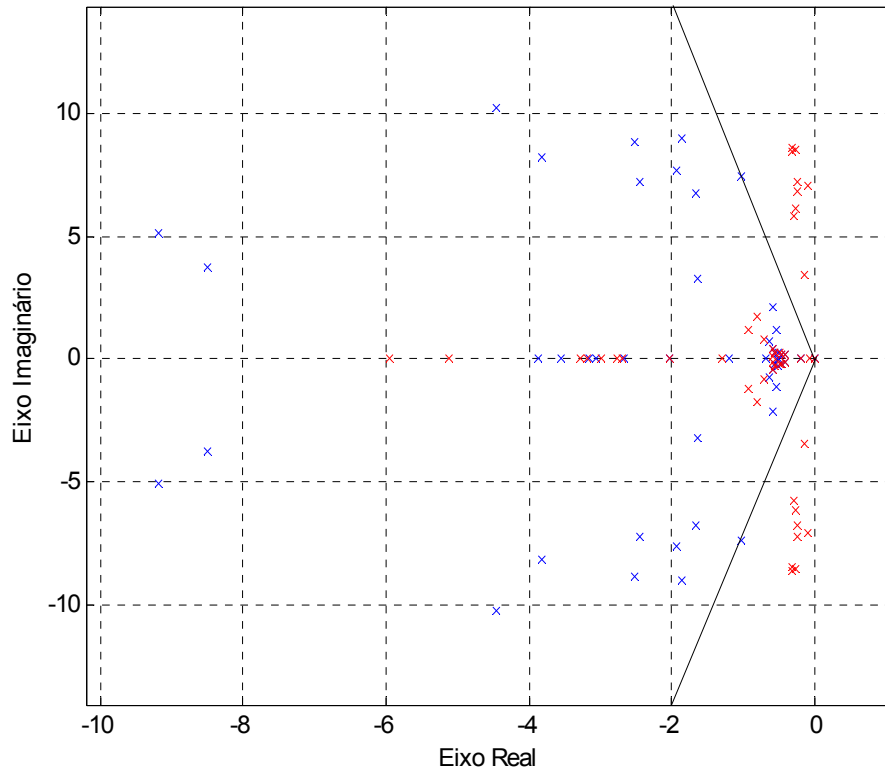
**Figura 5.53 - Autovalores do sistema New England de 39 barras com termogeradores em malha aberta**

Detalhando a figura 5.54 nas proximidades do eixo imaginário, obtemos a figura 5.55. Pode-se perceber que a especificação de desempenho foi satisfeita, e o sistema atingiu um fator de amortecimento mínimo de 13%.



**Figura 5.54 – Autovalores do sistema New England de 39 barras com termogeradores em malha fechada**

Autovalores do sistema com termogeradores em malha aberta (vermelho) e malha fechada (azul)



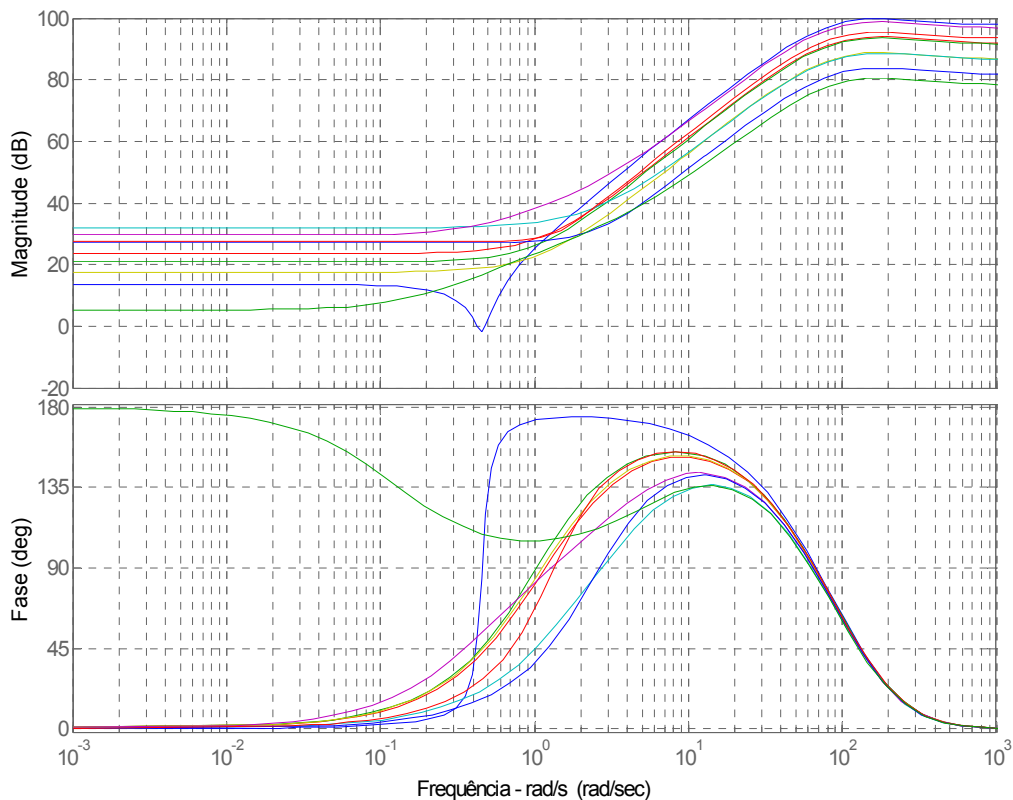
**Figura 5.55 – Autovalores do sistema New England de 39 barras com termogeradores em malha aberta (vermelho) e malha fechada (azul) (detalhe nas proximidades do eixo imaginário). As duas linhas delimitam a região do plano complexo na qual o amortecimento dos autovalores do sistema é de 13 %**

Os diagramas de Bode para os nove controladores obtidos são mostrados na figura 5.56. Note-se que os controladores obtidos têm um comportamento típico de compensadores por avanço de fase. Os parâmetros das funções de transferência dos 9 controladores são apresentados na tabela 5.13. O formato da função de transferência dos controladores descentralizados apresentados nesta tabela é aquele dado na equação (5.2).

Gerador	parâmetro $a_i$	parâmetro $b_i$	parâmetro $c_i$	parâmetro $d_i$
30	0.07580	22.74	1.835	4.769
31	0.03866	11.60	25.51	14.97
32	0.03690	11.07	20.00	11.07
33	0.02135	6.406	13.48	7.552
34	0.02101	6.319	34.63	39.59
35	0.06803	20.41	80.23	30.14
36	0.01197	3.599	14.66	22.10
37	0.04586	13.76	24.13	23.48
38	0.008211	2.463	14.27	-1.846

**TABELA 5.13 – PARÂMETROS DOS CONTROLADORES PARA O SISTEMA NEW ENGLAND DE 39 BARRAS – MODELO COM TERMOGERADORES**

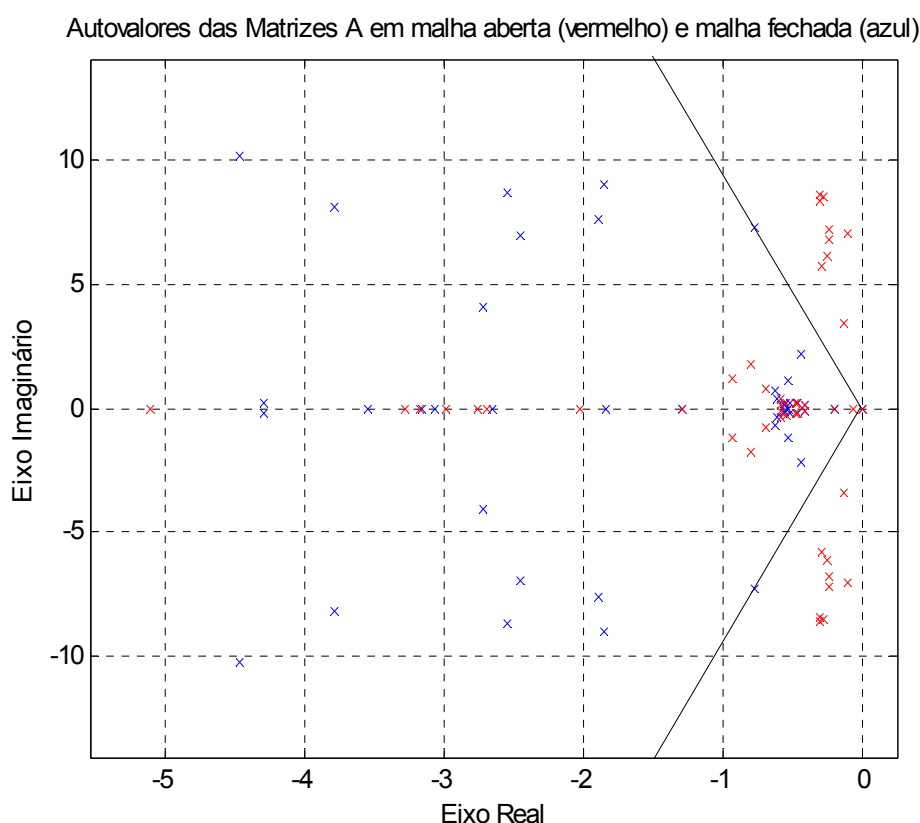
Além disso, a norma da matriz de ganhos do controlador ( $K_C$ ) obtida foi 107189.



