

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ELETRICIDADE

**ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DO IMPACTO DOS PSS E  
CONTROLADORES FACTS NA ESTABILIDADE ELETROMECHANICA  
DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA**

RAIMUNDO NONATO DINIZ COSTA FILHO

São Luís – MA, Brasil  
2014

RAIMUNDO NONATO DINIZ COSTA FILHO

**ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DO IMPACTO DOS PSS E  
CONTROLADORES FACTS NA ESTABILIDADE ELETROMECHANICA  
DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade da UFMA como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica na área de concentração de Sistemas de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Vicente Leonardo Paucar Casas

São Luís – MA, Brasil  
2014

Costa Filho, Raimundo Nonato Diniz.

Análise técnico – econômica do impacto dos PSS e Controladores FACTS na estabilidade eletromecânica de sistemas de energia elétrica/ Raimundo Nonato Diniz Costa Filho – São Luís, 2014.

178 f.

Impresso por computador (fotocópia).

Orientador: Vicente Leonardo Paucar Casas.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Maranhão, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade, 2014.

1. Sistema de energia elétrica - Estabilidade. 2. Controladores FACTS. 3. Estabilizador de sistema de potência (PSS). I. Título.

CDU 621.3.052: 621.3.016.35

**ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DO IMPACTO DOS PSS E  
CONTROLADORES FACTS NA ESTABILIDADE ELETROMECHANICA  
DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA**

**RAIMUNDO NONATO DINIZ COSTA FILHO**

Dissertação aprovada em 21 de Fevereiro de 2014



Prof. Dr. Vicente Leonardo Paucar Casas

UFMA

(Orientador)



PhD. Nelson Martins

CEPEL

(Membro da Banca Examinadora)



Prof. Dr. José Eduardo Onoda Pessanha

UFMA

(Membro da Banca Examinadora)

Este Trabalho é dedicado aos meus pais: Maria Jucileide e Raimundo Nonato. Aos meus irmãos: Ana Maria, Bárbara Maria, Raimunda Carolina, Nelson Chagas, Antônio Marcos e Maria Madalena. À minha futura esposa Livia Brandão e a minha filha Layla.

## **Agradecimentos**

A Deus por todas as bênçãos que recebi na vida.

À minha mãe e meu pai, pelos ensinamentos, pelo amor, carinho e incentivo, que me proporcionou a continuidade nos estudos.

À Livia Brandão, por ter ficado ao meu lado em todos os momentos, dos mais tristes aos mais felizes, deste mestrado. Por sua compreensão (pelos momentos ausente) e apoio durante o período de elaboração deste trabalho, e por ter me dado uma nova razão para continuar: Layla.

A meus irmãos Ana Maria, Bárbara Maria, Raimunda Carolina, Nelson Chagas, Antônio Marcos e Maria Madalena por todos os momentos de alegrias e tristezas. Ao mascote da família, Quinho, por eu aguentar seus latidos deste desde a minha 7ª série.

Ao professor Dr. Vicente Leonardo Paucar pela orientação fornecida, grande dedicação e apoio.

Aos professores Osvaldo Ronald Saavedra, Maria da Guia da Silva e José Eduardo Onoda Pessanha pelo apoio e ensinamentos.

As minhas tias e padrinho pelo incentivo dado no decorrer da minha vida.

Aos meus colegas de graduação e mestrado.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro.

“Tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar, divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade continua misterioso diante de meus olhos”

**(Isaac Newton)**

## Resumo

Neste trabalho é analisada a influência dos Controladores FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) e dos estabilizadores de sistemas de potência ou PSS (*Power System Stabilizers*) na estabilidade eletromecânica dos sistemas de energia elétrica (SEE), considerando o seu impacto técnico e econômico na operação e planejamento. Os Controladores FACTS mais empregados na prática foram considerados nesta pesquisa, o compensador estático de potência reativa ou SVC (*Static VAR Compensator*) e o capacitor série controlado a tiristores ou TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*), além dos PSS. Para a avaliação técnico-econômica do impacto dos FACTS e PSS nos SEE foi desenvolvida uma metodologia baseada em índices de estabilidade eletromecânica a pequenas perturbações e de estabilidade transitória. Na análise técnica foram utilizados os programas PacDyn e ANATEM, além do ANAREDE, todos desenvolvidos pelo CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica). A análise econômica baseou-se no uso do aplicativo PSAT (*Power Systems Analysis Toolbox*). Como parte da avaliação técnica a coordenação e sintonização dos parâmetros dos PSS, SVC e TCSC foram conduzidas utilizando métodos de inteligência artificial de forma a obter os melhores valores ótimos. A metodologia proposta foi aplicada a sistemas teste e a uma configuração do Sistema Interligado Nacional (SIN) modelado com 50 geradores e 616 barras.

**Palavras-chave:** Sistemas de energia elétrica, Controladores FACTS, Estabilizador de sistemas de potência (PSS), Estabilidade eletromecânica, Inteligência artificial.



## **Abstract**

In this work the influence of FACTS (Flexible AC Transmission Systems) Controllers and power system stabilizers (PSS) on electromechanical stability of electrical power systems (EPS) is analyzed considering their technical and economic impact in the operation and planning. FACTS Controllers most employees in practical applications were considered in this study, the Static VAR Compensator (SVC) and Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC), in addition to the PSS. For the technical and economic evaluation of the impact of FACTS and PSS in power systems a methodology based on indices of electromechanical small-signal and transient stability has been developed. Software packages PacDyn and ANATEM, including ANAREDE, all produced by CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica), were used to analyze the technical impact of SVC, TCSC and PSS on electromechanical stability enhancement. The economic analysis was based on the use of software package PSAT (Power Systems Analysis Toolbox). As part of the technical evaluation, coordination and tuning of the parameters of PSS and FACTS Controllers were conducted using artificial intelligence techniques in order to obtain the best optimal values. The proposed methodology was applied to test systems and a configuration of the Brazilian Interconnected System (SIN - Sistema Interligado Nacional) modeled with 50 generators and 616 buses.

**Keywords:** Electrical power systems, FACTS Controllers, Power system stabilizer (PSS), Electromechanical stability, Artificial intelligence.

## Lista de Figuras

|                                                                                                                                | Página |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Figura 2.1: Classificação da estabilidade de sistemas de energia elétrica.....                                                 | 8      |
| Figura 2.2: Diagrama de controle do regulador automático de tensão. ....                                                       | 10     |
| Figura 2.3: Estrutura convencional do PSS .....                                                                                | 11     |
| Figura 2.4: Modelo 1 do SVC .....                                                                                              | 13     |
| Figura 2.5: Modelo 2 do SVC .....                                                                                              | 13     |
| Figura 2.6: Modelo 1 do TCSC .....                                                                                             | 14     |
| Figura 2.7: Modelo 2 do TCSC .....                                                                                             | 14     |
| Figura 2.8: Região de convergência das quatro funções objetivo. ....                                                           | 24     |
| Figura 3.1: Fluxograma da execução dos programas PacDyn e ANATEM.....                                                          | 33     |
| Figura 3.2: Zona da função objetivo no plano S.....                                                                            | 34     |
| Figura 3.3: Equivalência entre o plano S e o plano Z.....                                                                      | 35     |
| Figura 3.4: Fluxograma da análise técnica da estabilidade a pequenas perturbações. ....                                        | 37     |
| Figura 3.5: Diagrama unifilar do sistema WSCC de 9 barras e 3 geradores. ....                                                  | 38     |
| Figura 3.6: Mapa de pólos para o sistema WSCC no caso base.....                                                                | 39     |
| Figura 3.7: Mapa de pólos para o sistema WSCC com PSS. ....                                                                    | 41     |
| Figura 3.8: Mapa de pólos para o sistema WSCC com SVC. ....                                                                    | 42     |
| Figura 3.9: Mapa de pólos para o sistema WSCC com TCSC. ....                                                                   | 44     |
| Figura 3.10: Mapa de pólos para o sistema WSCC com PSS e SVC.....                                                              | 45     |
| Figura 3.11: Mapa de pólos para o sistema WSCC com PSS e TCSC. ....                                                            | 47     |
| Figura 3.12: Mapa de pólos do sistema WSCC com PSS, SVC e TCSC.....                                                            | 48     |
| Figura 3.13: Diagrama unifilar do sistema New England. ....                                                                    | 51     |
| Figura 3.14: Mapa de pólos para o sistema New England no caso base. ....                                                       | 52     |
| Figura 3.15: Mapa de pólos para o sistema New England com PSS.....                                                             | 54     |
| Figura 3.16: Mapa de pólos do sistema New England com SVC e PSS. ....                                                          | 56     |
| Figura 3.17: Mapa de pólos do sistema New England com PSS e TCSC.....                                                          | 58     |
| Figura 3.18: Mapa de pólos do sistema New England com PSS, SVC e TCSC. ....                                                    | 60     |
| Figura 3.19: Mapa de pólos para o sistema brasileiro. ....                                                                     | 62     |
| Figura 3.20: Mapa de pólos para o sistema brasileiro com PSS.....                                                              | 65     |
| Figura 3.21: Mapa de pólos para o sistema brasileiro com PSS, SVC e TCSC. ....                                                 | 68     |
| Figura 3.22: Mapa de pólos de malha fechada e aberta para diferentes quantidade de blocos <i>lead-lag</i> no sistema WSCC..... | 70     |

|                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 3.23: Diagrama unifilar do sistema de 3 geradores e 6 barras. ....                                    | 71  |
| Figura 3.24: Diagrama unifilar do sistema de 5 geradores e 7 barras. ....                                    | 71  |
| Figura 3.25: Mapa de pólos dos sistemas de 3 e 5 geradores no plano S.....                                   | 73  |
| Figura 3.26: Mapa de pólos dos sistemas de 3 e 5 geradores no plano Z. ....                                  | 73  |
| Figura 3.27: Resposta do produto interno: (a) sistema estável, (b) sistema instável.....                     | 75  |
| Figura 3.28: Área de integração do produto interno.....                                                      | 76  |
| Figura 3.29: Fluxograma para análise técnica da estabilidade transitória dos controladores PSS e FACTS ..... | 78  |
| Figura 3.30: Amortecimento em função de $K_{pss}$ . ....                                                     | 79  |
| Figura 3.31: Comportamento do ângulo dos geradores, com e sem PSS, do sistema WSCC..                         | 80  |
| Figura 3.32: Amortecimento em função de $K_{svc}$ . ....                                                     | 81  |
| Figura 3.33: Comparação entre SVC e o caso base par ao sistema WSCC. ....                                    | 82  |
| Figura 3.34: Amortecimento em função de $T_1$ e $T_w$ do POD-TCSC.....                                       | 83  |
| Figura 3.35: Comparação entre TCSC e o caso base para o sistema WSCC. ....                                   | 84  |
| Figura 3.36: Comparação entre o caso SVC e o caso SVC+PSS para o sistema WSCC.....                           | 86  |
| Figura 3.37: Comparação entre caso TCSC e o caso PSS+TCSC para o sistema WSCC. ....                          | 87  |
| Figura 3.38: Comparação entre os três casos anteriores para o sistema WSCC. ....                             | 88  |
| Figura 3.39: Curvas de oscilação dos ângulos dos geradores do sistema New England sem controladores. ....    | 91  |
| Figura 3.40: Curvas de oscilação dos ângulos dos geradores do sistema New England com PSS. ....              | 91  |
| Figura 3.41: Curva de oscilação dos ângulos dos geradores do sistema New England com PSS e SVC.....          | 93  |
| Figura 3.42: Curvas de oscilação dos ângulos dos geradores do sistema New England com PSS e TCSC.....        | 94  |
| Figura 3.43: Comportamento dos ângulos dos geradores do sistema New England com PSS, SVC e TCSC.....         | 96  |
| Figura 3.44: Comportamento dos ângulos dos geradores do sistema brasileiro sem controladores. ....           | 98  |
| Figura 3.45: Comportamento dos ângulos dos geradores do sistema brasileiro com PSS.....                      | 98  |
| Figura 3.46: Comportamento dos ângulos dos geradores do sistema brasileiro com PSS, SVC e TCSC. ....         | 100 |
| Figura 4.1: Fluxograma para análise econômica da estabilidade a pequenas perturbações. ..                    | 105 |

|                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 4.2: Curva do amortecimento versus custo de geração no sistema WSCC.....                               | 109 |
| Figura 4.3: Fluxograma para análise econômica da estabilidade transitória. ....                               | 111 |
| Figura 4.4: Ângulos dos geradores no caso base antes da aplicação do TSCOPF no sistema WSCC.....              | 113 |
| Figura 4.5: Ângulos dos geradores no caso base após a aplicação do TSCOPF no sistema WSCC.....                | 113 |
| Figura 4.6: Ângulos dos geradores no caso PSS após a aplicação do TSCOPF no sistema WSCC.....                 | 114 |
| Figura 4.7: Ângulos dos geradores no caso PSS+SVC após a aplicação do TSCOPF no sistema WSCC.....             | 114 |
| Figura 4.8: Ângulos dos geradores no caso PSS+TCSC após a aplicação do TSCOPF no sistema WSCC.....            | 115 |
| Figura 4.9: Ângulo dos geradores no caso base antes da aplicação do TSCOPF no sistema New England. ....       | 116 |
| Figura 4.10: Ângulo dos geradores no caso base após a aplicação do TSCOPF no sistema New England. ....        | 116 |
| Figura 4.11: Ângulo dos geradores no caso PSS após a aplicação do TSCOPF no sistema New England.....          | 117 |
| Figura 4.12: Ângulos dos geradores no caso PSS+SVC após a aplicação do TSCOPF no sistema New England. ....    | 118 |
| Figura 4.13: : Ângulos dos geradores no caso PSS+TCSC após a aplicação do TSCOPF no sistema New England. .... | 118 |
| Figura A.1: Linha do tempo das técnicas de IA. ....                                                           | 125 |
| Figura A.2: Fluxograma de um PSO padrão. ....                                                                 | 127 |
| Figura A.3: Fluxograma da evolução diferencial .....                                                          | 130 |

## Lista de Tabelas

|                                                                                            | Página |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Tabela 3.1: Limites dos parâmetros dos controladores nos sistemas teste.....               | 32     |
| Tabela 3.2: Técnicas de IA utilizadas nos sistemas teste. ....                             | 33     |
| Tabela 3.3: Razão de amortecimento do caso base para o sistema WSCC. ....                  | 39     |
| Tabela 3.4: Resíduos para a alocação do PSS no sistema WSCC. ....                          | 40     |
| Tabela 3.5: Parâmetros do PSS do sistema WSCC obtidos com técnicas de IA. ....             | 40     |
| Tabela 3.6: Razão de amortecimento para o sistema WSCC com PSS no gerador 2. ....          | 40     |
| Tabela 3.7: Resíduos para alocação do SVC no sistema WSCC. ....                            | 41     |
| Tabela 3.8: Constantes do POD do SVC para o sistema WSCC. ....                             | 42     |
| Tabela 3.9: Razão de amortecimento para o Sistema WSCC com SVC na barra 7. ....            | 42     |
| Tabela 3.10: Resíduos para alocação do TCSC no sistema WSCC. ....                          | 43     |
| Tabela 3.11: Constantes do POD do TCSC para o sistema WSCC. ....                           | 43     |
| Tabela 3.12: Razão de amortecimento para o Sistema WSCC com TCSC na linha 5-7. ....        | 43     |
| Tabela 3.13: Resíduos para alocação do SVC no sistema WSCC com PSS. ....                   | 44     |
| Tabela 3.14: Constantes do POD do SVC e do PSS para o sistema WSCC. ....                   | 45     |
| Tabela 3.15: Razão de amortecimento do caso com PSS e SVC para o sistema WSCC. ....        | 46     |
| Tabela 3.16: Resíduos para alocação do TCSC no sistema WSCC com PSS. ....                  | 46     |
| Tabela 3.17: Constantes do POD do TCSC e PSS para o sistema WSCC. ....                     | 46     |
| Tabela 3.18: Razão de amortecimento do caso com PSS e TCSC para o sistema WSCC. ....       | 47     |
| Tabela 3.19: Resíduos para alocação do TCSC no sistema WSCC com PSS e SVC. ....            | 48     |
| Tabela 3.20: Constantes dos PSS e dos POD do TCSC e SVC para o sistema WSCC. ....          | 49     |
| Tabela 3.21: Razão de amortecimento do sistema WSCC com PSS, SVC e TCSC. ....              | 49     |
| Tabela 3.22: Tabela resumo dos amortecimentos para o sistema WSCC. ....                    | 50     |
| Tabela 3.23: Razão de amortecimento crítica para o caso base do sistema New England. ....  | 51     |
| Tabela 3.24: Constantes dos PSS do sistema New England com diferentes técnicas de IA. .... | 53     |
| Tabela 3.25: Razão de amortecimento crítica para o caso PSS no sistema New England. ....   | 53     |
| Tabela 3.26: Resíduo para alocação do SVC no sistema New England. ....                     | 54     |
| Tabela 3.27: Constantes dos PSS e SVC do sistema New England com 4 técnicas de IA. ....    | 55     |
| Tabela 3.28: Razão de amortecimento crítica do sistema New England com PSS e SVC. ....     | 56     |
| Tabela 3.29: Resíduo para alocação do TCSC no sistema New England. ....                    | 56     |
| Tabela 3.30: Constantes dos PSS e TCSC do sistema New England com 4 técnicas de IA. ....   | 57     |
| Tabela 3.31: Razão de amortecimento crítica do sistema New England com PSS e TCSC. ....    | 58     |

|                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 3.32: Resíduo para alocação do SVC no sistema New England com PSS e TCSC. ....                   | 58  |
| Tabela 3.33: Constantes dos PSS e FACTS do sistema New England com 4 técnicas de IA. .                  | 59  |
| Tabela 3.34: Razão de amortecimento crítica do sistema New England com PSS, SVC e TCSC. ....            | 60  |
| Tabela 3.35: Tabela resumo para os casos do sistema New England.....                                    | 61  |
| Tabela 3.36: Razão de amortecimento crítica para o caso base no sistema Sul-Sudeste .....               | 62  |
| Tabela 3.37: Constantes dos PSS para o sistema brasileiro. ....                                         | 63  |
| Tabela 3.38: Constantes do SVC, TCSC e PSS para o sistema brasileiro. ....                              | 66  |
| Tabela 3.39: Amortecimento versus quantidade de blocos <i>lead-lag</i> .....                            | 69  |
| Tabela 3.40: Parâmetros do PSS com diferentes quantidades de blocos <i>lead-lag</i> . ....              | 69  |
| Tabela 3.41: Comparação das técnicas de IA com outras metodologias.....                                 | 72  |
| Tabela 3.42: Valores de $K_{pss}$ obtidos com AG e SA para o sistema WSCC.....                          | 80  |
| Tabela 3.43: Valores de $K_{svc}$ obtidos com AG e SA para o sistema WSCC.....                          | 82  |
| Tabela 3.44: Valores de $T_1$ e $T_w$ obtidos com AG e SA para o sistema WSCC.....                      | 84  |
| Tabela 3.45: Valores de $K_{pss}$ e $K_{svc}$ obtidos com AG e SA para o sistema WSCC. ....             | 85  |
| Tabela 3.46: Valores de $K_{pss}$ , $T_1$ e $T_w$ obtidos para o sistema WSCC. ....                     | 86  |
| Tabela 3.47: Valores de $K_{pss}$ , $T_1$ , $T_w$ e $K_{svc}$ obtidos para o sistema WSCC.....          | 88  |
| Tabela 3.48: Tempos críticos para diferentes faltas simuladas no sistema WSCC.....                      | 89  |
| Tabela 3.49: Valores de $K_{pss}$ obtidos para o sistema New England.....                               | 90  |
| Tabela 3.50: Valores de $K_{pss}$ e $K_{svc}$ obtidos para o sistema New England. ....                  | 92  |
| Tabela 3.51: Valores de $K_{pss}$ , $T_1$ e $T_w$ obtidos para o sistema New England.....               | 94  |
| Tabela 3.52: Valores de $K_{pss}$ , $K_{svc}$ , $T_1$ e $T_w$ para o sistema New England.....           | 95  |
| Tabela 3.53: Tempo crítico para todos os casos no sistema New England. ....                             | 96  |
| Tabela 3.54: $K_{pss}$ para o sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....                                      | 97  |
| Tabela 3.55: Parâmetros de $K_{pss}$ , $K_{svc}$ , $T_1$ e $T_w$ . ....                                 | 99  |
| Tabela 3.56: Tempo crítico para diferentes tipos de perturbação no sistema Sul-Sudeste brasileiro. .... | 100 |
| Tabela 4.1: Resultado do FPO para alguns dos casos do sistema WSCC.....                                 | 106 |
| Tabela 4.2: Resultado do FPO para todos os casos do sistema New England. ....                           | 107 |
| Tabela 4.3: Impacto dos PSS e FACTS no custo de geração do sistema WSCC.....                            | 108 |
| Tabela 4.4: Impacto dos PSS e FACTS no custo de geração do sistema New England. ....                    | 108 |
| Tabela 4.5: Resultado do TSCOPF no sistema WSCC. ....                                                   | 119 |
| Tabela 4.6: Resultado do TSCOPF no sistema New England.....                                             | 119 |

|                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela A.1: Procedimento básico dos algoritmos genéticos .....                         | 126 |
| Tabela A.2: Procedimento básico do algoritmo <i>simulated annealing</i> .....          | 128 |
| Tabela B.1: Dados de barra do sistema de 3 geradores e 6 barras .....                  | 131 |
| Tabela B.2: Dados dos geradores do sistema de 3 geradores e 6 barras. ....             | 131 |
| Tabela B.3: Dados dos reguladores de tensão do sistema de 3 geradores e 6 barras. .... | 131 |
| Tabela B.4: Dados de barra do sistema de 5 geradores e 7 barras. ....                  | 132 |
| Tabela B.5: Dados dos ramos do sistema de 5 geradores e 7 barras. ....                 | 132 |
| Tabela B.6: Dados dos geradores do sistema de 5 geradores e 7 barras. ....             | 133 |
| Tabela B.7: Dados dos reguladores de tensão do sistema do sistema de 5 geradores ..... | 133 |
| Tabela B.8: Dados de barra do sistema WSCC .....                                       | 134 |
| Tabela B.9: Dados dos ramos do sistema WSCC .....                                      | 134 |
| Tabela B.10: Dados dos geradores do sistema WSCC .....                                 | 135 |
| Tabela B.11: Dados dos reguladores de tensão do sistema WSCC .....                     | 135 |
| Tabela B.12: Dados de barras do sistema New England .....                              | 136 |
| Tabela B.13: Dados dos ramos do sistema New England .....                              | 137 |
| Tabela B.14: Dados dos geradores do sistema New England .....                          | 139 |
| Tabela B.15: Dados dos reguladores de tensão do sistema New England .....              | 139 |
| Tabela B.16: Dados de geradores do sistema Sul-Sudeste brasileiro .....                | 140 |
| Tabela B.17: Dados dos reguladores de tensão do sistema Sul-Sudeste brasileiro .....   | 143 |
| Tabela C.1: Dados econômicos dos geradores do sistema WSCC .....                       | 145 |
| Tabela C.2: Dados econômicos dos geradores do sistema New England .....                | 145 |
| Tabela D.1: Modelos de geradores do aplicativo PSAT .....                              | 146 |
| Tabela D.2: Modelos de geradores do PacDyn .....                                       | 146 |

## Lista de Abreviaturas

|         |                                                             |
|---------|-------------------------------------------------------------|
| PSS     | : <i>Power System Stabilizer</i>                            |
| FACTS   | : <i>Flexible Alternating Current Transmission System</i>   |
| AVR     | : <i>Automatic Voltage Regulator</i>                        |
| RBFN    | : <i>Radial Basis Function Networks</i>                     |
| AG      | : <i>Algoritmos Genéticos</i>                               |
| SA      | : <i>Simulated Annealing</i>                                |
| PSO     | : <i>Particle Swarm Optimization</i>                        |
| SVC     | : <i>Static Var Compensator</i>                             |
| TCSC    | : <i>Thyristor Controlled Series Compensator</i>            |
| ED      | : <i>Evolução Diferencial</i>                               |
| BFOA    | : <i>Bacteria Foraging Optimization Algorithm</i>           |
| UPFC    | : <i>Unified Power Flow Controller</i>                      |
| IPFC    | : <i>Interline Power Flow Controller</i>                    |
| POD     | : <i>Power Oscillation Damping</i>                          |
| SEP     | : <i>Sistemas Elétricos de Potência</i>                     |
| SEE     | : <i>Sistemas de Energia Elétrica</i>                       |
| MATLAB  | : <i>Matrix Laboratory</i>                                  |
| FMINCON | : <i>Find Minimum of Constrained Nonlinear</i>              |
| STATCOM | : <i>Static Synchronous Compensator</i>                     |
| FPO     | : <i>Fluxo de Potência Ótimo</i>                            |
| TSCOPF  | : <i>Transient Stability Constrained Optimal Power Flow</i> |
| COI     | : <i>Centre Of Inertia</i>                                  |
| EAC     | : <i>Equal Area Criterion</i>                               |
| OMIB    | : <i>One Machine Infinite Bus</i>                           |
| SIME    | : <i>Single Machine Equivalent</i>                          |
| TCVR    | : <i>Thyristor Controlled Voltage Regulator</i>             |
| TCPST   | : <i>Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer</i>    |
| NPV     | : <i>Net Present Value</i>                                  |
| IA      | : <i>Inteligência Artificial</i>                            |
| CDU     | : <i>Controladores Definidos pelo Usuário</i>               |
| ANATEM  | : <i>Análise de Transitórios Eletromecânicos</i>            |



|         |                                                                |
|---------|----------------------------------------------------------------|
| ANAREDE | : Análise de Redes                                             |
| CEPEL   | : Centro de Pesquisas de Energia Elétrica                      |
| IEEE    | : <i>The Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> |
| CIGRÉ   | : <i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques</i>  |
| PSAT    | : <i>Power Systems Analysis Toolbox</i>                        |
| SIN     | : Sistema Interligado Nacional                                 |
| WSCC    | : <i>Western Systems Coordinating Council</i>                  |
| Hz      | : Hertz                                                        |
| PQ      | : Barra de carga                                               |
| PV      | : Barra de geração                                             |
| p.u     | : Por unidade                                                  |
| AET     | : Avaliação da Estabilidade Transitória                        |
| rad     | : Radianos                                                     |
| s       | : Segundos                                                     |
| SARQI   | : <i>Subspace Accelerated Rayleigh Quotient Iteration</i>      |

## Lista de Símbolos

|              |                                                        |
|--------------|--------------------------------------------------------|
| $\mathbf{A}$ | : Matriz de estado                                     |
| $\lambda$    | : Autovalor                                            |
| $\phi$       | : Autovetor à direita                                  |
| $\psi$       | : Autovetor à esquerda                                 |
| $p$          | : Fator de participação                                |
| $e$          | : Número de Euler                                      |
| $\sigma$     | : Parte real do autovalor                              |
| $\omega$     | : Parte imaginária do autovalor                        |
| $f$          | : Frequência                                           |
| $\zeta$      | : Razão de amortecimento                               |
| $H$          | : Constante de inércia                                 |
| $T_m$        | : Torque mecânico                                      |
| $T_e$        | : Torque elétrico                                      |
| $D$          | : Coeficiente de amortecimento                         |
| $\omega_s$   | : Velocidade síncrona                                  |
| $\omega_r$   | : Velocidade do rotor da máquina síncrona              |
| $V_t$        | : Tensão terminal da máquina síncrona                  |
| $V_d$        | : Tensão terminal de eixo direto da máquina síncrona   |
| $V_q$        | : Tensão terminal em quadratura da máquina síncrona    |
| $P_t$        | : Potência ativa terminal da máquina síncrona          |
| $P_e$        | : Potência elétrica da máquina síncrona                |
| $I_d$        | : Corrente terminal de eixo direto da máquina síncrona |
| $I_q$        | : Corrente terminal em quadratura da máquina síncrona  |
| $R_a$        | : Resistência de armadura da máquina síncrona          |
| $K_a$        | : Ganho do amplificador do AVR                         |
| $T_a$        | : Constante de tempo do amplificador do AVR            |
| $K_f$        | : Ganho do estabilizador do AVR                        |
| $T_f$        | : Constante de tempo do estabilizador do AVR           |
| $T_e$        | : Constante de tempo do sistema de medição do AVR      |
| $V_{ref}$    | : Tensão de referência                                 |

|               |                                                                       |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------|
| $V_{pss}$     | : Sinal de saída do PSS                                               |
| $K_{pss}$     | : Ganho do PSS                                                        |
| $T_w$         | : Constante de tempo do bloco <i>washout</i>                          |
| $T_1$         | : Primeira constante de tempo do bloco <i>lead-lag</i>                |
| $T_2$         | : Segunda constante de tempo do bloco <i>lead-lag</i>                 |
| $T_3$         | : Terceira constante de tempo do bloco <i>lead-lag</i>                |
| $T_4$         | : Quarta constante de tempo do bloco <i>lead-lag</i>                  |
| $V_{bus}$     | : Tensão de barramento                                                |
| $K_{svc}$     | : Constante do regulador do SVC                                       |
| $T_{svc}$     | : Constante de tempo do regulador do SVC                              |
| $K_{tcsc}$    | : Constante do regulador do TCSC                                      |
| $T_{tcsc}$    | : Constante de tempo do regulador do TCSC                             |
| $P_{ref}$     | : Potência de referência                                              |
| $P_{ij}$      | : Fluxo de potência ativa da linha entre as barras <i>i-j</i>         |
| $K_{ij}$      | : Constante do TCSC                                                   |
| $K_p$         | : Ganho proporcional do PI do TCSC                                    |
| $K_i$         | : Ganho integral do PI do TCSC                                        |
| $F_1$         | : Primeira função objetiva                                            |
| $F_2$         | : Segunda função objetiva                                             |
| $N_g$         | : Número de geradores do sistema                                      |
| $\zeta_{min}$ | : Mínima razão de amortecimento                                       |
| $z$           | : Vetor constituído pelos parâmetros dos controladores                |
| $P_m$         | : Potência mecânica da máquina síncrona                               |
| $P_a$         | : Potência acelerante da máquina síncrona                             |
| $F$           | : Vetor das potências acelerantes dos geradores com relação ao COI    |
| $\Theta$      | : Vetor dos ângulos dos geradores com relação ao COI                  |
| $\theta$      | : Ângulos dos geradores com relação ao COI                            |
| $\delta$      | : Ângulos dos geradores                                               |
| $dot$         | : Produto interno                                                     |
| $A_{dot}$     | : Área do produto interno                                             |
| $a_i$         | : Coeficiente do termo quadrático da função custo do gerador <i>i</i> |
| $b_i$         | : Coeficiente do termo linear da função custo do gerador <i>i</i>     |

|                   |                                                                     |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------|
| $c_i$             | : Coeficiente do termo independente da função custo do gerador $i$  |
| $N_b$             | : Número de barras do sistema                                       |
| $N_l$             | : Número de linhas do sistema                                       |
| $P_g$             | : Potência ativa da barra de geração                                |
| $Q_g$             | : Potência reativa da barra de geração                              |
| $P_d$             | : Potência ativa da barra de carga                                  |
| $Q_d$             | : Potência reativa da barra de carga                                |
| $V_i$             | : Tensão da barra $i$                                               |
| $\theta_{ij}$     | : Diferença dos ângulos das tensões das barras $i$ e $j$            |
| $B_{svc}$         | : Susceptância do SVC                                               |
| $x_{tcsc}$        | : Reatância do TCSC                                                 |
| $C_i$             | : Função custo do gerador $i$                                       |
| $N_{autovalores}$ | : Número de autovalores da matriz de estados                        |
| $\delta_{max}$    | : Máximo desvio angular permissível                                 |
| $C_1$             | : Primeira constante de aceleração                                  |
| $C_2$             | : Segunda constante de aceleração                                   |
| $w$               | : Constante de inércia do PSO                                       |
| $X_\alpha$        | : Pai secundário                                                    |
| $X_\gamma$        | : Vetor doador                                                      |
| $X_\beta$         | : Vetor doador                                                      |
| $F_e$             | : Fator de escala                                                   |
| $U_i$             | : Vetor de teste                                                    |
| $\alpha$          | : Fator de redução                                                  |
| $x_d'$            | : Reatância transitória de eixo direto da máquina síncrona          |
| $x_d$             | : Reatância de eixo direto da máquina síncrona                      |
| $x_q$             | : Reatância em quadratura da máquina síncrona                       |
| $x_q'$            | : Reatância transitória em quadratura da máquina síncrona           |
| $T_{do}'$         | : Constante de tempo transitória de eixo direto da máquina síncrona |
| $T_{qo}'$         | : Constante de tempo transitória em quadratura da máquina síncrona  |
| $x_l$             | : Reatância de dispersão                                            |
| $t_{sim}$         | : Tempo de simulação da estabilidade transitória                    |

## SUMÁRIO

|                                                                                                                | Página |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 1. Introdução.....                                                                                             | 1      |
| 1.1. Generalidades .....                                                                                       | 1      |
| 1.2. Formulação do problema.....                                                                               | 2      |
| 1.3. Objetivos .....                                                                                           | 3      |
| 1.4. Justificativa.....                                                                                        | 4      |
| 1.5. Metodologia .....                                                                                         | 4      |
| 1.6. Estrutura do trabalho .....                                                                               | 5      |
| 2. Controladores FACTS e PSS para melhoria da estabilidade eletromecânica .....                                | 7      |
| 2.1. Introdução.....                                                                                           | 7      |
| 2.2. Conceitos básicos de estabilidade de SEE .....                                                            | 7      |
| 2.3. Modelo do SEE para estudos de estabilidade eletromecânica .....                                           | 9      |
| 2.3.1. Geradores síncronos .....                                                                               | 9      |
| 2.3.2. Regulador automático de tensão .....                                                                    | 10     |
| 2.3.3. Estabilizador de sistemas de potência .....                                                             | 11     |
| 2.3.4. Controladores FACTS.....                                                                                | 12     |
| 2.3.4.1. Compensador estático de potência reativa.....                                                         | 12     |
| 2.3.4.2. Capacitor série controlado por tiristores .....                                                       | 13     |
| 2.3.5. Sistema de transmissão e cargas.....                                                                    | 15     |
| 2.4. Estabilidade eletromecânica a pequenas perturbações.....                                                  | 15     |
| 2.4.1. Técnicas de análise da estabilidade a pequenas perturbações.....                                        | 16     |
| 2.4.2. Método do espaço de estado para análise da estabilidade eletromecânica a<br>pequenas perturbações ..... | 16     |
| 2.5. Estabilidade transitória.....                                                                             | 19     |
| 2.5.1. Modelagem matemática da estabilidade transitória .....                                                  | 19     |
| 2.5.2. Técnicas de análise da estabilidade transitória.....                                                    | 21     |
| 2.6. Projeto de PSS e FACTS para melhoria da estabilidade eletromecânica. ....                                 | 23     |
| 2.6.1. Projeto de PSS.....                                                                                     | 24     |
| 2.6.2. Projeto de Controladores FACTS .....                                                                    | 25     |
| 2.6.3. Projeto simultâneo de PSS e Controladores FACTS .....                                                   | 26     |

|                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.7. Impacto econômico dos PSS e Controladores FACTS na estabilidade eletromecânica.....                                | 26  |
| 3. Metodologia para análise técnica do impacto dos PSS e FACTS na estabilidade eletromecânica .....                     | 30  |
| 3.1. Introdução.....                                                                                                    | 30  |
| 3.2. Metodologia integrada para análise do impacto técnico dos PSS e FACTS na estabilidade eletromecânica .....         | 31  |
| 3.3. Metodologia para análise do impacto técnico dos PSS e FACTS na estabilidade a pequenas perturbações .....          | 34  |
| 3.3.1. Desenvolvimento da metodologia.....                                                                              | 34  |
| 3.3.2. Aplicação a sistemas teste .....                                                                                 | 38  |
| 3.3.2.1. Sistema WSCC .....                                                                                             | 38  |
| 3.3.2.2. Sistema New England.....                                                                                       | 50  |
| 3.3.2.3. Sistema brasileiro Sul-Sudeste.....                                                                            | 61  |
| 3.3.2.4. Influência da quantidade de blocos PSS no amortecimento do sistema .....                                       | 68  |
| 3.3.2.5. Sistema de 3 geradores e 6 barras/sistema de 5 geradores e 7 barras .....                                      | 70  |
| 3.4. Metodologia para análise do impacto técnico dos PSS e FACTS na estabilidade transitória.....                       | 74  |
| 3.4.1. Desenvolvimento da metodologia.....                                                                              | 74  |
| 3.4.2. Aplicação a sistemas teste .....                                                                                 | 78  |
| 3.4.2.1. Sistema WSCC .....                                                                                             | 79  |
| 3.4.2.2. Sistema New England.....                                                                                       | 89  |
| 3.4.2.3. Sistema brasileiro Sul-Sudeste.....                                                                            | 96  |
| 3.5. Discussão dos resultados.....                                                                                      | 101 |
| 4. Metodologia para análise do impacto econômico dos PSS e FACTS na estabilidade eletromecânica .....                   | 102 |
| 4.1. Introdução.....                                                                                                    | 102 |
| 4.2. O problema do fluxo de potência ótimo.....                                                                         | 102 |
| 4.3. Metodologia para análise do impacto técnico-econômico dos PSS e FACTS na estabilidade a pequenas perturbações..... | 104 |
| 4.3.1. Desenvolvimento da metodologia.....                                                                              | 104 |
| 4.3.2. Aplicação a sistemas teste .....                                                                                 | 106 |
| 4.3.2.1. Sistema WSCC .....                                                                                             | 106 |

|                                                     |                                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.3.2.2.                                            | Sistema New England .....                                                                               | 107 |
| 4.3.2.3.                                            | Discussão de resultados da aplicação do FPO com restrição de estabilidade a pequenas perturbações ..... | 108 |
| 4.4.                                                | Metodologia para análise do impacto técnico-econômico dos PSS e FACTS na estabilidade transitória ..... | 109 |
| 4.4.1.                                              | Desenvolvimento da metodologia .....                                                                    | 109 |
| 4.4.2.                                              | Aplicação a sistemas teste .....                                                                        | 112 |
| 4.4.2.1.                                            | Sistema WSCC .....                                                                                      | 112 |
| 4.4.2.2.                                            | Sistema New England .....                                                                               | 115 |
| 4.4.2.3.                                            | Discussão de resultados do FPO com restrição de estabilidade transitória ..                             | 119 |
| 5.                                                  | Conclusão .....                                                                                         | 121 |
| 5.1.                                                | Conclusões .....                                                                                        | 121 |
| 5.2.                                                | Trabalhos futuros.....                                                                                  | 122 |
| APÊNDICES .....                                     |                                                                                                         | 124 |
| Apêndice A Técnicas de Inteligência Artificial..... |                                                                                                         | 125 |
| Apêndice B Dados técnicos dos sistemas teste.....   |                                                                                                         | 131 |
| Apêndice C Dados econômicos dos sistemas teste..... |                                                                                                         | 145 |
| Apêndice D Modelos de geradores .....               |                                                                                                         | 146 |
| REFERÊNCIAS .....                                   |                                                                                                         | 147 |

# Capítulo 1

---

## 1. Introdução

### 1.1. Generalidades

A desregulamentação, privatização e reestruturação do setor elétrico trouxeram novas condições de operação e de competição ao mercado de energia elétrica brasileiro. O principal objetivo da reestruturação é visar o aumento da eficiência pela competição, fornecendo ao consumidor energia elétrica com qualidade, confiabilidade, sem interrupções e com modicidade tarifária.

Os sistemas de energia elétrica (SEE)<sup>1</sup> possuem dois princípios básicos: segurança e confiabilidade. A segurança está relacionada com o atendimento da demanda e a manutenção de níveis adequados de qualidade, como tensão e frequência, após a ocorrência de contingências/perturbações. Manter a confiabilidade dos SEE é garantir, a futuro, a entrega de energia elétrica com o menor número de interrupções possível.

A estabilidade dos SEE é a habilidade que esses sistemas possuem de atingir uma condição de equilíbrio pós-perturbação. As perturbações podem ser de dois tipos: pequenas ou grandes (severas). A análise do comportamento do SEE quando sujeito a grandes perturbações refere-se ao estudo da estabilidade transitória. Entretanto, pequenas perturbações caracterizam o estudo da estabilidade a pequenas perturbações (ou a pequeno sinal). Uma perturbação é considerada pequena se as equações matemáticas que descrevem o comportamento do sistema podem ser linearizadas. Já o estudo da estabilidade transitória exige modelos matemáticos não-lineares e a técnica normalmente utilizada para resolver as equações algébricas e diferenciais não-lineares do SEE é a simulação no domínio do tempo (ou métodos indiretos).

Uma forma de melhorar a estabilidade do sistema é a utilização do Estabilizador de Sistema de Potência (*Power System Stabilizer* – PSS). Entretanto, existem situações e sistemas elétricos de potência nos quais a utilização dos PSS não é suficiente para garantir resultados satisfatórios. Portanto, outros tipos de controladores têm sido utilizados. Recentes desenvolvimentos em eletrônica de potência resultaram no uso de dispositivos ou

---

<sup>1</sup> Neste trabalho o termo sistema de energia elétrica corresponde a “sistema elétrico de potência” ou simplesmente “sistema de potência”.



Controladores FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*) que são dispositivos/controladores para sistemas de transmissão CA flexíveis. Através destes controladores podem-se controlar oscilações de tensão e potência, e também reduzir os custos de investimentos em novos empreendimentos nos sistemas de transmissão já que os FACTS possibilitam o aumento da capacidade de transferência de potência sem a necessidade de construção de novas linhas de transmissão. Contudo, a determinação dos custos relativos à implantação dos Controladores FACTS é um assunto complexo e que causa controvérsia acerca dos investimentos quando são comparados a outras soluções disponíveis. Este problema envolve diversas variáveis e possui poucas referências na literatura, ainda mais quando é tratado em ambiente competitivo.

No Sistema Interligado Nacional (SIN) dois são os Controladores FACTS mais utilizados: o compensador estático de potência reativa ou SVC (*Static Var Compensator*) e o capacitor série controlado a tiristores ou TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*).

## **1.2. Formulação do problema**

A implantação dos Controladores FACTS e PSS possibilita diversos benefícios técnicos na operação e controle do sistema de energia elétrica tais como: melhoria da capacidade de transmissão na rede elétrica, melhoria do controle do fluxo de potência, aumento da capacidade de transmissão de potência ativa nas linhas de transmissão, aumento da segurança estática, aumento da segurança de tensão, aumento da segurança dinâmica do sistema através do aumento do limite de estabilidade transitória, aumento do amortecimento das oscilações eletromecânicas de baixa frequência, redução do fluxo de potência reativa, etc.

Resumidamente, os benefícios técnicos dos Controladores FACTS e PSS podem ser verificados tanto na operação do SEE em regime permanente (normal e sob contingência) quanto no regime transitório (após a ocorrência de perturbações).

Do ponto de vista do mercado elétrico os Controladores FACTS e PSS influenciam no preço da eletricidade, no custo do uso do sistema de transmissão, no custo de geração, etc. Ainda não existe uma metodologia para avaliar economicamente tal influência relacionada com o investimento para a implantação dos FACTS.

Entretanto, algumas questões precisam ser respondidas: qual o impacto técnico e econômico dos Controladores FACTS na estabilidade eletromecânica do sistema de energia elétrica? Qual o compromisso entre o impacto técnico e o impacto econômico da utilização

dos Controladores FACTS na estabilidade eletromecânica? Qual a contribuição, na razão de amortecimento e na margem de estabilidade transitória, do estabilizador de sistemas de potência, do compensador estático de potência reativa e do compensador série controlado a tiristores?

Pesquisas realizadas nas últimas décadas comprovaram que os Controladores FACTS e os PSS melhoram o amortecimento do sistema de energia elétrica além de aumentar a margem de estabilidade transitória. Aliado a isto, nos últimos anos o interesse no aspecto econômico vem aumentando de modo significativo no planejamento do sistema de transmissão em SEE que operam em mercado elétrico competitivo.

### **1.3. Objetivos**

#### Objetivo geral

- Contribuir com a discussão e o desenvolvimento de metodologias de análise da aplicação dos PSS e Controladores FACTS nos sistemas de energia elétrica.

#### Objetivos específicos

- Analisar a influência dos PSS e dos Controladores FACTS de maior aplicação prática (SVC e TCSC) na estabilidade eletromecânica dos SEE.
- Desenvolver índices baseados nos coeficientes de amortecimento e sincronismo, e da margem de estabilidade transitória para quantificação do impacto do SVC, TCSC e do PSS na estabilidade eletromecânica.
- Desenvolver uma metodologia para avaliar o impacto técnico-econômico dos Controladores FACTS, SVC e TCSC, e dos estabilizadores de sistemas de potência na estabilidade eletromecânica dos SEE em mercado elétrico competitivo.
- Aplicar a metodologia a ser desenvolvida em sistemas teste e em uma configuração do Sistema Interligado Nacional.
- Aplicar técnicas de Inteligência Artificial (IA) para sintonizar e coordenar PSS e Controladores FACTS.