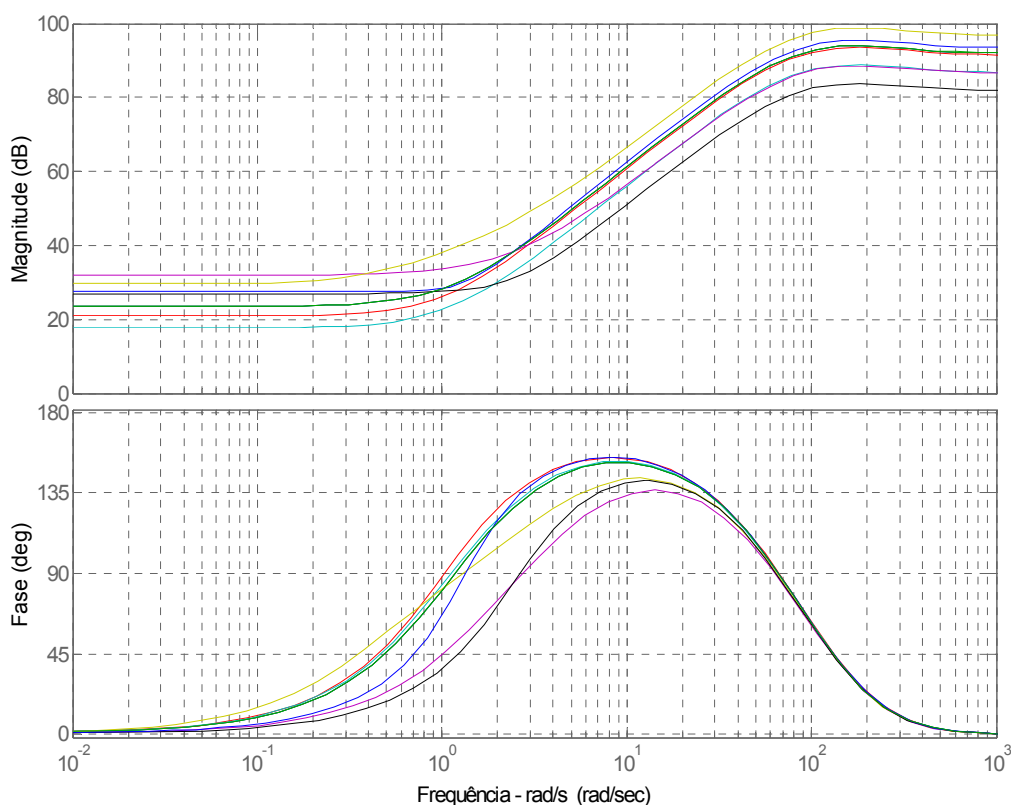
**Figura 5.56 – Diagramas de Bode de Ganho e Fase dos 9 controladores obtidos para o sistema New England de 39 barras com termogeradores**

Pode-se notar na tabela 5.13 que o parâmetro  $d_i$  do controlador associado ao gerador 38 é negativo. Observando ainda a figura 5.56, nota-se que as curvas de Bode de fase associadas a este controlador e ao controlador 30 assumiram formatos diferentes das curvas dos outros controladores. Para contornar este problema prático, os ESP's conectados aos geradores 30 e 38 foram substituídos por ESP's idênticos àquele obtido para o gerador 31 (pois as curvas de Bode de fase destes ESP's são similares para frequências acima de 20 rad/s). Considerando esta alteração heurística no sistema de controle, apresentamos os autovalores do sistema em malha fechada na figura 5.57. Pode-se notar que o amortecimento mínimo do sistema caiu para 10.5 %.

Os diagramas de Bode para o sistema após a substituição dos ESP's conectados aos geradores 30 e 38 são mostrados na figura 5.58. Agora todos os controladores apresentam curvas típicas de avançadores de fase.



**Figura 5.57 – Autovalores do sistema New England de 39 barras com termogeradores em malha aberta (vermelho) e malha fechada (azul) após a substituição dos ESP's 30 e 38 (detalhe nas proximidades do eixo imaginário). As duas linhas delimitam a região do plano complexo na qual o amortecimento dos autovalores do sistema é de 10 %**



**Figura 5.58 – Diagramas de Bode de Ganho e Fase dos 9 controladores obtidos para o sistema New England de 39 barras com termogeradores após a substituição dos ESP's 30 e 38**

#### 5.4. Sistema de Controle Hierarquizado

Nesta seção, apresentaremos os resultados dos sistemas de controle hierarquizados. Esses sistemas, descritos de forma esquemática na figura 4.2 (capítulo 4), consistem de duas camadas de controle: a primeira é formada pelos controladores descentralizados (que utilizam exclusivamente os sinais locais), enquanto que a segunda camada é formada pelo controlador central, que utiliza sinais de realimentação vindos de todas as máquinas do sistema para aumentar ainda mais o desempenho global. Nos casos apresentados a seguir, o modelo de sistema utilizado é o mesmo que foi descrito na seção 5.1.2 (modelo do sistema New England de 39 barras e 9 geradores montado no MATLAB, com 3 pontos de operação) com o controlador descentralizado projetado pelo primeiro método de controle. Dessa forma, o amortecimento mínimo do sistema em malha fechada somente com os controladores

descentralizados é de 32 %. Utilizando-se a camada de controle centralizado (que pode ser viabilizada através do uso integrado de PMU's e GPS, por exemplo), tentaremos aumentar ainda mais esse amortecimento. O controle centralizado a ser implementado é robusto, ou seja, contempla vários pontos de operação. O algoritmo de controle robusto centralizado é dado na seção 4.6, e utilizaremos a seguir 2 modelos de atrasos: as aproximações de Padé de ordens 1 e 2 (ver seção 4.6 para detalhes de modelagem). Utilizando cada um desses modelos, apresentaremos os testes para os atrasos de transmissão de informação no sistema valendo 10 ms e 50 ms. Atrasos de comunicação em sistemas de potência podem variar de dezenas de milissegundos a centenas de milissegundos ou mais (Quanyuan, Zhenyu e Yijia, 2005). Neste estudo, optamos por realizar simulações com atrasos baixos, mas atrasos de ordens mais elevadas podem ser facilmente testados na estrutura de controle hierarquizado proposta. Todas as simulações foram feitas no MATLAB.

#### 5.4.1. Sistema com atrasos de 10 ms e aproximação de Padé de ordem 1

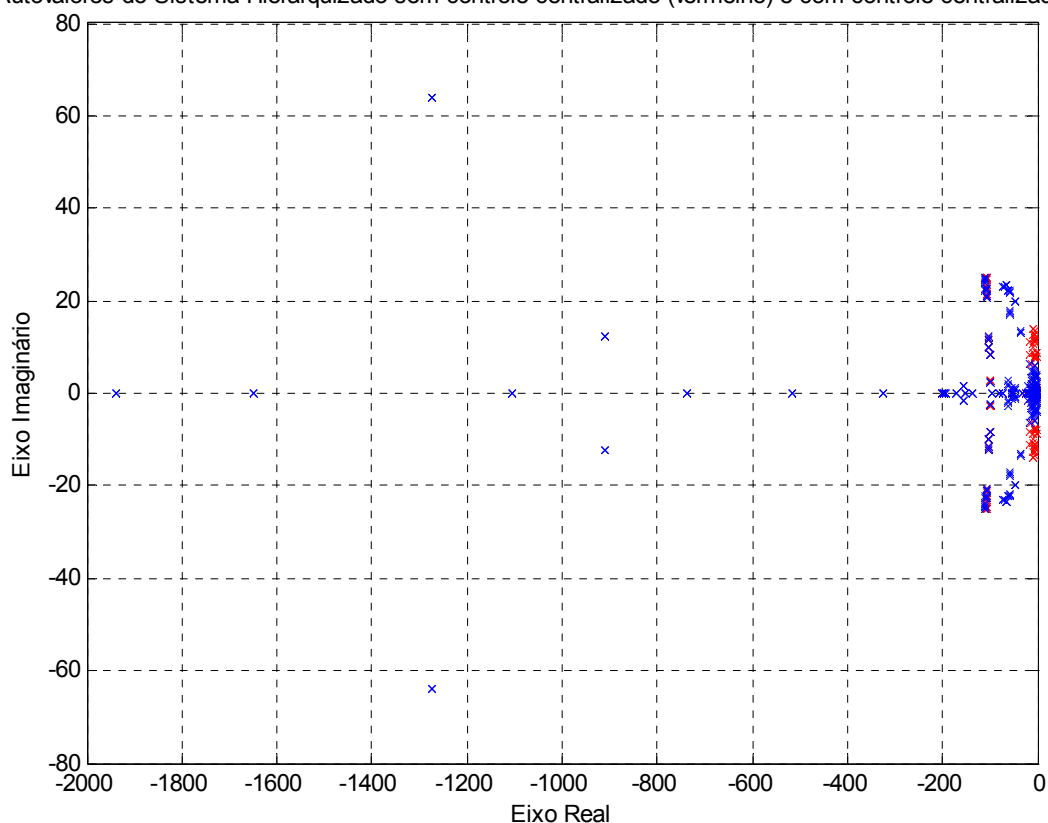
Executando –se o algoritmo que implementa o controlador centralizado para atrasos valendo 10 ms e utilizando aproximações de Padé de ordem 1 para os atrasos, obteve-se a convergência do processo em 43 horas (deve-se notar que as matrizes do controlador centralizado,  $A_C^{AT}$ ,  $B_C^{AT}$  e  $C_C^{AT}$  não são esparsas). Observe-se que, no método de projeto da seção 4.6, o controlador centralizado resultante deve ter a mesma ordem do sistema nominal (isto é, sistema com controladores descentralizados + modelos dos atrasos). Isto torna a ordem do sistema resultante bastante elevada (neste caso, a ordem do modelo em malha fechada é 126). Na figura 5.59, foram plotados os autovalores do sistema somente com controladores descentralizados (em vermelho) e com controladores centralizados numa segunda camada de controle (em azul). Aproximando-se a figura 5.59 nos arredores do eixo imaginário, obtemos a figura 5.60. Podemos tirar algumas conclusões:

1. O amortecimento mínimo dos autovalores do sistema foi aumentado de 32% para 65% com o uso do controlador centralizado. Esse amortecimento pode ser considerado excessivamente elevado para um sistema de potência. O esforço de controle necessário para garantir este amortecimento deve ser alto, de forma que o sinal de tensão estabilizante dos controladores possivelmente será restringido pelos limitadores de

tensão presentes no sistema. Contudo, para sistemas que apresentam um amortecimento baixo com controladores descentralizados (por exemplo, o sistema de 16 máquinas e 69 barras), o uso dos controladores centralizados pode fornecer uma taxa de amortecimento adicional adequada;

2. Para conseguir esse elevado amortecimento, alguns autovalores do controlador centralizado foram posicionados em pontos do plano complexo muito distantes da origem. Com isso, a frequência natural não amortecida do sistema em malha fechada aumenta bastante. Um modo de contornar essa situação, caso ela seja realmente indesejável, seria incluir no algoritmo de controle uma restrição de posicionamento de pólos dentro de um círculo de raio R pré-definido.