## **1.4. Justificativa**

O estudo e desenvolvimento de modelos e técnicas para avaliar os benefícios dos Controladores FACTS, na sua operação em regime permanente e transitório após a ocorrência de perturbações, têm recebido bastante atenção nos últimos anos. A literatura existente revela os avanços na determinação do impacto da tecnologia dos FACTS. Assim, por exemplo, é conhecido que o TCSC permite aumentar a capacidade de transmissão das linhas de interligação. Contudo, nem sempre existe uma quantificação precisa dos benefícios econômicos da implantação desse Controlador FACTS. Uma metodologia que leve a determinar economicamente os benefícios da implantação de um FACTS no SEE permitirá uma tomada de decisão mais adequada no planejamento da expansão do sistema de transmissão, bem como a melhora nos níveis de segurança dinâmica do SEE.

Já no aspecto econômico, poucas referências são encontradas na literatura. Portanto, este trabalho pretende contribuir, além da análise técnica, com uma avaliação econômica. Atualmente não existe um procedimento integrado que analise o impacto técnico e econômico dos FACTS no regime permanente e transitório do sistema de energia elétrica operando em um mercado elétrico competitivo. Com a metodologia a ser proposta será possível realizar uma tomada de decisão mais adequada do planejamento de investimentos da utilização dos Controladores FACTS conjuntamente com os PSS.

Na literatura ainda não existe uma metodologia integrada para quantificar os benefícios técnicos proporcionados pelos Controladores FACTS e os PSS e traduzi-los em sinais econômicos para o planejamento e tomada de decisão de novos investimentos envolvendo FACTS no sistema elétrico de potência. Este trabalho visa contribuir com o desenvolvimento desse tipo de metodologia enfatizando o aspecto dinâmico e a estabilidade eletromecânica na presença de Controladores FACTS e PSS.

## **1.5. Metodologia**

Para o desenvolvimento da pesquisa proposta foi adotada a metodologia da pesquisa científica.

Inicialmente foi realizada uma pesquisa bibliográfica para levantar o “estado da arte” nas técnicas de aplicação de Controladores FACTS em sistemas de energia elétrica com ênfase no impacto na estabilidade eletromecânica.

A seguir foram estudados os métodos e tecnologias mais utilizados para melhorar a estabilidade eletromecânica dos sistemas de energia elétrica. Logo foi realizada uma pesquisa para identificar e caracterizar os modelos matemáticos mais adequados dos Controladores FACTS, principalmente o SVC e TCSC, para representação no problema da estabilidade eletromecânica dos SEE.

Igualmente foram estudados os métodos de análise da estabilidade eletromecânica considerando a inserção de Controladores FACTS e os PSS. A simulação computacional da estabilidade eletromecânica foi realizada através de softwares especializados tais como o PacDyn (estabilidade a pequeno sinal) e ANATEM (estabilidade a perturbação severa), além do ANAREDE (utilizado para o cálculo da condição inicial do SEE no PacDyn e ANATEM), desenvolvidos pelo CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica).

Para o desenvolvimento de índices da estabilidade a pequenas perturbações que quantifiquem os benefícios da aplicação dos FACTS e dos PSS nos SEE, foram considerados critérios baseados no coeficiente da razão de amortecimento. O índice para quantificar o impacto dos FACTS e dos PSS na estabilidade transitória foi baseado na margem de estabilidade transitória e o tempo crítico de eliminação de falta, além de validação via simulação no domínio do tempo.

A análise econômica foi considerada utilizando um fluxo de potência ótimo. O aplicativo PSAT (*Power Systems Analysis Toolbox*) foi utilizado por ser uma plataforma desenvolvida em ambiente *MATLAB* (*MATrix LABoratory*). É importante utilizar uma plataforma unificada devido ao tempo de processamento.

## **1.6. Estrutura do trabalho**

Este trabalho contém cinco capítulos organizados da seguinte maneira.

Capítulo 1: descreve os assuntos relativos à proposta do trabalho apresentado.

Capítulo 2: apresenta conceitos relativos ao estudo da estabilidade eletromecânica em sistemas elétricos de potência. Também é dado foco aos modelos dos PSS e dos controladores FACTS: SVC e TCSC.

Capítulo 3: são apresentados os aspectos técnicos dos PSS e Controladores SVC e TCSC na operação dos sistemas elétricos. A metodologia proposta para avaliação dos benefícios técnicos dos PSS e Controladores FACTS na estabilidade eletromecânica é apresentada neste capítulo.

Capítulo 4: são apresentados os aspectos do impacto econômico dos PSS e Controladores SVC e TCSC na operação dos sistemas de energia elétrica. O desenvolvimento da metodologia de avaliação do impacto técnico-econômico dos PSS e FACTS é apresentada.

Capítulo 5: contém as conclusões do trabalho.

## Capítulo 2

---

### 2. Controladores FACTS e PSS para melhoria da estabilidade eletromecânica

#### 2.1. Introdução

Esse capítulo é inicializado com uma discussão sobre os conceitos essenciais para o entendimento dos próximos capítulos. Na Seção 2.2 são apresentados conceitos básicos sobre estabilidade nos sistemas de energia elétrica. Os modelos de máquinas, regulador automático de tensão (AVR), PSS, SVC e TCSC utilizados nas simulações são apresentados na Seção 2.3. Na Seção 2.4 os conceitos e modelagem matemática da estabilidade a pequenas perturbações são apresentados. Os conceitos e modelagem matemática da estabilidade transitória são detalhados na Seção 2.5. Por fim, na Seção 2.6 tem-se uma revisão das técnicas utilizadas na literatura no projeto dos PSS e Controladores FACTS para melhorar a estabilidade eletromecânica dos SEE. Uma revisão do fluxo de potência ótimo com restrição de estabilidade eletromecânica é apresentada também nesta seção.

#### 2.2. Conceitos básicos de estabilidade de SEE

A estabilidade de um SEE é definida como a habilidade de um sistema de energia elétrica, para uma determinada condição inicial de operação, de recuperar um estado de equilíbrio operacional depois que estiver sujeito a uma perturbação física, com limitação das variáveis do sistema de forma que a integridade do sistema seja preservada (KUNDUR, PASERBA, *et al.*, 2004).

Para facilitar a identificação dos fatores essenciais que contribuem para a instabilidade, bem como para a criação de métodos que melhoram a operação estável, é útil classificar a estabilidade em categorias. Essa classificação é baseada nas seguintes considerações (KUNDUR, 1994):

- A natureza física do modo de instabilidade resultante como indicado pelas principais variáveis do sistema nas quais a instabilidade pode ser observada.

- A severidade da perturbação considerada, que influencia o método de cálculo e previsão da estabilidade.
- Os equipamentos, os processos e o domínio do tempo que devem ser considerados de forma a determinar a estabilidade.

A Figura 2.1 ilustra o quadro geral do problema da estabilidade, classificando suas categorias e subcategorias (GÓMES-EXPÓSITO, CONEJO e CAÑIZARES, 2009).

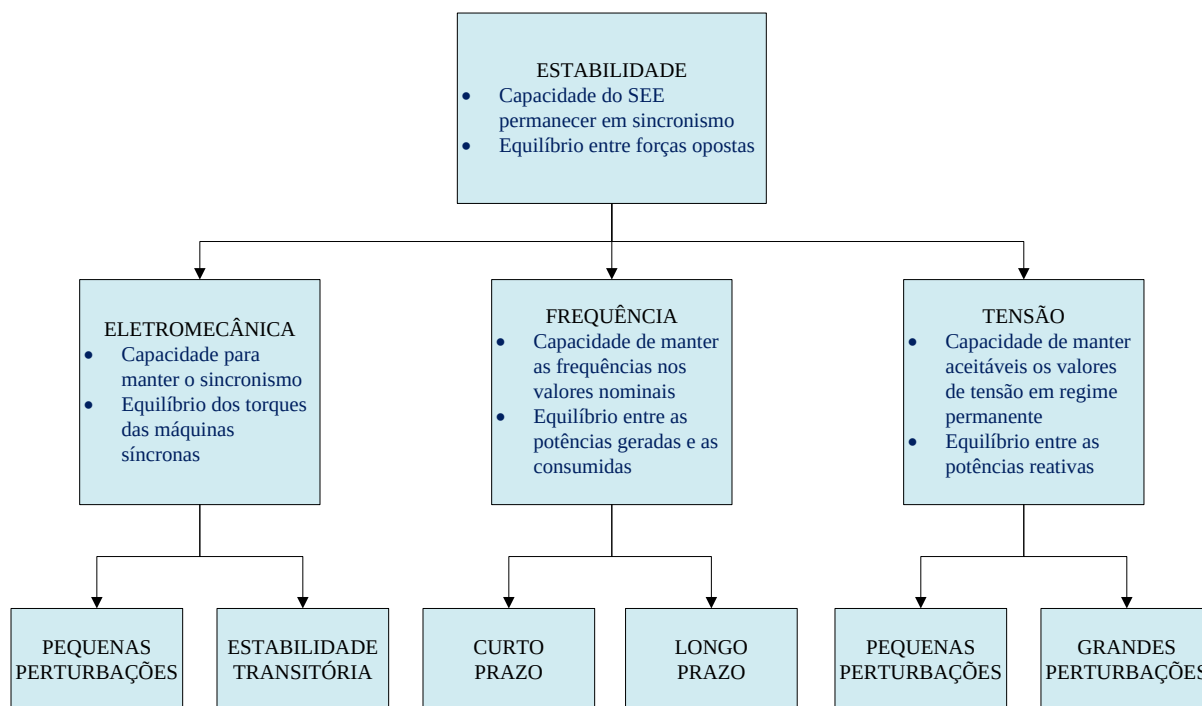


Figura 2.1: Classificação da estabilidade de sistemas de energia elétrica  
Fonte: Adaptado de (GÓMES-EXPÓSITO, CONEJO e CAÑIZARES, 2009)

Define-se estabilidade de tensão como a capacidade de um sistema de energia elétrica de manter tensões estáveis nas barras do sistema após a ocorrência de uma perturbação para uma dada condição de operação (KUNDUR, PASERBA, *et al.*, 2004). Já a estabilidade de frequência é definida como a capacidade de um sistema de energia elétrica de manter a frequência estável após a ocorrência de uma perturbação severa, resultando em um desequilíbrio entre a geração e a carga (KUNDUR, PASERBA, *et al.*, 2004).

Neste trabalho prioriza-se o estudo da estabilidade eletromecânica também conhecida como estabilidade angular. A estabilidade eletromecânica é definida como a capacidade que os ângulos dos rotores dos geradores síncronos possuem de continuar em sincronismo após a ocorrência de perturbações severas no sistema de energia elétrica (KUNDUR, PASERBA, *et al.*, 2004). Entende-se por sincronismo se os rotores dos geradores síncronos permanecem na

mesma velocidade. O estudo da estabilidade eletromecânica é dividido em estabilidade transitória e estabilidade a pequenas perturbações (ou estabilidade a pequenos sinais). Na estabilidade transitória o sincronismo é mantido após a ocorrência de perturbações severas. Os fenômenos mais comuns que provocam perturbações severas são grandes variações de carga e a ocorrência de curtos-circuitos no sistema. A solução matemática para a estabilidade transitória em sistemas multimáquina é obtida através de solução numérica de equações algébricas e diferenciais. Na estabilidade a pequenas perturbações o sincronismo deve ser mantido após a ocorrência de pequenas perturbações; a solução matemática pode ser alcançada linearizando as equações diferenciais que representam a equação de oscilação.

## 2.3. Modelo do SEE para estudos de estabilidade eletromecânica

Para o estudo da estabilidade eletromecânica é necessário estabelecer os modelos mais adequados dos diversos componentes do sistema de energia elétrica. A seguir serão apresentados os modelos dos principais componentes do SEE nesta pesquisa: geradores síncronos, AVR, PSS, SVC, TCSC, sistema de transmissão e cargas.

### 2.3.1. Geradores síncronos

As máquinas síncronas foram modeladas pelos modelos 3 e 4 (veja apêndice D), onde as equações (2.1)- (2.5) são comuns para todos os modelos:

Equação de oscilação:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H} (P_m - P_e - D * (\omega_r - \omega_s)) \quad (2.1)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_r - \omega_s \quad (2.2)$$

Equação da tensão terminal:

$$V_t = V_d^2 + V_q^2 \quad (2.3)$$

Equação da potência ativa terminal:

$$P_t = V_d * I_d + V_q * I_q \quad (2.4)$$

Equação da potência ativa no entreferro:

$$P_e = P_t + R_a * (I_d^2 + I_q^2) \quad (2.5)$$



Em que:  $\omega_r$  é a velocidade do rotor do gerador (p.u);  $\omega_s$  é a velocidade síncrona (p.u);  $P_m$  é a potência mecânica da turbina (p.u);  $P_e$  é a potência elétrica (p.u);  $H$  é a constante de inércia do rotor (s) e  $D$  é o coeficiente de amortecimento mecânico (p.u),  $V_t$  é a tensão terminal da máquina síncrona,  $V_d$  é a tensão terminal de eixo direto,  $V_q$  é a tensão terminal em quadratura,  $P_t$  é a potência ativa terminal da máquina síncrona,  $I_d$  é a corrente terminal de eixo direto,  $I_q$  é a corrente terminal em quadratura e  $R_a$  é a resistência de armadura.

### 2.3.2. Regulador automático de tensão

O regulador automático de tensão ou AVR (*Automatic Voltage Regulator*), determina a regulação primária de tensão da máquina síncrona. O AVR é o responsável por manter a tensão terminal de saída do gerador no valor desejado, bem como a geração de potência reativa. Vários modelos de AVR foram propostos na literatura (GROUP, 1981). O modelo do AVR utilizado neste trabalho ilustra-se na Figura 2.2. Na análise técnica foram considerados os parâmetros  $K_a$  e  $T_a$ . Na análise econômica todos os blocos foram considerados.

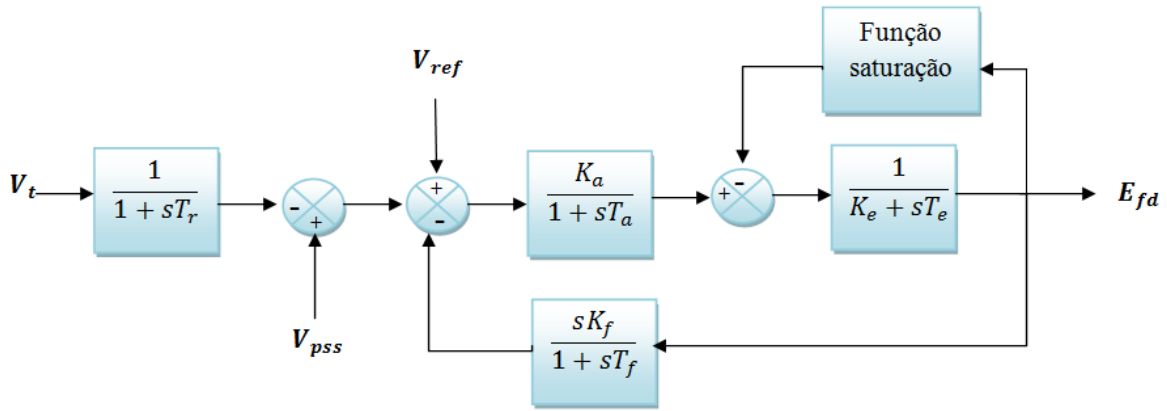


Figura 2.2: Diagrama de controle do regulador automático de tensão.

Em que  $V_{ref}$  é a tensão de referência do regulador;  $V_t$  é a tensão terminal do gerador onde está instalado o AVR;  $E_{fd}$  é a tensão de campo do gerador;  $V_{pss}$  é o sinal adicional do PSS;  $K_a$  é a constante do ganho do amplificador;  $T_a$  é a constante de tempo do amplificador;  $K_f$  é a constante do ganho da malha de estabilização do regulador;  $T_f$  é a constante de tempo da malha de estabilização;  $T_e$  é a constante de tempo da excitatriz;  $K_e$  é a constante da excitatriz;  $T_r$  é a constante de tempo do circuito de medição e o bloco função de saturação indica a saturação da excitatriz.

### 2.3.3. Estabilizador de sistemas de potência

Os estabilizadores de sistemas de potência (PSS) são provavelmente os controladores mais utilizados para resolver o problema da estabilidade a pequenas perturbações, uma vez que, para condições que requerem estabilidade transitória, o PSS pode atuar negativamente. Os PSS agem através dos reguladores de tensão e idealmente produzem uma componente de torque elétrico no rotor. Existem várias estruturas utilizadas na literatura (KAMWA, GRONDIN e TRUDEL, 2005). A estrutura básica utilizada neste trabalho considera como entrada do PSS o desvio de velocidade da máquina síncrona, ilustrada na Figura 2.3, compreende de um ganho, blocos de compensação de fases e um filtro *washout*. Na análise técnica considerou-se somente um bloco *lead-lag*. Na análise econômica foi simulado com dois blocos *lead-lag*.

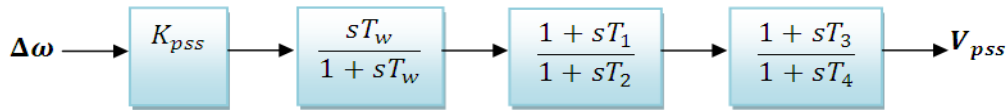


Figura 2.3: Estrutura convencional do PSS

Matematicamente, tem-se:

$$V_{pss} = K_{pss} \frac{sT_w}{1 + sT_w} \left( \frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \right) \left( \frac{1 + sT_3}{1 + sT_4} \right) \Delta\omega \quad (2.6)$$

Em que  $T_w$  é a constante de tempo do bloco *washout*;  $V_{pss}$  é o sinal de saída do PSS;  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  e  $T_4$  são as constantes de tempo dos blocos *lead-lag*;  $K_{pss}$  é o ganho do PSS e  $\Delta\omega$  é o desvio de velocidade da máquina síncrona.

O bloco *washout* funciona como um filtro passa-alta permitindo somente a passagem de sinais relacionados às baixas frequências eletromecânicas de interesse. O ganho  $K_{pss}$  do PSS é calculado para que os modos de oscilações do gerador e os SEE se tornem mais amortecidos. Os blocos de compensação de fase fornecem o necessário avanço de fase para modo eletromecânico, na frequência de interesse (KUNDUR, 1994); (ROGERS, 2000).

### 2.3.4. Controladores FACTS

Em alguns sistemas e situações, a utilização dos PSS não é suficiente para garantir um satisfatório nível de amortecimento. Portanto, outros tipos de controladores têm sido utilizados (DE MENEZES e DE ARAÚJO, 2012).

Recentes desenvolvimentos em eletrônica de potência resultaram no uso dos FACTS (SONG e JOHNS, 1999); (HINGORANI e GYUGYI, 2000) e sua utilização propiciou maior flexibilidade na operação do sistema de energia elétrica.

Equipamentos com conceito FACTS começaram a ser projetados a partir do final da década de 60 por vários grupos, porém o conceito de FACTS como uma ideia para o controle total da rede foi introduzido em 1988 por N. G. Hingorani (HINGORANI e GYUGYI, 2000).

De acordo com (HINGORANI e GYUGYI, 2000): “O IEEE (*The Institute of Electrical and Electronics Engineers*) em conjunto com o CIGRÉ (*Conseil International des Grands Réseaux Électriques*) definem os controladores FACTS como ‘sistemas de transmissão de corrente alternada que incorporam controladores baseados em eletrônica de potência e mais outros controladores estáticos, para melhorar a controlabilidade e aumentar a capacidade de transferência de potência’”.

Existem vários tipos de Controladores FACTS, os quais podem ser classificados da seguinte maneira (HINGORANI e GYUGYI, 2000): controladores série (TCSC e SSSC), controladores shunt (SVC, *Static Synchronous Compensator* - STATCOM), controladores combinados série-série (*Interline Power Flow Controller* - IPFC) e controladores combinados série-shunt (*Unified Power Flow Controller* - UPFC).

Os controladores de interesse neste trabalho são os controladores do tipo série e do tipo shunt, os quais em especial, o TCSC e SVC, respectivamente. Estes controladores, quando equipados com POD (*Power Oscillation Damping*), são capazes de introduzir amortecimento às oscilações de baixa frequência.

#### 2.3.4.1. Compensador estático de potência reativa

O compensador estático de potência reativa ou SVC tem sido usado desde o início da década de 1960, mas somente passou a ser utilizado para melhoria da estabilidade eletromecânica do sistema nos anos de 1980 (HSU, LIU, *et al.*, 1988); (MARTINS e LIMA, 1990). O SVC é conectado em derivação com a rede de transmissão, na qual injeta ou absorve

potência reativa de modo a manter algum parâmetro do sistema (geralmente a tensão da barra na qual está conectado) em torno de um valor especificado. Diversos modelos são encontrados na literatura, mas neste trabalho foi utilizado dois tipos de modelos para o SVC. O modelo 1 (MARTINS e LIMA, 1989), ilustrado na Figura 2.4, foi utilizado nas simulações do impacto técnico. Enquanto que, o modelo 2 (MILANO, 2005), ilustrado na Figura 2.5, foi empregado na análise econômica.

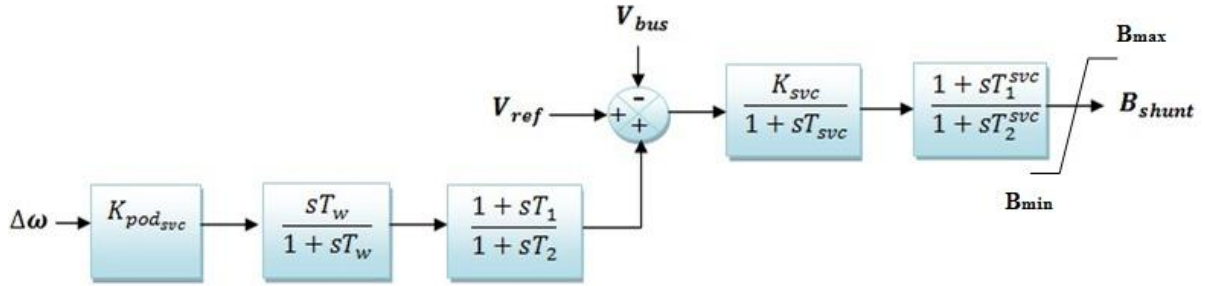


Figura 2.4: Modelo 1 do SVC

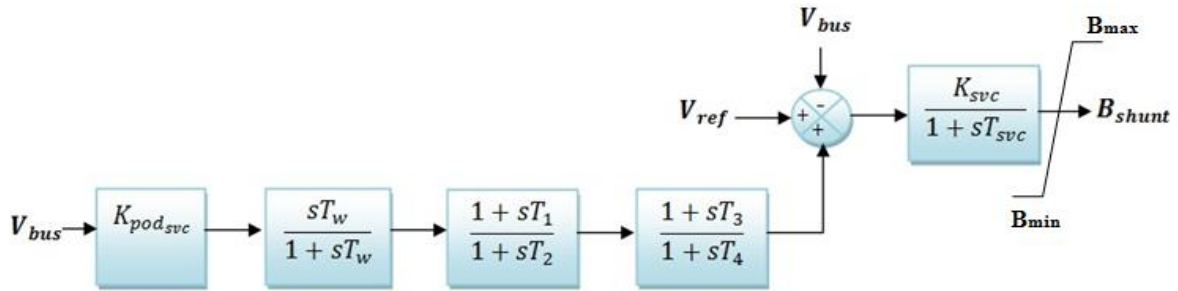


Figura 2.5: Modelo 2 do SVC

Em que  $V_{ref}$  é a tensão de referência do SVC;  $V_{bus}$  é a tensão do barramento onde está instalado o SVC;  $K_{svc}$  é o ganho do regulador;  $T_{svc}$  é a constante de tempo do regulador;  $T_1^{svc}$  e  $T_2^{svc}$  são as constantes transitória do regulador;  $T_w$  é a constante do bloco *washout*;  $B_{shunt}$  é o sinal de saída do SVC;  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  e  $T_4$  são as constantes dos blocos *lead-lag* e  $K_{pod_{svc}}$  é o ganho do POD do SVC.

#### 2.3.4.2. Capacitor série controlado por tiristores

A compensação em série foi desenvolvida pela ABB em 1950 para transmitir energia a longas distâncias. A ideia básica é a de compensar a queda de tensão indutiva na linha através da redução da reatância efetiva da linha de transmissão. A forma mais simples de se realizar a

compensação série é através de capacitores fixos. Entretanto, com os significativos avanços da eletrônica de potência, a compensação série pôde ser realizada de forma muito mais generalizada com a utilização do compensador série controlado por tiristores ou TCSC.

O TCSC é um tipo de controlador FACTS constituído por uma capacitância fixa e um reator controlado a tiristores. Da mesma maneira que o SVC, dois modelos foram utilizados para o TCSC. O modelo 1, ilustrado na Figura 2.7, foi empregado na análise técnica. Enquanto o modelo 2 foi utilizado nas simulações para quantificar o impacto econômico (AYRES, KOPCAK, *et al.*, 2010).

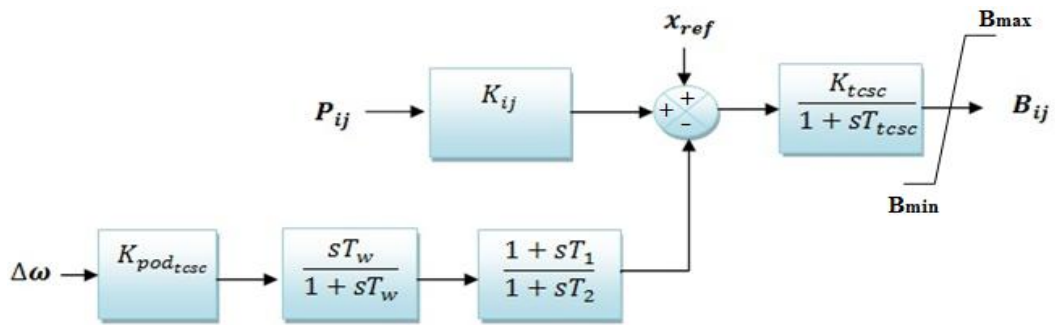


Figura 2.6: Modelo 1 do TCSC

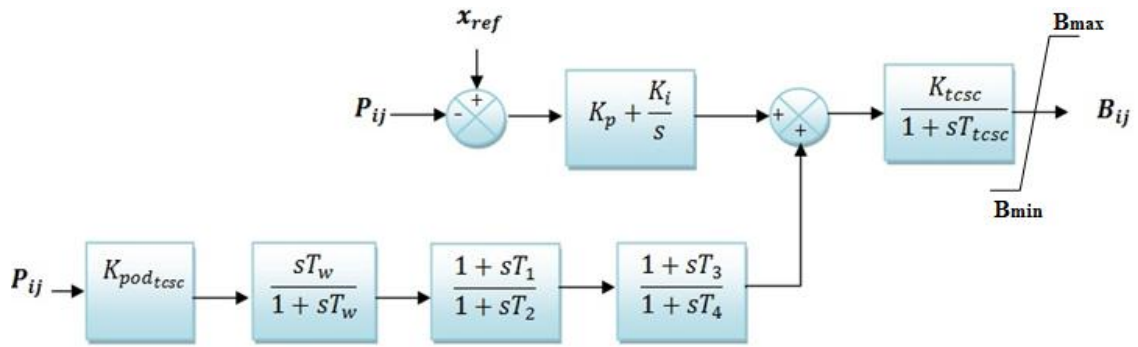


Figura 2.7: Modelo 2 do TCSC

Em que  $x_{ref}$  é a referência do fluxo de potência ativa do TCSC;  $P_{ij}$  é o fluxo de potência ativa no ramo  $i-j$ ;  $K_p$  é o ganho proporcional do regulador PI;  $K_i$  e  $K_{ij}$  são os ganhos integrais do regulador PI;  $K_{tcsc}$  é o ganho do regulador;  $T_{tcsc}$  é a constante de tempo do regulador;  $T_w$  é a constante do bloco washout;  $B_{ij}$  é o sinal de saída do TCSC;  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  e  $T_4$  são as constantes dos blocos lead-lag e  $K_{pod_{tcsc}}$  é o ganho do POD do TCSC.

### 2.3.5. Sistema de transmissão e cargas

Considerando que a frequência do SEE se mantém praticamente constante, as linhas aéreas foram modeladas através de esquemas com parâmetros concentrados. O modelo em  $\pi$  foi empregado neste trabalho, visto que o esquema em T introduz um nó adicional na rede. Os transformadores utilizados neste trabalho foram os transformadores de dois enrolamentos, os transformadores com enrolamento terciário e os transformadores defasadores.

Um modelo de carga é uma expressão que relaciona a potência (ativa e reativa) consumida pela carga com a tensão (magnitude e frequência). Os modelos mais utilizados nos SEE são os modelos *ZIP* e exponencial. O modelo *ZIP* é formado por três componentes: impedância constante (*Z*), corrente constante (*I*) e potência constante (*P*) (NEVES, 2008). Devido a limitações do programa ANAREDE (CEPEL, 2009), o modelo de carga utilizado neste trabalho é o modelo de potência constante.

## 2.4. Estabilidade eletromecânica a pequenas perturbações

A estabilidade eletromecânica a pequenas perturbações é definida como a habilidade do SEE de manter o sincronismo quando submetido a pequenas perturbações. O período de interesse deste tipo de estabilidade está na ordem de 10 a 20 segundos após a ocorrência da perturbação (KUNDUR, 1994); (KUNDUR, PASERBA, *et al.*, 2004).

A estabilidade a pequenas perturbações pode ser de natureza global ou local. Os problemas locais envolvem uma pequena parte do sistema, e são geralmente associadas com oscilações do ângulo do rotor de uma unidade geradora com o resto do SEE ou contra outra unidade geradora dentro da mesma área. Estas oscilações estão na faixa de frequência de 0,7 a 1,2 Hz. Geralmente as oscilações de modo local ocorrem quando os geradores são conectados ao sistema por linhas de transmissão com altas reatâncias (KUNDUR, PASERBA, *et al.*, 2004). Os problemas globais são causados por interações entre um grupo de geradores em uma área oscilando contra um grupo de geradores de outra área. Este tipo de oscilações é denominado como oscilações de modo interárea. A faixa de frequência das oscilações de modo interárea está entre 0,2 a 0,8 Hz. Geralmente estas oscilações ocorrem quando os sistemas de energia elétrica são conectados por linhas relativamente fracas (KUNDUR, PASERBA, *et al.*, 2004).

### 2.4.1. Técnicas de análise da estabilidade a pequenas perturbações

No estudo da estabilidade a pequenas perturbações de um sistema de energia elétrica simples, como por exemplo máquina-barramento infinito (MBI), pode ser utilizado o método do lugar das raízes, critério de Routh-Hurwitz, etc. Para sistemas de energia elétrica multimáquina podem-se utilizar os seguintes métodos:

- ✓ Método do espaço de estado (BYERLY, BENNON e SHERMAN, 1982).
- ✓ Método da separação de domínios ou *D-separation* (ZHENENKO e FOUAD, 1984).
- ✓ Análise modal seletiva (PEREZ-ARRIAGA, VERGHESES e SCHWEPPE, 1982), (ROUCO e PÉREZ-ARRIAGA, 1993).
- ✓ Expansão de Hermite (KOKANOS e KARADY, 2010).
- ✓ ESPRIT (*Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques*) (SALIM, RAMOS e BRETAS, 2010).
- ✓ Método de Prony (HAUER, DEMEURE e SCHARF, 1990).

Para este trabalho decidiu-se utilizar o método do espaço de estado por sua eficácia comprovada em situações reais.

### 2.4.2. Método do espaço de estado para análise da estabilidade eletromecânica a pequenas perturbações

O fenômeno da estabilidade eletromecânica do sistema de energia elétrica pode ser representado por um conjunto de equações diferenciais juntamente com um conjunto de equações algébricas, na forma (2.7):

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, y) \\ 0 &= g(x, y)\end{aligned}\tag{2.7}$$

Onde  $x$  é o vetor das variáveis de estado do sistema,  $y$  é o vetor das variáveis algébricas,  $f$  é o conjunto de equações matemáticas que representa a dinâmica do sistema e  $g$  é o vetor das equações matemáticas algébricas.

A análise da estabilidade a pequenas perturbações envolve a linearização das equações (2.7) em torno de um ponto de operação do sistema  $(x_0, y_0)$  obtida por um programa de fluxo de potência (neste trabalho foram utilizados os programas computacionais ANAREDE e

PSAT). Para pequenas variações em torno de um ponto de operação  $(x_0, y_0)$ , a forma linearizada da equação (2.7) torna-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Onde  $\Delta$  denota uma pequena perturbação nas variáveis,  $J_1 = \frac{\partial f}{\partial x}$ ,  $J_2 = \frac{\partial f}{\partial y}$ ,  $J_3 = \frac{\partial g}{\partial x}$  e  $J_4 = \frac{\partial g}{\partial y}$ .

A matriz de estado do sistema de energia elétrica pode ser obtida eliminando o vetor de variáveis algébricas  $\Delta y$ . O símbolo  $\mathbf{A}$  na equação (2.9) é utilizado para representar a matriz de estado do sistema.

$$\Delta \dot{x} = (J_1 - J_2 J_4^{-1} J_3) \Delta x = \mathbf{A} \Delta x \quad (2.9)$$

A estabilidade de um determinado ponto de equilíbrio ou ponto de operação pode ser estudada a partir do cálculo dos autovalores e autovetores associados a matriz de estado  $\mathbf{A}$ . Os autovalores da matriz  $\mathbf{A}$  são definidos como os valores do parâmetro escalar  $\lambda$  para o qual existem soluções não triviais da equação (2.10):

$$\mathbf{A} \phi = \lambda \phi \quad (2.10)$$

Onde  $\mathbf{A}$  é uma matriz  $n \times n$  e  $\phi$  um vetor de dimensão  $n$ .

A partir da equação (2.10), os autovalores da matriz  $\mathbf{A}$  podem ser calculados através da solução das raízes da sua equação característica, que é definida por (2.11):

$$(\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I}) \phi = 0 \quad (2.11)$$

Para cada autovalor  $\lambda_i$  da matriz  $\mathbf{A}$ , existe um vetor  $\phi_i$  que satisfaz (2.11), o qual recebe o nome de autovetor à direita da matriz  $\mathbf{A}$  associado ao autovalor  $\lambda_i$ . Logo, temos a definição de autovetor à direita em (2.12).

$$\mathbf{A} \phi_i = \lambda_i \phi_i, i = 1, \dots, n \quad (2.12)$$

Do mesmo modo, o vetor linha  $\psi_i$  que satisfaz a equação (2.13) denomina-se autovetor à esquerda da matriz de estado  $\mathbf{A}$ .



$$\mathbf{A}\psi_i = \lambda_i\psi_i, i = 1, \dots, n \quad (2.13)$$

Os elementos de um determinado autovetor à direita fornecem a intensidade com que um modo de resposta está presente nas variáveis de estado. Além disso, é importante determinar quais variáveis de estado são mais influentes num certo modo de resposta. Para isto, geralmente utilizam-se os fatores de participação (PEREZ-ARRIAGA, VERGHESES e SCHWEPPE, 1982). Esses fatores são importantes para a identificação de possíveis causas de problemas relacionados com modos críticos do sistema. O fator de participação é definido como um produto, elemento por elemento, dos autovetores direito e esquerdo associados. Matematicamente tem-se em (2.14).

$$p_{ki} = \psi_{ik} \phi_{ki} \quad (2.14)$$

Sendo  $\psi_{ik}$  o  $k$ -ésimo elemento do  $i$ -ésimo autovetor à esquerda  $\psi_i$  e  $\phi_{ki}$  o  $k$ -ésimo elemento do  $i$ -ésimo autovetor à esquerda  $\phi_i$ .

Os autovalores podem ser reais ou complexos conjugados. Se a matriz de estado é real, então os autovalores complexos sempre ocorrem em pares conjugados. A dependência no tempo de um modo correspondente a um autovalor  $\lambda_i$  é dada por  $e^{\lambda_i t}$ . Logo, a estabilidade do sistema é determinada pelos autovalores da matriz de estado  $\mathbf{A}$ . Se os  $\lambda_i$  têm parte real negativa, a resposta será atenuada pelos termos  $e^{\lambda_i t}$ , o que indica um sistema estável. Se a parte real de algum dos  $\lambda_i$  for positiva, o respectivo termo  $e^{\lambda_i t}$  introduzirá um crescimento exponencial na resposta, indicando um sistema instável. Cada autovalor  $\lambda_i$  é denominado um modo de oscilação do sistema. Considerando um par de autovalores complexo conjugado (KUNDUR, 1994).

$$\lambda_i = \sigma_i \pm \omega_i \quad (2.15)$$

A parte real  $\sigma_i$  está relacionada ao crescimento exponencial da resposta. Já a parte imaginária  $\omega_i$  determina a frequência de oscilação do respectivo modo de resposta a frequência é dada em Hz por (2.16).

$$f = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (2.16)$$

O fator de amortecimento (ou razão de amortecimento) para esta frequência, o qual representa a taxa de decaimento da amplitude da respectiva oscilação, pode ser obtido por (KUNDUR, 1994):

$$\zeta_i = \frac{-\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}} \quad (2.17)$$

Na prática valores aceitáveis para a razão de amortecimento  $\zeta_i$  são normalmente maiores que 5% (MARTINS, PELLANDA e ROMMES, 2007). Os programas utilizados nesta análise foram: o aplicativo PSAT e o software PacDyn. O aplicativo PSAT foi utilizado exclusivamente na análise econômica, enquanto o software PacDyn foi utilizado na análise técnica.

## 2.5. Estabilidade transitória

A estabilidade transitória é o estudo de grandes perturbações em sistemas elétricos de potência (KUNDUR, 1994). Estudos da estabilidade transitória são esperados quando se determina se o sistema permanecerá em sincronismo após perturbações significativas tais como faltas no sistema de transmissão, variações rápidas de carga, perdas de unidades geradoras ou chaveamento de linhas. Estes estudos foram introduzidos em meados dos anos 1950, mas estiveram limitados à consideração dos problemas dinâmicos de uma máquina e barramento infinito ou duas máquinas (STEVENSON, 1986).

Diferentemente do estudo da estabilidade a pequenas perturbações, o estudo da estabilidade transitória não permite a linearização das equações, portanto as equações algébricas e diferenciais não lineares devem ser resolvidas por métodos diretos ou por procedimentos numéricos iterativos.

### 2.5.1. Modelagem matemática da estabilidade transitória

A equação que descreve o movimento do rotor de um gerador síncrono está fundamentada na segunda lei de Newton, ou seja, o torque de aceleração é igual ao produto do momento de inércia do rotor pela sua aceleração angular. Assumindo que a máquina elétrica opera como gerador, a equação de movimento do rotor do gerador assume a seguinte forma:

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = T_m - T_e - T_d = T_m - T_e - K_d * (\Omega_r - \Omega_s) \quad (2.18)$$

Onde  $J$  é o momento de inércia total das massas do rotor, em kg-m<sup>2</sup>;  $\Omega_r$  é a velocidade mecânica angular, em radianos/s;  $\Omega_s$  é a velocidade mecânica angular síncrona em radianos/s;  $t$  em segundos;  $K_d$  é o coeficiente de amortecimento em N-m/s;  $T_m$  é o torque do eixo ou torque mecânico suprido pela máquina primária menos o torque de retardo devido às perdas rotacionais, em N-m;  $T_e$  é o torque elétrico resultante, em N-m e  $T_d$  é o torque de amortecimento, em N-m, que se assume como proporcional ao desvio da velocidade síncrona.

A equação (2.18) pode ser representada em por unidade (p.u) após a divisão pelo torque base  $T_{base}$  :

$$\frac{J}{T_{base}} \frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{T_m}{T_{base}} - \frac{T_e}{T_{base}} - \frac{T_d}{T_{base}} = \frac{T_m}{T_{base}} - \frac{T_e}{T_{base}} - \frac{K_d}{T_{base}} * (\Omega_r - \Omega_s) \quad (2.19)$$

Onde o torque base pode ser representado em função da potência base aparente  $S_{base}$  e da velocidade mecânica angular base  $\Omega_{base}$  (a velocidade síncrona  $\Omega_s$ ) como:

$$T_{base} = \frac{S_{base}}{\Omega_{base}} \quad (2.20)$$

Logo, a equação (2.19) assume a seguinte forma:

$$\frac{J\Omega_s^2}{S_{base}\Omega_s} \frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{T_m}{S_{base}\Omega_s} - \frac{T_e}{S_{base}\Omega_s} - \frac{K_d\Omega_s^2}{S_{base}\Omega_s} * (\Omega_r - \Omega_s) \quad (2.21)$$

Define-se a constante de inércia  $H$  e o coeficiente de amortecimento  $D$  pelas equações (2.22) e (2.23), respectivamente:

$$H = \frac{\frac{1}{2}J\Omega_s^2}{S_{base}} \quad (2.22)$$

$$D = \frac{K_d\Omega_s^2}{S_{base}} \quad (2.23)$$

A equação pode ser expressa em função da constante de inércia e do coeficiente de amortecimento e assume a seguinte forma:

$$\frac{2H}{\Omega_s} \frac{d\Omega_r}{dt} = T_m - T_e - \frac{D}{\Omega_s} * (\Omega_r - \Omega_s) \quad (2.24)$$

Onde os torque mecânico e elétrico são dados em (p.u).

As velocidades mecânicas  $\Omega_r$  e  $\Omega_s$  podem ser representadas em função das velocidades elétricas angulares  $\omega_r$  e  $\omega_s$ . Dessa forma a equação. Esta equação é conhecida como equação de oscilação.

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H} (P_m - P_e - D * (\omega_r - \omega_s)) \quad (2.25)$$

Onde  $P_m$  é a potência mecânica e  $P_e$  é a potência elétrica em (p.u).

### 2.5.2. Técnicas de análise da estabilidade transitória

Geralmente, para a análise da estabilidade transitória são considerados três métodos: métodos indiretos, métodos diretos e métodos híbridos. Tradicionalmente, os métodos indiretos são considerados como de simulação no domínio do tempo e entre os métodos diretos tem-se o método da função de Lyapunov. Existem também os métodos híbridos, estes são uma mistura dos métodos diretos e indiretos. Métodos que utilizam inteligência artificial são inseridos no conjunto dos métodos diretos (PAUCAR, 1998).

#### ✓ Métodos indiretos

Os métodos indiretos permitem que os diferentes componentes dos sistemas elétricos sejam modelados de forma mais detalhada, obtendo resultados mais precisos e confiáveis. Em contrapartida, seu esforço computacional é alto, o que os torna quase incompatíveis para serem utilizados em ambiente em tempo real (PAVELLA e MURTHY, 1994). Os métodos indiretos transformam o sistema de equações diferenciais ordinárias num conjunto de equações algébricas de diferenças. Os esquemas tradicionalmente adotados para resolução do sistema formado pelas equações (2.7) podem ser classificados com base no método de integração numérica das equações diferenciais ordinárias e na estratégia de resolução dos sistemas de equações. Os métodos de integração numérica são classificados em explícitos ou implícitos. Os métodos de integração explícitos são normalmente utilizados quando no estudo da estabilidade transitória se utilizam modelos simplificados dos componentes da rede elétrica. O método de integração explícito mais utilizado é o método de Runge-Kutta de quarta ordem.

Quando o tipo de estudo a ser realizado exige modelos mais detalhados dos diferentes componentes de um SEE, geralmente aparecem problemas de rigidez. A rigidez está relacionada com grandes diferenças nas constantes de tempo dos reguladores de tensão e dos reguladores de velocidade. Nestes casos, para superar este tipo de situação utilizam-se métodos de integração implícitos (FERREIRA, 2005).

Alguns programas computacionais utilizam métodos mais elaborados tais como o método de Adams-Bashfort e o método de Gear.

#### ✓ Métodos diretos

Os métodos diretos foram desenvolvidos com o objetivo de diminuir algumas deficiências dos métodos indiretos. Sua principal vantagem é a de não necessitar do conhecimento explícito da evolução temporal das variáveis de estado no período pós-falta para a avaliação da estabilidade do sistema de energia elétrica (FERREIRA, 2005). Porém, como desvantagem existe a necessidade de uma função de energia adequada à modelagem do sistema em estudo. Os métodos diretos se baseiam nos conceitos matemáticos do segundo teorema de Lyapunov.