Autovalores do Sistema Hierarquizado sem controle centralizado (vermelho) e com controle centralizado (azul)

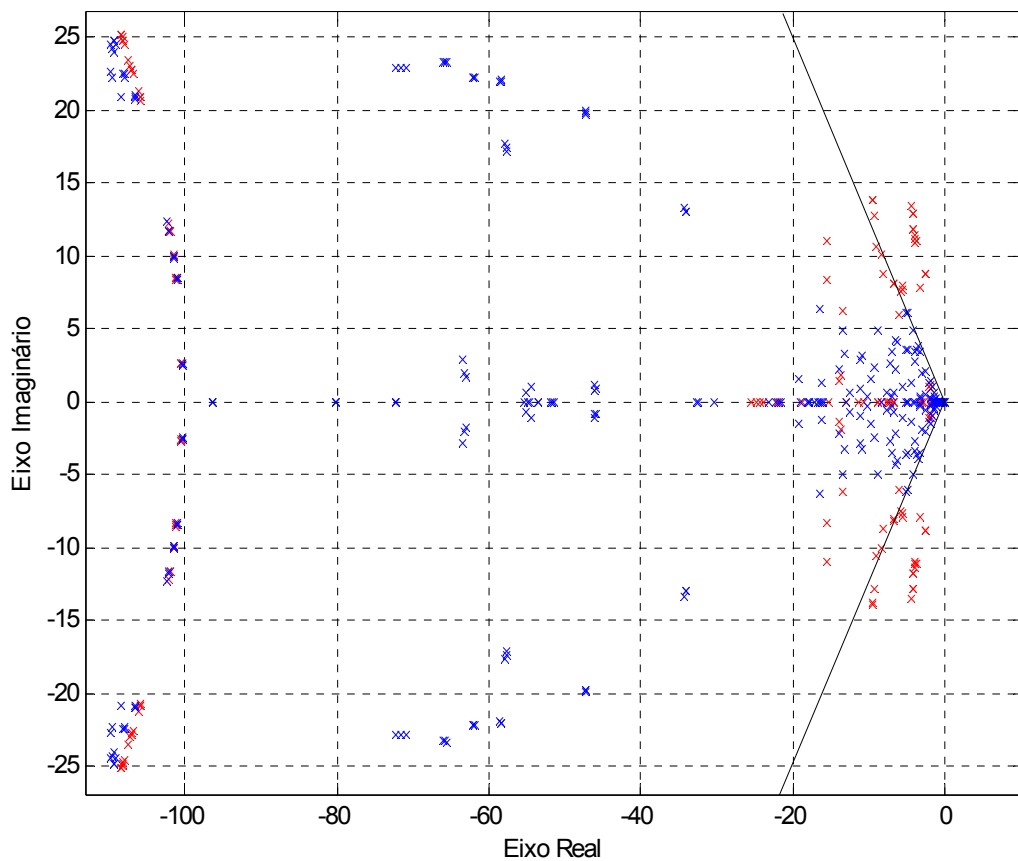


**Figura 5.59 - Autovalores do sistema New England de 39 barras (II) somente com controladores descentralizados (vermelho) e com controladores centralizados (azul) para os 3 pontos de operação – atrasos de 10 ms e aproximação de Padé de ordem 1**

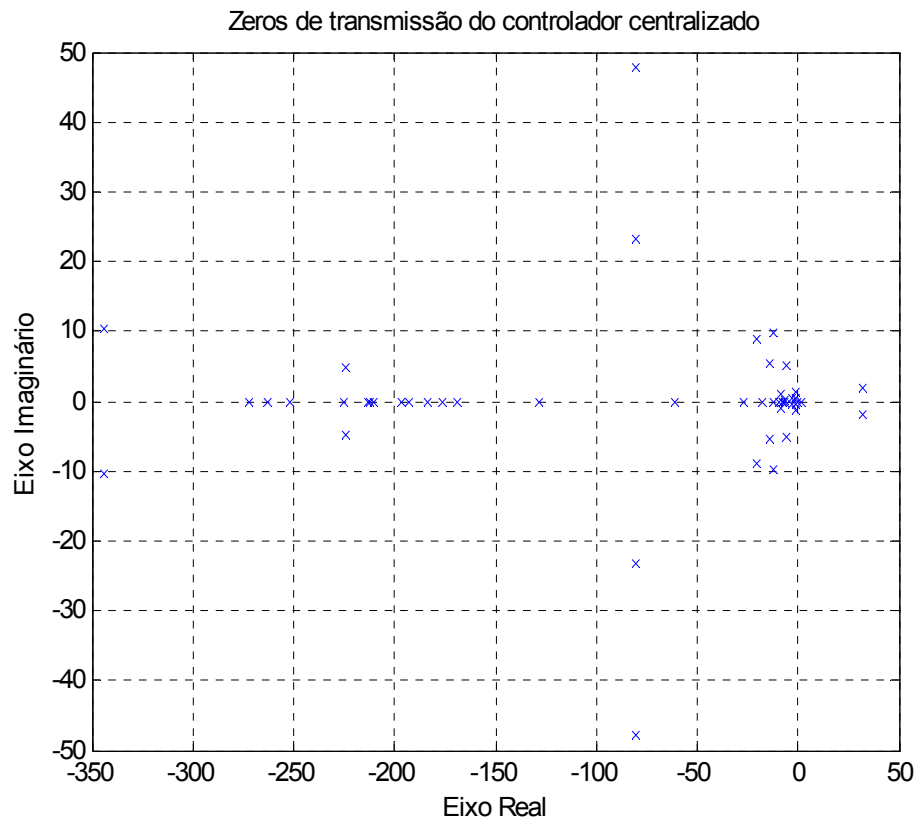


Na figura 5.61, são mostrados os zeros de transmissão do controlador centralizado obtido. Nota-se que alguns deles estão no semiplano direito do plano complexo, sendo zeros de fase não mínima. Sua influência no sistema de potência deve ser investigada através de simulações não-lineares. Nas figuras 5.62 e 5.63, são apresentados os pólos do controlador centralizado. Pode-se perceber que alguns deles são instáveis e outros têm frequência natural não amortecida bastante elevada.

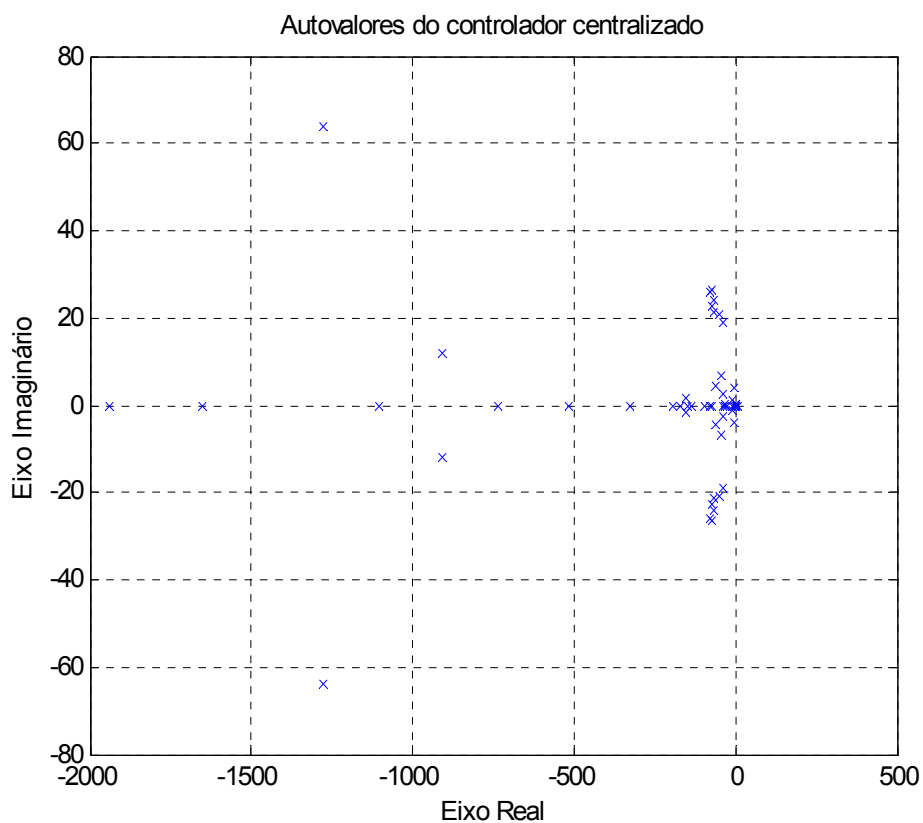
Autovalores do Sistema Hierarquizado sem controle centralizado (vermelho) e com controle centralizado (azul)



**Figura 5.60 – Autovalores do sistema New England de 39 barras (II) somente com controladores descentralizados (vermelho) e com controladores centralizados (azul) para os 3 pontos de operação (detalhe nas proximidades do eixo imaginário). As duas linhas delimitam a região do plano complexo na qual o amortecimento dos autovalores do sistema é de 65 %**



**Figura 5.61 – Zeros de transmissão para o controlador centralizado – sistema com atrasos de 10 ms e aproximação de Padé de ordem 1**

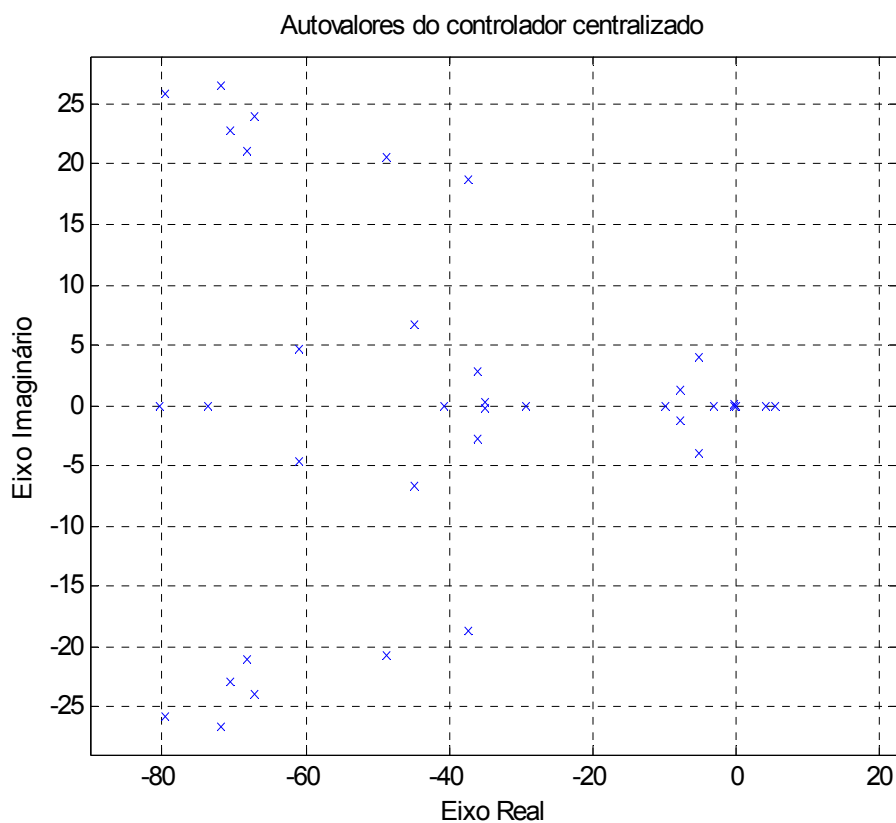


**Figura 5.62 – Autovalores do controlador centralizado – sistema com atrasos de 10 ms e aproximação de Padé de ordem 1**

Os autovalores instáveis do controlador centralizado são os seguintes:

5.5371, 4.2007, 0.001211 e 0.00095.