Diversas funções de Lyapunov foram desenvolvidas desde os trabalhos de Magnusson e Aylett. A mais utilizada e que tem sido aplicada com sucesso na análise de estabilidade transitória denomina-se função de energia transitória ou TEF (*Transient Energy Function*). Pode-se citar também a superfície limite de energia potencial (*Potential Energy Boundary Surface* - PEBS) e o método do ponto de equilíbrio instável de controle (*Boundary Controlling Unstable equilibrium point* - BCU) (KUNDUR, 1994).

Os métodos de inteligência artificial têm sido propostos recentemente para aplicações em tempo real na avaliação da estabilidade transitória. Os principais métodos de IA empregados foram: aproximações probabilísticas, redes neurais e árvores de decisão (PAVELLA e MURTHY, 1994).

#### ✓ Métodos híbridos

Os métodos híbridos combinam as vantagens dos métodos indiretos com as vantagens dos métodos diretos. Existem dois tipos: o primeiro utiliza o sistema multimáquina completo sem qualquer tipo de redução, enquanto o segundo considera uma máquina equivalente do sistema multimáquina e a estabilidade é avaliada, por exemplo, utilizando o critério das áreas iguais (PAVELLA, ERNST e RUIZ-VEGA, 2000).

## 2.6. Projeto de PSS e FACTS para melhoria da estabilidade eletromecânica.

A revisão apresentada nas seções 2.6.1-2.6.3 descreve o projeto de PSS e Controladores FACTS, quase que exclusivamente, para a melhoria da estabilidade a perturbações pequenas. O PSS é um controlador cuja principal função é adicionar amortecimento às oscilações eletromecânicas de baixa frequência através do controle de excitação das máquinas síncrona. Na maioria das aplicações os PSS degradam a estabilidade transitória. Por outro lado, os Controladores FACTS possuem a vantagem de ser mais flexíveis, sendo aplicados para melhorar a estabilidade a pequenas e grandes perturbações.

O primeiro método de Lyapunov estabelece que a estabilidade a pequenas perturbações de um sistema não-linear é uma função das raízes da equação característica do sistema em primeira aproximação. Isto é, a estabilidade a pequenas perturbações de um sistema não-linear é dada pelas raízes da equação característica do sistema, ou seja, pelos autovalores da matriz de estado  $A$  (KUNDUR, 1994):

- Quando os autovalores têm parte real negativa, o sistema é assintoticamente estável.
- Quando pelo menos um dos autovalores tem parte real positiva, o sistema é instável.

As funções objetivo formuladas na literatura para o projeto dos controladores PSS e FACTS estão baseadas na localização dos autovalores no plano complexo. Existem basicamente quatro funções objetivo utilizadas no projeto de controladores PSS e FACTS reportadas na literatura aplicadas na melhoria da estabilidade a pequenas perturbações. Estas funções são ilustradas na Figura 2.8 (WANG, 2013).

Na primeira função objetivo limita-se a parte real de todos os autovalores do sistema a  $\sigma_{\min}$ . Na segunda função objetivo a razão de amortecimento de todos os autovalores da matriz de estado do sistema é limitada num valor pré-definido  $\zeta_{\min}$ . A terceira função objetivo é uma combinação das duas primeiras ( $\zeta_{\min}$ ,  $\sigma_{\min}$ ). Por fim, a quarta função objetivo é uma combinação da segunda com a terceira funções objetivo ( $\chi_{\min}$ ,  $\sigma_{\min}$ ).

Os trabalhos reportados na literatura que utilizam técnicas de IA para o projeto dos PSS utilizam pelo menos uma das funções objetivo detalhadas na Figura 2.8. A seguir serão descritas as técnicas de IA empregadas neste trabalho de modo a verificar a existência de diversas técnicas de inteligência artificial aplicadas com sucesso no projeto de PSS e FACTS.

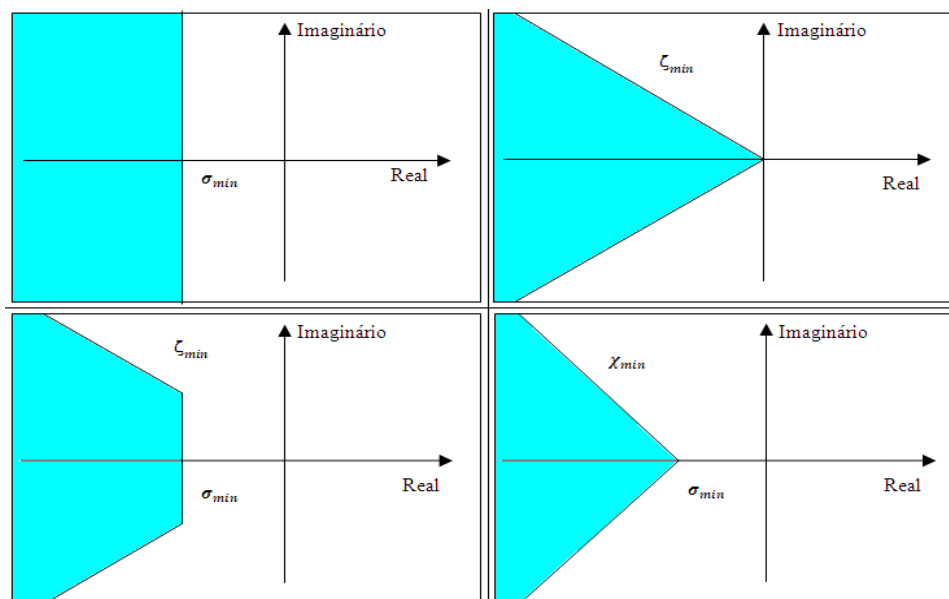


Figura 2.8: Região de convergência das quatro funções objetivo.  
Fonte: Adaptado de (WANG, 2013).

### 2.6.1. Projeto de PSS

O objetivo do projeto dos PSS é coordenar os seus parâmetros de modo a adicionar amortecimento aos modos eletromecânicos de interesse do sistema de energia elétrica (RABIH, PAL e MARTINS, 2010). Várias técnicas convencionais foram aplicadas para o projeto dos PSS: (RABIH, PAL e MARTINS, 2010) aplica programação cônica; (OTHMAN, SANCHES-GASCA, *et al.*, 1989) emprega alocação de pólos para múltiplas condições de operação; (WU e HSU, 1988) usa o princípio da teoria de controle modal; (NAMBU e OHSAWA, 1996) emprega conceitos de geometria diferencial; (SCAVONI, E SILVA, *et al.*, 2001) e (WERNER, KORBA e YANG, 2003) aplicam desigualdades matriciais lineares; (RAO e SEN, 1999) utiliza a teoria de realimentação quantitativa; (GIBBARD e VOWLES, 2000) emprega o convencional método P-Vr; (JIANG, 2007) aplica a teoria de controle sinérgico; (YUAN e FANG, 2009) utiliza a técnica de sensibilidade de trajetória. O objetivo da proposta de Yuan e Fang é uma boa aproximação para análise técnica deste trabalho. Yuan e Fang projetam e sintonizam os PSS utilizando o método do gradiente baseado na técnica de sensibilidade de trajetória, de modo a melhorar a estabilidade a pequenas perturbações e a estabilidade transitória. Todos os trabalhos comentados utilizam técnicas convencionais. Este trabalho aborda o ajuste dos parâmetros dos PSS e Controladores FACTS com técnicas de inteligência artificial. Portanto, uma revisão bibliográfica será dada adiante sobre o projeto de PSS com técnicas de IA.

Recentemente, várias técnicas de IA foram aplicadas para o projeto de PSS. Em (MITRA, CHOWDHURY, *et al.*, 2006) é proposto um PSS *fuzzy* com novos sinais de entrada. Estes sinais são o desvio de potência ativa da conexão de uma linha de interligação (*tie line*) de duas áreas e o desvio de velocidade. A técnica apresenta melhores resultados quando comparados a PSS convencionais e PSS *fuzzy* com entradas convencionais. Em (ABIDO e ABDEL-MAGID, 1999) desenvolve-se uma RBFN (*Radial Basis Function Networks*) para sintonizar os parâmetros dos PSS *on-line* com base na medida do carregamento do sistema em tempo real. Os algoritmos genéticos (AG) foram aplicados por vários autores para sintonizar e coordenar os parâmetros dos PSS. Em (ABDEL-MAGID, ABIDO, *et al.*, 1999); (DO BOMFIM, TARANTO e FALCÃO, 2000); (ALKHATIB e DUVEAU, 2013); (ABDEL-MAGID e ABIDO, 2003) demonstra-se o uso dos algoritmos genéticos para sintonizar múltiplos PSS em sistemas multimáquina considerando diferentes contingências no sistema. A diferença básica entre estas referências está na formulação da função objetivo, nos sistemas teste e no procedimento para programar o AG. Em (ABIDO, 2000) e (ABIDO, 2001) a técnica *Simulated Annealing* (SA) é aplicada para sintonizar múltiplos PSS. (ABIDO, 2002) e (SHAYEGHI, SHAYANFAR, *et al.*, 2010) empregam otimização por enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization* - PSO) para projetar os PSS em sistemas multimáquina. (ABIDO e ABDEL-MAGID, 2000) e (MISHRA, TRIPATHY e NANDA, 2007) utilizam busca tabu (*Tabu Search*) e uma técnica de otimização conhecida como algoritmo de otimização pela coleta de alimentos por bactérias (*Bacterial Foraging Optimization* – BFO), respectivamente, para o mesmo propósito. (WANG, 2013) apresenta uma nova função objetivo (considera um limite em  $\chi_{min}$ ) e um novo algoritmo, denominado método de pesquisa gradual, para sintonizar e projetar PSS.

### 2.6.2. Projeto de Controladores FACTS

A referência (MONDAL, CHAKRABARTI e SENGUPTA, 2012) utiliza PSO para selecionar a localização ótima e ajustar os parâmetros do SVC e do TCSC com o objetivo de amortecer as oscilações de pequenos sinais em sistemas multimáquina. (SHAYEGHI, SHAYANFAR, *et al.*, 2010) projeta o TCSC para melhorar as oscilações do SEE. (SHAYEGHI, SHAYANFAR, *et al.*, 2010) compara AG com PSO. (PANDA, 2009) apresenta um procedimento sistemático para modelar, simular e sintonizar os parâmetros do TCSC para melhorar a estabilidade do SEE utilizando evolução diferencial (ED). (ABD-



ELAZIM e ALI, 2012) e (ALI e ABD-ELAZIM, 2012) apresentam BFO para projetar SVC e TCSC, respectivamente, de modo a melhorar o comportamento das oscilações do sistema. Em (SHAYEGHI, SHAYANFAR, *et al.*, 2010) apresenta-se um PSO quântico para projetar os parâmetros do UPFC de modo a melhorar a estabilidade eletromecânica do sistema de energia elétrica. Em (FURINI, DE MOURA e DE ARAÚJO, 2012) utiliza-se algoritmos genéticos no ajuste automático dos parâmetros do controlador suplementar de amortecimento (POD) acoplado ao controlador FACTS UPFC objetivando o amortecimento de oscilações de baixa frequência no sistema de energia elétrica.

### **2.6.3. Projeto simultâneo de PSS e Controladores FACTS**

Particularmente, em SEE multimáquina, usar somente PSS convencionais pode não ser suficiente para amortecer os modos de oscilações interárea. Neste caso, uma solução efetiva é a utilização dos POD acoplados aos Controladores FACTS. Para tornar efetiva a atuação dos PSS e dos POD é necessário realizar o ajuste dos seus parâmetros. Diversas técnicas de IA foram aplicadas com sucesso. Em (CAI e ERLICH, 2005) analisa-se a sintonização coordenada e simultânea dos POD-TCSC e PSS convencionais utilizando a função *fmincon* (*Find Minimum of Constrained Nonlinear*) do MATLAB. (ABD-ELAZIM e ALI, 2012) e (ALI e ABD-ELAZIM, 2011) utilizam BFOA para sintonizar PSS com SVC e TCSC, respectivamente. (PANDA e PADHY, 2008) e (GOLKAR e ZARRINGHALAMEI, 2009) sintonizam PSS e STATCOM utilizando PSO e AG, respectivamente.

## **2.7. Impacto econômico dos PSS e Controladores FACTS na estabilidade eletromecânica**

A influência da estabilidade eletromecânica do sistema no mercado de energia elétrica foi tema de várias pesquisas nos últimos anos. A principal ferramenta utilizada pelos pesquisadores para analisar o impacto econômico foi o Fluxo de Potência Ótimo (FPO). O FPO é uma importante ferramenta para os operadores do sistema de energia elétrica na etapa do planejamento e da operação do SEE. O principal objetivo do FPO é determinar o ponto de operação ótimo e o correspondente ajuste das variáveis de controle para uma operação segura e econômica do sistema de energia elétrica (CAI, CHUNG e WONG, 2008).

Vários algoritmos foram propostos para incluir as restrições de estabilidade no problema do FPO. Em (TIRANUCHIT e THOMAS, 1988) e (LOF, SMED, *et al.*, 1992), os autores utilizam o mínimo valor singular da Jacobiana do fluxo de potência como um índice para detectar a aproximação da instabilidade de tensão. Em (GAN, THOMAS e ZIMMERMAN, 2000), um FPO com restrição de estabilidade é apresentado, onde as equações dinâmicas são convertidas em equações algébricas numéricas. Na referência (CONDREN e GEDRA, 2006) os autores utilizam o método dos pontos interiores primal-dual para otimizar o bem-estar social com restrição de estabilidade a pequenas perturbações; um limite foi dado para a parte real dos autovalores. Em (ZÁRATE-MIÑANO, MILANO e CONEJO, 2011) é apresentado um FPO com restrição a estabilidade a pequenas perturbações e estabilidade de tensão. Da mesma maneira que (CONDREN e GEDRA, 2006), a parte real dos autovalores foi limitada num valor pré-estabelecido. (LI, WEI, *et al.*, 2013) aplica programação não-linear semi-definida para solucionar um FPO com restrição de estabilidade a pequenas perturbações. Grande parte dos trabalhos onde a estabilidade a pequenas perturbações é incorporada como uma restrição no FPO o índice que é limitado é a parte real dos autovalores.

O fluxo de potência ótimo com restrição de estabilidade transitória (*Transient Stability Constrained Optimal Power Flow* - TSCOPF) é formulado como um problema de otimização não linear que envolve a solução de um conjunto de equações algébricas e diferenciais. (GAN, THOMAS e ZIMMERMAN, 2000) adiciona a restrição de estabilidade transitória no FPO limitando o ângulo dos geradores em  $100^\circ$  com relação ao centro de inércia ou COI (*Centre Of Inertia*). Na referência (YUAN, KUBOKAWA e SASAKI, 2003) utiliza-se o método dos pontos interiores Newton primal-dual para programação não-linear para resolver o TSCOPF considerando várias contingências. Da mesma maneira que (GAN, THOMAS e ZIMMERMAN, 2000); (YUAN, KUBOKAWA e SASAKI, 2003) adota como ângulo limite  $100^\circ$  com relação ao COI. Para diminuir o tempo computacional (JIANG e GENG, 2010) apresenta um método dos pontos interiores com redução de espaço para solucionar o TSCOPF. O método é baseado em métodos de discretização numérica e dos pontos interiores preditor-corretor. (AYAN e KILIÇ, 2013); (TANGPATIPHAN e YOKOYAMA, 2008) e (MO, ZOU, *et al.*, 2007) aplicam otimização por colônia de abelhas, programação evolutiva (com a incorporação de redes neurais) e otimização por enxame de partículas para resolver o TSCOPF, respectivamente.

Em (GAN, THOMAS e ZIMMERMAN, 2000); (YUAN, KUBOKAWA e SASAKI, 2003); (JIANG e GENG, 2010); (AYAN e KILIÇ, 2013); (TANGPATIPHAN e YOKOYAMA, 2008) e (MO, ZOU, *et al.*, 2007) a restrição da estabilidade transitória é apresentada através de métodos tradicionais. Nos métodos tradicionais define-se um desvio máximo dos ângulos dos rotores com relação ao COI como um índice de estabilidade. Entretanto, estes métodos não são adequados para sistemas de grande porte devido ao alto esforço computacional (especialmente para várias contingências). Para resolver este problema métodos híbridos e métodos diretos foram aplicados com sucesso no TSCOPF. (CAI, CHUNG e WONG, 2008) utiliza a evolução diferencial para solucionar TSCOPF. Esse artigo utiliza um método híbrido baseado em simulação no domínio do tempo e na função de energia transitória. (XU, DONG, *et al.*, 2012) utiliza um método híbrido fundamentado na margem de estabilidade transitória  $\eta$ , que é derivada do critério das áreas iguais (*Equal Area Criteria* - EAC) para uma máquina com barramento infinito (*One Machine Infinite Bus* - OMIB). Para obter a margem de energia transitória  $\eta$  os autores da referência (XU, DONG, *et al.*, 2012) utilizam o pacote FASTEST. Em (PIZZANO-MARTÍNEZ, FUERTE-ESQUIVEL e RUIZ-VEGA, 2011) utiliza-se o conceito de SIME (*Single Machine Equivalent*). O método SIME transforma um sistema multimáquina num equivalente OMIB. Baseado na observação da perda de sincronismo no sistema multimáquina no SIME pode-se concluir que há separação em dois grupos: um composto pelas máquinas críticas e o outro pelas máquinas não críticas.

Pouca atenção foi dada ao impacto econômico dos PSS e Controladores FACTS na estabilidade eletromecânica. (KODSI e CAÑIZARES, 2005) utiliza o método dos pontos interiores para maximizar o benefício social. Os PSS são alocados no sistema e observa-se que os PSS beneficiam o custo do congestionamento do sistema. A diferença entre o custo do sistema sem e com PSS pode ser utilizado para precificação dos serviços de controle do PSS. Em (SAMANI, SEIFI e SHEIKL-EL-ESLAMI, 2012) encontram-se dois *framework* para a avaliação da estabilidade a pequenas perturbações como serviço ancilar através dos PSS. Demonstra-se que os PSS reduzem o custo de geração sem degradar o amortecimento do sistema. (ALABDULJABBAR e MILANOVIC, 2010) avalia de forma separada os impactos técnico e econômico do inserção dos FACTS. Os Controladores FACTS considerados foram: SVC, TCSC, TCVR (*Thyristor-Controlled Voltage Regulator*) e o TCPST (*Thyristor-Controlled Phase Shifting Transformer*). O valor presente líquido (*Net Present Value* – NPV) é empregado para avaliar o impacto econômico dos Controladores FACTS. A ferramenta de otimização utilizada foi algoritmos genéticos. (ALHASAWI e MILANOVIC, 2012) apresenta

o impacto técnico e econômico do TCSC e SVC na operação do sistema de energia elétrica com 50% de concentração de energia eólica, a ferramenta de IA utilizada foi algoritmos genéticos.

### 3. Metodologia para análise técnica do impacto dos PSS e FACTS na estabilidade eletromecânica

#### 3.1. Introdução

Neste capítulo será apresentada uma metodologia integrada desenvolvida em ambiente *Matlab* para analisar o impacto dos PSS e Controladores FACTS na estabilidade eletromecânica. Os programas computacionais PacDyn e ANATEM, além do ANAREDE, foram utilizados na metodologia proposta. Igualmente serão apresentados e discutidos os resultados obtidos através da aplicação da metodologia proposta em sistemas teste. Na seção 3.2 é apresentada uma visão geral da comunicação entre os programas ANAREDE, ANATEM e PacDyn. Nesta seção encontram-se os parâmetros necessários para simulação das técnicas de IA em ambiente *Matlab*. O impacto técnico dos PSS e FACTS na estabilidade eletromecânica a pequenas perturbações e na estabilidade transitória será analisado empregando as metodologias apresentadas nas seções 3.3 e 3.4, respectivamente.

Nas simulações de aplicação da metodologia integrada proposta foram utilizados três sistemas teste. O primeiro, denominado WSCC (*Western Systems Coordinating Council*), possui 9 barras e 3 geradores (ANDERSON e FOUAD, 2003). Os geradores síncronos deste sistema foram representados pelo modelo 3 do programa PacDyn (equivale ao modelo 2 do programa ANATEM). O segundo sistema teste, o sistema New England, possui 39 barras e 10 geradores (PAI, 1989). Os geradores deste sistema foram representados pelo modelo 3 do programa PacDyn (equivale ao modelo 2 do programa ANATEM). Por fim, utilizou-se um sistema teste de maior porte representando o sistema Sul-Sudeste brasileiro, que corresponde a uma parte do SIN, sendo modelado por 616 barras e 50 geradores (MARTINS e LIMA, 1990). Os geradores deste sistema foram representados pelo modelo 4 do programa PacDyn (equivale ao modelo 2 no ANATEM).

A função objetivo definida no plano complexo  $S$  (ver item 3.3.1, Figura 3.2) será utilizada no projeto dos PSS e FACTS dos três sistemas teste mencionados. Também serão utilizados mais dois sistemas teste, um de 3 geradores e outro de 5 geradores, para aplicar o projeto de PSS e FACTS considerando uma função objetivo no plano  $Z$  (ver Figura 3.3).

### **3.2. Metodologia integrada para análise do impacto técnico dos PSS e FACTS na estabilidade eletromecânica**

As condições iniciais das variáveis de estado no estudo da estabilidade eletromecânica do sistemas de potências são obtidas por um programa de fluxo de potência. Portanto, na análise técnica o software utilizado para solução do fluxo de potência foi o ANAREDE, um software computacional desenvolvido no CEPEL. Nos estudos dinâmicos foram utilizados os softwares PacDyn e ANATEM. O software PacDyn é utilizado em estudos de respostas a pequenas perturbações, enquanto o ANATEM é utilizado para análises de transitórios eletromecânicos. Para integrar o ANAREDE, PacDyn e ANATEM utilizou-se a plataforma *Matlab*. O fluxograma ilustrado na Figura 3.1 oferece uma visão geral de uma simulação da estabilidade eletromecânica com os programas PacDyn e ANATEM. O *ARQUIVO.PWF* contém os dados estáticos da rede: dados de barras, dados de linhas, dados de transformadores, etc. O *ARQUIVO.HIS* contém a solução do fluxo de potência e é gerado pelo programa ANAREDE.

O *ARQUIVO.DYN* é utilizado na análise da estabilidade a pequenas perturbações. Esse arquivo contém os dados de geradores, AVR, PSS, Controladores FACTS, etc. O *ARQUIVO.STB* é utilizado no programa ANATEM. Esse arquivo contém os dados de geradores, AVR, etc. Os dados dos PSS e dos Controladores FACTS foram carregados no programa ANATEM através da ULOG 2.

O ANATEM pode ser executado via interface gráfica ou por comandos digitados em ambiente DOS. Neste trabalho foi executado o ANATEM através de comandos DOS.

O método dos resíduos foi útil na determinação do local onde serão instalados os PSS, SVC e TSCS. Os fatores de participação foram utilizados para determinar o sinal de entrada dos POD dos Controladores FACTS. Os resíduos e os fatores de participação foram determinados pelo PacDyn. Além disso, as matrizes de estado de todos os sistemas teste foram obtidas pelo PacDyn.

O problema de sintonia e ajuste coordenado de controladores de um determinado sistema de energia elétrica constitui um problema de otimização com restrições. Os parâmetros dos controladores PSS, SVC e TCSC devem obedecer os seus limites máximos e mínimos (ver Tabela 3.1).

Tabela 3.1: Limites dos parâmetros dos controladores nos sistemas teste.

|             |                  | Sistemas Teste |               |               |               |               |               |
|-------------|------------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|             |                  | WSCC           |               | New England   |               | Sul-Sudeste   |               |
|             |                  | $Valor_{min}$  | $Valor_{max}$ | $Valor_{min}$ | $Valor_{max}$ | $Valor_{min}$ | $Valor_{max}$ |
| <b>PSS</b>  | $K_{pss}$        | 1              | 50            | 1             | 50            | 0,1           | 30            |
|             | $T_1$            | 0,01           | 2             | 0,01          | 2             | 0,01          | 2             |
|             | $T_2$            | 0,001          | 1             | 0,001         | 1             | 0,001         | 1             |
|             | $T_w$            | 1              | 20            | 1             | 20            | Igual a 3     |               |
| <b>SVC</b>  | $K_{svc_{pod}}$  | 1              | 300           | 1             | 300           | 0,1           | 100           |
|             | $T_1$            | 0,01           | 2             | 0,01          | 2             | 0,01          | 2             |
|             | $T_2$            | 0,001          | 1             | 0,001         | 1             | 0,001         | 1             |
|             | $T_w$            | 1              | 20            | 1             | 20            | Igual a 3     |               |
| <b>TCSC</b> | $K_{tcsc_{pod}}$ | 1              | 1.400         | 1             | 1400          | 0,1           | 300           |
|             | $T_1$            | 0,01           | 2             | 0,01          | 2             | 0,01          | 2             |
|             | $T_2$            | 0,001          | 1             | 0,001         | 1             | 0,001         | 1             |
|             | $T_w$            | 1              | 20            | 1             | 20            | Igual a 3     |               |

As técnicas de IA utilizam uma combinação de escolhas aleatórias e conhecimento histórico dos resultados anteriores adquiridos pela técnica para se guiarem e realizar buscar até encontrar a suposta solução do problema. Portanto, é útil considerar várias técnicas de IA na resolução de um problema. Uma vez que para diferentes problemas não existe uma técnica de IA que seja superior às outras. Neste trabalho, as técnicas utilizadas foram: algoritmos genéticos, recozimento simulado (*simulated annealing*), evolução diferencial e otimização por enxame de partículas. Na Tabela 3.2 tem-se as técnicas de IA aplicadas para sintonizar e coordenar os parâmetros dos PSS e FACTS. Para mais informações sobre o funcionamento dos algoritmos genéticos, otimização por enxame de partículas, *simulated annealing* e evolução diferencial ver o Apêndice A. Devido à simplicidade e ao bom funcionamento das técnicas de algoritmos genéticos e *simulated annealing* na análise da estabilidade a pequenas perturbações, na análise da estabilidade transitória aplicaram-se somente essas técnicas.

Tabela 3.2: Técnicas de IA utilizadas nos sistemas teste.

| Sistema                    | Estabilidade a pequenas perturbações               | Estabilidade transitória                           |
|----------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 1. WSCC                    | Algoritmos genéticos                               | Algoritmos genéticos<br><i>Simulated annealing</i> |
| 2. New England             | Otimização por enxame de partículas                |                                                    |
| 3. Sul- Sudeste brasileiro | <i>Simulated annealing</i><br>Evolução diferencial |                                                    |

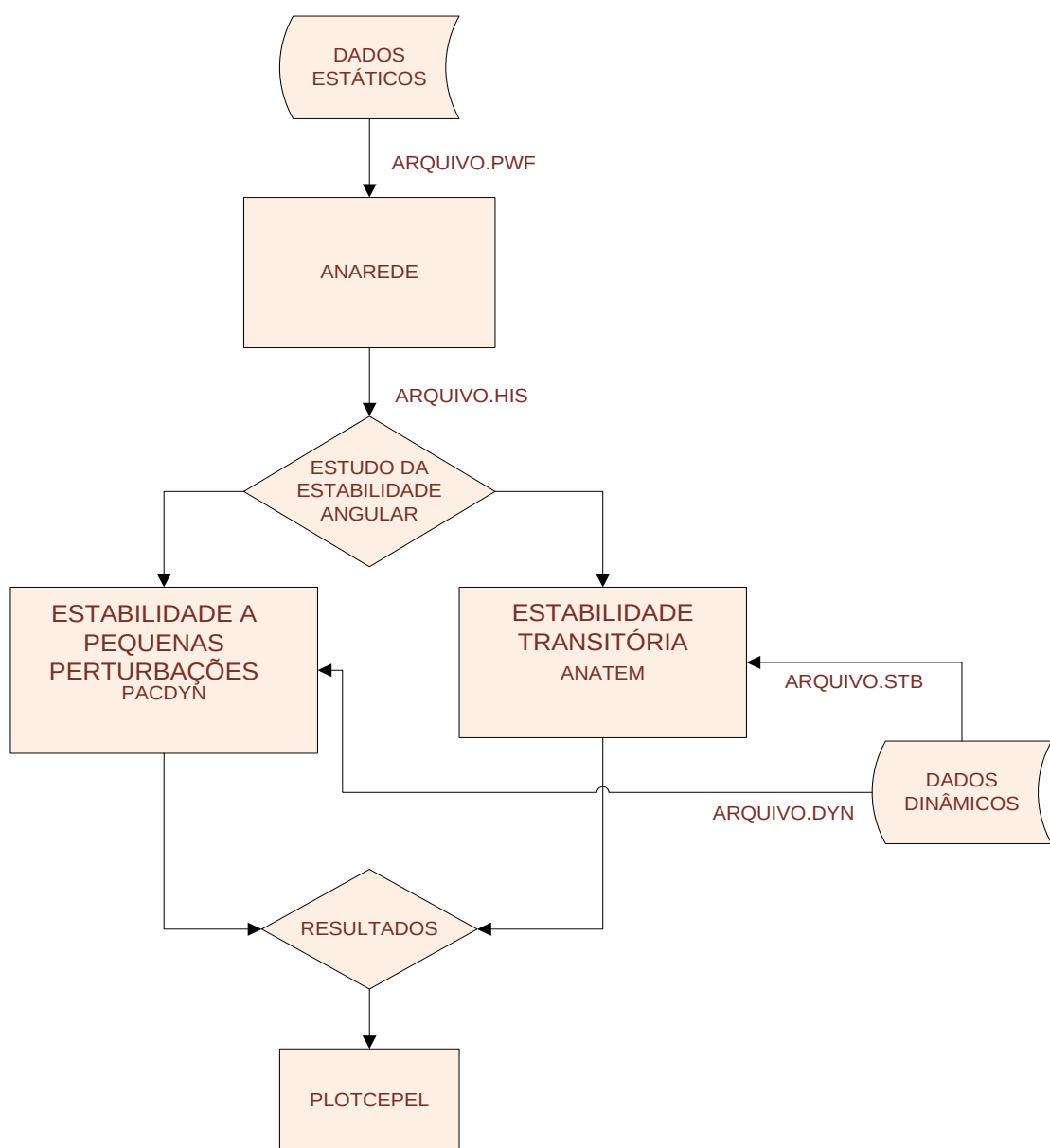


Figura 3.1: Fluxograma da execução dos programas PacDyn e ANATEM.



### 3.3. Metodologia para análise do impacto técnico dos PSS e FACTS na estabilidade a pequenas perturbações

#### 3.3.1. Desenvolvimento da metodologia

As quatro funções objetivo utilizadas na literatura no projeto de PSS e POD estão ilustradas na Figura 2.8. Optou-se em utilizar a função objetivo ilustrada na Figura 3.2, que matematicamente é dada pela expressão (3.1).

$$F_1 = \min(100 - \zeta_{min})$$

Sujeito a:

(3.1)

$$z_{min} \leq z \leq z_{min}$$

Em que  $\zeta_{min}$  representa o mínimo valor do coeficiente de amortecimento selecionado dentre todos os coeficientes calculados a partir da matriz de estado de malha fechada e o vetor  $z$  contém todos os parâmetros dos controladores a serem projetados e sintonizados.

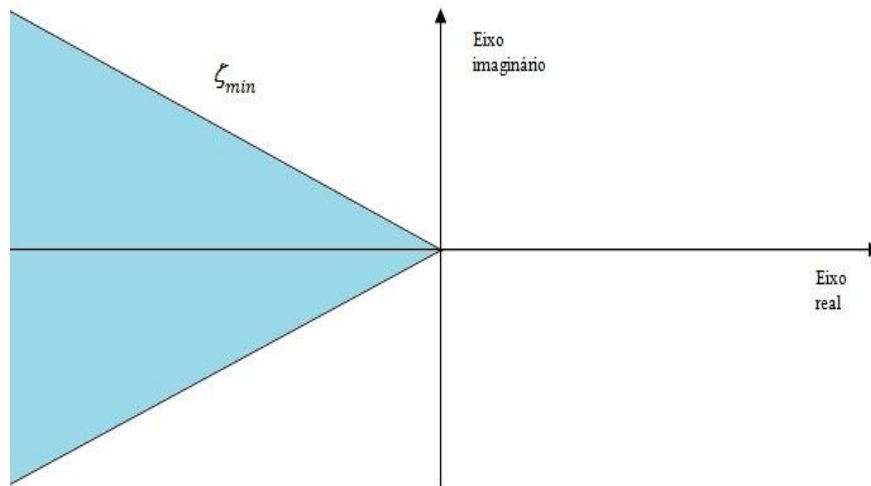


Figura 3.2: Zona da função objetivo no plano S.

Uma função objetivo foi formulada através da teoria do método da matriz S (UCHIDA e NAGOA, 1988). A equivalência entre a função objetivo utilizada neste trabalho e a função objetivo da matriz S é ilustrada na Figura 3.3.

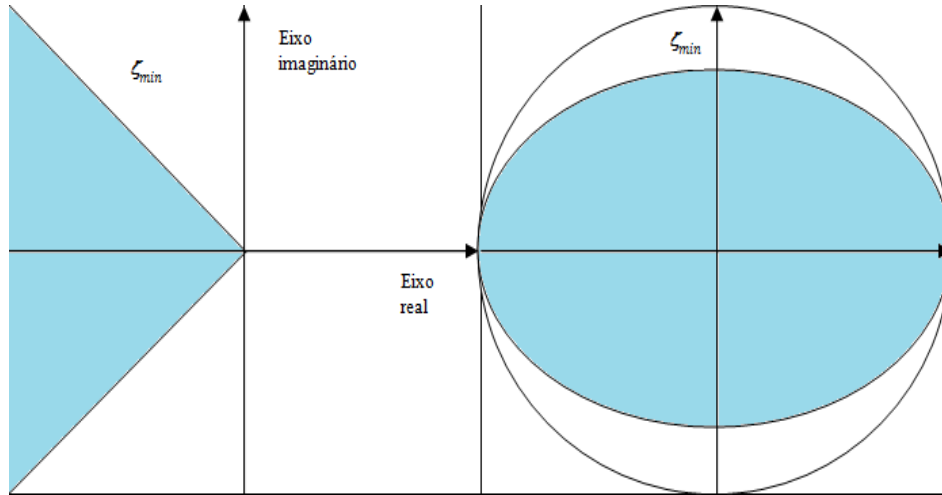


Figura 3.3: Equivalência entre o plano S e o plano Z.

O método da matriz  $S$  transforma a matriz de estado  $A$  numa matriz  $A_z$  utilizando a equação (3.2) (Este é um caso particular da Transformação de Möbius). Um sistema é estável, no plano S, se todos os pólos estiverem no semi-plano esquerdo do plano complexo. Um sistema é estável, no plano Z, se todos os pólos estiverem dentro do círculo unitário.

$$A_z = (A + hI)/(A - hI) \quad (3.2)$$

Onde  $h$  é um número positivo e  $I$  é uma matriz identidade.

A estabilidade do sistema é determinada pelo autovalor de maior valor absoluto  $\lambda_{Smax}$  da matriz de estado  $A_z$ .

- Instável se  $|\lambda_{Smax}| > 1$
- Crítico se  $|\lambda_{Smax}| = 1$
- Estável se  $|\lambda_{Smax}| < 1$

Na fronteira do círculo unitário a razão de amortecimento é igual a 0. Entretanto, sistemas com razões de amortecimento iguais a zero são considerados pobremente amortecidos. Logo, é oportuno considerar elipses ao invés do círculo unitário. Vale ressaltar que esta consideração é uma aproximação.

Seja  $\zeta_{min}$  o limite de amortecimento do sistema. Definindo o valor da distância  $D_i$  do autovalor  $\lambda_{iz}$  da matriz  $A_z$  pela expressão (3.3).

$$D_i = |\lambda_{iz}| - \sqrt{[\cos(t)]^2 + [\kappa^2 * \sin(t)]^2} \quad (3.3)$$

Onde  $|\lambda_{iz}|$  é o módulo do autovalor  $i$  da matriz  $A_z$ ,  $t$  é o argumento do autovalor  $i$  da matriz  $A_z$  e  $\kappa$  é um número entre zero e um. Portanto, com base na expressão (3.3) pode-se formular uma nova função objetivo  $F_2$ .

$$F_2 = \min \sum_{D_i > 0} D_i \quad (3.4)$$

Sujeito a:

$$z_{min} \leq z \leq z_{min}$$

Em tese não é necessário calcular todos os autovalores da matriz  $A_z$ . Foram calculados somente uma porcentagem dos autovalores da matriz  $A_z$ , ou seja, todos os autovalores que se encontram fora da elipse com seu  $\zeta_{min}$  correspondente. A função *eigs* do software *Matlab* foi utilizada para o cálculo dos autovalores de maiores módulos. Esta função utiliza o pacote ARPACK, que se fundamenta numa variante do método de *Arnoldi*, denominado de método de *Arnoldi* Implicitamente Reiniciado (IRAM). Em toda a análise técnica será utilizada a função objetivo  $F_1$ . A função objetivo  $F_2$  será utilizada em dois sistema teste para efeito de comparação e de sua validação.

O fluxograma simplificado da análise técnica dos controladores PSS e FACTS na estabilidade a pequenas perturbações é ilustrado na Figura 3.4. Após obter a localização dos PSS e dos Controladores FACTS por meio da aplicação dos métodos dos resíduos e dos fatores de participação, gera-se a matriz de estado do sistema no programa PacDyn. As informações da matriz de estado do sistema se encontram no *ARQUIVO.OUT*. O *Matlab*, através da função *pacstat*, recebe as informações contidas na matriz de estado gerada pelo PacDyn.

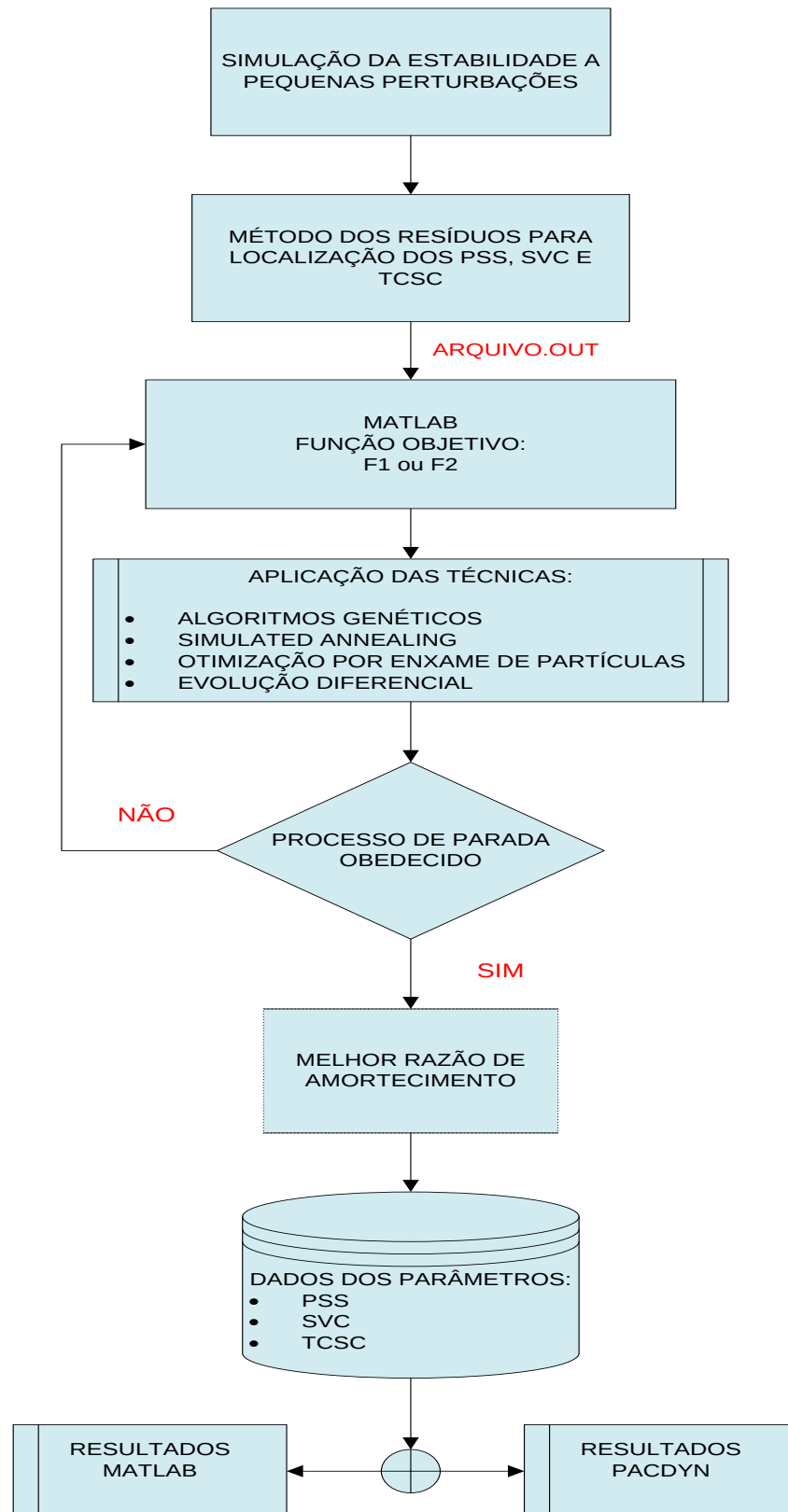


Figura 3.4: Fluxograma da análise técnica da estabilidade a pequenas perturbações.

### 3.3.2. Aplicação a sistemas teste

Nesta seção, são apresentados os resultados de simulações realizadas em sistemas teste. Estes resultados mostram o impacto provocado pela inserção de PSS e Controladores FACTS no amortecimento das oscilações eletromecânicas de baixa frequência.

#### 3.3.2.1. Sistema WSCC

O sistema teste WSCC de 9 barras e 3 geradores é ilustrado na Figura 3.5. Os dados deste sistema se encontram no Apêndice B deste trabalho e foram retirados da referência (ANDERSON e FOUAD, 2003).

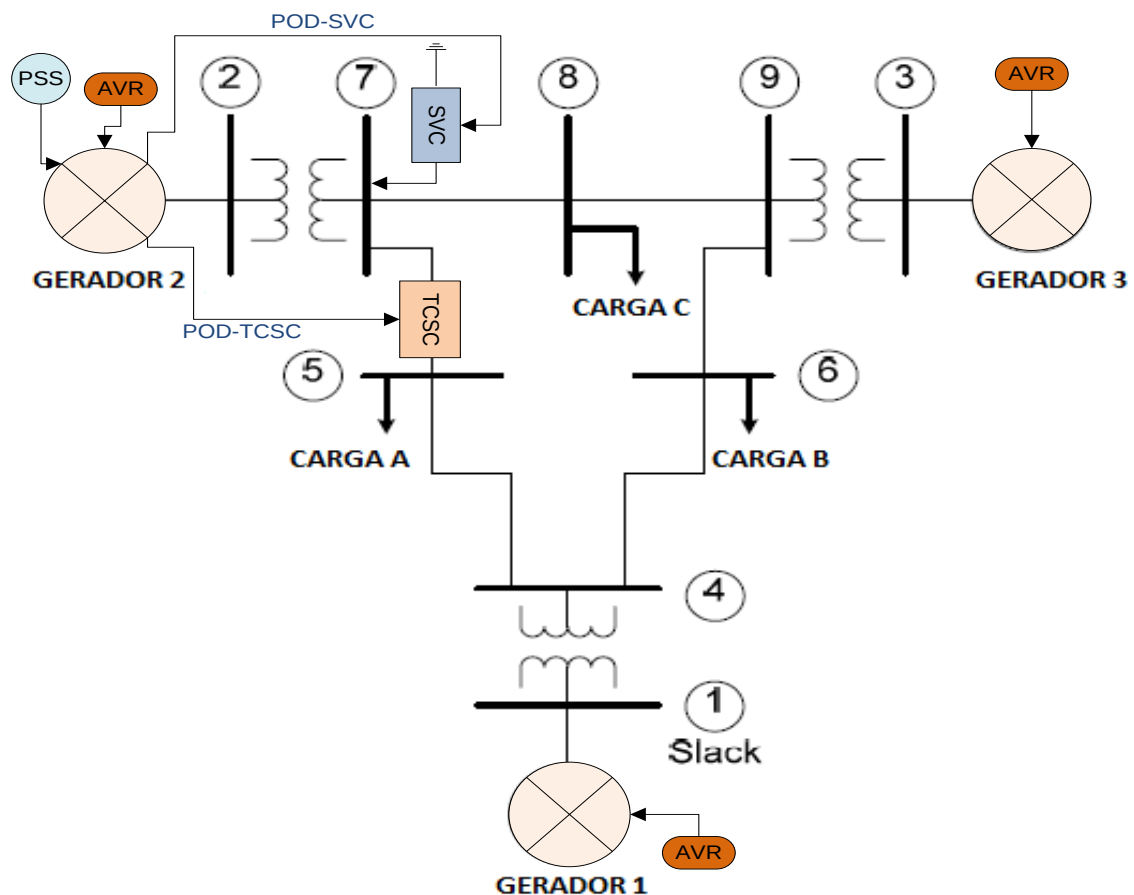


Figura 3.5: Diagrama unifilar do sistema WSCC de 9 barras e 3 geradores.  
Fonte: Adaptado de (ANDERSON e FOUAD, 2003).