Os zeros de transmissão de fase não-mínima do sistema sem o controlador centralizado são: 200 (zero de fase não mínima originário do modelo de atraso) e 0 (zeros de transmissão na origem). Desse modo, verifica-se que não há cancelamento de pólos instáveis e zeros de fase não mínima no sistema.



**Figura 5.63 – Autovalores do controlador centralizado (detalhe nas proximidades do eixo imaginário) – sistema com atrasos de 10 ms e aproximação de Padé de ordem 1**

#### 5.4.2. Sistema com atrasos de 50 ms e aproximação de Padé de ordem 1

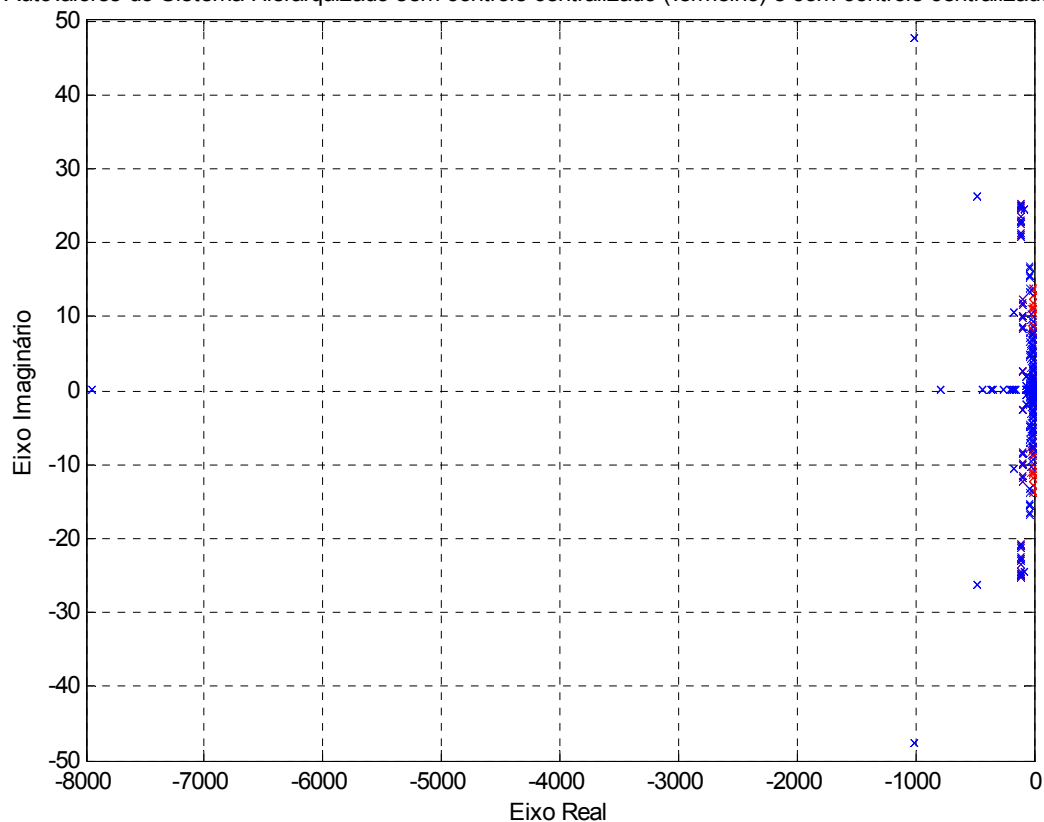
Neste caso, executou-se o algoritmo que implementa o controlador centralizado para atrasos valendo 50 ms e utilizaram-se aproximações de Padé de ordem 1 para os atrasos, obtendo-se a convergência do processo em 43.5 horas (deve-se notar que as matrizes do controlador centralizado,  $A_C^{AT}$ ,  $B_C^{AT}$  e  $C_C^{AT}$  não são esparsas). Na figura 5.64, mostramos os autovalores do sistema somente com controladores descentralizados (em vermelho) e com controladores centralizados numa segunda camada de controle (em azul). Aproximando-se a figura 5.64 nos arredores do eixo imaginário, obtemos a figura 5.65. Podemos tirar as seguintes conclusões:

1. O amortecimento mínimo dos autovalores do sistema foi aumentado de 32% para 65% com o uso do controlador centralizado. Esse amortecimento pode ser considerado excessivamente elevado para um sistema de potência. O esforço de controle necessário

para garantir este amortecimento deve ser alto, de forma que o sinal de tensão estabilizante dos controladores possivelmente será restringido pelos limitadores de tensão presentes no sistema. Contudo, para sistemas que apresentam um amortecimento baixo com controladores descentralizados, o uso dos controladores centralizados pode fornecer uma taxa de amortecimento adicional adequada;

2. Para conseguir esse elevado amortecimento, alguns autovalores do controlador centralizado foram posicionados em pontos do plano complexo muito distantes da origem. Neste caso, temos alguns pólos do controlador centralizado ainda mais distantes da origem do que no caso anterior, em que utilizamos atrasos de 10 ms. Desta forma, quanto maiores forem os atrasos de comunicação no sistema, mais difícil será de aumentar o seu amortecimento mínimo através do controlador centralizado.

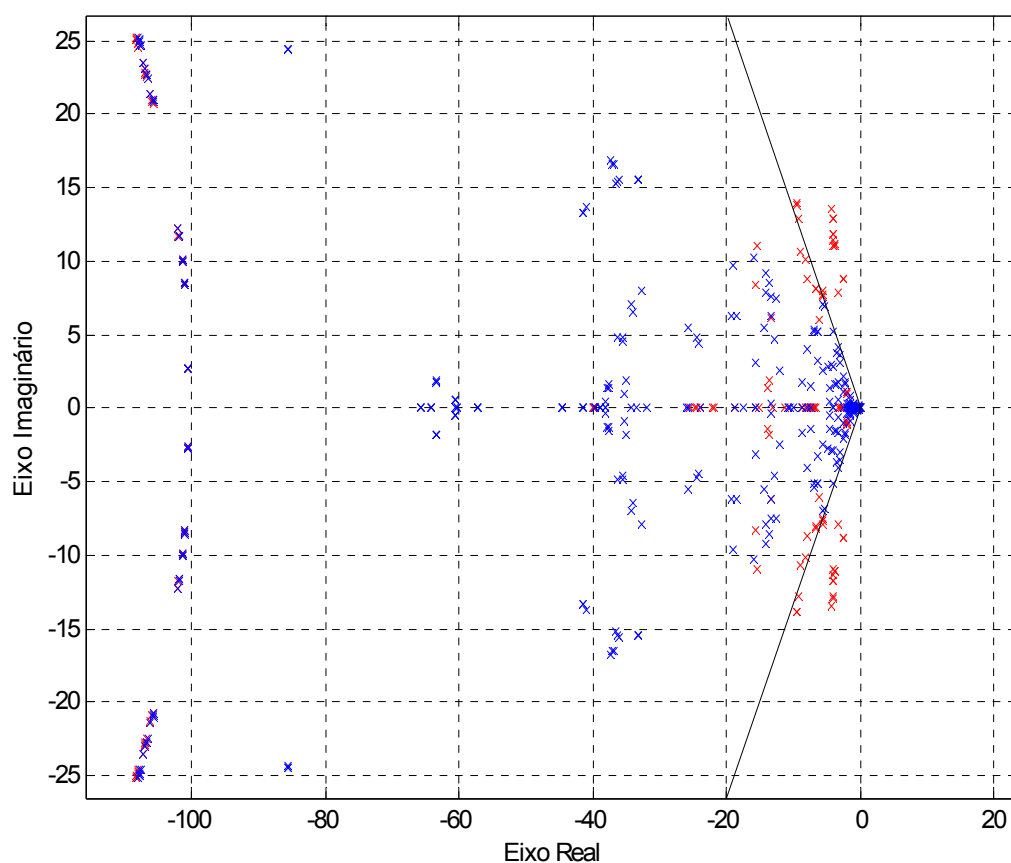
Autovalores do Sistema Hierarquizado sem controle centralizado (vermelho) e com controle centralizado (azul)



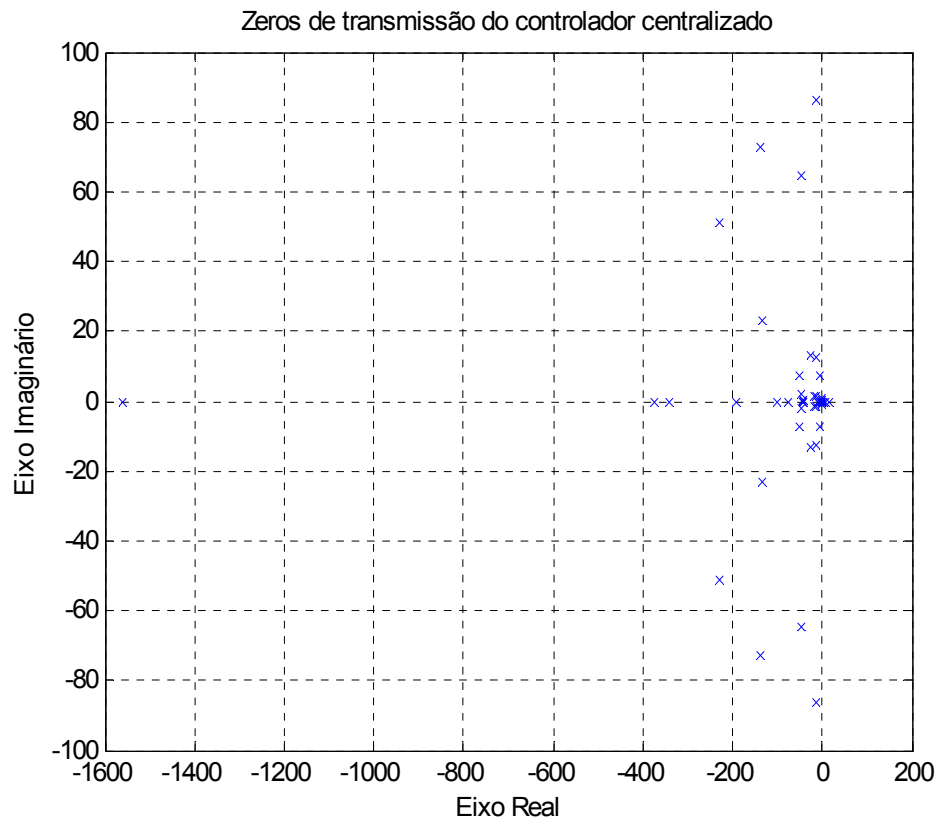
**Figura 5.64 - Autovalores do sistema New England de 39 barras (II) somente com controladores descentralizados (vermelho) e com controladores centralizados (azul) para os 3 pontos de operação – atrasos de 50 ms e aproximação de Padé de ordem 1**

Na figura 5.66, são mostrados os zeros de transmissão do controlador centralizado obtido. Nota-se que alguns deles estão no semiplano direito do plano complexo. Nas figuras 5.67 e 5.68, são apresentados os pólos do controlador centralizado. Pode-se perceber que alguns deles são instáveis e outros têm frequência natural não amortecida bastante elevada.