➤ Caso base:

A menor razão de amortecimento do caso base é dada na Tabela 3.3. Observa-se que o sistema é fracamente amortecido. Para melhorar o amortecimento foram instalados PSS, SVC, TCSC e suas combinações. Para todos os casos simularam-se duas condições no sistema WSCC: caso 1 sendo equivalente ao caso base e caso 2 considerando a saída da linha 4-6. O mapa de pólos de malha aberta é dado na Figura 3.6 para o sistema WSCC nos casos 1 e 2.

Tabela 3.3: Razão de amortecimento do caso base para o sistema WSCC.

| Autovalor            | Amortecimento (%) |
|----------------------|-------------------|
| $-0,1027 \pm j8,302$ | 1,2363            |

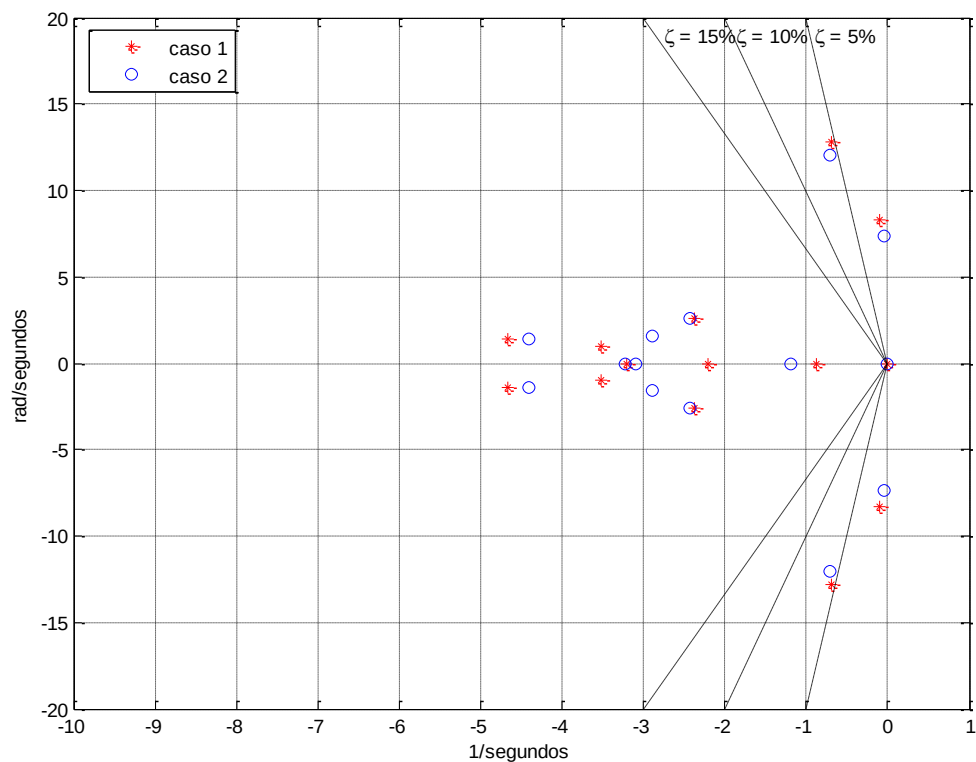


Figura 3.6: Mapa de pólos para o sistema WSCC no caso base.

➤ Caso com PSS:

Para a alocação dos PSS a função de transferência utilizada para o cálculo dos resíduos foi  $\frac{WW_k}{VREF_k}$ . Os resultados da Tabela 3.4 indicam que o PSS será instalado na malha de controle do gerador 2.

Tabela 3.4: Resíduos para a alocação do PSS no sistema WSCC.

| Módulo | Fase    | Barra     |
|--------|---------|-----------|
| 1,0000 | 33,614  | Gerador 2 |
| 0,2284 | 43,478  | Gerador 3 |
| 0,0609 | -138,14 | Gerador 1 |

Os valores das constantes utilizando diferentes técnicas de inteligência artificial são mostrados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Parâmetros do PSS do sistema WSCC obtidos com técnicas de IA.

|               | AG     | SA     | PSO    | ED      |
|---------------|--------|--------|--------|---------|
| $K_{pss}$     | 7,5155 | 6,3207 | 7,4360 | 13,0160 |
| $T_1$         | 1,9987 | 1,9991 | 2,0000 | 1,9081  |
| $T_2$         | 0,0021 | 0,0011 | 0,0100 | 0,0100  |
| $T_w$         | 1,0085 | 1,2054 | 1,0000 | 1,0000  |
| $\zeta_{min}$ | 7,5615 | 7,3734 | 6,6047 | 6,0517  |

A técnica que apresentou melhor resultado foi o AG. Logo, a menor razão de amortecimento, após a instalação do PSS no gerador 2, é mostrada na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Razão de amortecimento para o sistema WSCC com PSS no gerador 2.

| Autovalor             | Amortecimento (%) |
|-----------------------|-------------------|
| $-0,7515 \pm j9,9103$ | 7,5615            |

O mapa de pólos de malha fechada é ilustrado na Figura 3.7 para o sistema WSCC com PSS, observa-se que todos os pólos tem razão de amortecimento acima de 5%.

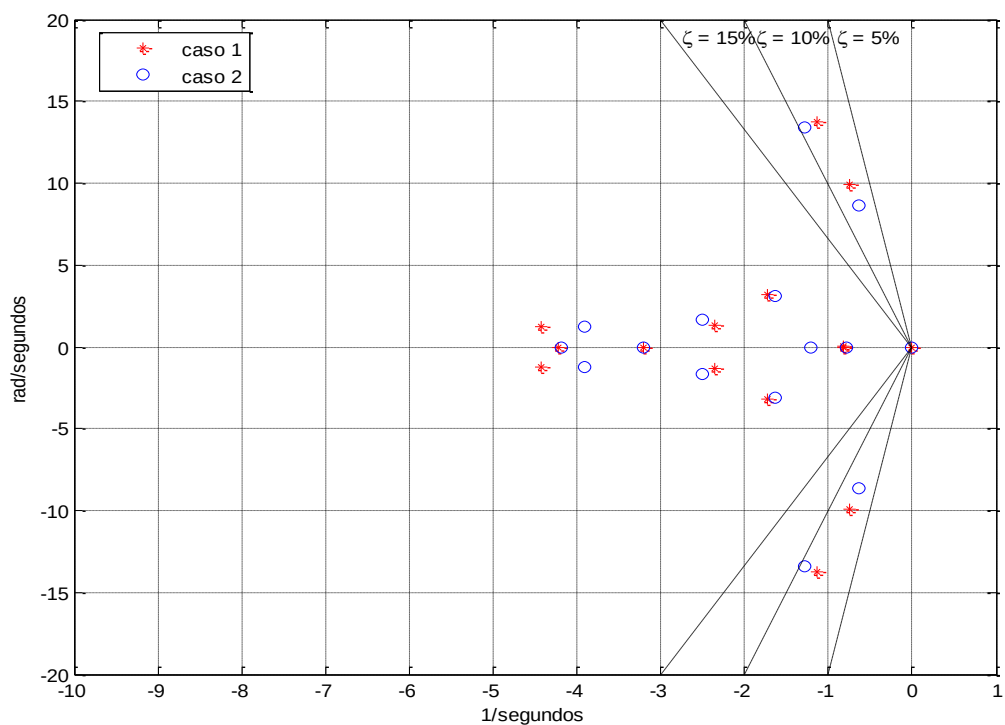


Figura 3.7: Mapa de pólos para o sistema WSCC com PSS.

➤ Caso com SVC:

Para a alocação do SVC no sistema WSCC utilizou-se a técnica dos resíduos e a função de transferência foi  $\frac{V_{bus}}{BSHU_{bus}}$ .

Tabela 3.7: Resíduos para alocação do SVC no sistema WSCC.

| Módulo | Fase    | Barra   |
|--------|---------|---------|
| 1,000  | -54,200 | Barra 7 |
| 0,9255 | -53,683 | Barra 8 |
| 0,8844 | -69,314 | Barra 5 |

Aplicando-se a técnica dos resíduos, cujos resultados são fornecidos na Tabela 3.7, conclui-se que o SVC será instalado na barra 7. Os valores das constantes dos parâmetros do SVC utilizando diferentes técnicas de inteligência artificial são mostrados na Tabela 3.8.



Tabela 3.8: Constantes do POD do SVC para o sistema WSCC.

|               | AG     | SA      | PSO     | ED     |
|---------------|--------|---------|---------|--------|
| $K_{svc}$     | 2,2478 | 82,2843 | 102,591 | 30,964 |
| $T_1$         | 0,9839 | 0,0160  | 0,0010  | 0,0010 |
| $T_2$         | 0,5561 | 0,8639  | 0,6844  | 0,0800 |
| $T_w$         | 11,852 | 11,269  | 19,133  | 16,323 |
| $\zeta_{min}$ | 5,6535 | 5,7551  | 5,8276  | 5,0818 |

Dentre as quatro técnicas, PSO obteve o melhor resultado. A menor razão de amortecimento com a instalação do SVC na barra 7 é mostrada na Tabela 3.9. O mapa de pólos de malha fechada é ilustrado na Figura 3.8 para o sistema WSCC com a instalação do SVC.

Tabela 3.9: Razão de amortecimento para o Sistema WSCC com SVC na barra 7.

| Autovalor             | Amortecimento (%) |
|-----------------------|-------------------|
| $-0,7395 \pm j12,699$ | 5,8276            |

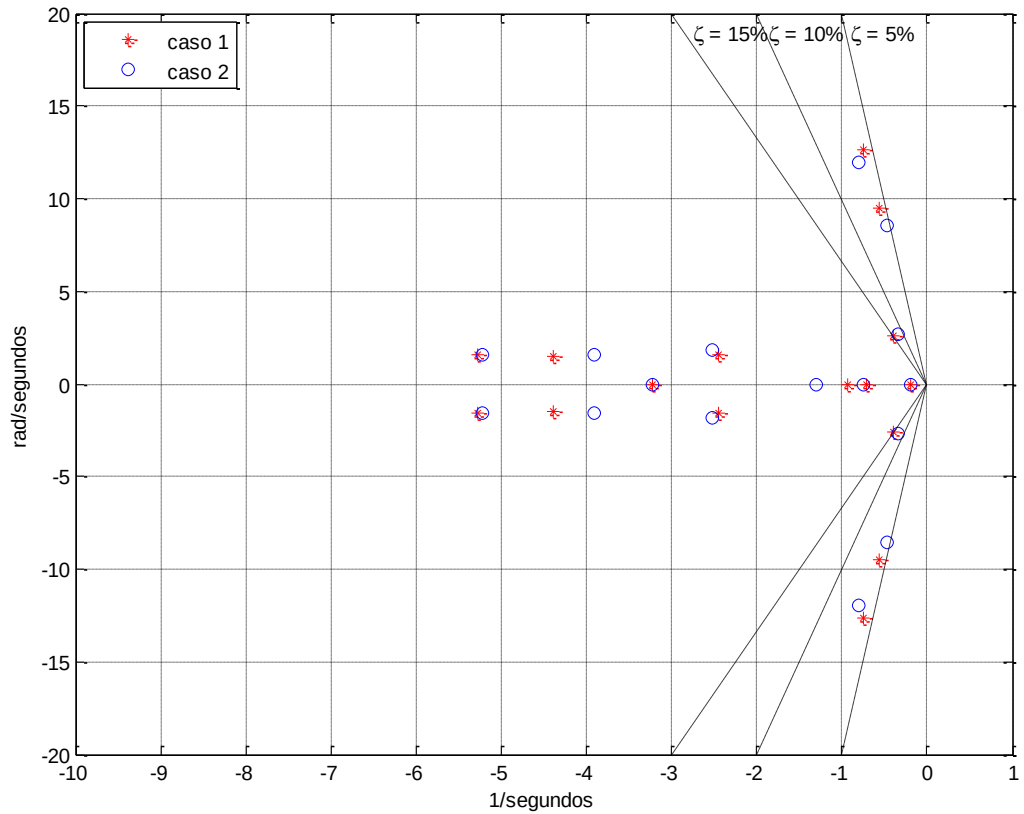


Figura 3.8: Mapa de pólos para o sistema WSCC com SVC.

➤ Caso com TCSC:

A função de transferência utilizada foi  $\frac{P_{ij}}{B_{ij}}$  para análise dos resíduos. Os resíduos de maiores módulos são mostrados na Tabela 3.10.

Tabela 3.10: Resíduos para alocação do TCSC no sistema WSCC.

| Módulo | Fase   | Ramo      |
|--------|--------|-----------|
| 1,000  | 91,61  | Linha 5-7 |
| 0,667  | -89,56 | Linha 2-7 |
| 0,414  | 93,76  | Linha 6-9 |

De acordo com os resultados dos resíduos, fornecidos pela Tabela 3.10, o TCSC será instalado na linha 5-7. A realimentação do POD do TCSC virá do gerador 2 pela análise dos fatores de participação.

Os parâmetros do POD do TCSC foram encontrados utilizando diferentes técnicas de IA. Na Tabela 3.11 têm-se os valores destes parâmetros.

Tabela 3.11: Constantes do POD do TCSC para o sistema WSCC.

|               | AG       | SA       | PSO      | ED      |
|---------------|----------|----------|----------|---------|
| $K_{tcsc}$    | 1.364,90 | 1.301,60 | 1.089,80 | 1.224,4 |
| $T_1$         | 0,3636   | 0,5437   | 0,4237   | 0,6520  |
| $T_2$         | 0,6530   | 0,9269   | 0,5980   | 1,0000  |
| $T_w$         | 2,680    | 15,539   | 4,8048   | 13,192  |
| $\zeta_{min}$ | 11,797   | 11,622   | 12,305   | 10,266  |

A técnica PSO obteve a melhor solução. A razão de amortecimento é mostrada na Tabela 3.12 com a instalação do TCSC na linha 5-7. O mapa de pólos de malha fechada é ilustrado na Figura 3.9 para o sistema WSCC com a instalação do TCSC.

Tabela 3.12: Razão de amortecimento para o Sistema WSCC com TCSC na linha 5-7.

| Autovalor            | Amortecimento (%) |
|----------------------|-------------------|
| $-1,224 \pm j12,383$ | 12,305            |

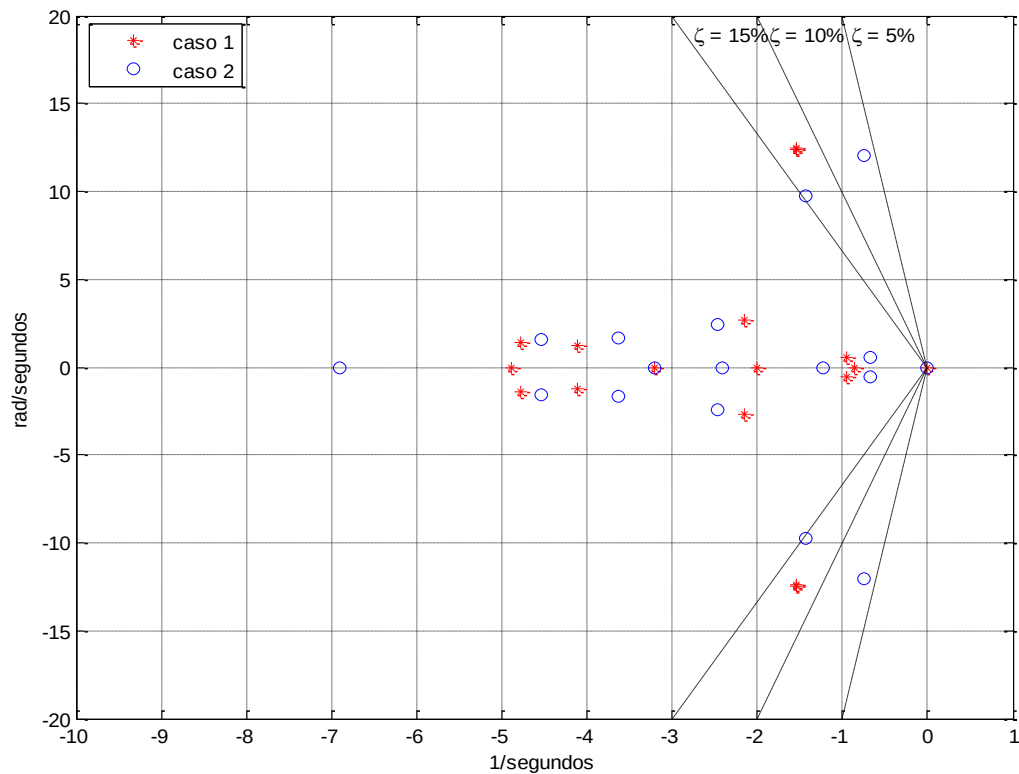


Figura 3.9: Mapa de pólos para o sistema WSCC com TCSC.

➤ Caso PSS + SVC.

Após a instalação do PSS no gerador 2 analisaram-se os resíduos para a instalação do SVC. O SVC será instalado na barra 7 em concordância com os resultados dos resíduos mostrados na Tabela 3.13.

Tabela 3.13: Resíduos para alocação do SVC no sistema WSCC com PSS.

| Módulo | Fase   | Barra   |
|--------|--------|---------|
| 1,000  | 99,995 | Barra 2 |
| 0,8246 | 99,081 | Barra 7 |
| 0,4952 | 98,325 | Barra 8 |

Os parâmetros do SVC e PSS foram determinados por diferentes técnicas de inteligência artificial. Os resultados são mostrados na Tabela 3.14. Após a sintonização do PSS e SVC tem-se o resultado do autovalor crítico na Tabela 3.15. O mapa de pólos de malha fechada é ilustrado na Figura 3.10 para o sistema WSCC com a instalação do PSS e do SVC.

Tabela 3.14: Constantes do POD do SVC e do PSS para o sistema WSCC.

|               | AG      | SA       | PSO      | ED     |
|---------------|---------|----------|----------|--------|
| <b>PSS</b>    |         |          |          |        |
| $K_{pss}$     | 42,7787 | 36,2112  | 44,2350  | 50,000 |
| $T_1$         | 1,8315  | 1,5287   | 1,2287   | 2,000  |
| $T_2$         | 0,0175  | 0,0351   | 0,0321   | 0,0441 |
| $T_w$         | 1,2908  | 13,9271  | 1,0000   | 18,484 |
| <b>SVC</b>    |         |          |          |        |
| $K_{svc}$     | 27,8415 | 139,8013 | 111,6738 | 99,294 |
| $T_1$         | 0,7814  | 0,2343   | 0,6669   | 0,9416 |
| $T_2$         | 0,1754  | 0,3207   | 0,7355   | 0,4662 |
| $T_w$         | 18,187  | 19,491   | 9,891    | 19,547 |
| $\zeta_{min}$ | 30,301  | 25,109   | 24,504   | 18,471 |

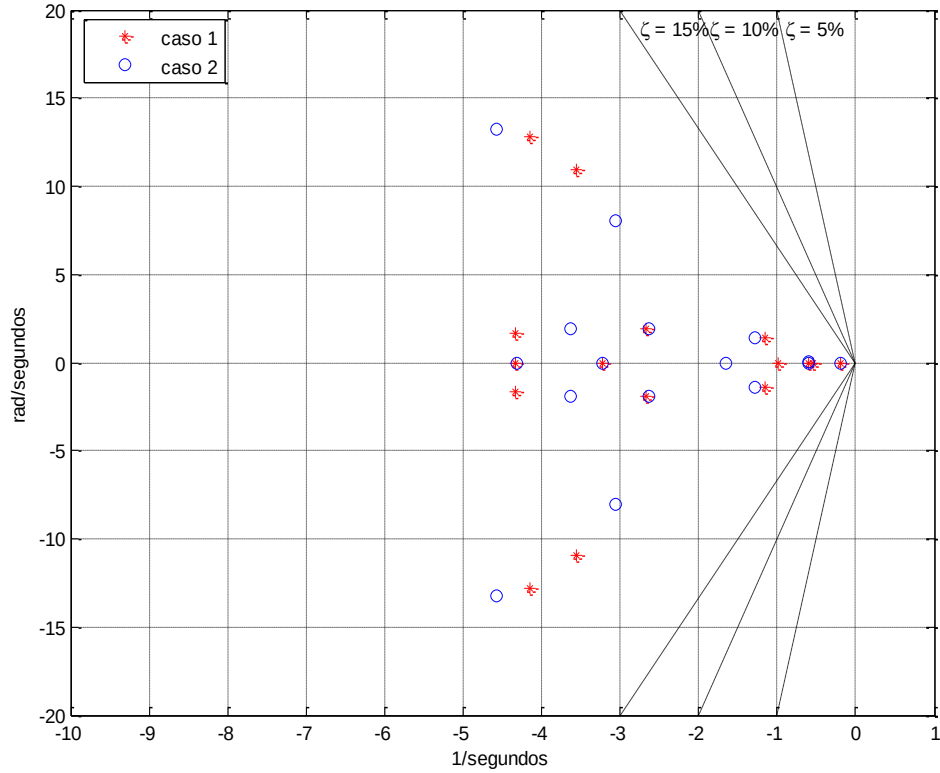


Figura 3.10: Mapa de pólos para o sistema WSCC com PSS e SVC.

Tabela 3.15: Razão de amortecimento do caso com PSS e SVC para o sistema WSCC.

| Autovalor             | Amortecimento (%) |
|-----------------------|-------------------|
| $-4,0839 \pm j12,844$ | 30,301            |

➤ Caso PSS + TCSC

Após a instalação do PSS no gerador 2 analisaram-se os resíduos para a instalação do TCSC. Analisando-se a Tabela 3.16 pode-se concluir que o TCSC será instalado no ramo 2-7.

Tabela 3.16: Resíduos para alocação do TCSC no sistema WSCC com PSS.

| Módulo | Fase    | Ramo |
|--------|---------|------|
| 1,000  | -85,956 | 2-7  |
| 0,3254 | 96,900  | 5-7  |
| 0,2556 | -88,681 | 7-8  |

Utilizando diferentes técnicas de inteligência artificial sintonizou-se o PSS e TCSC. Os resultados são mostrados na Tabela 3.17.

Tabela 3.17: Constantes do POD do TCSC e PSS para o sistema WSCC.

|               | AG     | SA     | PSO    | ED     |
|---------------|--------|--------|--------|--------|
| <b>PSS</b>    |        |        |        |        |
| $K_{pss}$     | 35,056 | 23,904 | 28,730 | 8,0578 |
| $T_1$         | 0,2780 | 0,2940 | 0,7766 | 1,3235 |
| $T_2$         | 0,4710 | 0,3659 | 0,5266 | 0,3316 |
| $T_w$         | 7,6983 | 13,738 | 5,1022 | 20,000 |
| <b>TCSC</b>   |        |        |        |        |
| $K_{tcsc}$    | 60,003 | 94,029 | 89,474 | 28,437 |
| $T_1$         | 0,6337 | 0,3836 | 0,4389 | 1,4384 |
| $T_2$         | 0,100  | 0,0922 | 0,0941 | 0,1108 |
| $T_w$         | 4,6871 | 1,2573 | 1,000  | 1,5385 |
| $\zeta_{min}$ | 28,870 | 29,533 | 32,364 | 28,396 |

Após a sintonização do PSS e TCSC tem-se a menor razão de amortecimento na Tabela 3.18. O mapa de pólos de malha fechada é ilustrado na Figura 3.11 para o sistema WSCC com a instalação do PSS e do TCSC.

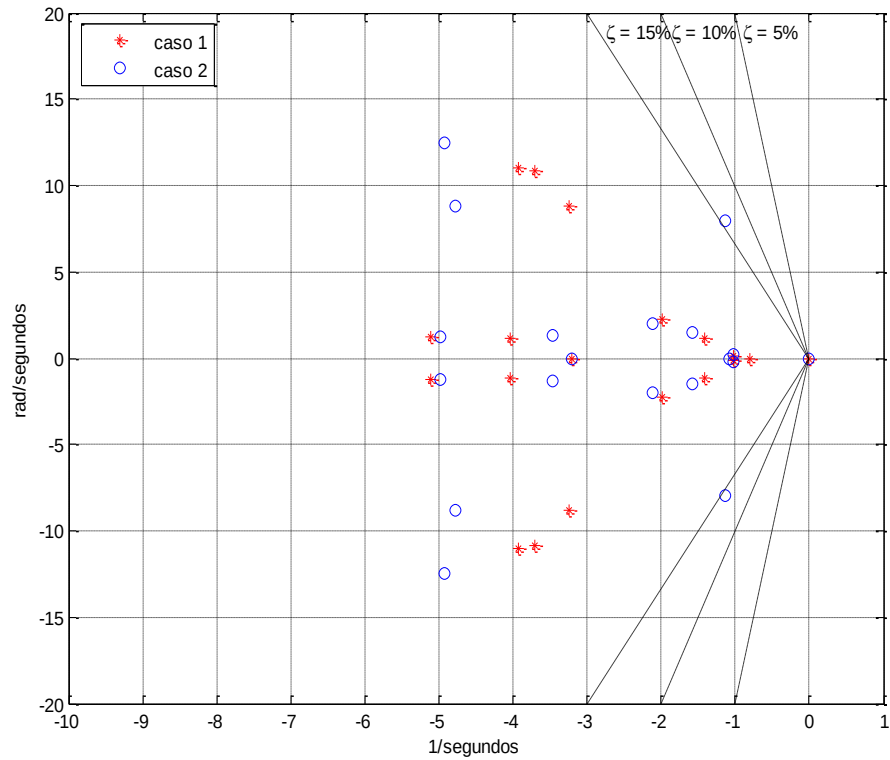


Figura 3.11: Mapa de pólos para o sistema WSCC com PSS e TCSC.

Tabela 3.18: Razão de amortecimento do caso com PSS e TCSC para o sistema WSCC.

| Autovalor             | Amortecimento (%) |
|-----------------------|-------------------|
| $-3,7134 \pm j10,857$ | 32,364            |

➤ Caso PSS + SVC + TCSC

Após a instalação do PSS no gerador 2 e do SVC na barra 7 determinaram-se os resíduos afim de indicar qual ramo deverá ser instalado o TCSC. A partir da análise dos resíduos fornecidos pela Tabela 3.19, conclui-se que o TCSC deverá ser instalado na linha 5-7.

Tabela 3.19: Resíduos para alocação do TCSC no sistema WSCC com PSS e SVC.

| Módulo | Fase    | Ramo |
|--------|---------|------|
| 1,0000 | 125,85  | 5-7  |
| 0,3254 | -7,6085 | 2-7  |
| 0,2556 | 123,62  | 3-9  |

Os parâmetros estimados com técnicas de IA são dados na Tabela 3.20. A entrada do POD do TCSC seguiu o mesmo princípio do caso PSS + SVC.

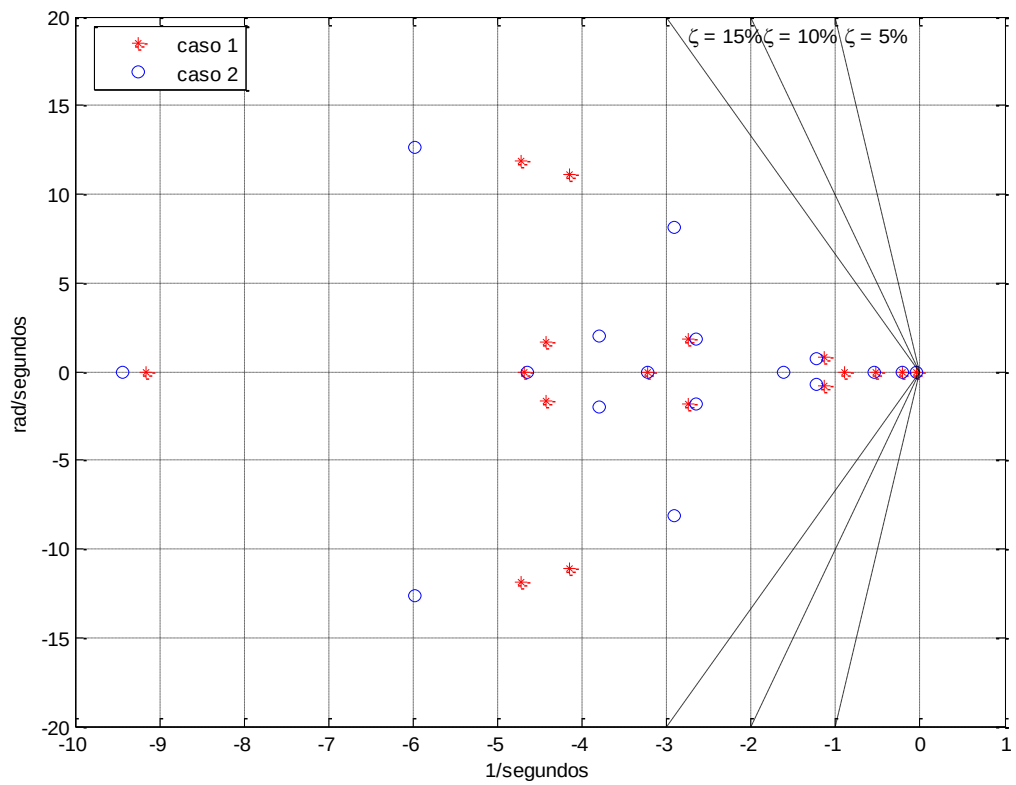


Figura 3.12: Mapa de pólos do sistema WSCC com PSS, SVC e TCSC.

Tabela 3.20: Constantes dos PSS e dos POD do TCSC e SVC para o sistema WSCC.

|               | AG      | SA     | PSO    | ED     |
|---------------|---------|--------|--------|--------|
| <b>PSS</b>    |         |        |        |        |
| $K_{pss}$     | 42,943  | 40,619 | 47,165 | 50,000 |
| $T_1$         | 1,9841  | 1,9616 | 1,6366 | 2,000  |
| $T_2$         | 0,02857 | 0,0203 | 0,0331 | 0,001  |
| $T_w$         | 1,8751  | 17,224 | 1,000  | 20,000 |
| <b>SVC</b>    |         |        |        |        |
| $K_{svc}$     | 50,40   | 42,249 | 43,978 | 28,981 |
| $T_1$         | 0,4850  | 0,5183 | 0,8699 | 0,7689 |
| $T_2$         | 0,1741  | 0,1503 | 0,2745 | 0,1578 |
| $T_w$         | 9,702   | 17,603 | 13,824 | 19,485 |
| <b>TCSC</b>   |         |        |        |        |
| $K_{tcsc}$    | 45,731  | 516,12 | 5,8257 | 10,000 |
| $T_1$         | 0,1880  | 0,0367 | 0,1989 | 1,000  |
| $T_2$         | 0,1417  | 0,8616 | 0,5246 | 0,001  |
| $T_w$         | 3,6796  | 17,044 | 1,000  | 20,000 |
| $\zeta_{min}$ | 27,403  | 28,287 | 27,846 | 35,805 |

Com a instalação do PSS, SVC e TCSC no sistema WSCC tem-se a menor razão de amortecimento na Tabela 3.21.

Tabela 3.21: Razão de amortecimento do sistema WSCC com PSS, SVC e TCSC.

| Autovalor             | Amortecimento (%) |
|-----------------------|-------------------|
| $-4,2117 \pm j10,983$ | 35,805            |

O mapa de pólos de malha fechada é ilustrado na Figura 3.12 para o sistema WSCC com a instalação do PSS, SVC e TCSC.

Em síntese, tem-se na Tabela 3.22 a comparação de todos os casos simulados para o sistema WSCC. A configuração PSS+SVC+TCSC apresentou melhores resultados para os dois casos simulados. O SVC mostrou-se eficaz no amortecimento dos modos eletromecânicos menores do que 5%.



Tabela 3.22: Tabela resumo dos amortecimentos para o sistema WSCC.

| <b>Caso</b>         | <b>Amortecimento (%)</b> |                    |
|---------------------|--------------------------|--------------------|
|                     | Regime permanente        | Saída da linha 4-6 |
| <b>Base</b>         | 1,236                    | 0,609              |
| <b>PSS</b>          | 7,561                    | 7,264              |
| <b>SVC</b>          | 5,830                    | 5,633              |
| <b>TCSC</b>         | 12,305                   | 6,206              |
| <b>PSS+SVC</b>      | 30,301                   | 32,395             |
| <b>PSS+TCSC</b>     | 32,364                   | 14,207             |
| <b>PSS+SVC+TCSC</b> | 35,805                   | 33,810             |

### 3.3.2.2. Sistema New England

O sistema teste New England é muito utilizado no estudo da estabilidade eletromecânica. Este sistema é formado por 39 barras, sendo que 10 destas são barras de geração. Os dados estáticos e dinâmicos deste sistema se encontram no Apêndice B deste trabalho e foram retirados da referência (PAI, 1989). O diagrama unifilar do sistema New England é ilustrado na Figura 3.13. Por ser um sistema de médio porte, existe uma grande quantidade de interações entre as máquinas deste sistema. Para este sistema foram simulados os seguintes casos: todos os geradores com PSS (com exceção do gerador 10, por se tratar de um gerador equivalente representando parte do sistema interconectado do Canadá - Estados Unidos), todos os geradores com PSS mais o controlador SVC, todos os geradores com PSS mais o controlador TCSC e todos os geradores com PSS mais os controladores SVC e TCSC.



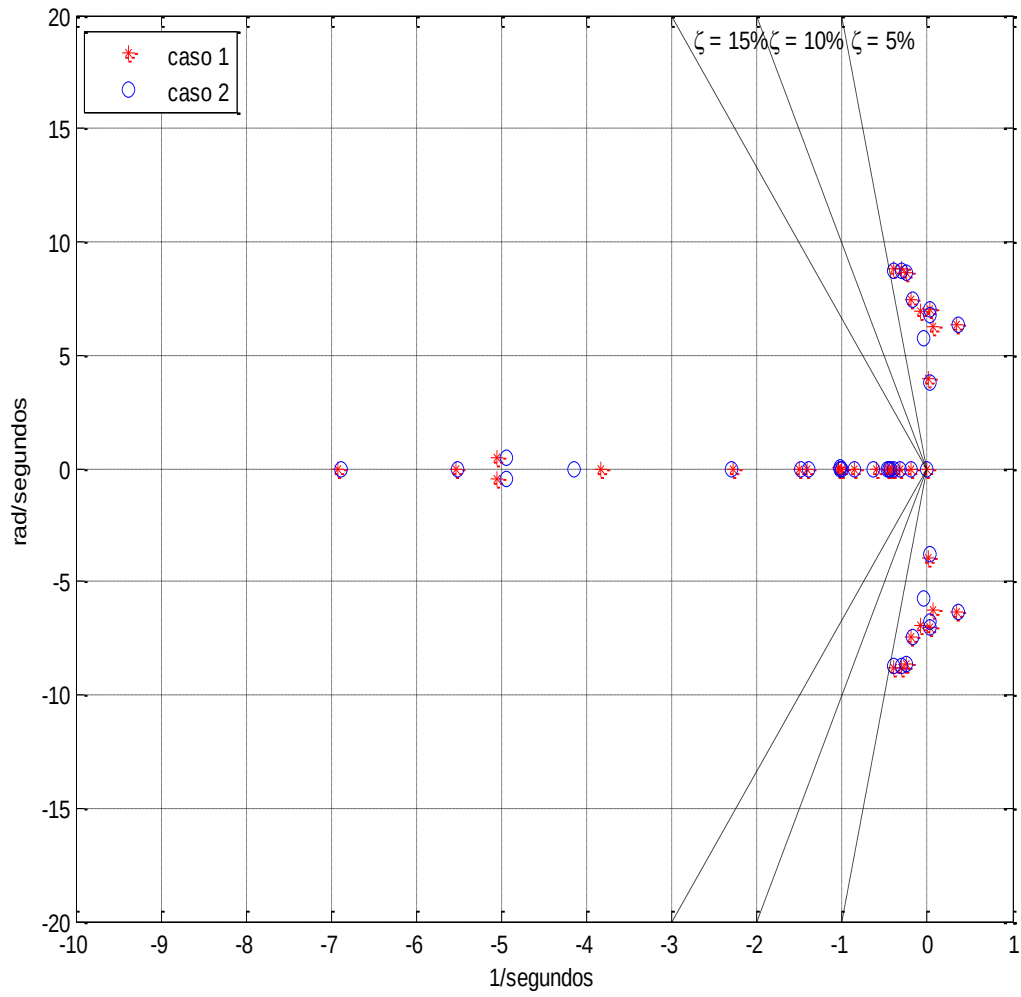


Figura 3.14: Mapa de pólos para o sistema New England no caso base.

➤ Caso com PSS:

Em todos os geradores serão instalados PSS (com exceção do gerador 10). Os parâmetros estimados com técnicas de IA são mostrados na Tabela 3.24.

Os parâmetros otimizados foram  $K_{pss}$ ,  $T_w$ ,  $T_1$  e  $T_2$ , totalizando 36 parâmetros. Observando os resultados na Tabela 3.24, conclui-se que a técnica que obteve melhor resultado foi PSO (destacado em negrito). Na Tabela 3.25 encontra-se o autovalor com menor razão de amortecimento, quando os PSS são inseridos no sistema New England, e sua correspondente razão de amortecimento.

Tabela 3.24: Constantes dos PSS do sistema New England com diferentes técnicas de IA.

| Algoritmos genéticos                      |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| PSS<br>Constante                          | PSS 30  | PSS 31  | PSS 32  | PSS 33  | PSS 34  | PSS 35  | PSS 36  | PSS 37  | PSS 38  |
| $K_{pss}$                                 | 29,6244 | 20,1093 | 21,1250 | 11,5754 | 16,4979 | 31,1145 | 27,4113 | 24,6820 | 20,5234 |
| $T_w$                                     | 3,7172  | 8,4837  | 8,3539  | 3,2500  | 4,1093  | 1,3109  | 3,2500  | 1,5000  | 1,0000  |
| $T_1$                                     | 0,1000  | 1,9931  | 1,1000  | 1,7685  | 1,7125  | 1,3630  | 1,6099  | 1,0566  | 0,7498  |
| $T_2$                                     | 0,600   | 0,1000  | 0,0368  | 0,0698  | 0,1175  | 0,0994  | 0,0340  | 0,8869  | 0,3924  |
| $\zeta_{min} (\%) = 6,1066$               |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Simulated Annealing                       |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| PSS<br>Constante                          | PSS 30  | PSS 31  | PSS 32  | PSS 33  | PSS 34  | PSS 35  | PSS 36  | PSS 37  | PSS 38  |
| $K_{pss}$                                 | 22,1446 | 21,5765 | 22,8796 | 28,4425 | 14,4005 | 7,2506  | 25,8455 | 32,0937 | 28,8412 |
| $T_w$                                     | 2,1881  | 5,1195  | 16,3687 | 1,0385  | 14,3224 | 7,3148  | 4,1055  | 5,2109  | 2,4965  |
| $T_1$                                     | 1,9112  | 1,1786  | 1,4524  | 1,1624  | 1,6769  | 1,6808  | 0,7889  | 1,1578  | 1,1344  |
| $T_2$                                     | 0,0068  | 0,0920  | 0,2653  | 0,0844  | 0,4775  | 0,9748  | 0,5929  | 0,1046  | 0,3769  |
| $\zeta_{min} (\%) = 5,1804$               |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Otimização por enxame de partículas - PSO |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| PSS<br>Constante                          | PSS 30  | PSS 31  | PSS 32  | PSS 33  | PSS 34  | PSS 35  | PSS 36  | PSS 37  | PSS 38  |
| $K_{pss}$                                 | 37,2679 | 43,0502 | 9,7318  | 23,6294 | 40,4093 | 42,0771 | 8,1804  | 12,8407 | 39,6940 |
| $T_w$                                     | 1,0000  | 1,0000  | 1,0000  | 1,0000  | 1,0000  | 1,0000  | 1,0000  | 1,0000  | 1,0000  |
| $T_1$                                     | 1,7524  | 1,7445  | 0,7435  | 1,2760  | 0,9403  | 1,1712  | 1,4275  | 1,9733  | 0,6075  |
| $T_2$                                     | 0,0868  | 0,1083  | 0,7883  | 0,0775  | 0,1956  | 0,0346  | 0,4015  | 0,0611  | 0,0498  |
| $\zeta_{min} (\%) = 8,2708$               |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Evolução diferencial                      |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| PSS<br>Constante                          | PSS 30  | PSS 31  | PSS 32  | PSS 33  | PSS 34  | PSS 35  | PSS 36  | PSS 37  | PSS 38  |
| $K_{pss}$                                 | 32,8908 | 38,1988 | 21,3188 | 21,4532 | 38,2691 | 50,0000 | 18,3957 | 15,6050 | 19,0181 |
| $T_w$                                     | 11,4643 | 8,0216  | 3,1789  | 3,9444  | 18,7644 | 20,0000 | 3,0953  | 4,7682  | 3,2813  |
| $T_1$                                     | 1,0542  | 1,6374  | 1,6306  | 0,9837  | 0,4729  | 1,3701  | 0,7638  | 0,7016  | 1,5903  |
| $T_2$                                     | 1,0000  | 0,2491  | 0,0858  | 0,0652  | 0,0157  | 0,0389  | 0,8000  | 0,0378  | 0,2756  |
| $\zeta_{min} (\%) = 5,9686$               |         |         |         |         |         |         |         |         |         |

Tabela 3.25: Razão de amortecimento crítica para o caso PSS no sistema New England.

| Autovalor             | Amortecimento (%) |
|-----------------------|-------------------|
| $-0,5945 \pm j7,1630$ | 8,2709            |

O mapa de pólos de malha fechada é ilustrado na Figura 3.15 para o sistema New England com PSS nos casos 1 e 2. Os PSS melhoraram o amortecimento crítico do sistema passando de -5,31% para 8,27%.

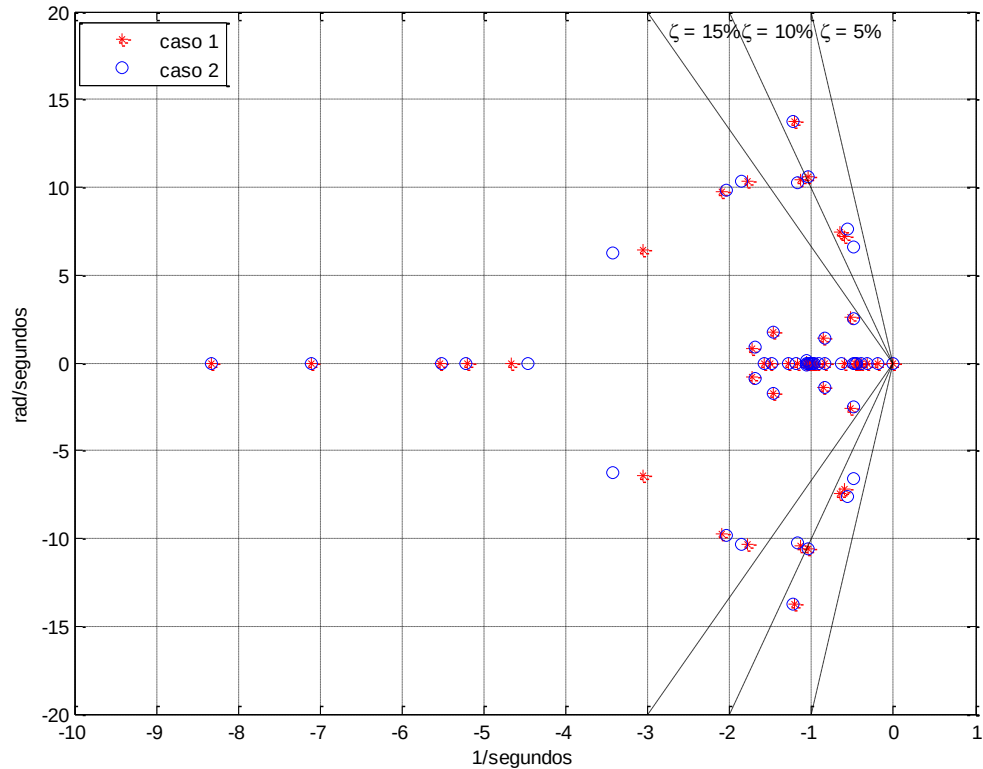


Figura 3.15: Mapa de pólos para o sistema New England com PSS.

➤ Caso com SVC e PSS.