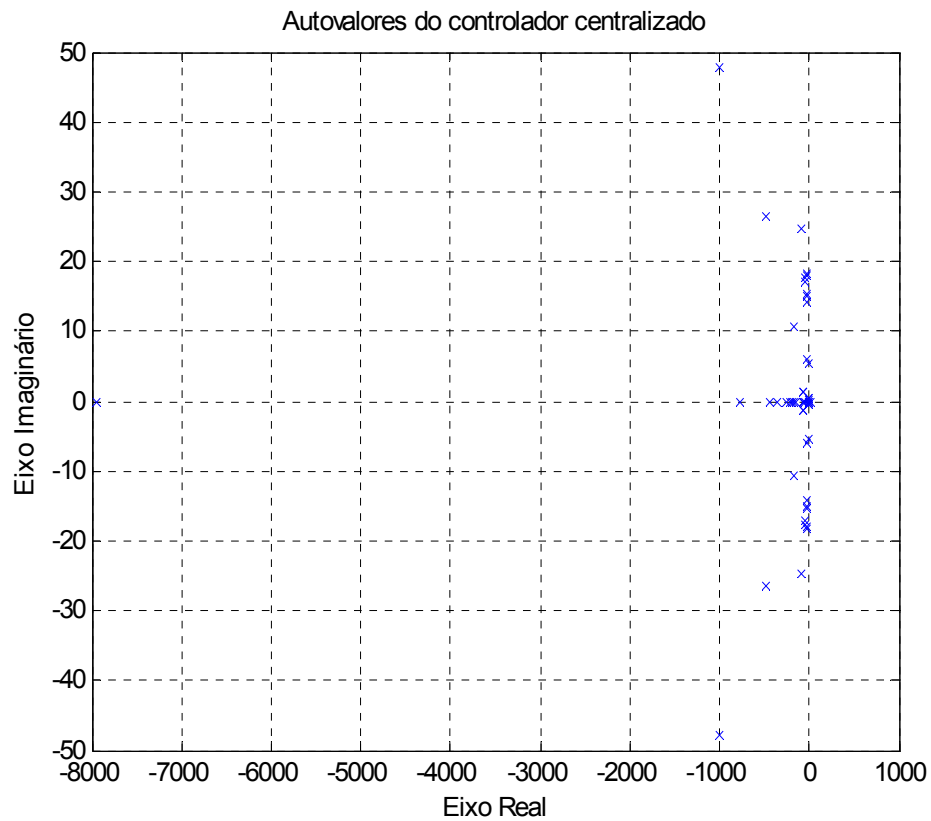
Autovalores do Sistema Hierarquizado sem controle centralizado (vermelho) e com controle centralizado (azul)



**Figura 5.65 – Autovalores do sistema New England de 39 barras (II) somente com controladores descentralizados (vermelho) e com controladores centralizados (azul) para os 3 pontos de operação (detalhe nas proximidades do eixo imaginário). As duas linhas delimitam a região do plano complexo na qual o amortecimento dos autovalores do sistema é de 65 %**



**Figura 5.66 – Zeros de transmissão para o controlador centralizado – sistema com atrasos de 50 ms e aproximação de Padé de ordem 1**



**Figura 5.67 – Autovalores do controlador centralizado – sistema com atrasos de 50 ms e aproximação de Padé de ordem 1**

Os autovalores instáveis do controlador centralizado são os seguintes:

6.1622, 4.8807, 3.0723, 1.7614, 0.0859, 0.0409, 0.0132 e 0.0062.

Os zeros de transmissão de fase não-mínima do sistema sem o controlador centralizado são: 40 (zero de fase não mínima originário do modelo de atraso) e 0 (zeros de transmissão na origem). Desse modo, verifica-se que não há cancelamento de pólos instáveis e zeros de fase não mínima no sistema.

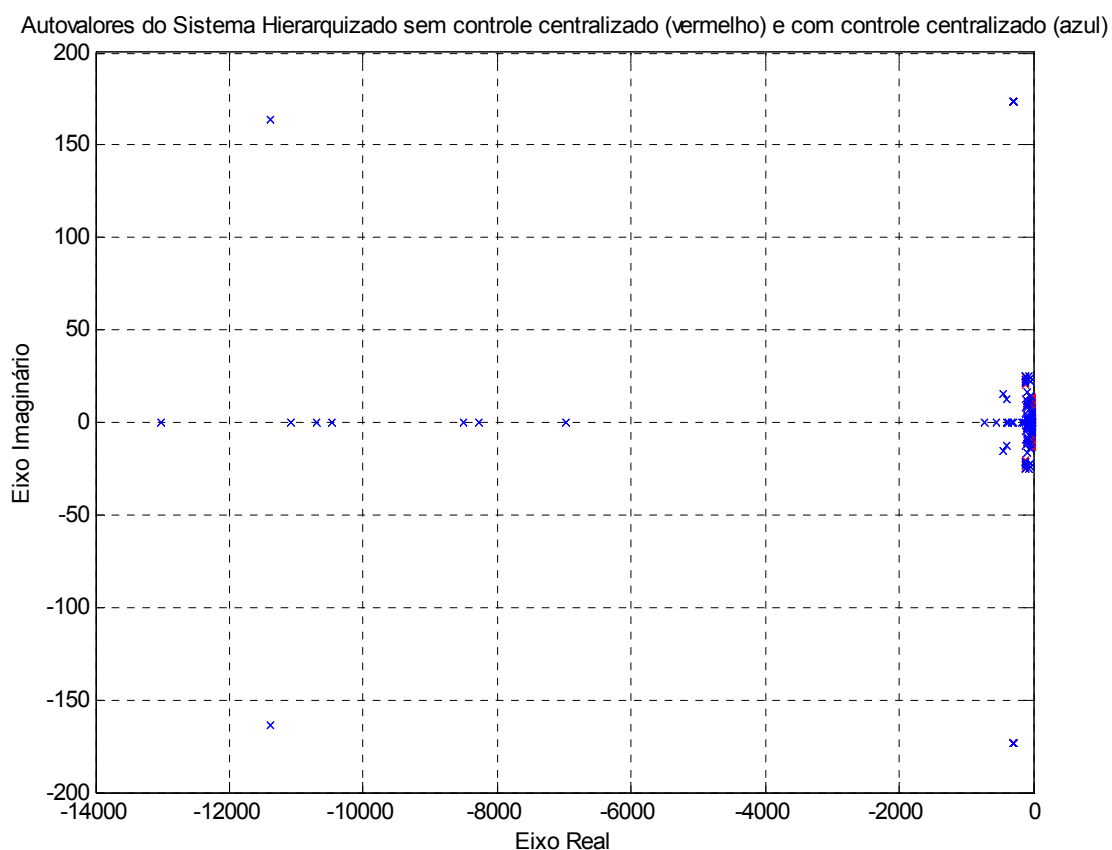




vermelho) e com controladores centralizados numa segunda camada de controle (em azul). Aproximando-se a figura 5.69 nos arredores do eixo imaginário, obtemos a figura 5.70. Podemos tirar as seguintes conclusões:

1. O amortecimento mínimo dos autovalores do sistema foi aumentado de 32% para 62.5% com o uso do controlador centralizado. Conclui-se assim que os controladores centralizados podem aumentar muito o amortecimento do sistema;
2. Para conseguir esse elevado amortecimento, alguns autovalores do controlador centralizado foram posicionados em pontos do plano complexo muito distantes da origem. Poder-se-ia incluir uma restrição de raio máximo no problema de controle robusto descrito através das LMI's (ver capítulo 4) e, dessa forma, os autovalores do sistema em malha fechada ficariam com uma frequência natural não amortecida bem menor; provavelmente, o amortecimento do sistema não seria tão elevado.

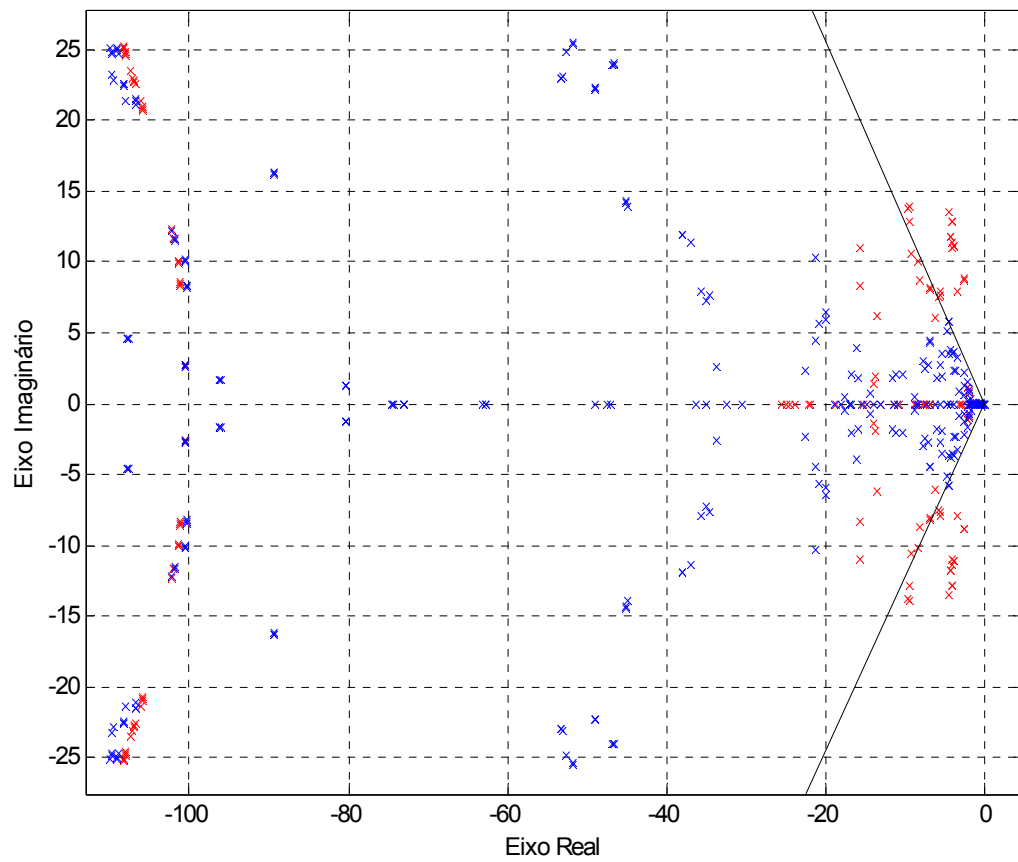
Na figura 5.71, são mostrados os zeros de transmissão do controlador centralizado obtido. Nota-se que alguns deles estão no semiplano direito do plano complexo. Nas figuras 5.72 e 5.73 são apresentados os pólos do controlador centralizado. Pode-se perceber que alguns deles são instáveis e outros têm frequência natural não amortecida bastante elevada.