Para a alocação do SVC no sistema New England utilizou-se a técnica dos resíduos, a função de transferência utilizada foi  $\frac{V_{bus}}{B_{SHU}_k}$  e a Tabela 3.26 mostra o valor do correspondente resíduo. Foi instalado um (01) SVC na barra 2. A entrada do POD é a velocidade da máquina 30. Os valores dos parâmetros dos PSS e do POD/SVC, após a sintonização utilizando diferentes técnicas de IA, são mostrados na Tabela 3.27.

Tabela 3.26: Resíduo para alocação do SVC no sistema New England.

| Módulo | Fase   | Barra- SVC/ Gerador-POD |
|--------|--------|-------------------------|
| 0,9458 | 37,956 | 2/ 30                   |

Tabela 3.27: Constantes dos PSS e SVC do sistema New England com 4 técnicas de IA.

| Algoritmos genéticos                      |        |        |        |        |        |        |        |        |        |          |
|-------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| PSS /SVC                                  | PSS 30 | PSS 31 | PSS 32 | PSS 33 | PSS 34 | PSS 35 | PSS 36 | PSS 37 | PSS 38 | SVC<br>2 |
| Constante                                 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |          |
| $K_{pss/svc}$                             | 7,5604 | 35,403 | 24,745 | 19,320 | 41,366 | 46,404 | 19,001 | 30,771 | 17,363 | 62,384   |
| $T_w$                                     | 4,3454 | 5,3366 | 16,248 | 16,222 | 6,9053 | 14,867 | 18,768 | 1,1310 | 3,6448 | 15,583   |
| $T_1$                                     | 1,0363 | 1,6569 | 0,8318 | 0,7184 | 0,6048 | 0,8423 | 0,4328 | 1,9911 | 0,7647 | 0,4535   |
| $T_2$                                     | 0,0959 | 0,0053 | 0,0247 | 0,0119 | 0,0439 | 0,0835 | 0,0079 | 0,0716 | 0,0681 | 0,4120   |
| $\zeta_{min}(\%) = 14,137$                |        |        |        |        |        |        |        |        |        |          |
| Simulated Annealing                       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |          |
| PSS /SVC                                  | PSS 30 | PSS 31 | PSS 32 | PSS 33 | PSS 34 | PSS 35 | PSS 36 | PSS 37 | PSS 38 | SVC<br>2 |
| Constante                                 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |          |
| $K_{pss/svc}$                             | 5,5511 | 13,588 | 11,174 | 30,992 | 21,263 | 24,974 | 44,518 | 39,604 | 12,655 | 66,648   |
| $T_w$                                     | 4,2991 | 1,1171 | 4,4168 | 1,8773 | 19,738 | 1,0713 | 7,0804 | 19,443 | 18,526 | 18,960   |
| $T_1$                                     | 1,9972 | 1,7606 | 0,9024 | 1,9481 | 1,2073 | 1,6179 | 1,8345 | 1,3352 | 0,6761 | 0,1242   |
| $T_2$                                     | 0,9891 | 0,0242 | 0,0344 | 0,0039 | 0,0104 | 0,0756 | 0,0025 | 0,0184 | 0,1509 | 0,0152   |
| $\zeta_{min}(\%) = 12,604$                |        |        |        |        |        |        |        |        |        |          |
| Otimização por enxame de partículas - PSO |        |        |        |        |        |        |        |        |        |          |
| PSS /SVC                                  | PSS 30 | PSS 31 | PSS 32 | PSS 33 | PSS 34 | PSS 35 | PSS 36 | PSS 37 | PSS 38 | SVC<br>2 |
| Constante                                 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |          |
| $K_{pss/svc}$                             | 41,432 | 27,624 | 1,0000 | 39,579 | 14,574 | 21,500 | 5,2484 | 39,276 | 14,186 | 35,616   |
| $T_w$                                     | 1,0000 | 1,000  | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 9,523    |
| $T_1$                                     | 1,9234 | 0,5859 | 1,0662 | 0,6316 | 0,6677 | 1,8230 | 1,7028 | 1,2790 | 0,9541 | 0,1702   |
| $T_2$                                     | 0,0039 | 0,0039 | 0,7985 | 0,9095 | 0,1277 | 0,0440 | 0,0357 | 0,0630 | 0,1545 | 0,6706   |
| $\zeta_{min}(\%) = 13,400$                |        |        |        |        |        |        |        |        |        |          |
| Evolução diferencial                      |        |        |        |        |        |        |        |        |        |          |
| PSS /SVC                                  | PSS 30 | PSS 31 | PSS 32 | PSS 33 | PSS 34 | PSS 35 | PSS 36 | PSS 37 | PSS 38 | SVC<br>2 |
| Constante                                 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |          |
| $K_{pss}$                                 | 23,696 | 19,393 | 15,015 | 25,575 | 24,148 | 41,925 | 20,008 | 30,940 | 8,9053 | 139,03   |
| $T_w$                                     | 16,917 | 4,6014 | 5,0591 | 7,7641 | 20,000 | 9,1125 | 7,3709 | 10,527 | 12,189 | 14,251   |
| $T_1$                                     | 0,8655 | 2,0000 | 1,4966 | 1,9668 | 1,1584 | 0,9228 | 0,9814 | 0,7851 | 1,4785 | 0,6224   |
| $T_2$                                     | 0,1454 | 0,0436 | 0,0404 | 0,0036 | 0,0200 | 0,0418 | 0,0547 | 0,0100 | 0,1327 | 0,5602   |
| $\zeta_{min}(\%) = 14,220$                |        |        |        |        |        |        |        |        |        |          |

Observando os resultados da Tabela 3.27, conclui-se que a técnica que obteve melhor resultado foi evolução diferencial. A Tabela 3.28 mostra o autovalor crítico, quando os PSS e o SVC são inseridos no sistema New England, e sua correspondente razão de amortecimento.

Tabela 3.28: Razão de amortecimento crítica do sistema New England com PSS e SVC.

| Autovalor             | Amortecimento (%) |
|-----------------------|-------------------|
| $-1,8078 \pm j12,556$ | 14,251            |

O mapa de pólos é ilustrado na Figura 3.16 para o sistema New England com PSS e SVC nos casos 1 e 2. Neste caso, o amortecimento do sistema atingiu quase 15%.

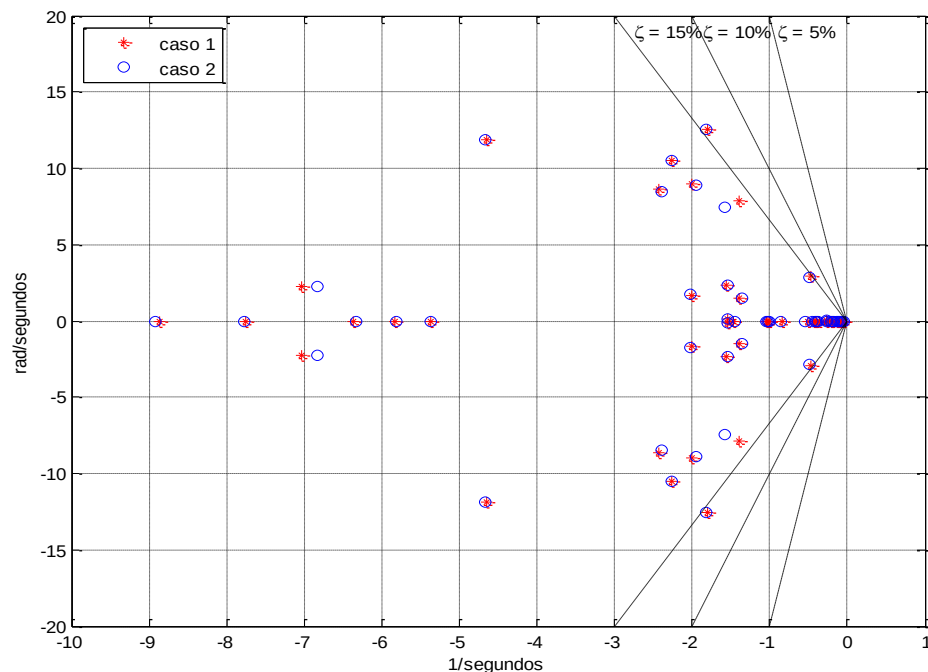


Figura 3.16: Mapa de pólos do sistema New England com SVC e PSS.

#### ➤ Caso com TCSC e PSS

Para a alocação do TCSC no sistema New England utilizou-se a técnica dos resíduos e a função de transferência utilizada foi  $\frac{P_{ij}}{B_{ij}}$ , a Tabela 3.29 mostra o valor do correspondente resíduo.

Tabela 3.29: Resíduo para alocação do TCSC no sistema New England.

| Módulo | Fase    | TCSC/POD |
|--------|---------|----------|
| 1,0    | -90,626 | 10-32/32 |

De acordo com Tabela 3.29 será instalado 1 TCSC no ramo 10-32. A entrada do POD será a velocidade da máquina 30.

Tabela 3.30: Constantes dos PSS e TCSC do sistema New England com 4 técnicas de IA.

| Algoritmos genéticos                       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |            |
|--------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|
| $\frac{\text{PSS/TCSC}}{\text{Constante}}$ | PSS 30 | PSS 31 | PSS 32 | PSS 33 | PSS 34 | PSS 35 | PSS 36 | PSS 37 | PSS 38 | TCSC 10-32 |
| $K_{pss/tcsc}$                             | 45,795 | 41,660 | 4,2869 | 14,731 | 14,884 | 36,202 | 12,754 | 23,182 | 16,527 | 277,90     |
| $T_w$                                      | 11,944 | 15,744 | 19,844 | 4,4585 | 19,260 | 12,275 | 7,4777 | 18,664 | 1,4908 | 13,623     |
| $T_1$                                      | 1,8673 | 1,8577 | 0,7828 | 1,2102 | 1,3271 | 1,9947 | 1,6852 | 0,8062 | 0,9333 | 0,5780     |
| $T_2$                                      | 0,0351 | 0,0148 | 0,6416 | 0,0446 | 0,0906 | 0,0408 | 0,0484 | 0,0336 | 0,1282 | 0,6838     |
| $\zeta_{min}(\%) = 16,086$                 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |            |
| Simulated Annealing                        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |            |
| $\frac{\text{PSS/TCSC}}{\text{Constante}}$ | PSS 30 | PSS 31 | PSS 32 | PSS 33 | PSS 34 | PSS 35 | PSS 36 | PSS 37 | PSS 38 | TCSC 10-32 |
| $K_{pss/tcsc}$                             | 49,827 | 48,909 | 30,279 | 49,875 | 34,007 | 24,781 | 32,801 | 25,157 | 36,606 | 586,69     |
| $T_w$                                      | 1,8707 | 11,208 | 11,730 | 8,9739 | 4,5918 | 7,5627 | 9,3081 | 11,490 | 14,507 | 4,7178     |
| $T_1$                                      | 1,5492 | 1,9901 | 0,7992 | 1,6527 | 0,9470 | 1,8298 | 0,4139 | 0,9403 | 0,2233 | 0,4742     |
| $T_2$                                      | 0,0458 | 0,0185 | 0,5277 | 0,0266 | 0,0390 | 0,1433 | 0,0651 | 0,0537 | 0,0136 | 0,2800     |
| $\zeta_{min}(\%) = 14,673$                 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |            |
| Otimização por enxame de partículas - PSO  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |            |
| $\frac{\text{PSS/TCSC}}{\text{Constante}}$ | PSS 30 | PSS 31 | PSS 32 | PSS 33 | PSS 34 | PSS 35 | PSS 36 | PSS 37 | PSS 38 | TCSC 10-32 |
| $K_{pss/tcsc}$                             | 21,198 | 37,944 | 8,9321 | 26,124 | 40,503 | 27,284 | 22,548 | 27,685 | 19,730 | 1,0000     |
| $T_w$                                      | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000     |
| $T_1$                                      | 1,9565 | 0,8545 | 0,2728 | 1,8110 | 0,7011 | 1,2711 | 1,0121 | 0,6370 | 0,5329 | 0,1838     |
| $T_2$                                      | 0,0055 | 0,0509 | 0,6873 | 0,0250 | 0,0368 | 0,1508 | 0,0131 | 0,0225 | 0,1549 | 0,1880     |
| $\zeta_{min}(\%) = 17,080$                 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |            |
| Evolução diferencial                       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |            |
| $\frac{\text{PSS/TCSC}}{\text{Constante}}$ | PSS 30 | PSS 31 | PSS 32 | PSS 33 | PSS 34 | PSS 35 | PSS 36 | PSS 37 | PSS 38 | TCSC 10-32 |
| $K_{pss/tcsc}$                             | 50,000 | 50,000 | 6,7129 | 50,000 | 17,239 | 18,454 | 1,000  | 50,000 | 38,906 | 1.400,0    |
| $T_w$                                      | 11,964 | 7,1903 | 1,000  | 1,000  | 7,3904 | 7,7291 | 5,6893 | 1,000  | 20,000 | 1,000      |
| $T_1$                                      | 2,000  | 2,000  | 2,000  | 2,000  | 1,0869 | 2,000  | 1,9648 | 2,000  | 0,4173 | 0,4172     |
| $T_2$                                      | 0,001  | 0,001  | 1,000  | 0,001  | 0,001  | 0,001  | 0,001  | 0,001  | 0,001  | 0,001      |
| $\zeta_{min}(\%) = 15,807$                 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |            |



Os parâmetros dos PSS e do POD/TCSC, após a sintonização com técnicas de IA, são mostrados na Tabela 3.30. Observando esta tabela, conclui-se que a técnica que obteve melhor resultado foi PSO. Na Tabela 3.31 tem-se o autovalor crítico, quando os PSS e o TCSC são inseridos no sistema, e sua correspondente razão de amortecimento. A configuração PSS+TCSC foi superior ao caso PSS+SVC em termos de amortecimento.

Tabela 3.31: Razão de amortecimento crítica do sistema New England com PSS e TCSC.

| Autovalor             | Amortecimento (%) |
|-----------------------|-------------------|
| $-1,3653 \pm j7,8761$ | 17,080            |

O mapa de pólos de malha fechada é ilustrado na Figura 3.17 para o sistema New England com a instalação dos 9 PSS e do TCSC.

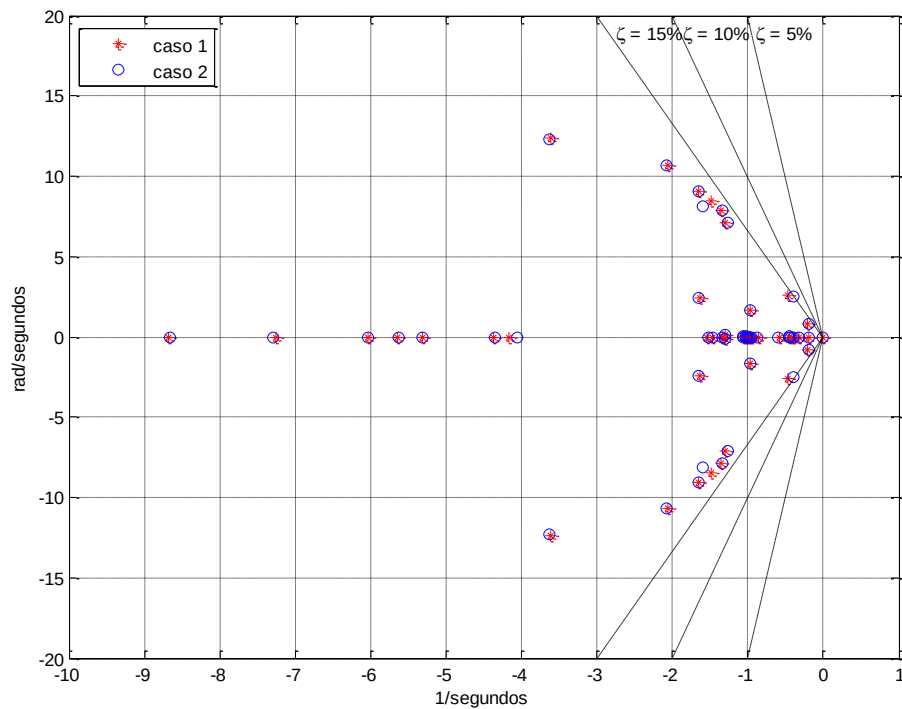


Figura 3.17: Mapa de pólos do sistema New England com PSS e TCSC.

#### ➤ Caso com TCSC, SVC e PSS

Para a alocação do SVC, considerou-se o caso com TCSC e PSS. Para a alocação do SVC no sistema New England utilizou-se a técnica dos resíduos e a função de transferência utilizada foi  $\frac{V_{bus}}{BSHU_k}$ . Na Tabela 3.32 encontra-se o valor do correspondente resíduo.

Tabela 3.32: Resíduo para alocação do SVC no sistema New England com PSS e TCSC.

| Módulo | Fase    | Barra SVC / Gerador-POD |
|--------|---------|-------------------------|
| 0,8038 | -83,602 | 20/ 33                  |

De acordo com Tabela 3.32 será instalado 1 SVC na barra 20. A entrada do POD será a velocidade da máquina 33.

Tabela 3.33: Constantes dos PSS e FACTS do sistema New England com 4 técnicas de IA.

| Algoritmos genéticos                      |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| PSS/ FACTS                                | PSS    | PSS    | PSS    | PSS    | PSS    | PSS    | PSS    | PSS    | PSS    | TCSC   | SVC    |
| Constante                                 | 30     | 31     | 32     | 33     | 34     | 35     | 36     | 37     | 38     | 2-30   | 20     |
| $K_{pss}/Facts$                           | 49,768 | 45,830 | 43,138 | 45,450 | 4,8758 | 33,465 | 11,969 | 36,929 | 21,182 | 586,55 | 102,38 |
| $T_w$                                     | 1,5255 | 18,169 | 19,733 | 10,203 | 19,900 | 19,788 | 11,035 | 3,1594 | 18,106 | 3,7187 | 19,575 |
| $T_1$                                     | 1,7937 | 0,9445 | 0,8284 | 1,5560 | 0,3772 | 1,6804 | 0,9594 | 0,4853 | 0,9004 | 0,0488 | 0,2491 |
| $T_2$                                     | 0,0531 | 0,0388 | 0,6570 | 0,0781 | 0,0687 | 0,0903 | 0,0816 | 0,0184 | 0,0727 | 0,2459 | 0,2156 |
| $\zeta_{min} (\%) = 18,172$               |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Simulated Annealing                       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| PSS/ FACTS                                | PSS    | PSS    | PSS    | PSS    | PSS    | PSS    | PSS    | PSS    | PSS    | TCSC   | SVC    |
| Constante                                 | 30     | 31     | 32     | 33     | 34     | 35     | 36     | 37     | 38     | 10-32  | 20     |
| $K_{pss}/Facts$                           | 40,790 | 45,994 | 49,000 | 29,808 | 38,991 | 30,159 | 49,861 | 40,707 | 23,270 | 1396,4 | 290,74 |
| $T_w$                                     | 17,897 | 13,799 | 19,119 | 14,600 | 12,014 | 13,502 | 18,779 | 17,342 | 13,171 | 12,591 | 17,281 |
| $T_1$                                     | 1,9910 | 0,7922 | 1,6526 | 0,5033 | 1,2423 | 1,6510 | 0,3259 | 0,5880 | 0,3473 | 0,8784 | 0,1852 |
| $T_2$                                     | 0,0010 | 0,0243 | 0,9987 | 0,2249 | 0,0097 | 0,0821 | 0,0240 | 0,0065 | 0,1054 | 0,8343 | 0,8850 |
| $\zeta_{min} (\%) = 18,004$               |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Otimização por enxame de partículas - PSO |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| PSS/ FACTS                                | PSS    | PSS    | PSS    | PSS    | PSS    | PSS    | PSS    | PSS    | PSS    | TCSC   | SVC    |
| Constante                                 | 30     | 31     | 32     | 33     | 34     | 35     | 36     | 37     | 38     | 2-30   | 20     |
| $K_{pss}/Facts$                           | 49,850 | 34,694 | 45,737 | 14,585 | 1,000  | 5,4882 | 5,2461 | 40,701 | 7,7010 | 1146,5 | 137,59 |
| $T_w$                                     | 1,3213 | 3,2008 | 9,3148 | 1,3741 | 13,541 | 1,5069 | 2,3147 | 1,000  | 4,1502 | 1,5115 | 5,671  |
| $T_1$                                     | 1,9872 | 1,0455 | 0,4661 | 0,2676 | 0,1720 | 1,7812 | 1,1353 | 0,6313 | 0,5494 | 0,5702 | 0,1561 |
| $T_2$                                     | 0,0036 | 0,0186 | 0,9892 | 0,0610 | 0,1274 | 0,0061 | 0,0220 | 0,0227 | 0,0720 | 0,3479 | 0,1660 |
| $\zeta_{min} (\%) = 18,819$               |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Evolução diferencial                      |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| PSS/ FACTS                                | PSS    | PSS    | PSS    | PSS    | PSS    | PSS    | PSS    | PSS    | PSS    | TCSC   | SVC    |
| Constante                                 | 30     | 31     | 32     | 33     | 34     | 35     | 36     | 37     | 38     | 2-30   | 20     |
| $K_{pss}/Facts$                           | 48,314 | 50,000 | 1,000  | 50,000 | 50,000 | 50,000 | 9,8298 | 50,000 | 50,000 | 1400,0 | 1,000  |
| $T_w$                                     | 1,000  | 1,000  | 20,000 | 20,000 | 1,0000 | 1,0000 | 20,000 | 1,000  | 20,000 | 1,000  | 1,000  |
| $T_1$                                     | 2,000  | 2,000  | 0,010  | 2,000  | 2,000  | 2,000  | 1,0117 | 2,0000 | 2,000  | 0,010  | 0,0748 |
| $T_2$                                     | 0,001  | 0,001  | 1,000  | 0,0010 | 0,0010 | 0,1491 | 0,0010 | 0,0010 | 0,0010 | 0,7541 | 0,0010 |
| $\zeta_{min} (\%) = 20,284$               |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |

Os valores das constantes dos PSS, do POD/TCSC e do POD do SVC, após a sintonização utilizando diferentes técnicas de IA, são mostrados na Tabela 3.33. Observando a Tabela 3.33, conclui-se que a técnica que obteve melhor resultado foi evolução diferencial. Na Tabela 3.34 tem-se o autovalor crítico, quando os PSS e os FACTS TCSC e SVC são inseridos no sistema New England, e sua correspondente razão de amortecimento.

Tabela 3.34: Razão de amortecimento crítica do sistema New England com PSS, SVC e TCSC.

| Autovalor             | Amortecimento (%) |
|-----------------------|-------------------|
| $-2,1660 \pm j10,456$ | 20,284            |

O mapa de pólos de malha fechada é ilustrado na Figura 3.18 para o sistema New England com a instalação dos 9 PSS, 1 SVC e 1 TCSC.

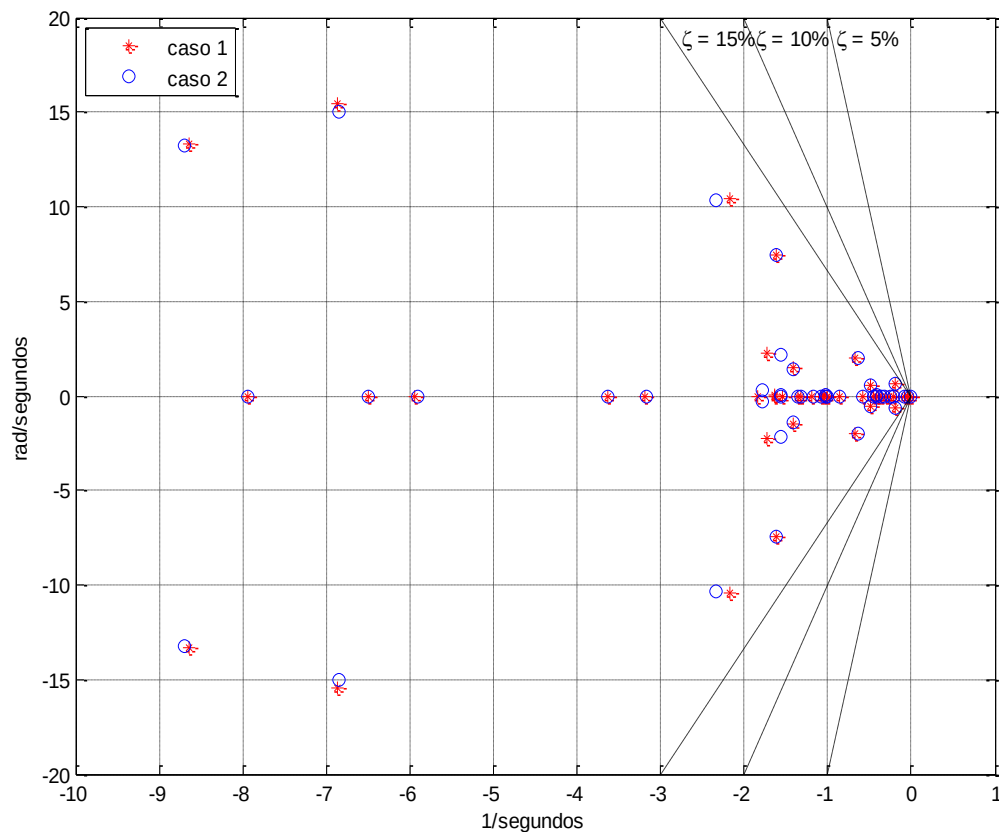


Figura 3.18: Mapa de pólos do sistema New England com PSS, SVC e TCSC.

Após a instalação dos controladores no sistema New England houve um aumento da razão de amortecimento. O sistema no caso base possuía um amortecimento de -5,3%, depois da sintonização e coordenação dos controladores o amortecimento alcançou 20,284%.

Na Tabela 3.35, é mostrada de forma sucinta, a mínima razão de amortecimento para os casos considerados no sistema New England. Nota-se que os PSS e controladores FACTS melhoram o amortecimento do sistema. No caso base existem modos com parte real positiva, tornando o sistema instável. Com a instalação dos PSS e controladores FACTS houve uma significativa.

Tabela 3.35: Tabela resumo para os casos do sistema New England.

| Caso                | Razão de amortecimento |                      |
|---------------------|------------------------|----------------------|
|                     | Regime permanente      | Saída da linha 14-15 |
| <b>Base</b>         | -5,315                 | -5,720               |
| <b>PSS</b>          | 8,2709                 | 7,285                |
| <b>PSS+SVC</b>      | 14,220                 | 14,383               |
| <b>PSS+TCSC</b>     | 17,080                 | 15,696               |
| <b>PSS+SVC+TCSC</b> | 20,284                 | 21,205               |

### 3.3.2.3. Sistema brasileiro Sul-Sudeste

A configuração do SIN considerado neste trabalho corresponde ao sistema Sul-Sudeste brasileiro. Este sistema foi considerado em alguns estudos de operação nos anos de 1980, contendo 616 barras, 995 ramos e 50 hidrogeradores (MARTINS e LIMA, 1990). Os dados dos geradores e dos AVR se encontram no Apêndice B.

Consideraram-se 3 estudos de caso: caso base, caso com PSS e caso com PSS+SVC+TCSC. Foram simuladas duas diferentes topologias da rede: caso 1 equivale ao caso base e caso 2 equivale à saída da linha 1276 - 1285.

#### ➤ Caso Base

O caso base corresponde à condição de carga pesada com um grande intercâmbio de potência fluindo da região Sul para região Sudeste. Todos os geradores foram representados pelo modelo 4 do programa PacDyn e os reguladores de tensão representados pelo modelo de primeira ordem, que corresponde ao sistema de excitação estático.

Na Tabela 3.36 mostra-se o autovalor crítico para o caso base e o valor da sua razão de amortecimento.

Tabela 3.36: Razão de amortecimento crítica para o caso base no sistema Sul-Sudeste

| Autovalor             | Amortecimento (%) |
|-----------------------|-------------------|
| $-0,1012 \pm j5,2861$ | -1,9142           |

O mapa de pólos de malha aberta é ilustrado na Figura 3.19 para o sistema brasileiro Sul-Sudeste nos casos 1 e 2. Há vários modos eletromecânicos fora da região estável.

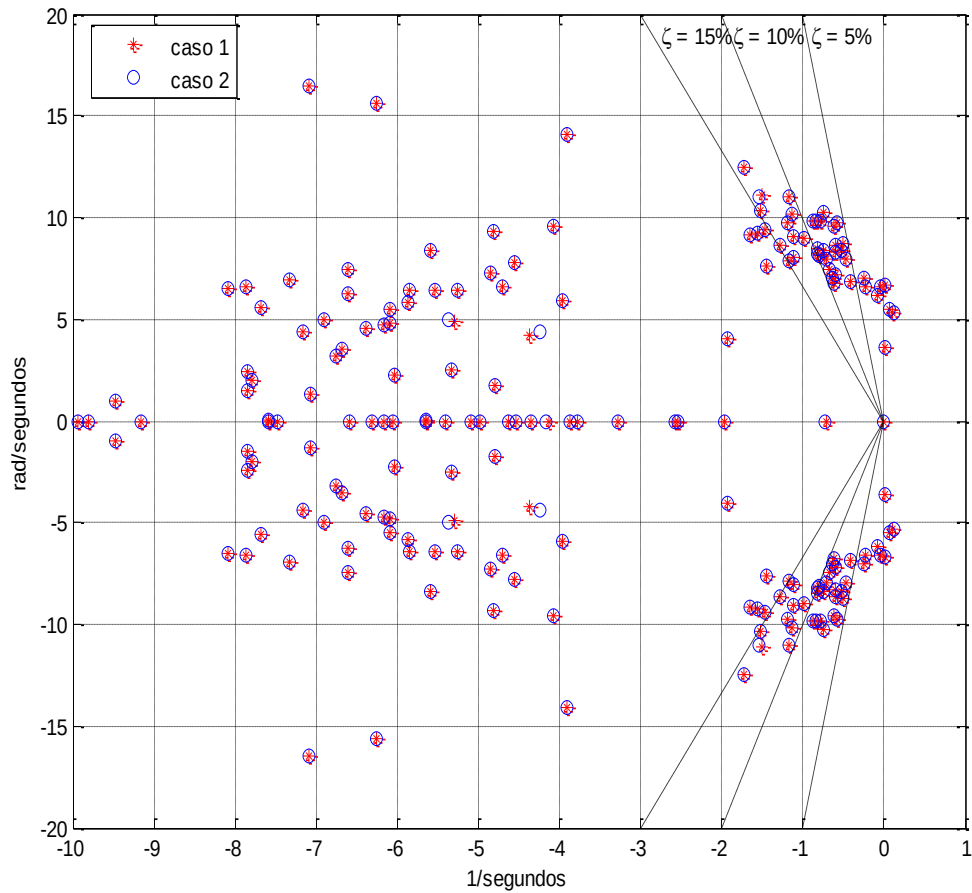


Figura 3.19: Mapa de pólos para o sistema brasileiro.

#### ➤ Caso PSS

Os PSS foram instalados baseados nos resíduos. Neste sistema serão instalados 19 PSS nos seguintes geradores: 18, 20, 22, 26, 30, 31, 300, 303, 401, 507, 512, 514, 518, 519, 753, 806, 917, 1107 e 1162. As constantes a serem otimizadas serão  $T_1$ ,  $T_2$  e  $K_{pss}$ . Devido ao sistema ser de maior porte que o WSCC e New England e pelo fato da constante  $T_w$  não influenciar muito no amortecimento do sistema, considerou-se  $T_w = 3$ .

Tabela 3.37: Constantes dos PSS para o sistema brasileiro.

|      | Constantes           |            |                   |                            |            |                   |
|------|----------------------|------------|-------------------|----------------------------|------------|-------------------|
| PSS  | Algoritmos Genéticos |            |                   | <i>Simulated Annealing</i> |            |                   |
|      | $K_{pss}$            | $T_1$      | $T_2$             | $K_{pss}$                  | $T_1$      | $T_2$             |
| 18   | 4,0000               | 1,0000     | 0,0100            | 3,9278                     | 0,9662     | 0,0248            |
| 20   | 4,5000               | 1,0000     | 0,0100            | 4,1271                     | 0,9851     | 0,0180            |
| 22   | 4,0000               | 1,0000     | 0,0100            | 4,1020                     | 1,0356     | 0,0043            |
| 26   | 4,0000               | 1,0000     | 0,0100            | 3,8732                     | 0,9359     | 0,0020            |
| 30   | 4,5000               | 1,0000     | 0,0100            | 3,8969                     | 1,0001     | 0,0182            |
| 31   | 4,0000               | 1,0000     | 0,9298            | 3,9676                     | 0,8664     | 0,0241            |
| 300  | 4,0000               | 1,0000     | 0,0100            | 4,3782                     | 0,9549     | 0,0912            |
| 303  | 4,0000               | 1,2500     | 0,6246            | 4,2841                     | 1,0384     | 0,2391            |
| 401  | 4,0000               | 1,000      | 0,0100            | 4,4042                     | 0,9553     | 0,0054            |
| 507  | 4,5000               | 1,5000     | 0,0100            | 3,8397                     | 1,0185     | 0,0894            |
| 512  | 4,0000               | 1,0000     | 0,0100            | 4,1240                     | 0,9325     | 0,0159            |
| 514  | 4,5000               | 1,0000     | 0,2600            | 3,8338                     | 1,0849     | 0,1149            |
| 518  | 4,0000               | 1,0000     | 0,0100            | 3,9501                     | 0,9488     | 0,0774            |
| 519  | 4,0000               | 1,0000     | 0,0100            | 3,7553                     | 1,0434     | 0,0664            |
| 753  | 1,3441               | 1,0000     | 0,0100            | 4,1119                     | 1,1208     | 0,0126            |
| 806  | 4,0000               | 0,2853     | 0,2600            | 4,3424                     | 1,0185     | 0,1307            |
| 917  | 4,0000               | 1,0000     | 0,0100            | 3,8842                     | 1,060      | 0,0026            |
| 1107 | 4,0000               | 1,0000     | 0,0100            | 3,8261                     | 1,0249     | 0,0413            |
| 1162 | 4,0000               | 0,7180     | 0,0100            | 3,9010                     | 0,9958     | 0,0025            |
|      | Autovalor            | Freq. (Hz) | $\zeta_{min}$ (%) | Autovalor                  | Freq. (Hz) | $\zeta_{min}$ (%) |
|      | $-0,230 \pm j3,3717$ | 0,5366     | 6,8236            | $-0,464 \pm j6,547$        | 1,042      | 7,0698            |
|      | Constantes           |            |                   |                            |            |                   |
| PSS  | Evolução diferencial |            |                   | PSO                        |            |                   |
|      | $K_{pss}$            | $T_1$      | $T_2$             | $K_{pss}$                  | $T_1$      | $T_2$             |
| 18   | 4,4135               | 0,9982     | 0,0485            | 4,4371                     | 0,9782     | 0,0776            |
| 20   | 4,3107               | 0,4706     | 0,0104            | 4,3527                     | 0,4458     | 0,0169            |
| 22   | 4,4211               | 1,9991     | 0,0016            | 4,4281                     | 1,1680     | 0,0112            |
| 26   | 4,3304               | 1,1685     | 0,0029            | 1,7360                     | 1,1451     | 0,0073            |
| 30   | 4,3987               | 1,0547     | 0,0074            | 4,3914                     | 1,0537     | 0,0125            |

|      |                      |            |                   |                     |            |                   |
|------|----------------------|------------|-------------------|---------------------|------------|-------------------|
| 31   | 4,3851               | 1,1095     | 0,0301            | 4,3987              | 1,0856     | 0,0338            |
| 300  | 0,5005               | 1,1770     | 0,0463            | 0,5000              | 1,1727     | 0,0680            |
| 303  | 4,4665               | 1,1605     | 0,1032            | 4,4500              | 1,1426     | 0,0965            |
| 401  | 0,5009               | 1,1434     | 0,0124            | 1,5000              | 1,1555     | 0,0105            |
| 507  | 4,3566               | 1,2184     | 0,1365            | 4,3656              | 1,2226     | 0,1145            |
| 512  | 4,5240               | 1,0793     | 0,0031            | 4,5099              | 1,0816     | 0,0158            |
| 514  | 4,4771               | 1,1546     | 0,1018            | 4,5008              | 1,1576     | 0,0868            |
| 518  | 4,4276               | 1,1907     | 0,0963            | 4,4301              | 1,1903     | 0,0868            |
| 519  | 4,4768               | 1,0972     | 0,0560            | 4,4916              | 1,0715     | 0,0394            |
| 753  | 4,5037               | 1,2156     | 0,0173            | 4,5024              | 0,1886     | 0,0298            |
| 806  | 4,3813               | 0,9566     | 0,8280            | 4,3696              | 0,9965     | 0,8188            |
| 917  | 4,4517               | 1,2169     | 0,0091            | 4,4846              | 1,2345     | 0,0200            |
| 1107 | 4,4023               | 1,1328     | 0,0705            | 4,4076              | 0,8154     | 0,0735            |
| 1162 | 4,5117               | 1,1063     | 0,0119            | 4,5198              | 1,1240     | 0,0207            |
|      | Autovalor            | Freq. (Hz) | $\zeta_{min}$ (%) | Autovalor           | Freq. (Hz) | $\zeta_{min}$ (%) |
|      | $-0,474 \pm j9,4896$ | 1,510      | 5,000             | $-0,670 \pm j10,56$ | 1,680      | 6,3367            |

Os valores otimizados dos parâmetros dos PSS são mostrados na Tabela 3.37. Os parâmetros obtidos com a técnica de *simulated annealing* serão escolhidos para o projeto dos PSS, pois com essa técnica alcançou-se a maior razão de amortecimento. O mapa de pólos de malha fechada é ilustrado na Figura 3.20 para o sistema brasileiro Sul-Sudeste com 19 PSS instalados. Nota-se que a razão de amortecimento está próxima de 5%, ou seja, no limite da região estável. Uma das alternativas para que o amortecimento mínimo do sistema alcance os 10% ou 15% seria a instalação de mais blocos *lead-lag* nos PSS. Essa análise será detalhada na seção 3.3.2.4 no qual será utilizado o sistema WSCC, mas pode ser estendida para sistemas maiores.

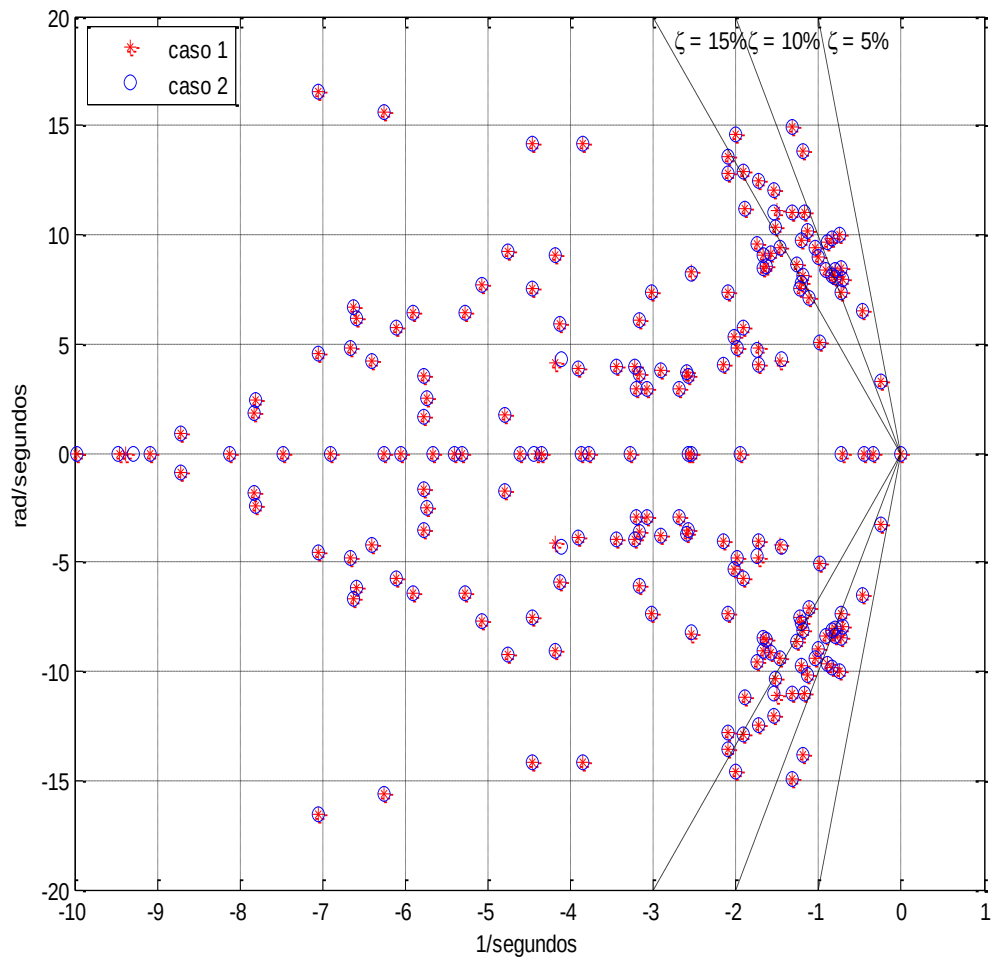


Figura 3.20: Mapa de pólos para o sistema brasileiro com PSS.

#### ➤ Caso PSS, SVC e TCSC

Para a alocação do SVC e TCSC, considerou-se o sistema com a instalação dos PSS. Através do cálculo dos resíduos será instalado um SVC na barra 1089 e um TCSC na linha 325-370, ambos com o POD com entrada a velocidade da máquina 501. Os valores otimizados se encontram na Tabela 3.38. Os resultados obtidos com evolução diferencial serão considerados por possuí melhores resultados. O mapa de pólos com os PSS, SVC e TCSC instalados no sistema é ilustrado na Figura 3.21. Como o sistema em estudo é de maior porte que os anteriores WSCC e New England, a instalação de SVC e TCSC não apresentou um aumento significativo no amortecimento do sistema.