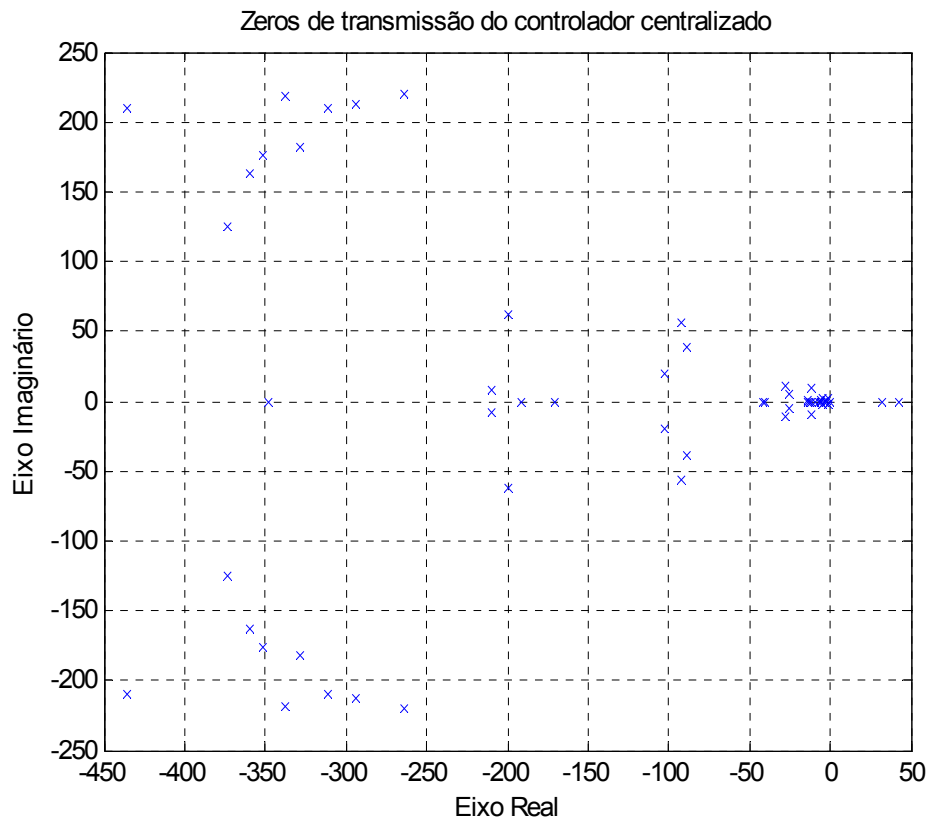
**Figura 5.69 - Autovalores do sistema New England de 39 barras (II) somente com controladores descentralizados (vermelho) e com controladores centralizados (azul) para os 3 pontos de operação – atrasos de 10 ms e aproximação de Padé de ordem 2**

A norma infinito do controlador neste caso vale 276162, sendo maior do que no caso em que foi utilizada a aproximação de Padé de ordem 1. Isto indica que, quanto melhor a aproximação dos atrasos, maior deverá ser o esforço de controle para posicionar os autovalores do sistema numa dada região do plano complexo.

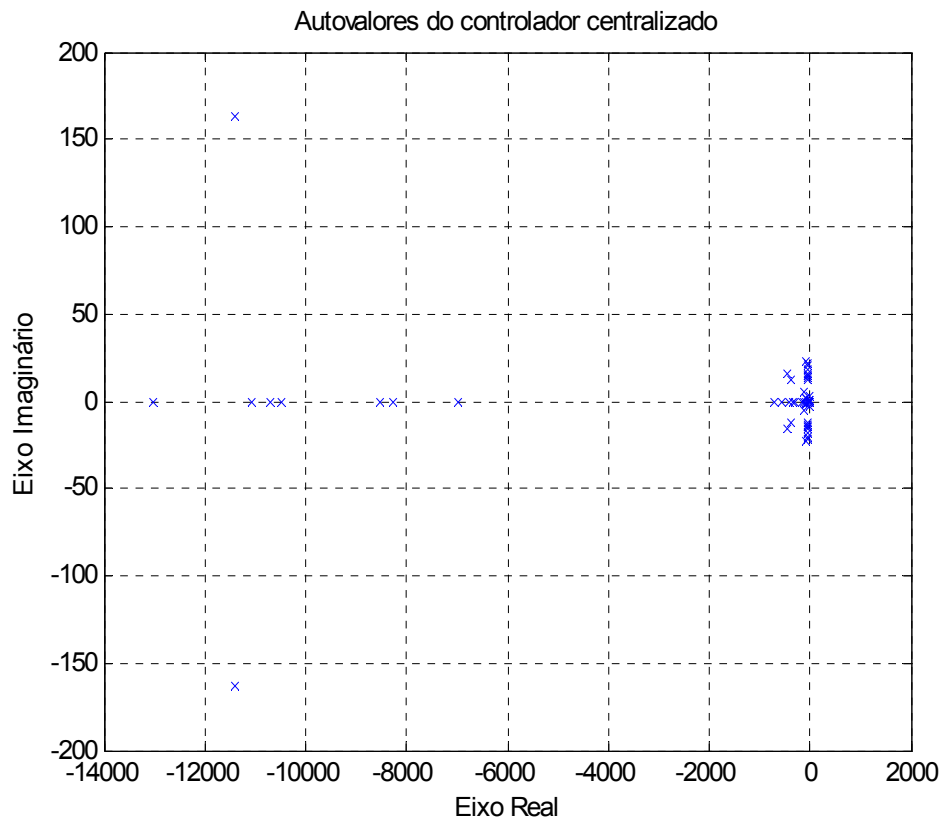
Autovalores do Sistema Hierarquizado sem controle centralizado (vermelho) e com controle centralizado (azul)



**Figura 5.70 – Autovalores do sistema New England de 39 barras (II) somente com controladores descentralizados (vermelho) e com controladores centralizados (azul) para os 3 pontos de operação (detalhe nas proximidades do eixo imaginário). As duas linhas delimitam a região do plano complexo na qual o amortecimento dos autovalores do sistema é de 62 %**



**Figura 5.71 – Zeros de transmissão para o controlador centralizado – sistema com atrasos de 10 ms e aproximação de Padé de ordem 2**

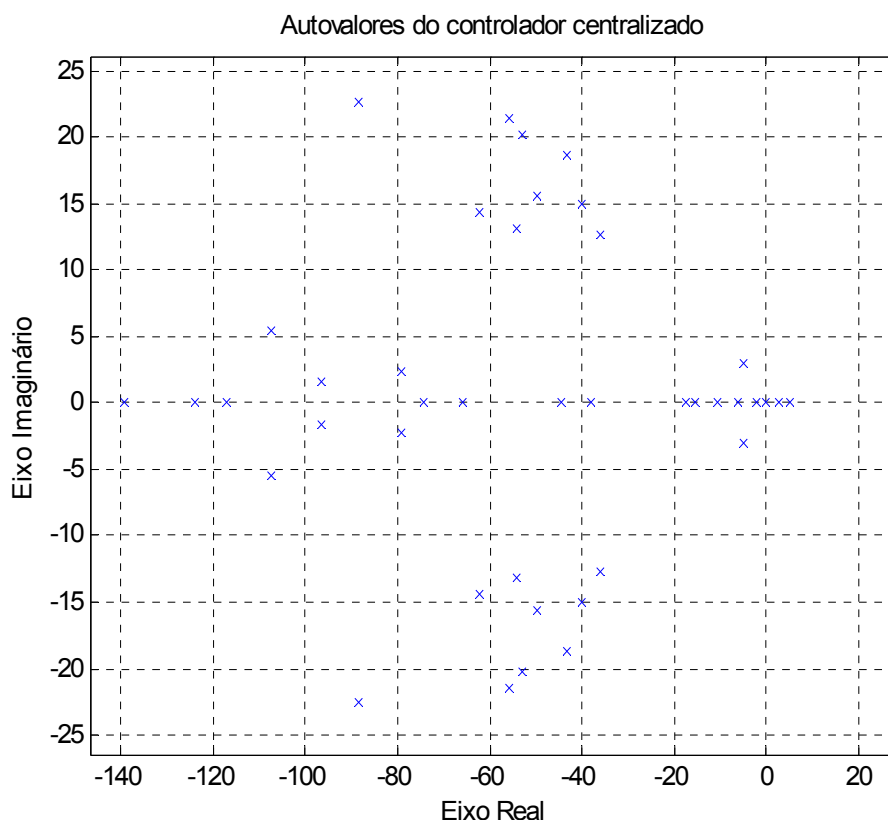


**Figura 5.72 – Autovalores do controlador centralizado – sistema com atrasos de 10 ms e aproximação de Padé de ordem 2**

Os autovalores instáveis do controlador centralizado são os seguintes:

4.9496, 2.6251,  $0.003526 + 0.000389i$  e  $0.003526 - 0.000389i$ .

Os zeros de transmissão de fase não-mínima do sistema sem o controlador centralizado são:  $300 + 173.21i$ ,  $300 - 173.21i$  (zeros de fase não mínima originários do modelo de atraso) e 0 (zeros de transmissão na origem). Desse modo, verifica-se que não há cancelamento de pólos instáveis e zeros de fase não mínima no sistema.



**Figura 5.73 – Autovalores do controlador centralizado (detalhe nas proximidades do eixo imaginário) – sistema com atrasos de 10 ms e aproximação de Padé de ordem 2**

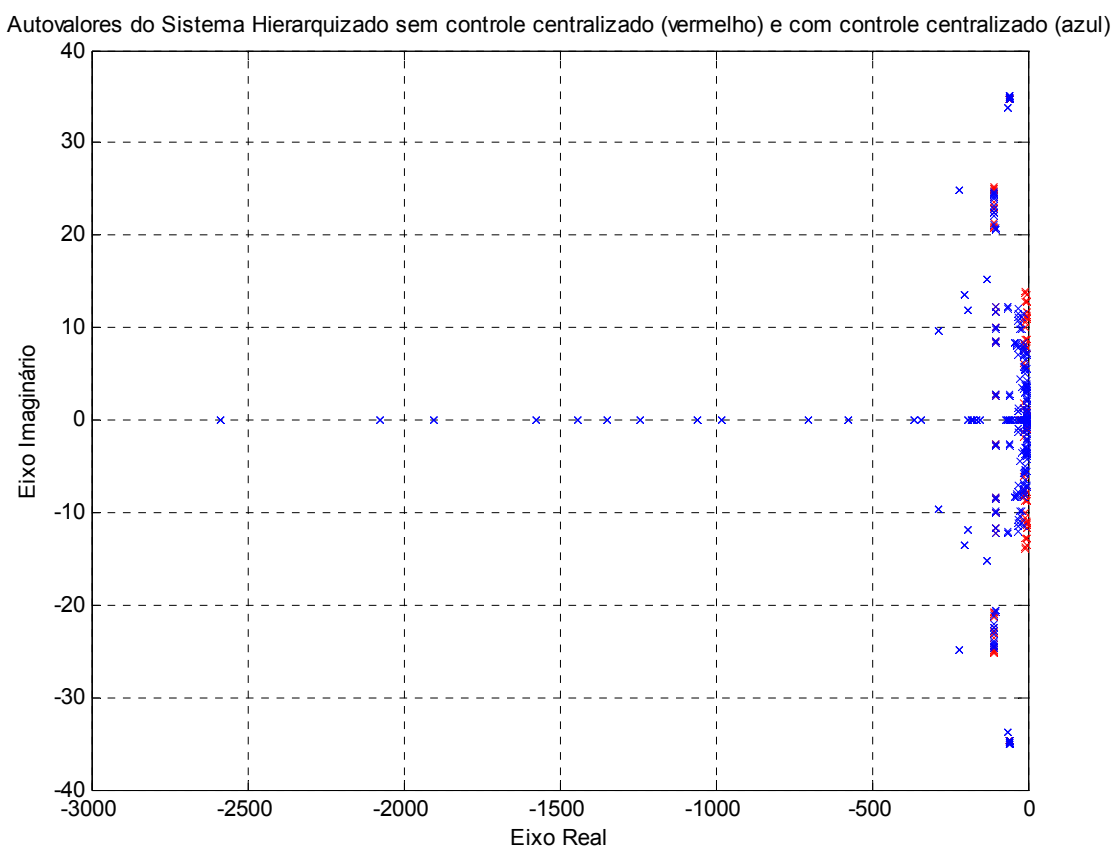
#### 5.4.4 Sistema com atrasos de 50 ms e aproximação de Padé de ordem 2

Neste caso, executamos o algoritmo que implementa o controlador centralizado robusto para atrasos valendo 50 ms e utilizamos aproximações de Padé de ordem 2 para os atrasos. Obteve-se a convergência do algoritmo de controle robusto para 3 pontos de operação em 85.2 horas (deve-se notar que as matrizes do controlador centralizado,  $A_C^{AT}$ ,  $B_C^{AT}$  e  $C_C^{AT}$  não são esparsas). Na figura 5.74, temos os autovalores do sistema somente com controladores descentralizados (em vermelho) e com controladores centralizados numa segunda camada de controle (em azul). Aproximando-se a figura 5.74 nos arredores do eixo imaginário, obtemos a figura 5.75. Observa-se o seguinte:

1. O amortecimento mínimo dos autovalores do sistema foi aumentado de 32% para 58% com o uso do controlador centralizado;

2. Para conseguir esse elevado amortecimento, alguns autovalores do controlador centralizado foram posicionados em pontos do plano complexo distantes da origem. Comparando-se este caso com o anterior, no qual os atrasos valiam 10 ms, percebe-se que o amortecimento foi um pouco menor agora (58% em vez de 62%) e, em compensação, a frequência natural não amortecida do sistema em malha fechada foi bem menor neste caso (2600 rad/s em vez de 13000 rad/s).

Na figura 5.76, são mostrados os zeros de transmissão do controlador centralizado obtido. Nota-se que alguns deles estão no semiplano direito do plano complexo. Nas figuras 5.77 e 5.78, são apresentados os pólos do controlador centralizado. Pode-se perceber que alguns deles são instáveis e outros têm frequência natural não amortecida elevada.

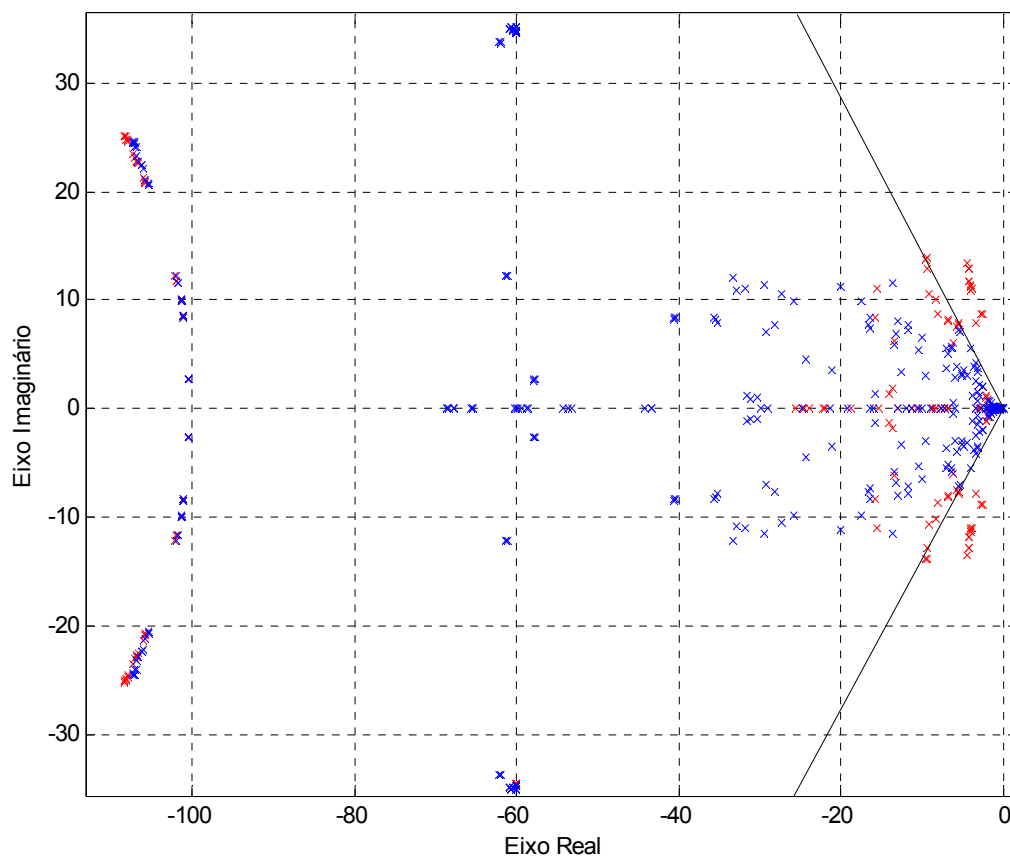


**Figura 5.74 - Autovalores do sistema New England de 39 barras (II) somente com controladores descentralizados (vermelho) e com controladores centralizados (azul) para os 3 pontos de operação – atrasos de 50 ms e aproximação de Padé de ordem 2**

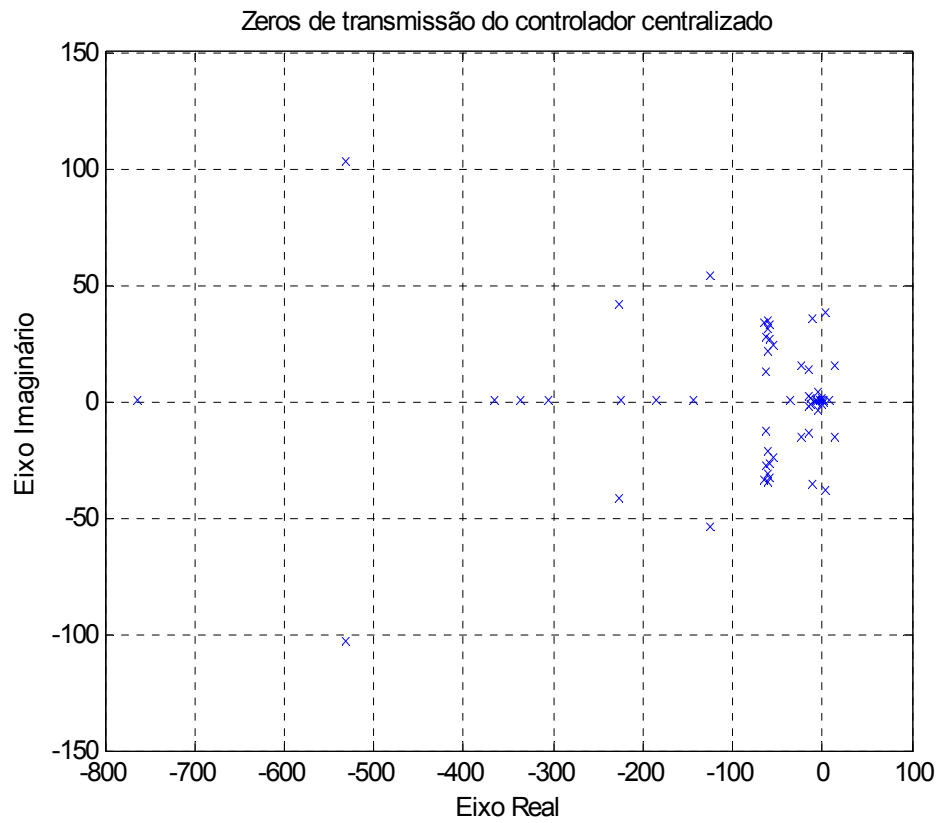


A norma infinito do controlador neste caso vale 25883, sendo menor do que no caso em que foi utilizada a aproximação de Padé de ordem 1. Isto provavelmente se deve ao fato de termos obtido um amortecimento menor neste caso.