Tabela 3.38: Constantes do SVC, TCSC e PSS para o sistema brasileiro.

|       | Constantes           |            |                   |                     |            |                   |
|-------|----------------------|------------|-------------------|---------------------|------------|-------------------|
|       | Algoritmos Genéticos |            |                   | Simulated Annealing |            |                   |
| PSS   | $K_{pss}$            | $T_1$      | $T_2$             | $K_{pss}$           | $T_1$      | $T_2$             |
| 18    | 4,00                 | 1,00       | 0,01              | 3,980               | 1,028      | 0,010             |
| 20    | 4,00                 | 1,00       | 0,01              | 3,986               | 1,003      | 0,011             |
| 22    | 5,00                 | 1,25       | 0,01              | 4,001               | 1,002      | 0,018             |
| 26    | 4,00                 | 1,00       | 0,01              | 4,014               | 0,997      | 0,010             |
| 30    | 4,25                 | 1,00       | 0,01              | 4,021               | 1,005      | 0,012             |
| 31    | 4,00                 | 1,00       | 0,01              | 4,016               | 1,003      | 0,028             |
| 300   | 4,00                 | 1,00       | 0,01              | 3,985               | 0,998      | 0,025             |
| 303   | 4,00                 | 2,00       | 0,01              | 3,992               | 1,007      | 0,018             |
| 401   | 4,00                 | 1,00       | 0,01              | 4,052               | 0,999      | 0,012             |
| 507   | 4,00                 | 1,25       | 0,51              | 3,983               | 0,969      | 0,029             |
| 512   | 4,00                 | 1,00       | 0,01              | 3,985               | 1,010      | 0,012             |
| 514   | 4,00                 | 1,00       | 0,51              | 3,987               | 0,996      | 0,041             |
| 518   | 4,25                 | 1,00       | 0,01              | 3,965               | 0,991      | 0,017             |
| 519   | 4,00                 | 1,00       | 0,01              | 4,000               | 1,025      | 0,044             |
| 753   | 4,00                 | 1,00       | 0,01              | 4,022               | 0,995      | 0,037             |
| 806   | 4,00                 | 1,00       | 0,26              | 4,011               | 1,011      | 0,041             |
| 917   | 4,00                 | 1,00       | 0,01              | 3,984               | 0,992      | 0,026             |
| 1.107 | 4,00                 | 1,25       | 0,01              | 3,990               | 1,006      | 0,026             |
| 1.162 | 4,50                 | 1,00       | 0,01              | 3,965               | 0,980      | 0,028             |
| SVC   | $K_{svc}$            | $T_1$      | $T_2$             | $K_{svc}$           | $T_1$      | $T_2$             |
|       | 25,00                | 2,00       | 0,100             | 35,026              | 0,968      | 0,094             |
| TCSC  | $K_{tcsc}$           | $T_1$      | $T_2$             | $K_{tcsc}$          | $T_1$      | $T_2$             |
|       | 35,00                | 1,00       | 0,10              | 28,009              | 1,997      | 0,102             |
|       | Autovalor            | Freq. (Hz) | $\zeta_{min}$ (%) | Autovalor           | Freq. (Hz) | $\zeta_{min}$ (%) |
|       | $-0,542 \pm j7,038$  | 1,120      | 7,6879            | $-0,464 \pm j6,547$ | 1,042      | 7,0698            |
|       | Constantes           |            |                   |                     |            |                   |
|       | Evolução diferencial |            |                   | PSO                 |            |                   |
| PSS   | $K_{pss}$            | $T_1$      | $T_2$             | $K_{pss}$           | $T_1$      | $T_2$             |

|       |                     |            |                   |                     |            |                   |
|-------|---------------------|------------|-------------------|---------------------|------------|-------------------|
| 18    | 3,3571              | 0,8636     | 0,2229            | 3,8788              | 1,0506     | 0,0350            |
| 20    | 3,6210              | 0,9158     | 0,0122            | 4,0111              | 1,0984     | 0,0483            |
| 22    | 4,6843              | 1,2602     | 0,0075            | 4,0725              | 1,0576     | 0,0169            |
| 26    | 4,5047              | 0,7868     | 0,0228            | 4,0013              | 1,0030     | 0,0073            |
| 30    | 3,9684              | 1,1326     | 0,0090            | 3,9880              | 0,8968     | 0,0145            |
| 31    | 4,6120              | 1,1065     | 0,0132            | 2,9923              | 0,9035     | 0,0228            |
| 300   | 3,9496              | 1,1989     | 0,0548            | 3,9268              | 1,0232     | 0,0220            |
| 303   | 4,2753              | 1,1955     | 0,0593            | 4,0145              | 0,9904     | 0,0420            |
| 401   | 3,6776              | 0,7487     | 0,0383            | 4,0360              | 0,9324     | 0,0252            |
| 507   | 3,6341              | 0,7854     | 0,0205            | 3,8933              | 0,9490     | 0,0316            |
| 512   | 4,5659              | 0,8269     | 0,0020            | 3,9475              | 1,0430     | 0,0038            |
| 514   | 3,9900              | 0,9138     | 0,2493            | 3,9424              | 1,1135     | 0,0507            |
| 518   | 4,6013              | 1,1945     | 0,0163            | 3,8925              | 0,9869     | 0,0305            |
| 519   | 4,2687              | 0,8677     | 0,0306            | 3,9122              | 1,0834     | 0,0034            |
| 753   | 3,9245              | 0,8474     | 0,0463            | 4,0483              | 1,0421     | 0,0409            |
| 806   | 3,5646              | 1,2631     | 0,2212            | 4,0036              | 1,0384     | 0,2510            |
| 917   | 3,7597              | 0,8161     | 0,0469            | 3,9628              | 0,9827     | 0,0220            |
| 1.107 | 4,2429              | 1,2770     | 0,0400            | 3,9854              | 1,0991     | 0,0441            |
| 1.162 | 4,0861              | 0,7745     | 0,0301            | 4,0444              | 0,9955     | 0,0030            |
| SVC   | $K_{svc}$           | $T_1$      | $T_2$             | $K_{svc}$           | $T_1$      | $T_2$             |
|       | 30,2426             | 0,9693     | 0,9470            | 30,000              | 0,9359     | 0,9291            |
| TCSC  | $K_{tcsc}$          | $T_1$      | $T_2$             | $K_{tcsc}$          | $T_1$      | $T_2$             |
|       | 9,6786              | 1,3205     | 0,9834            | 9,9507              | 1,1182     | 0,9908            |
|       | Autovalor           | Freq. (Hz) | $\zeta_{min}$ (%) | Autovalor           | Freq. (Hz) | $\zeta_{min}$ (%) |
|       | $-0,264 \pm j3,336$ | 3,346      | 7,9049            | $-0,484 \pm j6,592$ | 1,049      | 7,3252            |

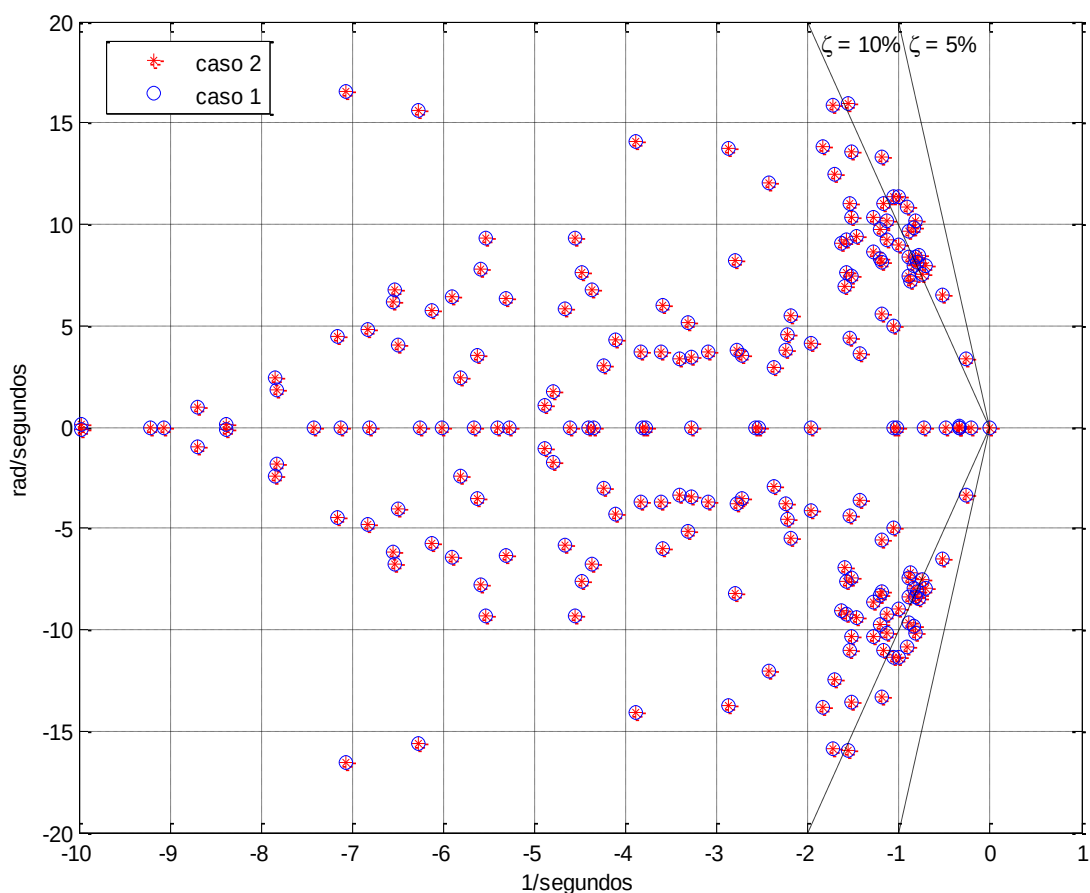


Figura 3.21: Mapa de pólos para o sistema brasileiro com PSS, SVC e TCSC.

#### 3.3.2.4. Influência da quantidade de blocos PSS no amortecimento do sistema

Nesta seção será analisada a influência da quantidade de blocos *lead-lag* do PSS no amortecimento do sistema. A análise é feita incrementando blocos *lead-lag* no PSS do gerador 2 do sistema WSCC. A Tabela 3.39 apresenta a variação do amortecimento dos sistema WSCC em função da quantidade de blocos *lead-lag*. Os parâmetros otimizados foram o ganho do PSS e as constantes de tempo dos blocos *lead-lag*. A constante de tempo do bloco *washout* foi considerada constante nas simulações e igual a 3 segundos. Na Tabela 3.40 têm-se os valores dos parâmetros do PSS para diferentes estruturas.

Tabela 3.39: Amortecimento versus quantidade de blocos *lead-lag*.

| Número de blocos <i>lead-lag</i> | $\zeta_{min}$ (%) | Autovalor             |
|----------------------------------|-------------------|-----------------------|
| 1                                | 6,743             | $-0,6702 \pm j9,916$  |
| 2                                | 24,322            | $-2,9965 \pm j11,950$ |
| 3                                | 25,861            | $-3,1009 \pm j11,583$ |
| 4                                | 27,651            | $-3,5730 \pm j12,418$ |

Tabela 3.40: Parâmetros do PSS com diferentes quantidades de blocos *lead-lag*.

| Número de blocos <i>lead-lag</i> | Parâmetros                                                                                                                                                                              |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                                | $\begin{cases} K_{pss} = 7,515 \\ T_1 = 1,9987 \quad T_2 = 0,0021 \end{cases}$                                                                                                          |
| 2                                | $\begin{cases} K_{pss} = 2,065 \\ T_1 = 1,3486 \quad T_2 = 0,0056 \\ T_3 = 0,7565 \quad T_4 = 0,0636 \end{cases}$                                                                       |
| 3                                | $\begin{cases} K_{pss} = 4,753 \\ T_1 = 0,4965 \quad T_2 = 0,1923 \\ T_3 = 0,3111 \quad T_4 = 0,0411 \\ T_5 = 0,5153 \quad T_6 = 0,0255 \end{cases}$                                    |
| 4                                | $\begin{cases} K_{pss} = 8,488 \\ T_1 = 0,4215 \quad T_2 = 0,0420 \\ T_3 = 0,2201 \quad T_4 = 0,7083 \\ T_5 = 0,6131 \quad T_6 = 0,0845 \\ T_7 = 0,3105 \quad T_8 = 0,0421 \end{cases}$ |

O aumento da quantidade de blocos *lead-lag* significa aumento da razão de amortecimento, aumento do tempo computacional de processamento do projeto de PSS e aumento das variáveis a serem otimizadas. Uma solução para sistemas de energia elétrica de maior porte (no caso o sistema Sul-Sudeste brasileiro) é o aumento da quantidade de blocos *lead-lag*, ao invés, da quantidade de PSS. A Figura 3.22 ilustra o mapa de pólos de malha aberta e fechada do sistema WSCC com diferentes estruturas de PSS.

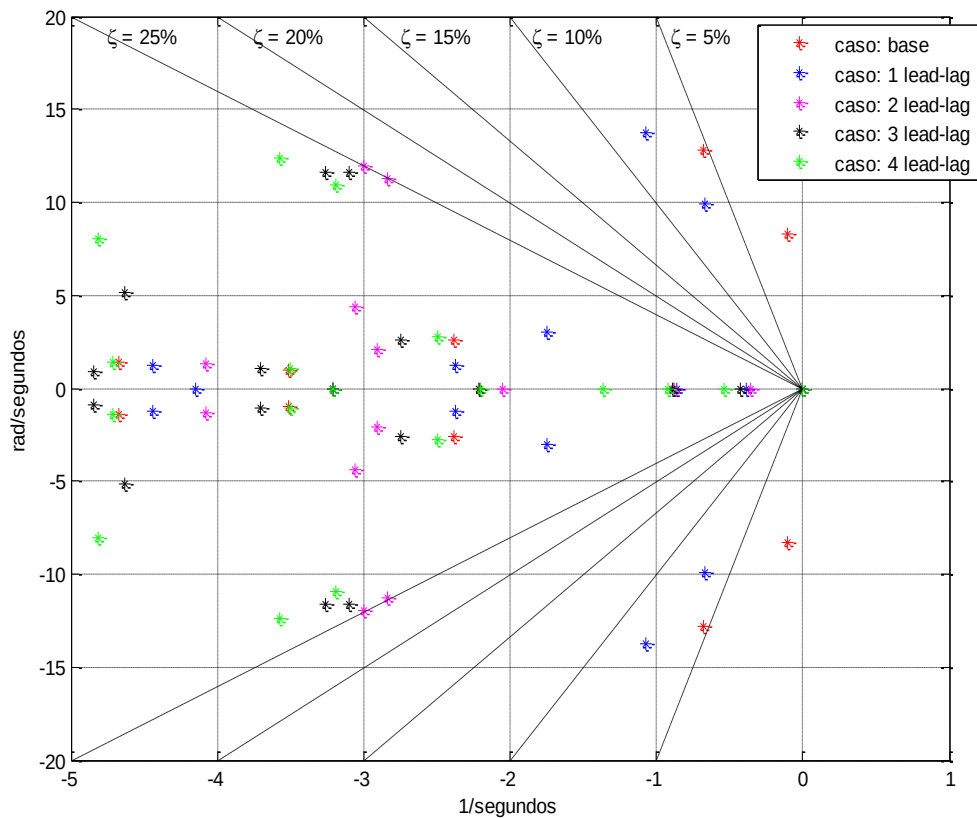


Figura 3.22: Mapa de pólos de malha fechada e aberta para diferentes quantidade de blocos *lead-lag* no sistema WSCC.

### 3.3.2.5. Sistema de 3 geradores e 6 barras/sistema de 5 geradores e 7 barras

Neste item será apresentado o projeto e sintonização de PSS utilizando a função objetivo  $F_2$ . Foram utilizados dois sistemas teste.

No primeiro sistema teste, composto de 3 geradores e 6 barras (DE MARCO, MARTINS e FERRAZ, 2013) e cujo diagrama unifilar é mostrado na Figura 3.23, instalou-se um PSS no gerador 3 composto por um ganho, um bloco *washout* e dois blocos *lead-lag*. Os dados dos geradores e AVR se encontram no Apêndice B.

O segundo sistema teste consiste de 5 geradores e 7 barras (BOUKATIM, WANG, *et al.*, 2000) e o diagrama unifilar é mostrado na Figura 3.24. Neste segundo sistema teste foram instalados dois PSS. O primeiro PSS, com estrutura de um ganho, um bloco *washout* e dois blocos *lead-lag*, foi instalado na barra Salto Segredo. O segundo PSS, com estrutura de um ganho, um bloco *washout* e um bloco *lead-lag*, foi instalado na barra Itaipu. Os dados do sistema de 5 geradores e 7 barras se encontram no Apêndice B deste trabalho.

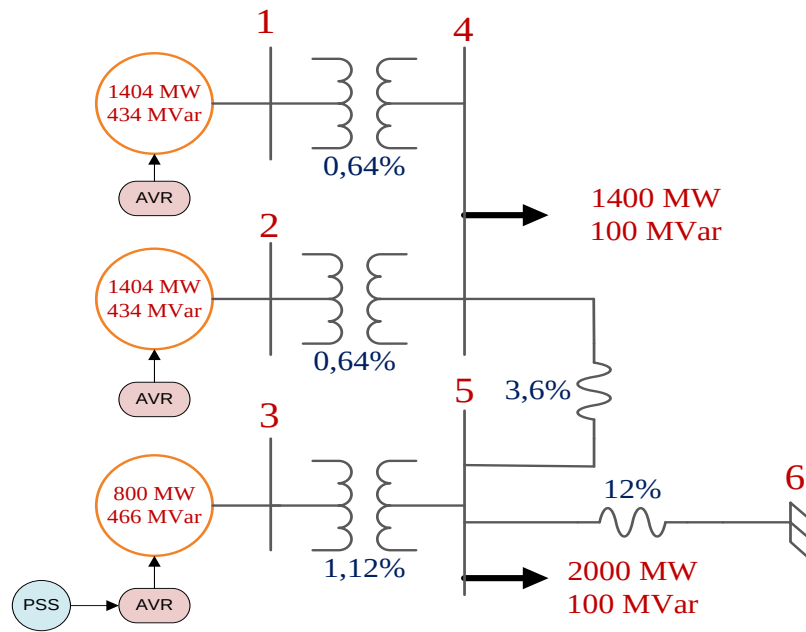


Figura 3.23: Diagrama unifilar do sistema de 3 geradores e 6 barras.  
Fonte: Adaptado de (DE MARCO, MARTINS e FERRAZ, 2013).

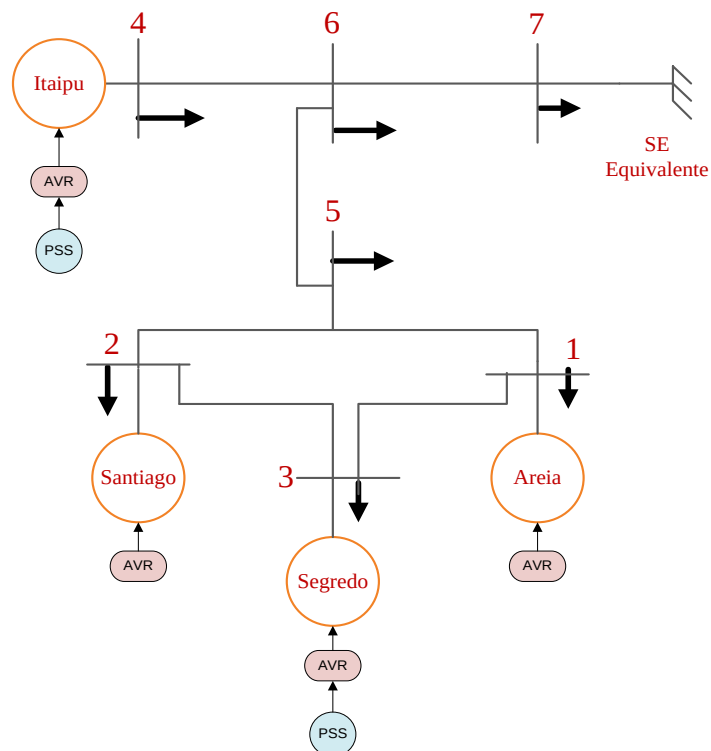


Figura 3.24: Diagrama unifilar do sistema de 5 geradores e 7 barras.  
Fonte: Adaptado de (BOUKATIM, WANG, *et al.*, 2000).

Com  $\kappa = 0,85$ , projetaram-se os PSS dos sistemas teste utilizando a função objetivo  $F_2$ . Em contrapartida com  $F_1$ , onde é necessário calcular todos os autovalores, para utilização de  $F_2$  não foi necessário o cálculo de todos os autovalores. No total, 60% dos autovalores foram calculados. Na Tabela 3.41 apresenta-se a comparação dos parâmetros obtidos com as técnicas de IA e os resultados com outras metodologias recentes utilizadas na literatura tais como programação cônica (RABIH, PAL e MARTINS, 2010) e o método de ajuste automático de fase (DE MARCO, MARTINS e FERRAZ, 2013). As técnicas de IA apresentaram resultados satisfatórios e comparáveis com os resultados dessas referências.

As Figuras 3.25 e 3.26 ilustram a equivalência de resultados obtidos utilizando as funções objetivo  $F_1$  e  $F_2$  com a instalação dos PSS nos dois sistemas teste, respectivamente. Na Figura 3.25 há 6 modos eletromecânicos com parte real positiva (sistema instável), quatro modos referem-se ao sistema de 5 geradores caso base e dois modos eletromecânicos referem-se ao sistema de três geradores caso base. Na Figura 3.26 esses seis modos instáveis encontram-se localizados fora do círculo unitário. Com relação ao projeto e sintonização de PSS, a principal vantagem no uso da função objetivo  $F_2$  está no cálculo dos autovalores, ou seja, não é necessário realizar o cálculo de todos os autovalores da matriz de estado.

Tabela 3.41: Comparação das técnicas de IA com outras metodologias.

| PSS                    | Parâmetros                                                                                                                                | $\zeta_{min}$<br>(%) | Parâmetros                                                                                                                         | $\zeta_{min}$<br>(%) |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Sistema de 3 geradores |                                                                                                                                           |                      |                                                                                                                                    |                      |
|                        | Com $F_2$                                                                                                                                 |                      | Referência: (DE MARCO, MARTINS e FERRAZ, 2013)                                                                                     |                      |
| 1                      | $\begin{cases} K_{pss} = 24,657 \\ T_1 = 0,5318 & T_2 = 0,4991 \\ T_3 = 0,1807 & T_4 = 0,0084 \\ T_5 = 0,1579 & T_6 = 0,0028 \end{cases}$ | 8,390                | $\begin{cases} K_{pss} = 35,00 \\ T_1 = 0,142 & T_2 = 0,014 \\ T_3 = 0,142 & T_4 = 0,014 \\ T_5 = 0,158 & T_6 = 0,641 \end{cases}$ | 8,390                |
| Sistema de 5 geradores |                                                                                                                                           |                      |                                                                                                                                    |                      |
|                        | Com $F_2$                                                                                                                                 |                      | Referência: (RABIH, PAL e MARTINS, 2010)                                                                                           |                      |
| 1                      | $\begin{cases} K_{pss} = 11,417 \\ T_1 = 0,1456 & T_2 = 0,0308 \end{cases}$                                                               | 14,185               | $\begin{cases} K_{pss} = 14,00 \\ T_1 = 0,1 & T_2 = 0,01 \end{cases}$                                                              | 11,256               |
| 2                      | $\begin{cases} K_{pss} = 15,914 \\ T_1 = 0,0646 & T_2 = 0,0051 \\ T_3 = 0,4167 & T_4 = 0,0042 \end{cases}$                                |                      | $\begin{cases} K_{pss} = 14,00 \\ T_1 = 0,1 & T_2 = 0,01 \\ T_3 = 0,1 & T_4 = 0,01 \end{cases}$                                    |                      |

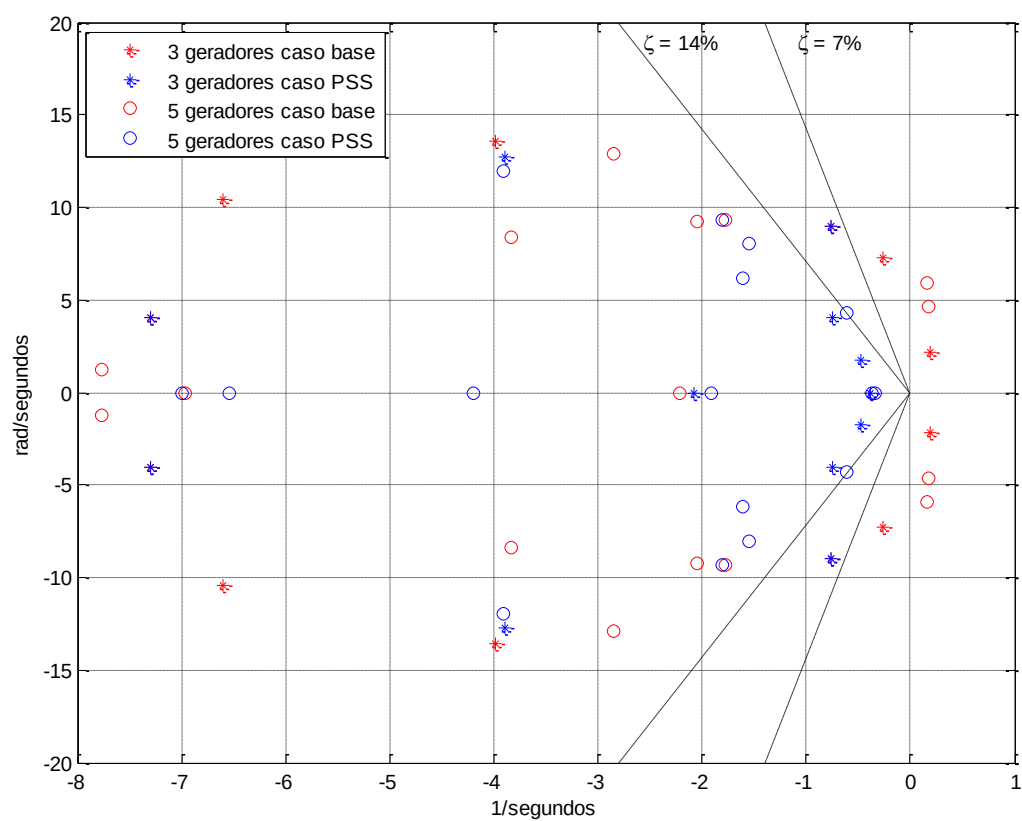


Figura 3.25: Mapa de pólos dos sistemas de 3 e 5 geradores no plano S.

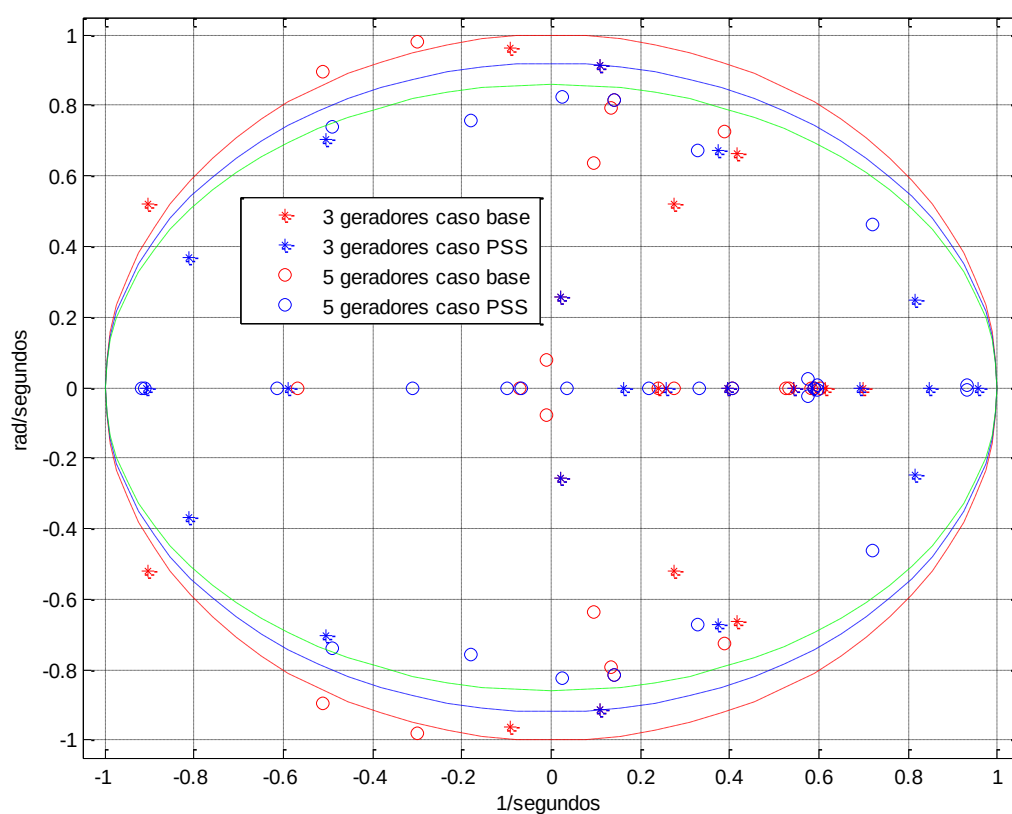


Figura 3.26: Mapa de pólos dos sistemas de 3 e 5 geradores no plano Z.



### 3.4. Metodologia para análise do impacto técnico dos PSS e FACTS na estabilidade transitória.

#### 3.4.1. Desenvolvimento da metodologia

No estudo da estabilidade transitória é conveniente descrever o comportamento dos ângulos dos rotores dos geradores com relação ao centro de inércia de todos os geradores. A posição do centro de inércia – COI de um sistema de energia elétrica pode ser representada por uma combinação linear dos ângulos de todos os geradores como segue na expressão (3.5).

$$\delta_{COI} = \frac{1}{H_T} \sum_{i=1}^{N_g} H_i * \delta_i \quad (3.5)$$
$$\theta_i = \delta_i - \delta_{COI}$$

Onde  $H_T$  é a soma das constantes de inércia de todos os  $N_g$  geradores no sistema.

A potência acelerante  $P_{ai}$  do gerador  $i$  com relação ao COI é definida por (3.6).

$$P_{ai} = P_{mi} - P_{ei} - \frac{H_i}{H_T} P_{COI}$$
$$P_{COI} = \sum_{i=1}^{N_g} (P_{mi} - P_{ei}) \quad (3.6)$$

Em que  $P_{mi}$  e  $P_{ei}$  são as potências mecânica e elétrica do gerador  $i$ , respectivamente.

O produto escalar foi definido para detectar o ponto de saída (*exit point*) sendo este caracterizado pelo primeiro máximo da energia transitória potencial com relação à rede pós-falta. O vetor dos ângulos dos rotores e da potência acelerante dos geradores com relação ao COI são medidas relevantes que podem ser utilizadas para detectar a instabilidade do sistema no domínio do tempo. Os vetores  $F$  e  $\Theta$  são formados pelas potências acelerantes e pelos ângulos dos geradores com relação ao COI, respectivamente (FU e BOSE, 1999).

[illegible]

$$\Theta = \begin{bmatrix} \theta_1 = \delta_1 - \delta_{COI} \\ \theta_2 = \delta_2 - \delta_{COI} \\ \dots\dots\dots \\ \theta_{Nq} = \delta_{Nq} - \delta_{COI} \end{bmatrix}$$

Portanto, a estabilidade do sistema pode ser determinada pelo uso do produto interno em (3.8):

$$dot = F * \Theta^t = F_1 * \Theta_1 + F_2 * \Theta_2 + \dots + F_{Ng} * \Theta_{Ng} \quad (3.8)$$

A evolução do tempo do produto interno irá definir a instabilidade ou estabilidade do sistema em estudo. O comportamento do produto interno para um sistema estável (a) e instável (b) é ilustrado na Figura 3.27. A partir da Figura 3.27 observa-se que o produto interno é calculado através do método indireto. O produto interno tem valor elevado para sistema instáveis, enquanto para sistema estáveis, seu valor diminui até o sistema encontrar um novo ponto de operação, para o qual o produto interno é nulo.

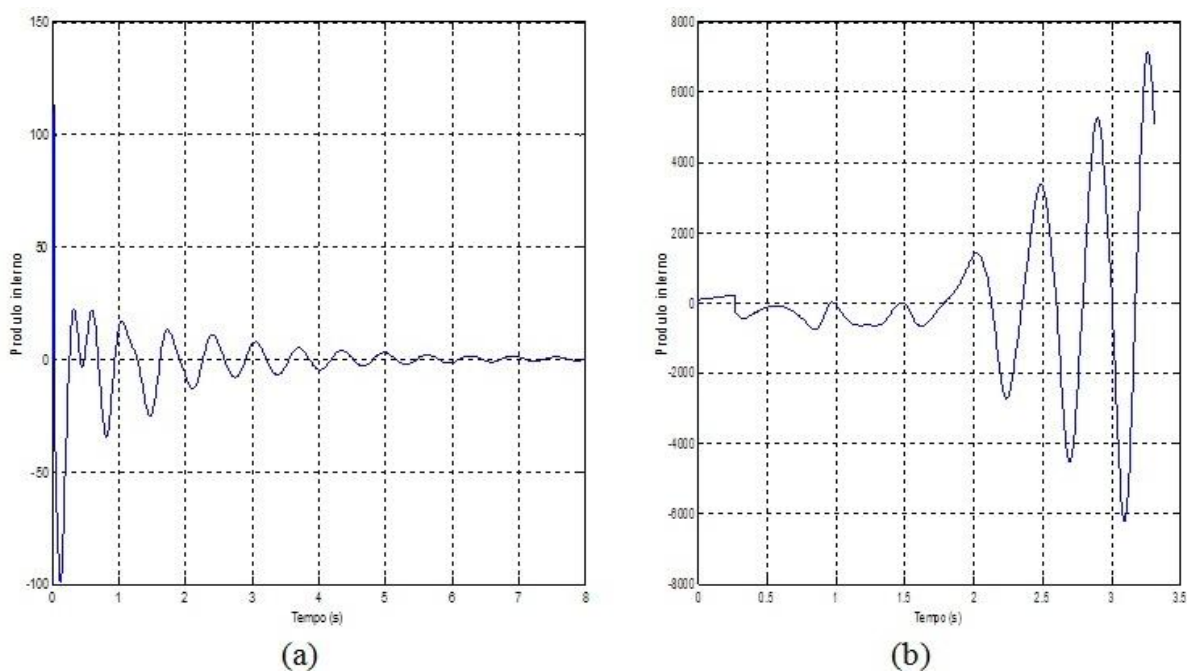


Figura 3.27: Resposta do produto interno: (a) sistema estável, (b) sistema instável.

A função objetivo na análise técnica da estabilidade transitória consiste em minimizar a área do produto interno ao longo do tempo,  $A_{dot}$ , ou seja, minimizar a área em cinza ilustrada na Figura 3.28 que representa uma forma de energia transitória.

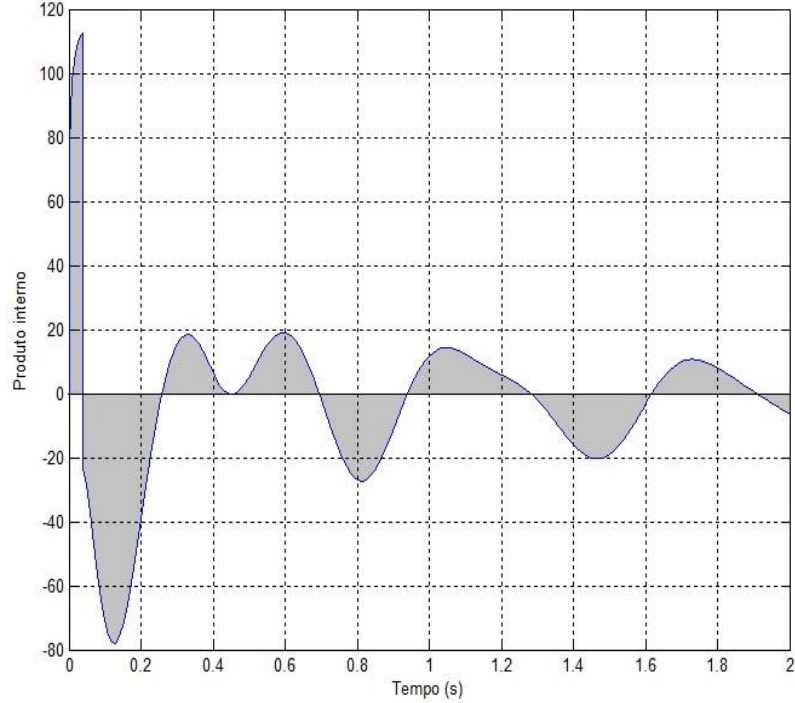


Figura 3.28: Área de integração do produto interno

Dessa maneira, na técnica da sintonização e coordenação dos PSS e Controladores FACTS implementada, o índice que mede a qualidade do ajuste dos parâmetros corresponde à área de integração da resposta do produto interno  $A_{dot}$ . A área  $A_{dot}$  foi calculada utilizando o método de integração trapezoidal. Matematicamente,  $A_{dot}$  é dada por (3.9)

$$A_{dot} = \int_0^{t_{sim}} dot * dt \quad (3.9)$$

Em que  $t_{sim}$  é o tempo de simulação, em segundos, e depende do sistema em estudo.

Atualmente, os projetos de PSS e Controladores FACTS para melhoria da estabilidade transitória e da estabilidade a pequenas perturbações são realizados de forma separada. Nesta seção, a sintonização e coordenação dos PSS e Controladores FACTS para melhoria da estabilidade transitória levará em conta o amortecimento do sistema. De modo a não degradar o amortecimento do sistema, no projeto dos controladores para estabilidade transitória, limitou-se o amortecimento mínimo do sistema no valor pré-definido  $\zeta_{min}$  (por exemplo 5%).

O fluxograma da metodologia para a análise técnica da estabilidade transitória é ilustrado na Figura 3.29.

Adicionando a razão de amortecimento às restrições do problema, pode-se expressar matematicamente por (3.10).

$$F_3 = \min(A_{dot})$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} z_{min} &\leq z \leq z_{min} \\ \zeta_i &\geq \zeta_{min}, i = 1, 2, \dots, N_{autovalores} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Em que  $z$  é um vetor composto pelos parâmetros a serem otimizados dos controladores;  $\zeta_{min}$  é a mínima razão de amortecimento do sistema pré-definida no projeto e  $N_{autovalores}$  é o número de autovalores da matriz de estado.

Portanto, na Figura 3.29 ilustra-se o fluxograma geral da análise do impacto técnico dos Controladores FACTS e PSS. O ARQUIVO.HIS contém a solução do fluxo de potência gerado pelo programa ANAREDE. O ARQUIVO.CDU contém os modelos de AVR, PSS, SVC e TCSC. O ARQUIVO.plt contém os dados da simulação no domínio do tempo. Por fim, o programa ANATEM foi executado em ambiente DOS (CEPEL, 2010).

A matriz de estado do sistema é obtida pelo software PacDyn. O amortecimento do sistema é determinado a partir da obtenção dos autovalores da matriz de estado. Na estabilidade transitória as equações que regem a dinâmica do sistema não podem ser linearizadas. Portanto, deve-se trabalhar com as equações diferenciais do sistema. O índice utilizado neste trabalho foi a área de integração da resposta do produto interno  $A_{dot}$ .

O tempo de simulação  $t_{sim}$  (entende-se por  $t_{sim}$  o tempo de simulação da estabilidade transitória no processo de otimização), depende do sistema em estudo. Para os sistemas WSCC e New England utilizou-se 2 s. Para o sistema Sul-Sudeste brasileiro o tempo foi de 3 s. A metodologia proposta concentra-se em melhorar a estabilidade transitória sem muito degradar a estabilidade a pequenas perturbações (YUAN e FANG, 2009).

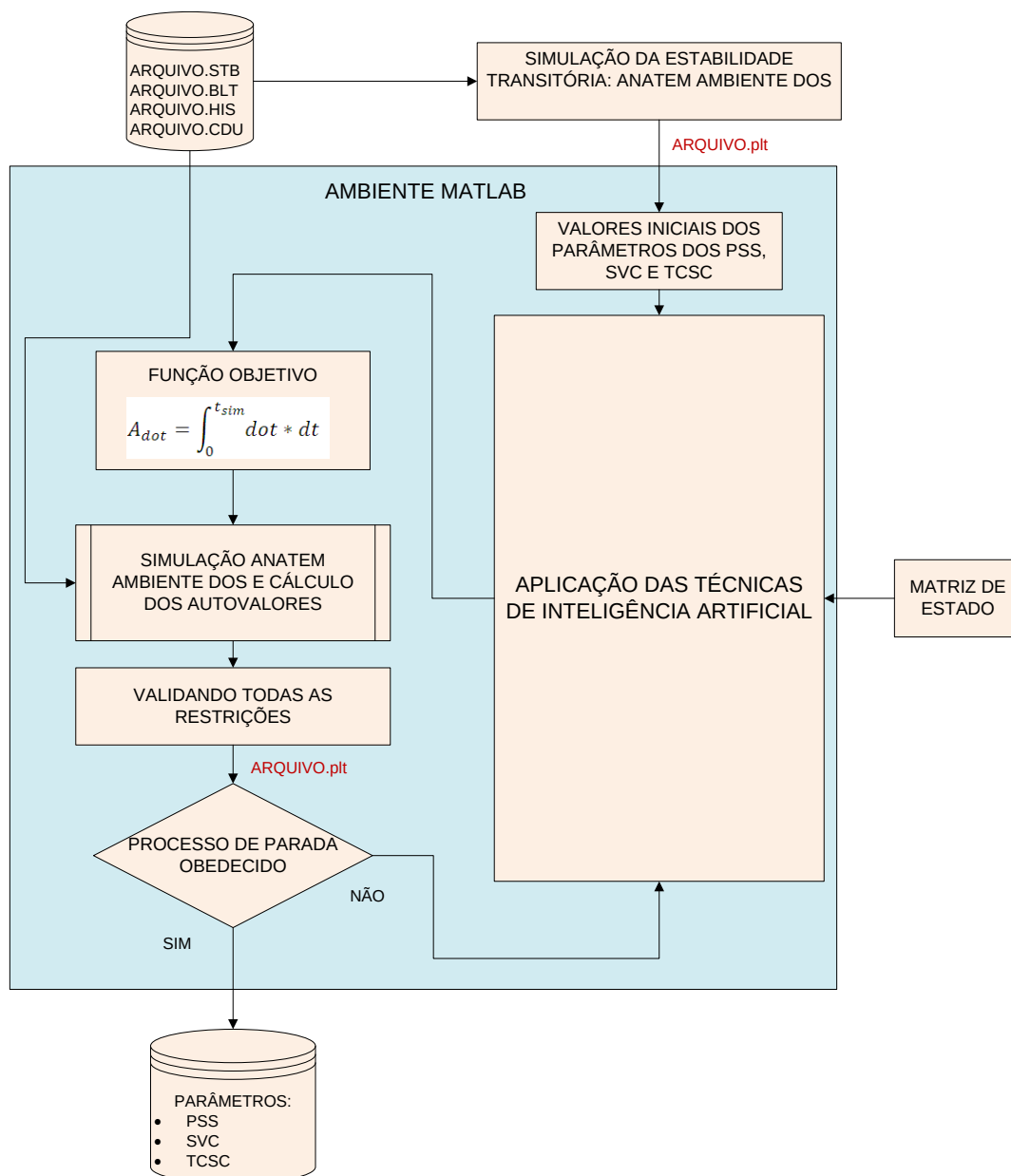


Figura 3.29: Fluxograma para análise técnica da estabilidade transitória dos controladores PSS e FACTS.

### 3.4.2. Aplicação a sistemas teste

Nesta seção são apresentados os resultados de simulações realizadas em sistemas teste. Estes resultados mostram que os PSS e Controladores FACTS, quando sintonizados e coordenados corretamente, fornecem melhorias na estabilidade transitória do sistema sem degradar o amortecimento do mesmo.

### 3.4.2.1. Sistema WSCC

#### ➤ Caso base

A perturbação para o sistema WSCC consistiu na aplicação de um curto-circuito trifásico na barra 4 (em  $t = 0$ ). O curto-circuito trifásico foi eliminado em  $t_{cl} = 0,086$  s mediante a saída da linha 4-6. O valor obtido de  $A_{dot}$  é igual a 101,51.

#### ➤ Caso com PSS

Na análise da estabilidade transitória o valor de  $A_{dot}$ , com PSS instalado no sistema, é mais sensível a variação do ganho  $K_{pss}$ . Portanto, fixaram-se os valores de  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_w$  e variaram-se os valores de  $K_{pss}$ . Os mínimos e máximos de  $K_{pss}$  foram escolhidos de modo a se respeitar o amortecimento crítico do sistema. A Figura 3.30 ilustra que para  $K_{pss} > 32$  o sistema fica sujeito a um amortecimento menor do que 5%. Do mesmo modo, acontece para  $K_{pss} < 2.50$ .

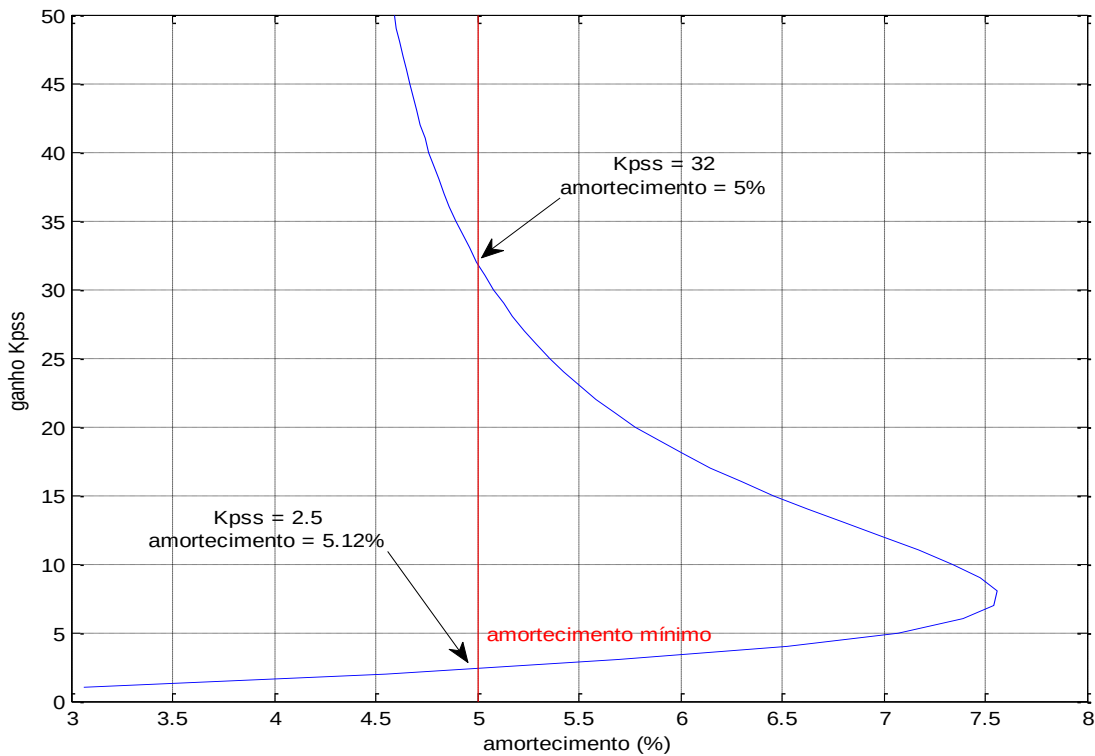


Figura 3.30: Amortecimento em função de  $K_{pss}$ .