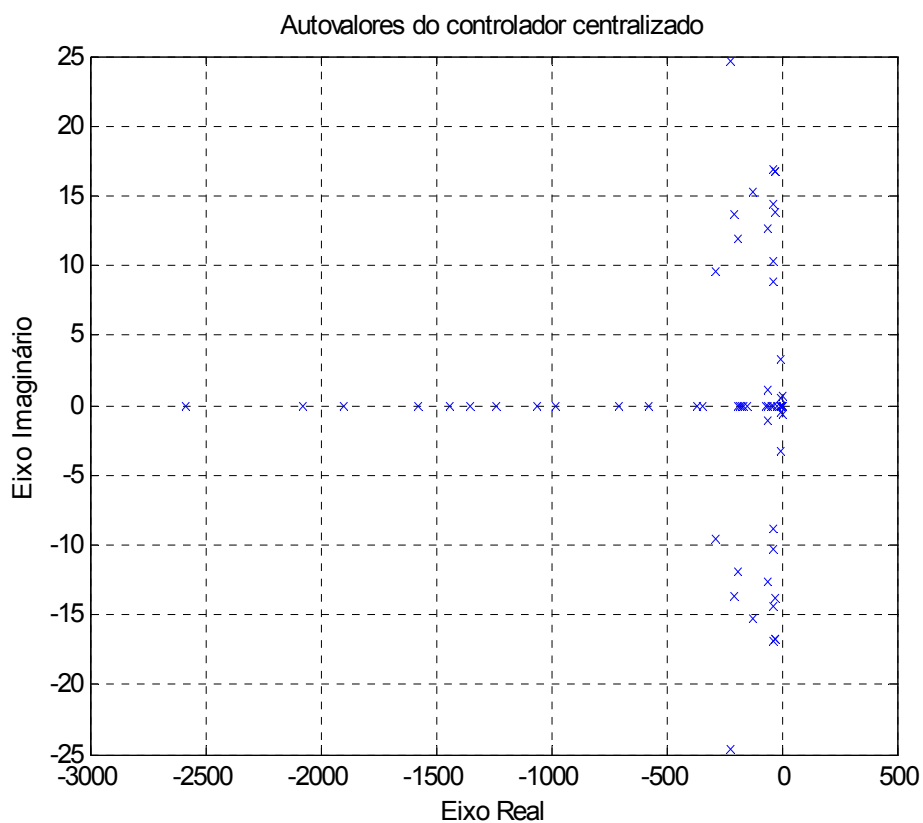
Autovalores do Sistema Hierarquizado sem controle centralizado (vermelho) e com controle centralizado (azul)



**Figura 5.75 – Autovalores do sistema New England de 39 barras (II) somente com controladores descentralizados (vermelho) e com controladores centralizados (azul) para os 3 pontos de operação (detalhe nas proximidades do eixo imaginário). As duas linhas delimitam a região do plano complexo na qual o amortecimento dos autovalores do sistema é de 58 %**



**Figura 5.76 – Zeros de transmissão para o controlador centralizado – sistema com atrasos de 50 ms e aproximação de Padé de ordem 2**

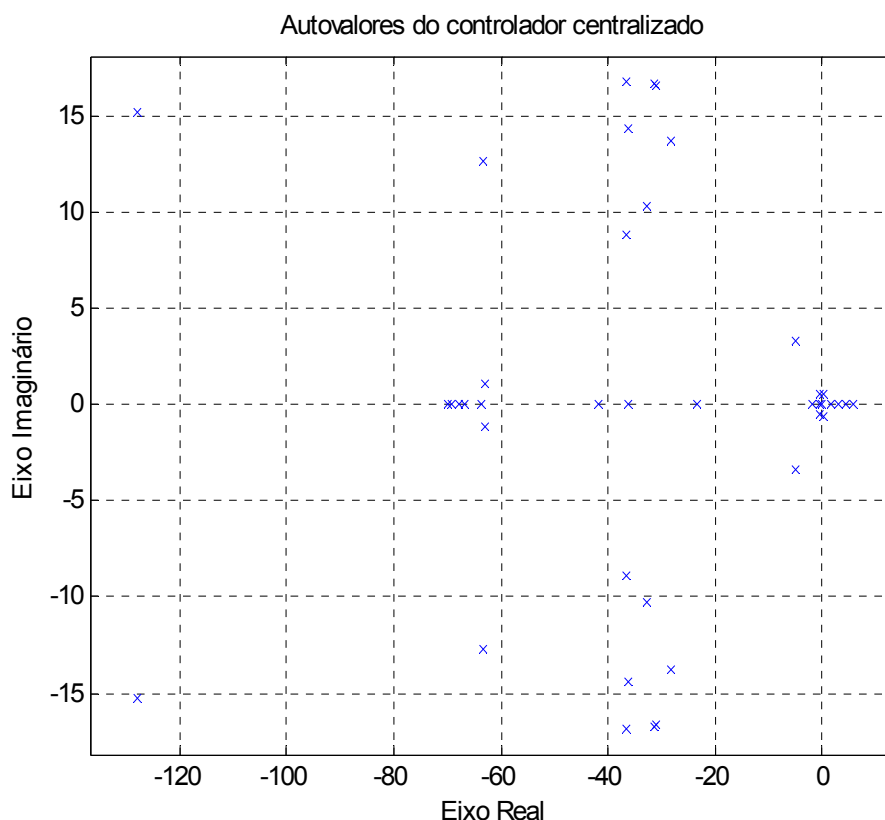


**Figura 5.77 – Autovalores do controlador centralizado – sistema com atrasos de 50 ms e aproximação de Padé de ordem 2**

Os autovalores instáveis do controlador centralizado são os seguintes:

5.9503, 4.5216, 3.273, 1.7794,  $0.2198 + 0.5944i$ ,  $0.2198 - 0.5944i$ , 0.09715, 0.04978, 0.01832 e 0.0074.

Os zeros de transmissão de fase não-mínima do sistema sem o controlador centralizado são:  $60 + 34.64i$ ,  $60 - 34.64i$  (zeros de fase não mínima originários do modelo de atraso) e 0 (zeros de transmissão na origem). Desse modo, verifica-se que não há cancelamento de pólos instáveis e zeros de fase não mínima no sistema.



**Figura 5.78 – Autovalores do controlador centralizado (detalhe nas proximidades do eixo imaginário) – sistema com atrasos de 50 ms e aproximação de Padé de ordem 2**

## 5.5. Análises dos Resultados e Comentários Finais

Utilizando-se todos os experimentos apresentados anteriormente para fazer comparações entre o primeiro método de controle robusto e o método homotópico, podem-se tirar as seguintes conclusões:

- Nos casos estudados, o primeiro método superou o método homotópico em termos de desempenho (amortecimento mínimo alcançado).
- Os controladores gerados pelos dois métodos têm características diferentes. O primeiro método gera controladores com característica de avançadores de fase, enquanto que o segundo método gera controladores do tipo atraso-avanço. Deste modo, o primeiro método é mais adequado a aplicações práticas em sistemas elétricos, pois compensadores

que geram atraso de fase não são comumente utilizados em sistemas de potência. A aplicação do método homotópico, então, exigiria alguns testes adicionais a fim de verificar o efeito do atraso de fase em altas frequências nos sistemas de potência. As simulações não-lineares realizadas sugerem que os controladores gerados pelo método homotópico não apresentam problemas quando aplicados aos sistemas de potência.

- A execução do algoritmo homotópico foi, nos casos estudados, oito vezes mais lenta que a execução do algoritmo do primeiro método, uma vez que a aplicação do método homotópico exige que os passos dados a cada iteração sejam pequenos.
- Para o sistema New England de 16 máquinas, foram utilizados dois modelos diferentes para a máquina síncrona, um deles mais sofisticado e o outro, mais simples. Os resultados obtidos mostram que, para o primeiro método de controle robusto, os controladores tiveram melhor desempenho para o modelo mais complexo. Já no caso do método homotópico, os controladores obtidos tiveram melhor desempenho para o modelo mais simples. Em outras palavras, os dois métodos apresentaram desempenhos diferentes (mas próximos) para modelos diferentes de máquina síncrona, sendo que cada método foi mais adequado a um certo modelo. Dessa forma, conclui-se que os métodos de controle robusto apresentam sensibilidade ao modelo de sistema de potência utilizado.
- As aproximações feitas nos algoritmos de controle robusto não prejudicaram o desempenho final do sistema, ou seja, mesmo com as aproximações realizadas nos algoritmos foi possível posicionar os autovalores do sistema em malha fechada nas regiões adequadas do plano complexo. A aproximação feita no algoritmo homotópico é mais precisa do que a aproximação feita no algoritmo do primeiro método. A aproximação do método homotópico considera pequenos incrementos de desempenho a cada iteração (desprezando termos matriciais quadráticos), enquanto que a aproximação do primeiro método permite atribuir valores a parâmetros da matriz de Lyapunov que deveriam valer zero. Assim, a aproximação do método homotópico deveria, teoricamente, ser mais próxima do problema original (descrito na forma de BMI's). Contudo, os testes mostraram que, em termos de desempenho, o primeiro método gera resultados melhores ou iguais ao método homotópico. Dessa forma, o fato de atribuímos valores a parâmetros que deveriam valer zero, no primeiro método, não constitui uma aproximação grosseira nos casos estudados; os valores destes parâmetros, na verdade, são pequenos, e provavelmente sua interferência no resultado final foi mínima.

- Os dois métodos propostos são flexíveis com relação à estrutura do controlador utilizado. Eles permitem que possamos escolher os pólos dos controladores, além de podermos escolher também quantos pólos e zeros terão os controladores. Esta é uma das principais características que definem a contribuição do método proposto.
- Em alguns casos, um ou dois controladores obtidos pelo primeiro método de controle robusto apresentaram parâmetros não convencionais para ESP's. Para fins de aplicações práticas, este(s) controlador(es) foi (ou foram) substituído(s) por outro(s) de comportamento similar numa dada faixa de frequências (e que apresentasse parâmetros positivos). Em geral, isto reduziu um pouco o desempenho obtido inicialmente, mas ainda assim mantendo uma boa taxa de amortecimento.

Considerando os resultados obtidos com a utilização do controlador hierarquizado, podem-se tirar as seguintes conclusões:

- O uso dos controladores centralizados permitiu aumentar muito o amortecimento dos autovalores do sistema de potência. Para sistemas que já possuem amortecimentos satisfatórios com os controladores descentralizados isto pode não ser adequado, uma vez que esforços de controle excessivamente elevados podem fazer com que os sinais de tensão estabilizante dos controladores sejam restringidos pelos limitadores de tensão, o que não é desejável. Mas, para sistemas que possuem amortecimentos baixos com os ESP's, o controle centralizado pode oferecer um bom amortecimento adicional.
- Os controladores centralizados obtidos apresentaram zeros de fase não mínima. A influência deste tipo de controle em sistemas de potência deve ser investigada mais detalhadamente antes de se utilizarem os controladores centralizados em aplicações práticas.
- A estrutura de controle hierarquizado permite que o controle descentralizado continue funcionando normalmente (garantindo o desempenho mínimo desejado para o sistema) caso todos os sinais remotos utilizados na realimentação do controlador centralizado sejam perdidos. Assim, o algoritmo de controle também é robusto com relação à perda dos sinais remotos.
- Nos casos estudados, quanto melhor foi a aproximação de Padé utilizada para os atrasos, maior foi o esforço de controle para aumentar o amortecimento dos autovalores do sistema.

- Nos casos avaliados, constatou-se que vale a regra geral: quanto maior o amortecimento especificado, maior deverá ser o esforço de controle aplicado ao sistema.

Todos os métodos desenvolvidos proporcionaram um aumento de amortecimento para os autovalores dos sistemas de potência utilizados nos testes. Uma próxima etapa deste trabalho consiste em aplicar o primeiro método de controle robusto descentralizado a um sistema de 60 máquinas (equivalente sul-sudeste brasileiro). Assim, poderemos verificar o funcionamento do algoritmo de controle quando aplicado a um sistema de grande porte.