Portanto, necessita-se encontrar o valor do ganho  $K_{pss}$ . A função objetivo para o caso com PSS é dada por (3.12):

$$F_3 = \min A_{dot}$$

Sujeito a:

$$2.5 \leq K_{pss} \leq 32$$

(3.12)

Utilizando as técnicas algoritmos genéticos e *simulated annealing* construiu-se a Tabela 3.42.

Tabela 3.42: Valores de  $K_{pss}$  obtidos com AG e SA para o sistema WSCC

|                   | AG     | SA     |
|-------------------|--------|--------|
| $K_{pss}$         | 31,741 | 31,641 |
| $A_{dot}$         | 67,973 | 68,033 |
| $\zeta_{min}(\%)$ | 5,0075 | 5,0114 |

O valor obtido a partir dos algoritmos genéticos define o valor de  $K_{pss}$ . A Figura 3.31 ilustra a comparação entre o caso do sistema WSCC com e sem PSS após a aplicação de um curto-circuito na linha 4-6 por um tempo de 0,086 s. As curvas mostram o comportamento do ângulo de todos os geradores com relação ao ângulo do COI.

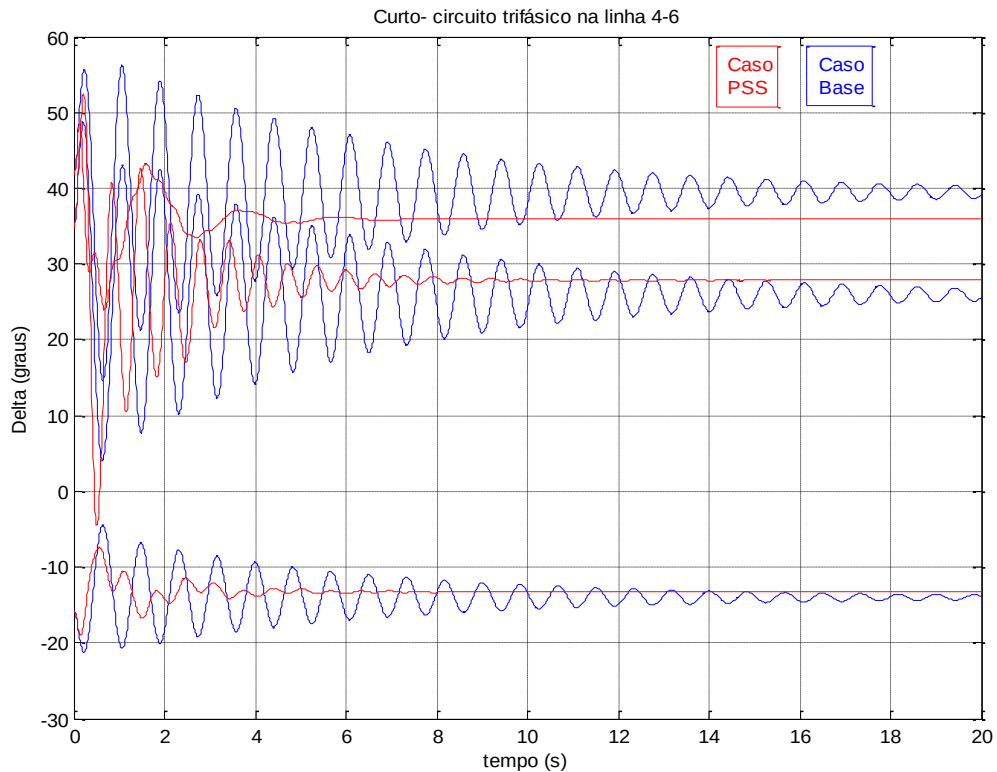


Figura 3.31: Comportamento do ângulo dos geradores, com e sem PSS, do sistema WSCC.

➤ Caso SVC

O SVC foi instalado na barra 7. Aplicou-se um curto-circuito trifásico na linha 4-6 o qual foi eliminado em  $t_{cl} = 0,086$  s com a abertura desta linha pelas proteções do sistema.

Na análise da estabilidade transitória o valor de  $A_{dot}$ , para a análise com SVC, é mais sensível à variação do ganho  $K_{svc}$ . Portanto, fixaram-se os valores de  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_w$  e variaram-se os valores de  $K_{svc}$ . Os mínimos e máximos de  $K_{svc}$  foram escolhidos de modo a se respeitar o amortecimento crítico do sistema. A Figura 3.32 ilustra que para  $K_{svc} > 181$  o sistema fica sujeito a um amortecimento menor que 5%. Do mesmo modo, acontece para  $K_{svc} < 65$ .

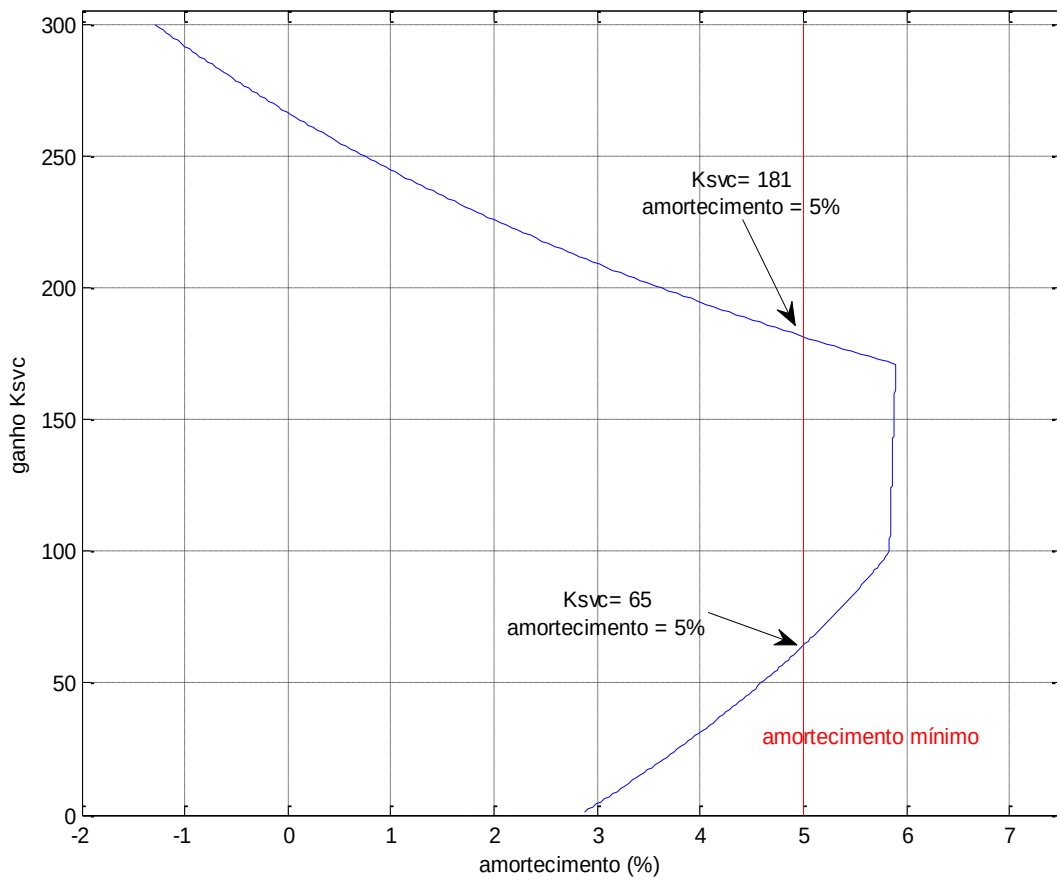


Figura 3.32: Amortecimento em função de  $K_{svc}$ .

Portanto, necessita-se encontrar o valor do ganho  $K_{svc}$ . A função objetivo para o caso SVC será dada por (3.13):

$$F_3 = \min A_{dot}$$

Sujeito a:

$$65 \leq K_{svc} \leq 181$$

(3.13)



Utilizando as técnicas de algoritmos genéticos e recozimento simulado (*simulated annealing* - SA) foram obtidos os resultados mostrados na Tabela 3.43.

Tabela 3.43: Valores de  $K_{svc}$  obtidos com AG e SA para o sistema WSCC.

|                   | AG     | SA     |
|-------------------|--------|--------|
| $K_{svc}$         | 64,580 | 65,460 |
| $A_{dot}$         | 96,184 | 96,188 |
| $\zeta_{min}(\%)$ | 5,1200 | 5,1400 |

O valor obtido a partir dos algoritmos genéticos define o valor de  $K_{svc}$ . A Figura 3.33 ilustra a comparação entre o caso do sistema WSCC com e sem SVC após a aplicação de um curto-circuito na linha 4-6 por um tempo de 0,086 s. As curvas mostram o comportamento do ângulo de todos os geradores com relação ao COI.

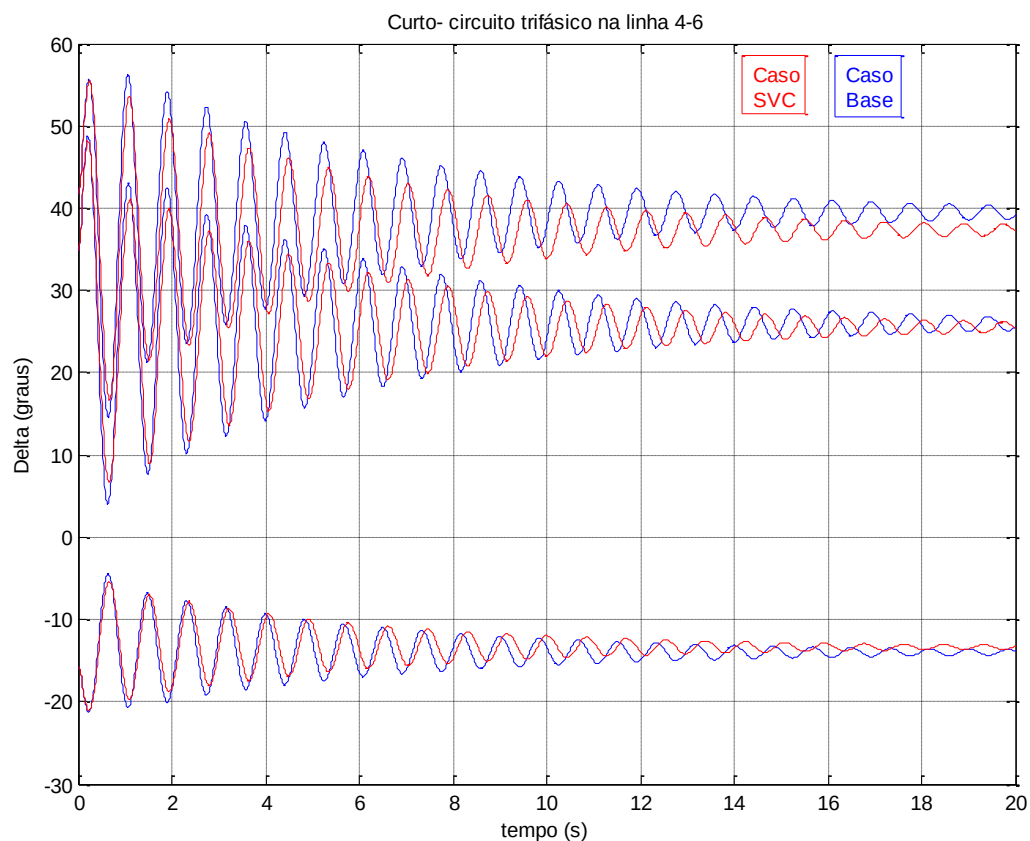


Figura 3.33: Comparação entre SVC e o caso base par ao sistema WSCC.

➤ Caso TCSC

O TCSC foi instalado na linha 5-7. Aplicou-se um curto-circuito trifásico na linha 4-6 por um tempo de 0,086 s, instante no qual ocorreu a abertura desta linha pelo sistema de proteção do sistema.

Na análise da estabilidade transitória neste trabalho, para a análise com TCSC, é mais sensível a variação dos parâmetros das constantes do bloco *lead-lag* e *washout*, principalmente as constantes  $T_1$  e  $T_w$ . Portanto, fixaram-se os valores de  $K_{tcsc}$  e  $T_2$ , variaram-se os valores de  $T_1$  e  $T_w$ . Quando o problema envolve mais de duas variáveis é difícil estimar os limites máximos e mínimos, portanto deve-se resolver o problema com restrição de estabilidade a pequenas perturbações. A Figura 3.34 ilustra o comportamento do amortecimento do sistema em função das variáveis  $T_1$  e  $T_w$ .

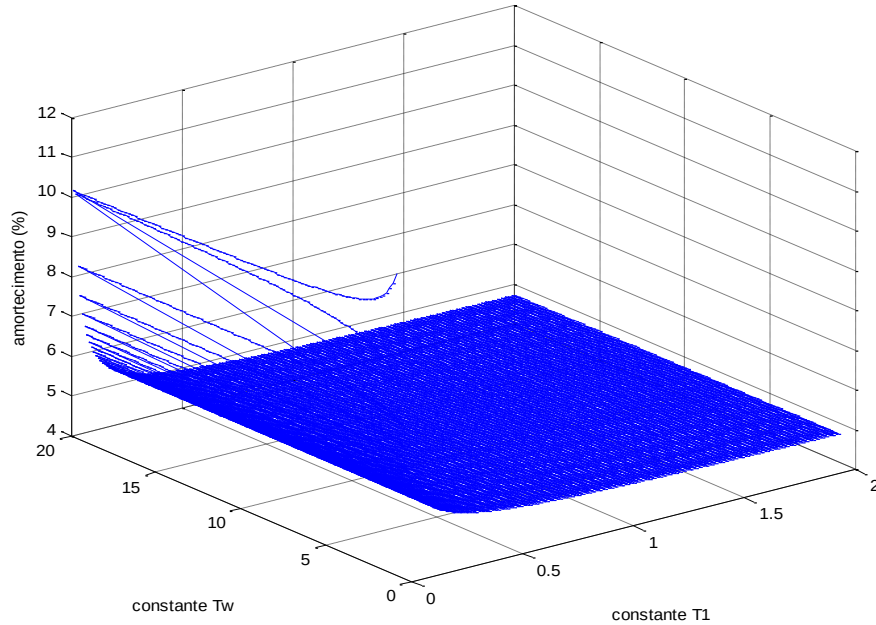


Figura 3.34: Amortecimento em função de  $T_1$  e  $T_w$  do POD-TCSC.

De uma forma geral o problema de melhorar a estabilidade transitória sem degradar a estabilidade a pequenas perturbações se resume em (3.14).

$$F_3 = \min A_{dot}$$

Sujeito a:

$$\min \zeta \geq \zeta_o, \forall \zeta_i \quad (3.14)$$

$$z_{min} \leq z \leq z_{max}$$

Onde  $z$  corresponde ao vetor dos parâmetros dos controladores PSS, POD- SVC e POD-TCSC.

Empregando as técnicas algoritmos genéticos e *simulated annealing* foram obtidos os resultados da Tabela 3.44.

Tabela 3.44: Valores de  $T_1$  e  $T_w$  obtidos com AG e SA para o sistema WSCC.

|                   | AG     | SA     |
|-------------------|--------|--------|
| $T_1$             | 0,3559 | 0,3822 |
| $T_w$             | 11,502 | 17,056 |
| $A_{dot}$         | 83,132 | 83,056 |
| $\zeta_{min}(\%)$ | 5,9238 | 5,8087 |

Os valores obtidos a partir da técnica *simulated annealing* definem as constantes  $T_1$  e  $T_w$  do POD-TCSC. A Figura 3.35 ilustra a comparação entre o caso do sistema WSCC com e sem TCSC após a aplicação de um curto-circuito na linha 4-6 por um tempo de 0,086 s. As curvas mostram o comportamento do ângulo de todos geradores com relação ao ângulo do COI.

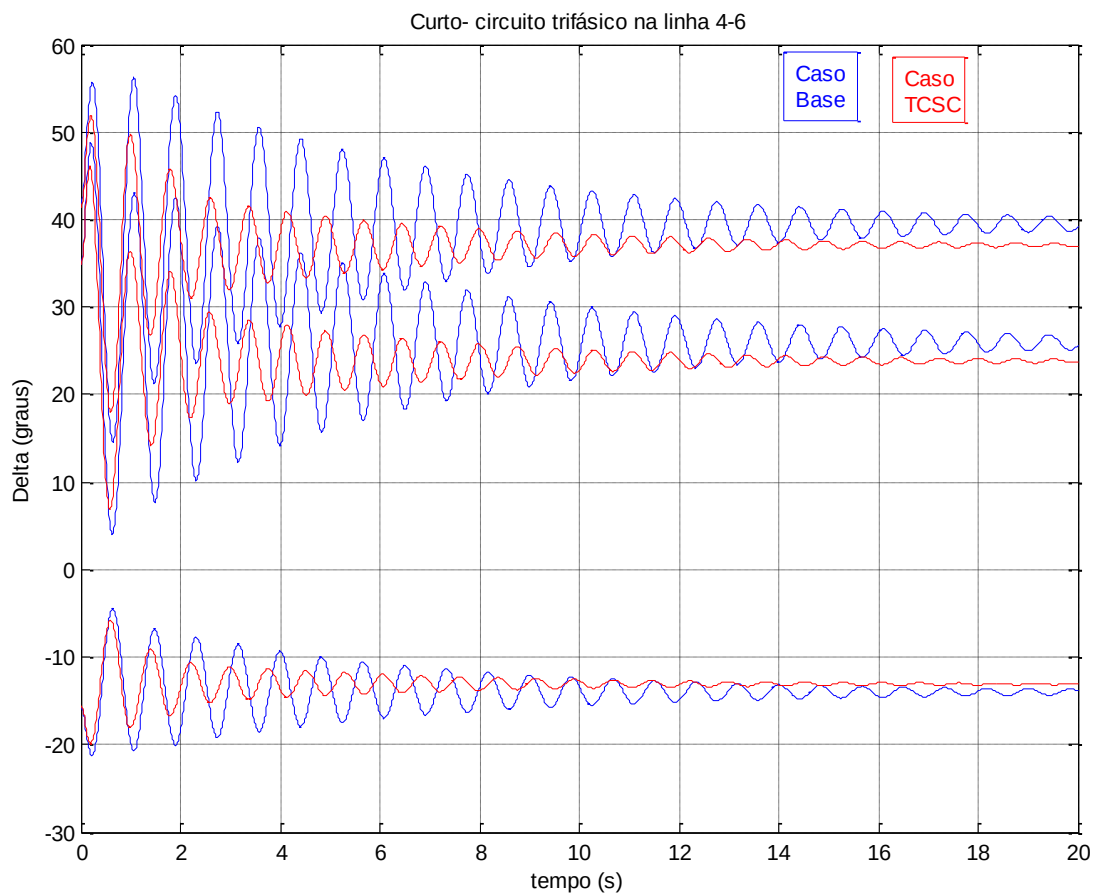


Figura 3.35: Comparação entre TCSC e o caso base para o sistema WSCC.

➤ Caso SVC+PSS

O SVC foi instalado na barra 7 e o PSS foi instalado no gerador 2. Aplicou-se um curto-circuito trifásico na barra 4 ( $t = 0$  segundos), sendo eliminado pela abertura da linha 4-6 por um tempo de 0,086 s, nesse instante ocorreu a abertura desta linha pelo sistema de proteção do sistema.

Na análise técnica da estabilidade transitória deste trabalho, com o sistema com PSS e SVC, fixaram-se os valores de  $T_w$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  do PSS e do POD-SVC e variaram-se os valores de  $K_{pss}$  e  $K_{svc}$ . Utilizando algoritmos genéticos e *simulated annealing* foram definidos os valores mostrados na Tabela 3.45.

Tabela 3.45: Valores de  $K_{pss}$  e  $K_{svc}$  obtidos com AG e SA para o sistema WSCC.

|                   | AG     | SA     |
|-------------------|--------|--------|
| $K_{pss}$         | 5,830  | 13,685 |
| $K_{svc}$         | 55,988 | 76,172 |
| $A_{dot}$         | 59,026 | 61,052 |
| $\zeta_{min}(\%)$ | 5,9817 | 6,6589 |

Os valores calculados a partir dos algoritmos genéticos serão definidos para as constantes  $K_{pss}$  e  $K_{svc}$ . A Figura 3.36 ilustra a comparação entre o caso do sistema WSCC com SVC, e com PSS e SVC após a aplicação de um curto-circuito trifásico na linha 4-6 por um tempo de 0,086 s. As curvas de oscilação mostram o comportamento do ângulo dos rotores dos geradores com relação ao ângulo do COI. Houve uma melhora significativa no comportamento dos ângulos dos geradores do sistema com a introdução do SVC e PSS.

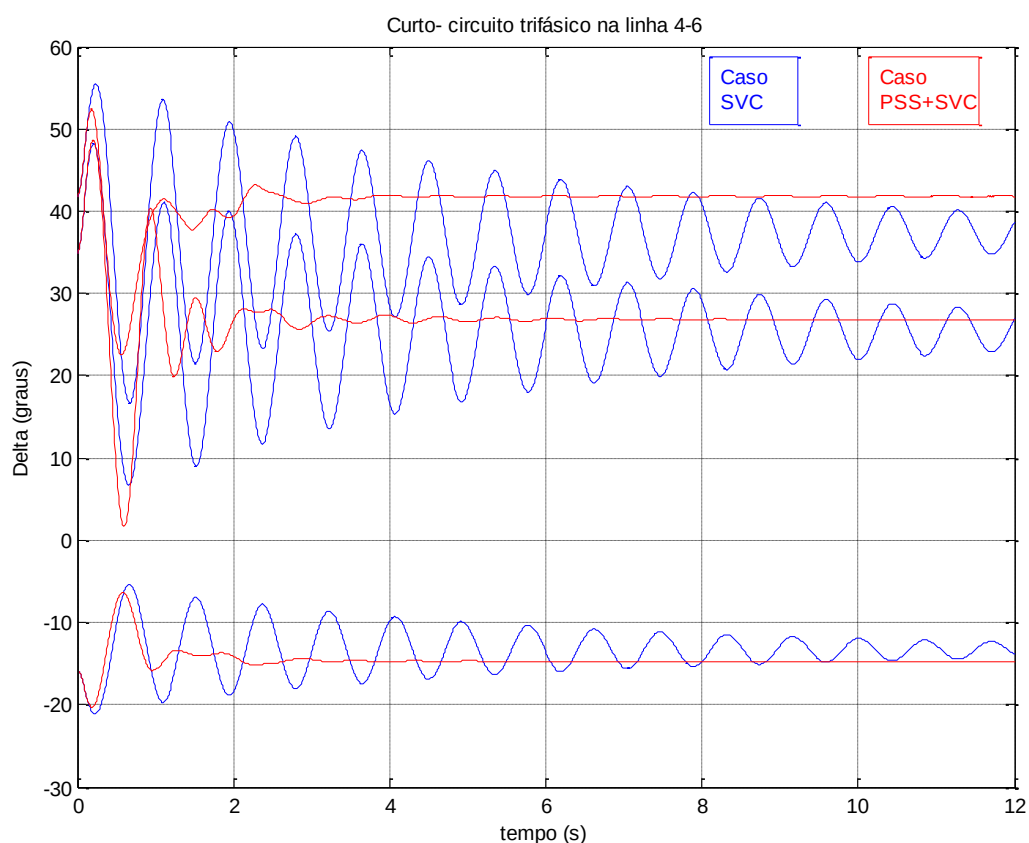


Figura 3.36: Comparação entre o caso SVC e o caso SVC+PSS para o sistema WSCC.

#### ➤ Caso PSS+TCSC

O PSS foi instalado no gerador da barra 2 e o TCSC foi instalado na linha 5-7. Na análise técnica da estabilidade transitória deste trabalho, com o sistema com PSS e TCSC, foram fixados os valores do TCSC:  $K_{tcsc}$ ,  $T_2$  e do PSS:  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_w$ , variando-se os parâmetros do PSS:  $K_{pss}$  e do TCSC:  $T_1$  e  $T_w$ . Utilizando algoritmos genéticos e *simulated annealing* construiu-se a Tabela 3.46.

Tabela 3.46: Valores de  $K_{pss}$ ,  $T_1$  e  $T_w$  obtidos para o sistema WSCC.

|                   | AG     | SA     |
|-------------------|--------|--------|
| $K_{pss}$         | 47,295 | 8,8078 |
| $T_1$             | 0,7472 | 1,9866 |
| $T_w$             | 3,9471 | 1,0153 |
| $A_{dot}$         | 60,235 | 61,881 |
| $\zeta_{min}(\%)$ | 5,1516 | 5,174  |

Os valores obtidos a partir dos algoritmos genéticos definem os parâmetros:  $K_{pss}$ ,  $T_1$  e  $T_w$ . A Figura 3.37 ilustra a comparação entre o caso do sistema WSCC com TCSC e com PSS+TCSC após a aplicação de um curto-circuito na linha 4-6 por um tempo de 0,086. As curvas mostram o comportamento do ângulo de todos os geradores com relação ao ângulo do COI. Claramente, há uma melhora no comportamento dos ângulos dos geradores.

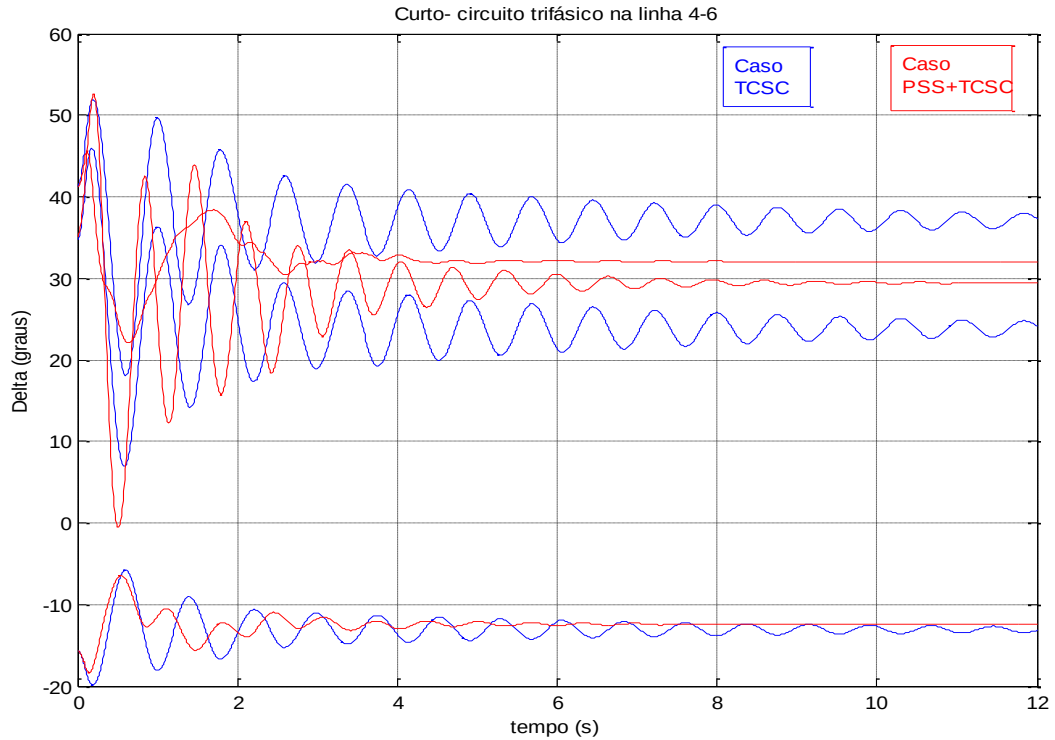


Figura 3.37: Comparação entre caso TCSC e o caso PSS+TCSC para o sistema WSCC.

#### ➤ Caso PSS+SVC+TCSC

O PSS foi instalado no gerador da barra 2, o SVC foi instalado na barra 7 e o TCSC foi instalado na linha 5-7 com extremidade na barra 5. Os parâmetros fixos do PSS:  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_w$ , do SVC:  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_w$  e do TCSC:  $K_{tcsc}$  e  $T_2$ . Os parâmetros  $K_{svc}$ ,  $K_{pss}$ ,  $T_1$  e  $T_w$  serão otimizados de modo a minimizar  $A_{dot}$ . Utilizando algoritmos genéticos e *simulated annealing* chegou-se aos resultados mostrados na Tabela 3.47. O melhor valor de razão de amortecimento foi conseguida com a técnica de algoritmos genéticos.

Tabela 3.47: Valores de  $K_{pss}$ ,  $T_1$ ,  $T_w$  e  $K_{svc}$  obtidos para o sistema WSCC.

|                   | AG      | SA     |
|-------------------|---------|--------|
| $K_{pss}$         | 46,540  | 16,679 |
| $T_1$             | 0,4413  | 1,6903 |
| $T_w$             | 5,5084  | 9,8789 |
| $K_{svc}$         | 100,910 | 54,332 |
| $A_{dot}$         | 52,212  | 53,015 |
| $\zeta_{min}(\%)$ | 6,3642  | 5,2187 |

Os valores obtidos a partir dos algoritmos genéticos definem as constantes  $K_{pss}$ ,  $T_1$ ,  $T_w$  e  $K_{svc}$ . A Figura 3.38 ilustra a comparação entre o caso do sistema WSCC com TCSC e PSS, com PSS e SVC e com PSS+TCSC+SVC após a aplicação de um curto-circuito na linha 4-6 por um tempo de 0,086 s. As curvas mostram o comportamento do ângulo de todos os geradores com relação ao COI.

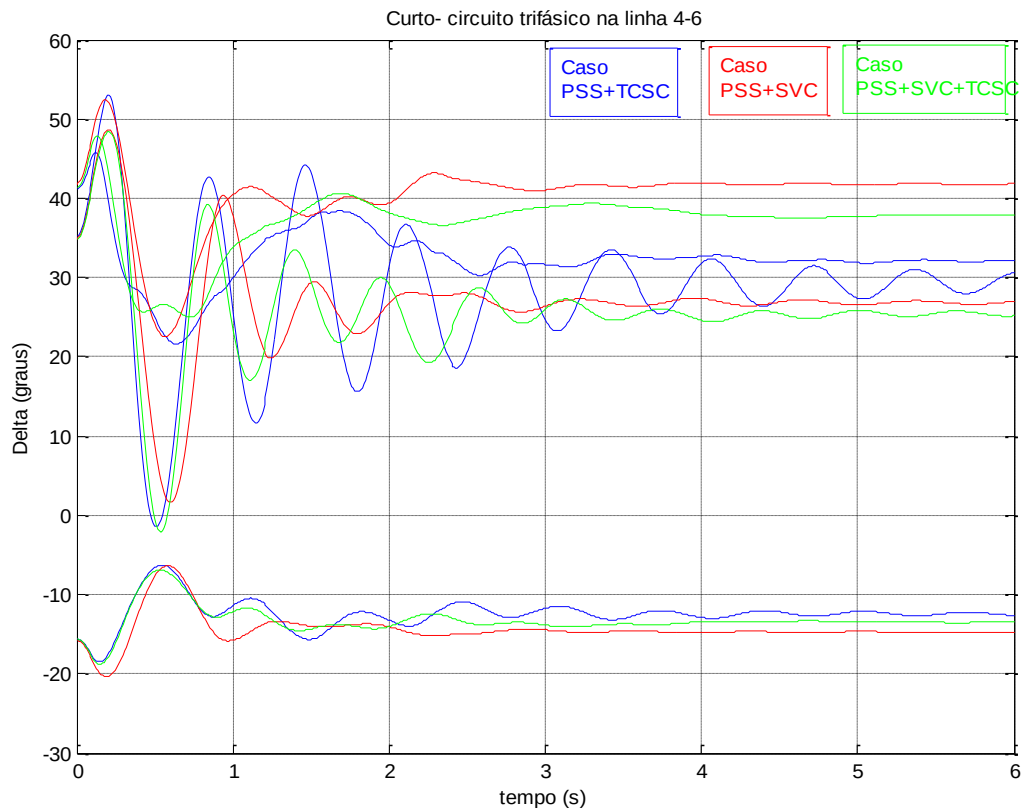


Figura 3.38: Comparação entre os três casos anteriores para o sistema WSCC.

Existem vários métodos para avaliação da estabilidade transitória (AET). Estes métodos incluem métodos na simulação do domínio do tempo, função de energia transitória e métodos híbridos. Muitas pesquisas consideram, resumidas na referência (ZÁRATE-MIÑANO, MILANO e CONEJO, 2011), o limite de estabilidade transitória quando o ângulo de pelo menos um gerador síncrono com relação ao COI ultrapasse  $100^\circ$  (GAN, THOMAS e ZIMMERMAN, 2000). Baseado nestas pesquisas calculou-se o tempo crítico, dados em segundos, para cada um dos casos. Os resultados são apresentados na Tabela 3.48. Houve um aumento significativo nos tempos críticos em todos os casos.

Tabela 3.48: Tempos críticos para diferentes faltas simuladas no sistema WSCC.

| Caso       | Base  | PSS   | SVC   | TCSC  | PSS+SVC | PSS+TCSC | PSS+SVC+TCSC |
|------------|-------|-------|-------|-------|---------|----------|--------------|
| <b>4-6</b> | 0,236 | 0,265 | 0,238 | 0,258 | 0,251   | 0,271    | 0,273        |
| <b>4-5</b> | 0,219 | 0,275 | 0,220 | 0,231 | 0,267   | 0,281    | 0,284        |
| <b>7-8</b> | 0,155 | 0,221 | 0,157 | 0,177 | 0,183   | 0,215    | 0,219        |
| <b>9-6</b> | 0,167 | 0,181 | 0,171 | 0,179 | 0,174   | 0,180    | 0,187        |
| Ganho (s)  | -     | 0,165 | 0,009 | 0,068 | 0,098   | 0,170    | 0,186        |
| Ganho (%)  | -     | 88,82 | 4,98  | 36,18 | 51,15   | 89,63    | 98,62        |

### 3.4.2.2. Sistema New England

#### ➤ Caso Base

A perturbação severa no sistema New England consistiu na aplicação de um curto-circuito trifásico na linha de transmissão 14-15, as proteções abriram a linha em  $t_{cl} = 0,130$  s eliminando o curto-circuito. O valor da área calculado de  $A_{dot}$  é igual a 1.110,50.

#### ➤ Caso PSS

Do mesmo modo que o caso PSS para o sistema WSCC, os valores de  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_w$  foram fixados e variaram-se os valores de  $K_{pss}$ . Portanto, necessita-se encontrar o valor do ganho  $K_{pss}$ . Os valores dos ganhos dos PSS são dados na Tabela 3.49.



Tabela 3.49: Valores de  $K_{pss}$  obtidos para o sistema New England.

|                   | AG     | SA     |
|-------------------|--------|--------|
| $K_{pss}^{30}$    | 17,213 | 15,014 |
| $K_{pss}^{31}$    | 13,371 | 4,341  |
| $K_{pss}^{32}$    | 19,753 | 14,919 |
| $K_{pss}^{33}$    | 22,751 | 5,458  |
| $K_{pss}^{34}$    | 22,762 | 6,498  |
| $K_{pss}^{35}$    | 11,624 | 17,251 |
| $K_{pss}^{36}$    | 7,220  | 14,766 |
| $K_{pss}^{37}$    | 21,981 | 7,829  |
| $K_{pss}^{38}$    | 9,682  | 6,483  |
| $A_{dot}$         | 863,37 | 949,58 |
| $\zeta_{min}(\%)$ | 5,0561 | 5,0324 |

Os valores obtidos a partir dos algoritmos genéticos definem as constantes de  $K_{pss}$ . As Figuras 3.39 e 3.340 ilustram a comparação entre o sistema New England no caso base e o sistema New England com PSS após a aplicação de um curto-circuito na linha 14-15 por um tempo de 0,160 s, respectivamente. As curvas mostram a comparação do comportamento do ângulo de todos os geradores com relação ao COI para o caso base e o caso com PSS no sistema New England. Os PSS melhoram o comportamento dos ângulos dos geradores sem degradar a estabilidade a pequenas perturbações somente com um bloco *lead-lag*.

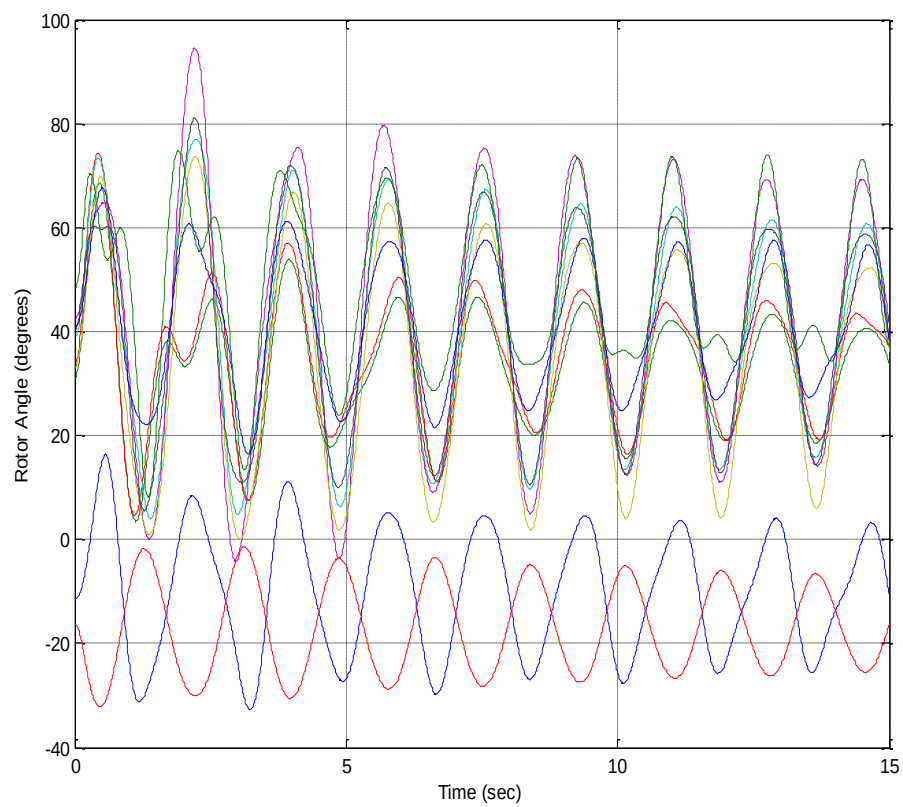


Figura 3.39: Curvas de oscilação dos ângulos dos geradores do sistema New England sem controladores.

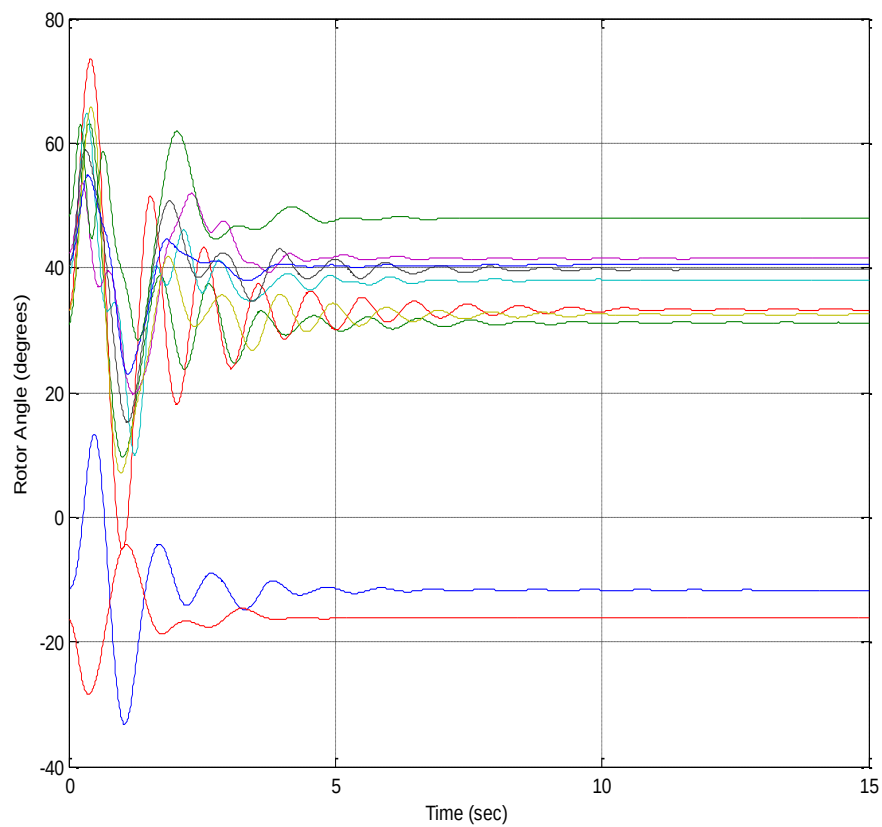


Figura 3.40: Curvas de oscilação dos ângulos dos geradores do sistema New England com PSS.

➤ Caso SVC+PSS

Com exceção do gerador 10, todos os geradores foram equipados com PSS. O SVC foi instalado na barra 2 e a realimentação do POD está associado ao gerador 30. Seguindo o mesmo raciocínio do sistema WSCC construiu-se a Tabela 3.50.

Tabela 3.50: Valores de  $K_{pss}$  e  $K_{svc}$  obtidos para o sistema New England.

|                   | AG      | SA      |
|-------------------|---------|---------|
| $K_{pss}^{30}$    | 2,561   | 6,820   |
| $K_{pss}^{31}$    | 21,453  | 18,563  |
| $K_{pss}^{32}$    | 10,740  | 24,909  |
| $K_{pss}^{33}$    | 24,593  | 24,404  |
| $K_{pss}^{34}$    | 24,111  | 13,089  |
| $K_{pss}^{35}$    | 10,989  | 11,696  |
| $K_{pss}^{36}$    | 7,966   | 7,051   |
| $K_{pss}^{37}$    | 20,882  | 17,462  |
| $K_{pss}^{38}$    | 4,110   | 3,639   |
| $K_{svc}$         | 192,850 | 82,589  |
| $A_{dot}$         | 845,880 | 809,589 |
| $\zeta_{min}(\%)$ | 13,021  | 7,6822  |

Os valores obtidos a partir da técnica *simulated annealing* definem as constantes de  $K_{pss}$  e  $K_{svc}$ . A Figura 3.41 ilustra as curvas dos ângulos dos geradores do sistema New England com PSS e SVC após a aplicação de um curto-circuito na linha 14-15 por um tempo de 0,160 s. As curvas mostram o comportamento dos ângulos de todos os geradores com relação ao ângulo do COI para o caso com PSS+SVC no sistema New England.

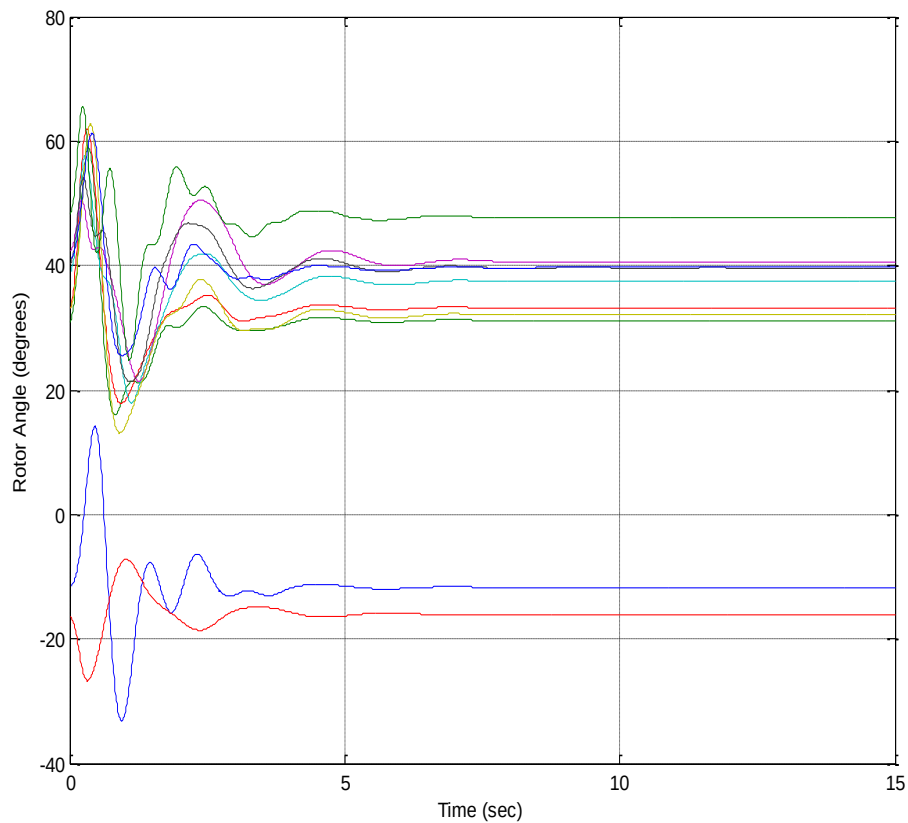


Figura 3.41: Curva de oscilação dos ângulos dos geradores do sistema New England com PSS e SVC.

#### ➤ Caso PSS+TCSC

Seguindo o mesmo raciocínio dos casos anteriores, o TCSC foi instalado na linha 10-32 e em todos os geradores, com exceção do gerador 39, foram instalados PSS. Construiu-se a Tabela 3.51 a partir de um processo de otimização utilizando algoritmos genéticos e *simulated annealing*.

Os valores obtidos a partir da técnica de algoritmos genéticos definem as constantes de  $K_{pss}$ ,  $T_1$  e  $T_w$ . A Figura 3.42 ilustra o comportamento dos ângulos dos geradores do sistema *New England* com PSS+TCSC após a aplicação de um curto-circuito na linha 14-15 por um tempo de 0,160 s. As curvas mostram a comparação do comportamento do ângulo de todos os geradores com relação ao COI no caso com PSS+TCSC no sistema New England.

Tabela 3.51: Valores de  $K_{pss}$ ,  $T_1$  e  $T_w$  obtidos para o sistema New England.

|                   | AG     | SA     |
|-------------------|--------|--------|
| $K_{pss}^{30}$    | 37,999 | 15,338 |
| $K_{pss}^{31}$    | 44,072 | 20,202 |
| $K_{pss}^{32}$    | 7,031  | 9,876  |
| $K_{pss}^{33}$    | 49,236 | 13,816 |
| $K_{pss}^{34}$    | 11,238 | 2,657  |
| $K_{pss}^{35}$    | 4,962  | 9,749  |
| $K_{pss}^{36}$    | 7,472  | 17,828 |
| $K_{pss}^{37}$    | 30,573 | 10,783 |
| $K_{pss}^{38}$    | 7,580  | 8,627  |
| $T_1$             | 0,3419 | 1,5979 |
| $T_w$             | 16,375 | 12,166 |
| $A_{dot}$         | 676,71 | 725,80 |
| $\zeta_{min}(\%)$ | 8,0437 | 7,1982 |

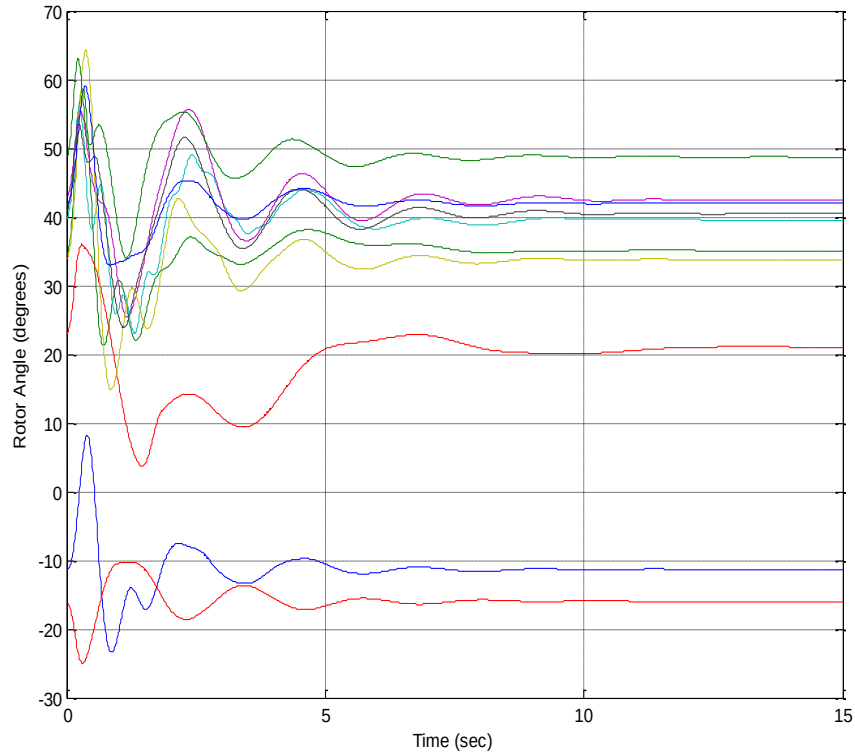


Figura 3.42: Curvas de oscilação dos ângulos dos geradores do sistema New England com PSS e TCSC.

➤ Caso PSS+SVC+TCSC

Foi considerada a mesma configuração dos casos anteriores, ou seja, todos os geradores com PSS, exceto o gerador da barra 39, o SVC instalado na barra 20 e o TCSC instalado na linha 10-32. A Tabela 3.52 mostra os parâmetros de todos os PSS, SVC e TCSC. A Figura 3.43 ilustra o comportamento de todos os geradores após a aplicação de um curto-circuito por um tempo de 160 ms.

Um resumo é apresentado na Tabela 3.53. Aplicou-se em diferentes barras curtos-circuitos trifásicos. Observa-se que com a instalação de PSS, SVC e TCSC o sistema apresenta uma melhora muito grande no valor do tempo crítico.

Tabela 3.52: Valores de  $K_{pss}$ ,  $K_{svc}$ ,  $T_1$  e  $T_w$  para o sistema New England.

|                   | AG     | SA     |
|-------------------|--------|--------|
| $K_{pss}^{30}$    | 4,135  | 19,997 |
| $K_{pss}^{31}$    | 7,964  | 14,209 |
| $K_{pss}^{32}$    | 8,427  | 17,749 |
| $K_{pss}^{33}$    | 7,971  | 7,120  |
| $K_{pss}^{34}$    | 15,988 | 19,683 |
| $K_{pss}^{35}$    | 12,282 | 1,276  |
| $K_{pss}^{36}$    | 15,036 | 14,167 |
| $K_{pss}^{37}$    | 9,004  | 19,945 |
| $K_{pss}^{38}$    | 9,680  | 19,961 |
| $T_1$             | 0,548  | 1,868  |
| $T_w$             | 11,096 | 15,788 |
| $K_{svc}$         | 8,572  | 95,575 |
| $A_{dot}$         | 603,53 | 637,14 |
| $\zeta_{min}(\%)$ | 5,7899 | 8,1220 |

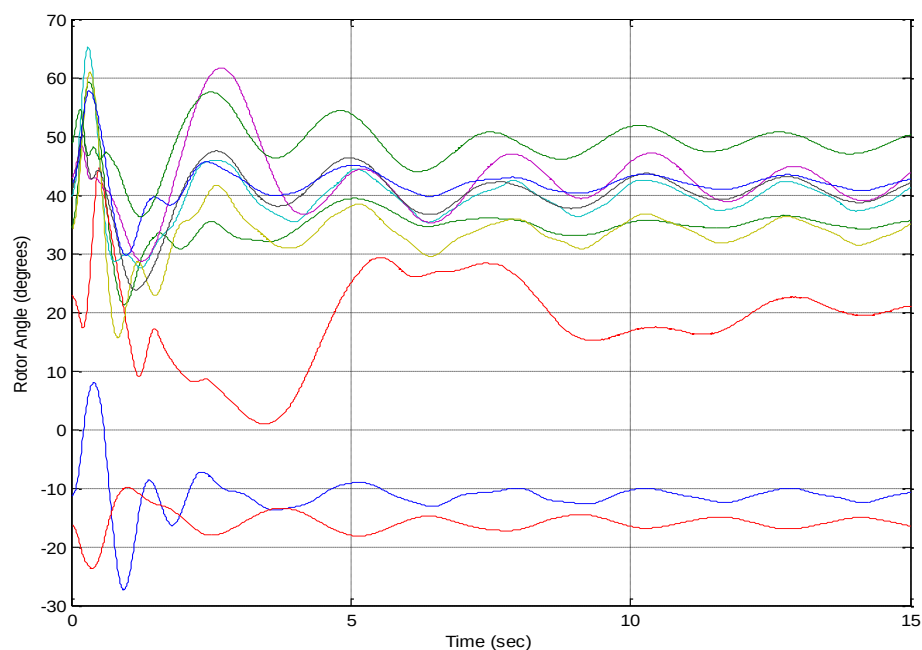


Figura 3.43: Comportamento dos ângulos dos geradores do sistema New England com PSS, SVC e TCSC.

Tabela 3.53: Tempo crítico para todos os casos no sistema New England.

| Caso<br>(saída de linha) | Base  | PSS    | PSS+SVC | PSS+TCSC | PSS+SVC+TCSC |
|--------------------------|-------|--------|---------|----------|--------------|
| 14-15                    | 0,174 | 0,291  | 0,292   | 0,359    | 0,341        |
| 26-27                    | 0,045 | 0,139  | 0,139   | 0,147    | 0,205        |
| 4-5                      | 0,191 | 0,273  | 0,291   | 0,313    | 0,303        |
| 21-22                    | 0,057 | 0,187  | 0,165   | 0,159    | 0,187        |
| Ganho (s)                | -     | 0,423  | 0,420   | 0,511    | 0,569        |
| Ganho (%)                | -     | 547,13 | 491,13  | 575,81   | 738,24       |

### 3.4.2.3. Sistema brasileiro Sul-Sudeste

Três casos foram analisados: caso base, caso com PSS e caso com PSS, SVC e TCSC.

#### ➤ Caso Base

A lista de contingência para o sistema brasileiro Sul-Sudeste é dada pela saída da linha 100-101. Todos os geradores são equipados com reguladores automáticos de tensão. Aplicou-se um curto-circuito trifásico na linha 100-101 que liga Marimbondo a Araraquara por um tempo de 0,190 s. O valor calculado da área  $A_{dot} = 2045,90$ . O tempo de simulação para este sistema foi de 3 s.

➤ Caso com PSS

Foram instalados 19 PSS nas respectivas máquinas: 18, 20, 22, 26, 30, 31, 300, 303, 401, 507, 512, 514, 518, 519, 753, 806, 917, 1107 e 1162. Os parâmetros otimizados calculados por algoritmos genéticos e *simulated annealing* são mostrados na Tabela 3.54. O índice  $A_{dot}$  foi menor com *simulated annealing*, portanto os parâmetros otimizados com essa técnica serão considerados nas simulações.

Tabela 3.54:  $K_{pss}$  para o sistema Sul-Sudeste brasileiro.

|                   | AG      | SA      |
|-------------------|---------|---------|
| $K_{pss}^{18}$    | 4,8300  | 4,5651  |
| $K_{pss}^{20}$    | 2,7550  | 4,6274  |
| $K_{pss}^{22}$    | 2,0300  | 2,4670  |
| $K_{pss}^{26}$    | 1,0476  | 1,9056  |
| $K_{pss}^{30}$    | 2,5991  | 3,7243  |
| $K_{pss}^{31}$    | 2,3509  | 4,7102  |
| $K_{pss}^{300}$   | 3,9788  | 4,4336  |
| $K_{pss}^{303}$   | 4,3772  | 4,4270  |
| $K_{pss}^{401}$   | 1,1169  | 1,2364  |
| $K_{pss}^{507}$   | 2,9767  | 3,3317  |
| $K_{pss}^{512}$   | 3,7279  | 3,0427  |
| $K_{pss}^{514}$   | 2,1679  | 2,5135  |
| $K_{pss}^{518}$   | 1,7125  | 3,6577  |
| $K_{pss}^{519}$   | 4,9307  | 3,8276  |
| $K_{pss}^{753}$   | 3,8734  | 4,7731  |
| $K_{pss}^{806}$   | 3,7013  | 3,2590  |
| $K_{pss}^{917}$   | 3,3048  | 3,7929  |
| $K_{pss}^{1107}$  | 3,1630  | 2,8429  |
| $K_{pss}^{1162}$  | 3,7851  | 4,8116  |
| $A_{dot}$         | 1.405,4 | 1.386,6 |
| $\zeta_{min}(\%)$ | 6,5482  | 6,1200  |



As Figuras 3.44 e 3.45 ilustram a comparação entre o caso base e o caso com os 19 PSS instalados no sistema brasileiro após um curto-circuito na barra 100. Observa-se que no caso base sem PSS o sistema é instável e após a instalação dos PSS o sistema tem suas oscilações amortecidas sendo o sistema estável para pequenas perturbações.

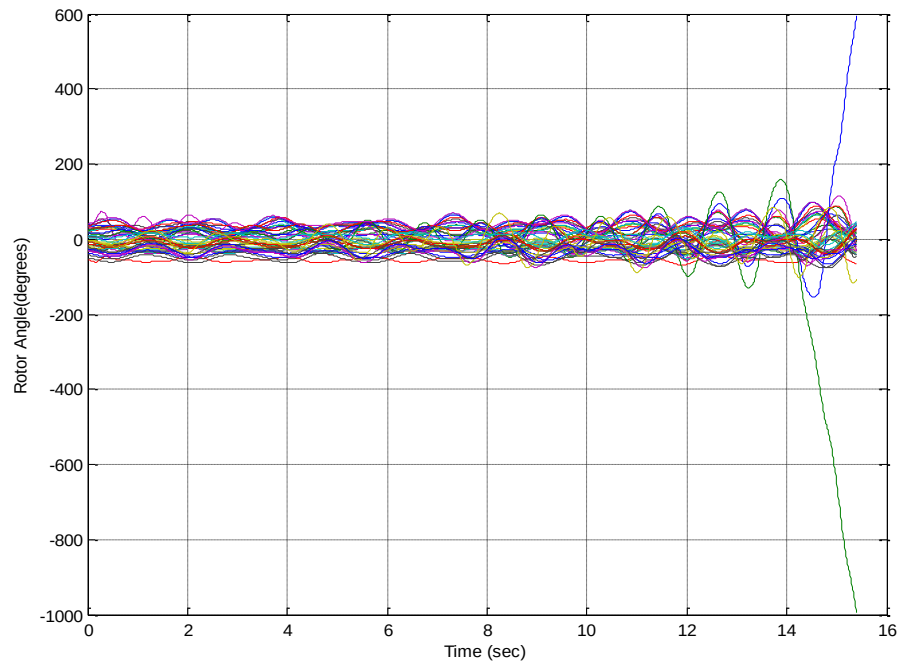


Figura 3.44: Comportamento dos ângulos dos geradores do sistema brasileiro sem controladores.

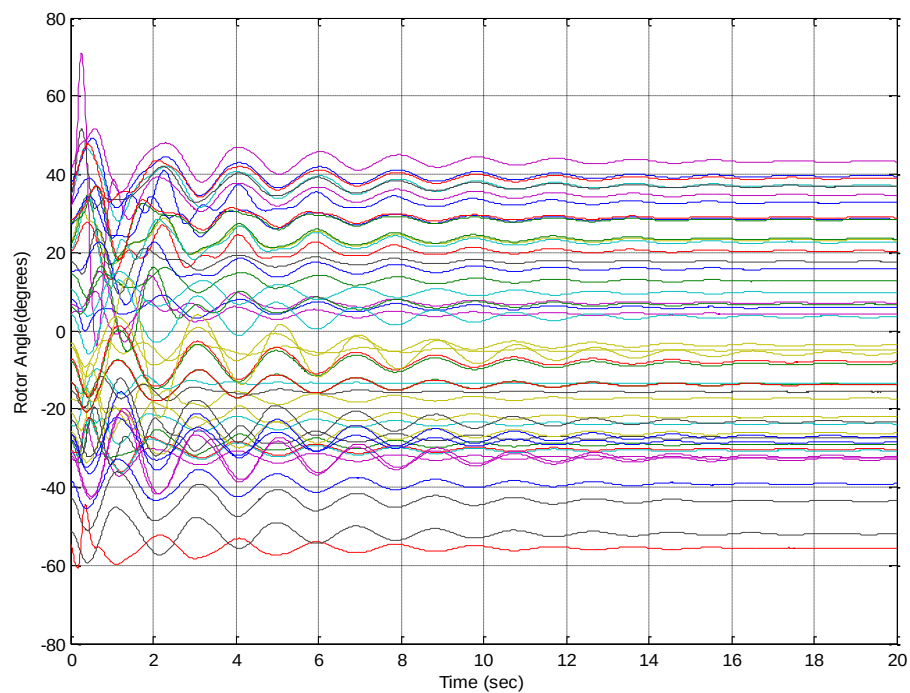


Figura 3.45: Comportamento dos ângulos dos geradores do sistema brasileiro com PSS.

➤ Caso PSS+SVC+TCSC

Os PSS, TCSC e SVC foram instalados segundo a análise da estabilidade a pequenas perturbações. Os parâmetros obtidos dos PSS, TCSC e SVC são dados na Tabela 3.55.

Tabela 3.55: Parâmetros de  $K_{pss}$ ,  $K_{svc}$ ,  $T_1$  e  $T_w$ .

|                   | AG       | SA       |
|-------------------|----------|----------|
| $K_{pss}^{18}$    | 3,5892   | 1,0087   |
| $K_{pss}^{20}$    | 5,4017   | 5,3532   |
| $K_{pss}^{22}$    | 2,7706   | 1,2338   |
| $K_{pss}^{26}$    | 3,0373   | 1,0014   |
| $K_{pss}^{30}$    | 5,4771   | 5,9995   |
| $K_{pss}^{31}$    | 2,9228   | 1,0071   |
| $K_{pss}^{300}$   | 4,9069   | 6,0000   |
| $K_{pss}^{303}$   | 2,5619   | 5,9956   |
| $K_{pss}^{401}$   | 5,4219   | 3,3569   |
| $K_{pss}^{507}$   | 1,5422   | 2,2899   |
| $K_{pss}^{512}$   | 4,0158   | 5,5011   |
| $K_{pss}^{514}$   | 1,8996   | 5,9711   |
| $K_{pss}^{518}$   | 3,8534   | 1,0055   |
| $K_{pss}^{519}$   | 4,4874   | 3,4509   |
| $K_{pss}^{753}$   | 1,0988   | 4,3283   |
| $K_{pss}^{806}$   | 4,2626   | 1,0122   |
| $K_{pss}^{917}$   | 4,4744   | 1,1083   |
| $K_{pss}^{1.107}$ | 5,8983   | 5,9964   |
| $K_{pss}^{1.162}$ | 2,0950   | 5,9954   |
| $K_{svc}$         | 15,2111  | 16,0522  |
| $T_1$             | 0,4718   | 1,9929   |
| $T_w$             | 8,2506   | 4,7141   |
| $A_{dot}$         | 1.327,30 | 1.322,80 |
| $\zeta_{min}(\%)$ | 5,1589   | 6,1481   |

Os valores obtidos por *simulated annealing* serão escolhidos para determinar os parâmetros dos PSS e FACTS. Na Figura 3.46 têm-se as curvas de oscilação de todos os geradores quando os PSS, SVC e TCSC são instalados no sistema brasileiro.

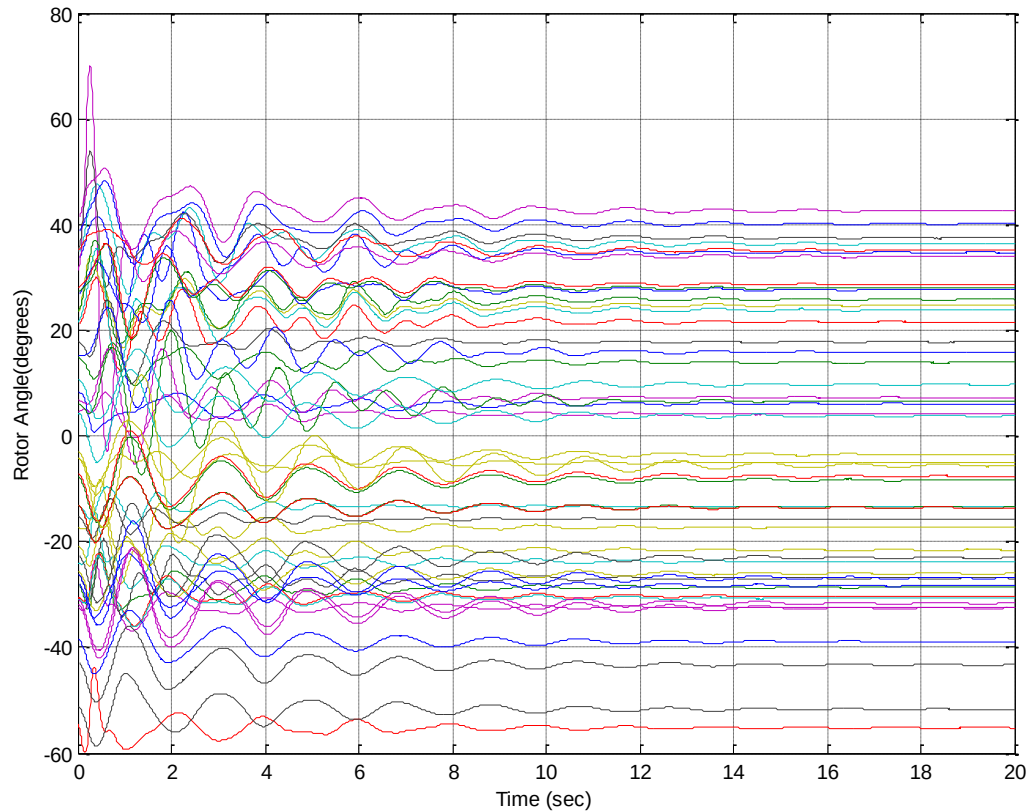


Figura 3.46: Comportamento dos ângulos dos geradores do sistema brasileiro com PSS, SVC e TCSC.

Na Tabela 3.56 são mostrados os tempos críticos de eliminação de falta para diferentes tipos de perturbações no sistema Sul-Sudeste brasileiro.

Tabela 3.56: Tempo crítico para diferentes tipos de perturbação no sistema Sul-Sudeste brasileiro.

| Caso<br>(curto-circuito na linha) | $t_{crítico}$ (s)<br>sistema com PSS | $t_{crítico}$ (s)<br>sistema com PSS+SVC+TCSC |
|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>100-101</b>                    | 0,262                                | 0,267                                         |
| <b>1215-1258</b>                  | 0,346                                | 0,346                                         |
| <b>999-1060</b>                   | 0,302                                | 0,329                                         |
| <b>561-581</b>                    | 0,373                                | 0,377                                         |

### 3.5. Discussão dos resultados

Para todos os sistemas e casos considerados, os controladores PSS, SVC e TCSC, quando sintonizados e coordenados simultaneamente, proporcionam um aumento significativo no amortecimento e no tempo crítico do sistema. A configuração PSS+SVC+TCSC foi a mais promissora, comprovando que o conjunto PSS+FACTS são uma excelente alternativa para adicionar um significativo amortecimento no sistema em estudo.

O tempo total de simulações da análise técnica da estabilidade a pequenas perturbações e da estabilidade transitória dos algoritmos de IA, mesmo para o sistema Sul-Sudeste brasileiro, não foi muito alto. Na análise da estabilidade a pequenas perturbações o tempo computacional reflete na quantidade de pontos de operação considerados nos sistemas teste. Neste trabalho, para cada sistema teste, foi considerado dois cenários. Em aplicações reais, deve-se considerar vários cenários, conseqüentemente o tempo computacional aumentar substancialmente. A principal causa para este fenômeno se deve ao algoritmo de cálculo dos autovalores da matriz de malha fechada. Atualmente, a mais utilizada é a metodologia do QR, onde todos os autovalores da matriz de estado são calculados considerando todos os pontos de operação pré-estabelecidos.

Confirmou-se que as técnicas de IA são boas alternativas no projeto e sintonização de PSS e FACTS. Através da função objetivo  $F_2$ , comparou-se técnicas de IA com outras técnicas convencionais. A função objetivo  $F_2$  demonstrou-se muito poderosa no projeto dos PSS.

Aplicando a metodologia proposta, os PSS e Controladores FACTS melhoram a estabilidade eletromecânica, sendo a configuração com PSS+SVC+TCSC a que obteve melhores resultados.

### 4. Metodologia para análise do impacto econômico dos PSS e FACTS na estabilidade eletromecânica

#### 4.1. Introdução

O objetivo deste capítulo é apresentar os resultados obtidos através da aplicação da metodologia proposta para análise econômica com a inclusão dos PSS, SVC e TCSC. A seção 4.2 apresenta os conceitos fundamentais sobre o fluxo de potência ótimo. O fluxo de potência ótimo é uma ferramenta essencial para quantificar o impacto econômico dos PSS e FACTS. As metodologias propostas para quantificar o impacto econômico dos PSS e FACTS na estabilidade a pequenas perturbações é exposta na seção 4.3. Na seção 4.4 apresenta o impacto econômico dos PSS e FACTS na estabilidade transitória. As metodologias propostas serão aplicadas em dois sistemas teste: WSCC e New England. As simulações destes sistemas foram conduzidas em ambiente *Matlab*. Utilizou-se também o aplicativo PSAT, para realização das simulações dinâmicas e estáticas.

#### 4.2. O problema do fluxo de potência ótimo

Devido às recentes mudanças no setor elétrico, tais como desregulamentação e privatização, a relação entre os controladores do sistema de energia elétrica e os mercados elétricos ficaram mais próximas. O efeitos destes controladores na estabilidade do sistema, do ponto de vista econômico, é uma recente área de pesquisa. Nesta seção será apresentada a metodologia para quantificar o impacto econômica dos controladores FACTS e PSS na estabilidade eletromecânica.

O fluxo de potência ótimo é uma das ferramentas mais utilizadas na literatura para quantificar o impacto econômico. O problema do FPO envolve a minimização de alguma função de custo enquanto satisfaz um conjunto de restrições.

A função custo de cada gerador é aproximada por uma função quadrática (WOOD e WOLLENBERG, 1996) dada pela equação (4.1).

$$C_i(P_i) = a_i * P_{gi}^2 + b_i * P_{gi} + c_i \quad (4.1)$$

Onde  $C_i(P_i)$  é o custo de combustível do gerador em (\$/h),  $P_{gi}$  é a potência gerada do gerador em (MW), e  $a_i, b_i, c_i$  são os coeficientes da função custo da  $i$ -ésima unidade.

Matematicamente, o fluxo de potência ótimo pode ser formulado por (4.2) sujeito às restrições de igualdade (4.3) e às restrições de desigualdade(4.4)-(4.9).

$$\min \sum_{i=1}^{N_g} C_i(P_{gi}) \quad (4.2)$$

Sujeito a

$$P_{gi} - P_{di} - V_i \sum_{j=1}^{N_b} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (4.3)$$

$$Q_{gi} - Q_{di} - V_i \sum_{j=1}^{N_b} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0$$

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{max}, i = 1, \dots, N_g \quad (4.4)$$

$$Q_{gi}^{min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{max}, i = 1, \dots, N_g \quad (4.5)$$

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max}, i = 1, \dots, N_b \quad (4.6)$$

$$|S_i| \leq S_i^{max}, i = 1, \dots, N_l \quad (4.7)$$

$$B_{svc}^{min} \leq B_{svc} \leq B_{svc}^{max} \quad (4.8)$$

$$x_{tcsc}^{min} \leq x_{tcsc} \leq x_{tcsc}^{max} \quad (4.9)$$

Onde  $N_b$  é o número de barras do sistema;  $N_g$  é o número de geradores do sistema;  $N_l$  é o número de linhas de transmissão do sistema;  $P_{gi}$  e  $Q_{gi}$  são as potências ativa e reativa da barra de geração  $i$ , respectivamente;  $P_{di}$  e  $Q_{di}$  são as potências ativa e reativa da carga da barra  $i$ , respectivamente;  $V_i$  é o valor da tensão da barra  $i$ ;  $\theta_{ij}$  é a diferença dos ângulos das tensões das barras  $i$  e  $j$ ;  $G_{ij}$  e  $B_{ij}$  são os valores da admitância de transferência entre as barras  $i$  e  $j$ ;  $B_{svc}$  é o valor da susceptância do SVC e  $x_{tcsc}$  é o valor da reatância do TCSC.

As restrições consideradas neste trabalho foram: limite de tensões nas barras do sistema (4.6) de  $0,90 \leq V_i \leq 1,10 pu$ ; potência ativa e reativa dos geradores (4.4) e (4.5), respectivamente; limites de potência aparente nas linhas de transmissão (4.7); limites de reatância do TCSC (4.9); limite de susceptância do SVC (4.8) e a não violação das equações do fluxo de potência (4.3).

### 4.3. Metodologia para análise do impacto técnico-econômico dos PSS e FACTS na estabilidade a pequenas perturbações

#### 4.3.1. Desenvolvimento da metodologia

A função objetivo do FPO utilizado neste trabalho é minimizar o custo de geração do sistema obedecendo várias restrições operacionais. Para garantir que o sistema funcione com amortecimento positivo e acima de um valor pré-definido  $\zeta_{\min}$ , adicionou-se mais uma restrição no FPO. Portanto, acrescentou-se uma desigualdade após (4.9).

$$\min \sum_{i=1}^{N_g} C_i(P_{gi}) \quad (4.2)$$

Sujeito a:

(4.3)-(4.9)

$$\zeta_i \geq \zeta_{\min}, i = 1, 2, \dots, N_{\text{autovalores}}$$

Os autovalores da matriz de estado do sistema variam a medida que a matriz de estado do sistema varia, visto que, **A** corresponde ao conjunto de equações diferenciais e algébricas linearizadas em torno de um ponto de operação. Variando-se as potências dos geradores, altera-se o ponto de operação do sistema, e consequentemente os autovalores do sistema são modificados. Em geral, qualquer técnica de otimização pode ser utilizado. A Figura 4.1 ilustra o fluxograma da análise econômica dos PSS, SVC e TCSC. A técnica de otimização utilizada foi algoritmos genéticos.

Os parâmetros dos controladores PSS e FACTS foram determinados utilizando a metodologia empregada na análise técnica.

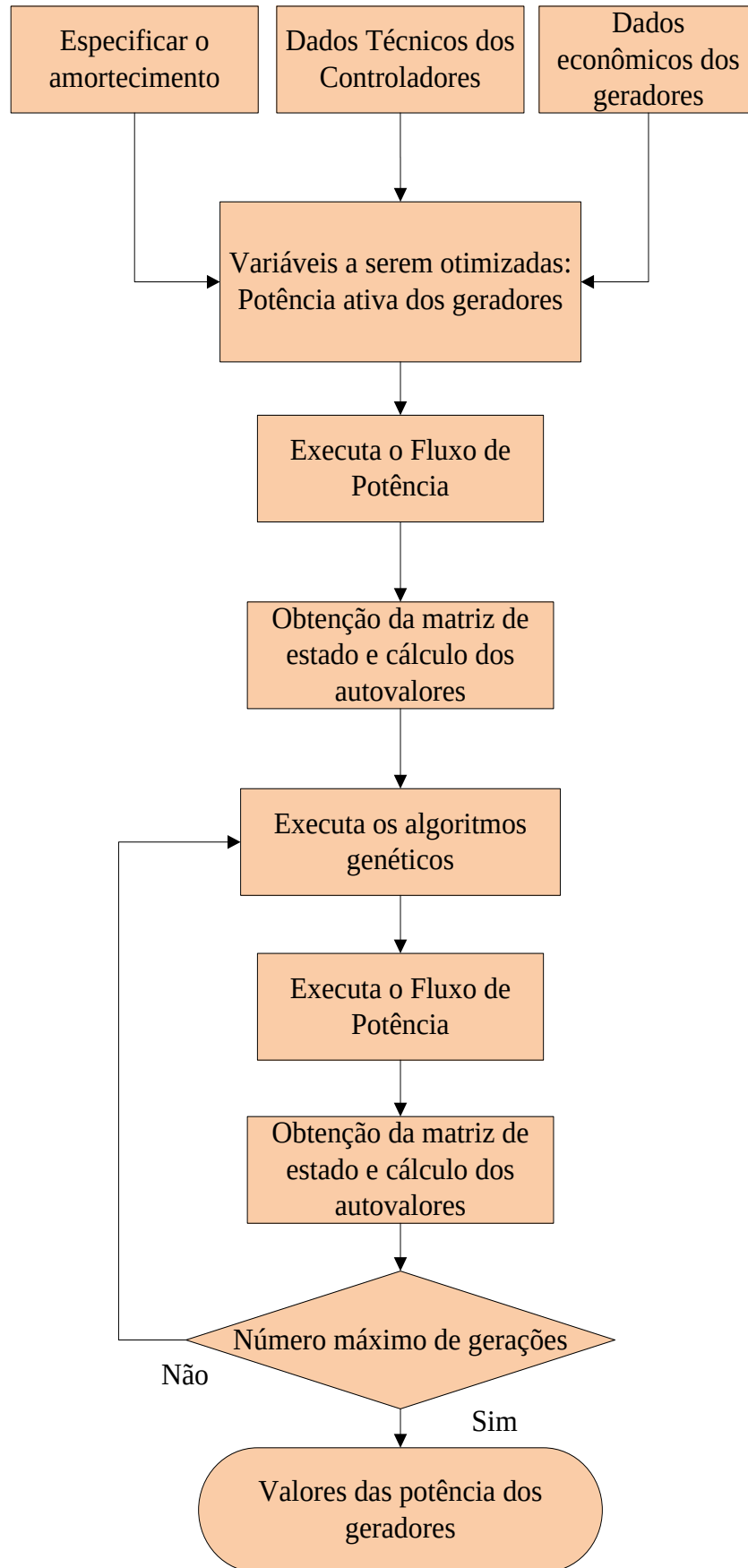


Figura 4.1: Fluxograma para análise econômica da estabilidade a pequenas perturbações.



### 4.3.2. Aplicação a sistemas teste

#### 4.3.2.1. Sistema WSCC

Seis casos foram considerados para este sistema: caso base, caso com PSS, caso com SVC, caso com TCSC, caso com PSS/SVC e caso PSS/TCSC. As razões de amortecimento consideradas foram:  $\zeta_{min} = 5\%$ ,  $\zeta_{min} = 7\%$ ,  $\zeta_{min} = 10\%$  e  $\zeta_{min} = 15\%$ .

As potências obtidas após o processo de otimização são mostradas na Tabela 4.1 para quatro casos. As tensões com as potências especificadas para os casos: base, PSS, PSS e SVC e PSS e TCSC estão entre os limites mínimo e máximo especificados. Os limites mínimos e máximos especificados para todas as tensões nas barras foram de 0,90 e 1,10 p.u, respectivamente.

Tabela 4.1: Resultado do FPO para alguns dos casos do sistema WSCC.

|                      |          | Casos  |        |         |          |
|----------------------|----------|--------|--------|---------|----------|
|                      |          | Base   | PSS    | PSS+SVC | PSS+TCSC |
| $\zeta_{min} = 5\%$  | $P_{g1}$ | 134,08 | 90,79  | 72,07   | 68,32    |
|                      | $P_{g2}$ | 98,45  | 120,55 | 137,74  | 123,50   |
|                      | $P_{g3}$ | 82,46  | 107,46 | 110,00  | 125,52   |
| $\zeta_{min} = 7\%$  | $P_{g1}$ | 34,10  | 91,03  | 89,88   | 94,88    |
|                      | $P_{g2}$ | 59,90  | 64,83  | 143,10  | 120,14   |
|                      | $P_{g3}$ | 221,08 | 163,62 | 86,11   | 102,18   |
| $\zeta_{min} = 10\%$ | $P_{g1}$ | 219,54 | 208,45 | 124,74  | 63,46    |
|                      | $P_{g2}$ | 25,84  | 44,30  | 137,99  | 177,92   |
|                      | $P_{g3}$ | 69,61  | 65,57  | 55,52   | 76,91    |
| $\zeta_{min} = 15\%$ | $P_{g1}$ | -      | 227,20 | 147,33  | 86,53    |
|                      | $P_{g2}$ | -      | 29,59  | 50,55   | 66,05    |
|                      | $P_{g3}$ | -      | 62,09  | 120,35  | 164,57   |

### 4.3.2.2. Sistema New England

Quatro casos foram considerados para este sistema: caso base, caso com PSS, caso com PSS/SVC e caso PSS/TCSC. As razões de amortecimentos consideradas foram:  $\zeta_{min} = 5\%$  e  $\zeta_{min} = 8\%$ . As potências obtidas após o processo de otimização são mostradas na Tabela 4.2 para os quatro casos. As tensões de todos os casos estão entre os limites especificados.

Tabela 4.2: Resultado do FPO para todos os casos do sistema New England.

|                     |           | Casos  |        |         |          |
|---------------------|-----------|--------|--------|---------|----------|
|                     |           | Base   | PSS    | PSS+SVC | PSS+TCSC |
| $\zeta_{min} = 5\%$ | $P_{g30}$ | 233,44 | 214,70 | 287,36  | 255,99   |
|                     | $P_{g31}$ | 722,12 | 534,39 | 615,54  | 518,95   |
|                     | $P_{g32}$ | 525,03 | 696,11 | 662,62  | 733,26   |
|                     | $P_{g33}$ | 663,12 | 606,32 | 675,28  | 613,51   |
|                     | $P_{g34}$ | 492,30 | 498,74 | 569,36  | 469,52   |
|                     | $P_{g35}$ | 668,31 | 677,02 | 623,85  | 603,46   |
|                     | $P_{g36}$ | 624,64 | 505,65 | 528,62  | 630,00   |
|                     | $P_{g37}$ | 483,04 | 529,68 | 486,14  | 546,58   |
|                     | $P_{g38}$ | 825,40 | 981,27 | 793,60  | 853,77   |
|                     | $P_{g39}$ | 958,92 | 960,42 | 952,51  | 972,67   |
| $\zeta_{min} = 8\%$ | $P_{g30}$ | -      | 265,42 | 221,43  | 234,73   |
|                     | $P_{g31}$ | -      | 581,20 | 658,94  | 534,01   |
|                     | $P_{g32}$ | -      | 744,87 | 598,11  | 736,27   |
|                     | $P_{g33}$ | -      | 586,76 | 670,94  | 658,16   |
|                     | $P_{g34}$ | -      | 543,99 | 553,38  | 509,27   |
|                     | $P_{g35}$ | -      | 644,83 | 581,46  | 734,13   |
|                     | $P_{g36}$ | -      | 512,71 | 643,28  | 456,67   |
|                     | $P_{g37}$ | -      | 470,96 | 547,13  | 524,84   |
|                     | $P_{g38}$ | -      | 949,44 | 786,21  | 869,32   |
|                     | $P_{g39}$ | -      | 900,95 | 936,89  | 941,43   |

#### 4.3.2.3. Discussão de resultados da aplicação do FPO com restrição de estabilidade a pequenas perturbações

Os resultados obtidos dos custos de geração para os sistemas WSCC e New England são mostrados nas Tabelas 4.3 e 4.4, respectivamente. Os PSS e controladores FACTS diminuem os custos de geração (\$/h) considerando um limite mínimo na razão de amortecimento do sistema. O PSS+TCSC apresenta os melhores resultados para os dois sistemas teste. A Figura 4.2 ilustra uma típica curva do comportamento do custo de geração versus a razão de amortecimento do sistema. As curvas demonstram que o TCSC para uma mesma razão de amortecimento (por exemplo 10%) apresenta um custo de geração menor comparado a instalação do SVC. Obviamente, devem considerar-se outras restrições para se chegar a uma conclusão final.

Tabela 4.3: Impacto dos PSS e FACTS no custo de geração do sistema WSCC.

|                 | 5%     | 7%     | 10%    | 15%    |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|
| <b>Base</b>     | 15.732 | 16.023 | 16.974 | -      |
| <b>PSS</b>      | 15.544 | 15.734 | 16.528 | 16.838 |
| <b>SVC</b>      | 15.582 | 15.945 | 16.769 | -      |
| <b>TCSC</b>     | 15.450 | 15.489 | 15.663 | 16.087 |
| <b>PSS+SVC</b>  | 15.542 | 15.555 | 15.691 | 15.936 |
| <b>PSS+TCSC</b> | 15.444 | 15.487 | 15.521 | 15.623 |

Tabela 4.4: Impacto dos PSS e FACTS no custo de geração do sistema New England.

|                 | 5%     | 8%     |
|-----------------|--------|--------|
| <b>Base</b>     | 62.350 | -      |
| <b>PSS</b>      | 62.137 | 62.227 |
| <b>PSS+SVC</b>  | 62.032 | 62.147 |
| <b>PSS+TCSC</b> | 62.053 | 62.141 |

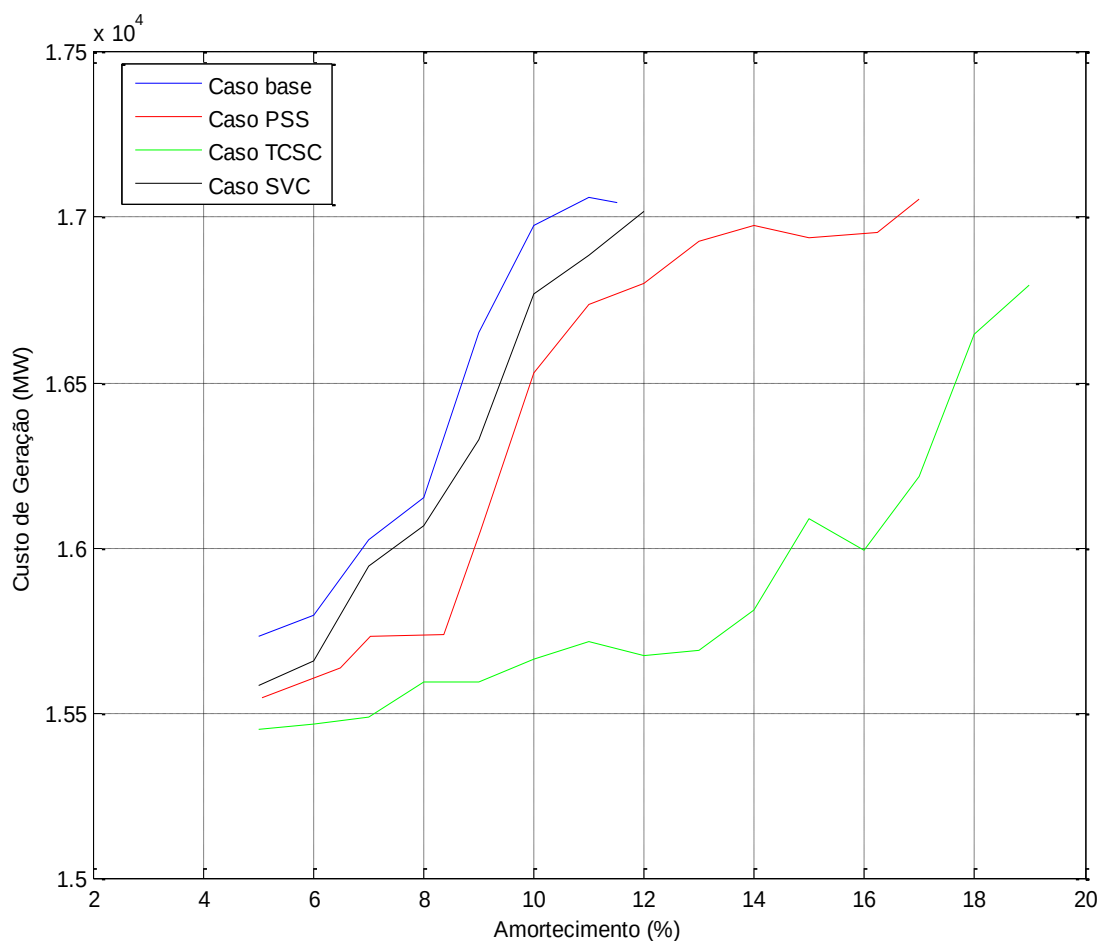


Figura 4.2: Curva do amortecimento versus custo de geração no sistema WSCC.

## 4.4. Metodologia para análise do impacto técnico-econômico dos PSS e FACTS na estabilidade transitória

### 4.4.1. Desenvolvimento da metodologia

O passo de integração foi de 0,001 segundos para simulação da estabilidade transitória, o período total de simulação foi de 4 segundos. O modelo dos geradores utilizado nestas simulações equivale ao tipo 4 do *Toolbox* PSAT (ver apêndice D). Dois sistemas testes foram utilizados: WSCC e New England. Os parâmetros dos controladores PSS e FACTS foram projetados baseado na metodologia da análise técnica.

Por ser de simples manipulação e por ser possível utilizá-lo para qualquer modelo de sistema de energia elétrica, os métodos indiretos serão utilizados na análise econômica da estabilidade transitória neste trabalho.

Para simplificar o critério da estabilidade transitória é definido o desvio dos ângulos dos rotores com relação ao COI, e então a restrição de desigualdade é formulada pela expressão (4.10).

$$|\delta_i - \delta_{coi}|_{max} \leq \delta_{max} \quad (4.10)$$

Em que  $|\delta_i - \delta_{coi}|_{max}$  corresponde ao máximo desvio angular do gerador  $i$  com relação ao ângulo do COI e  $\delta_{max}$  é o desvio angular máximo permissível.

A escolha do  $\delta_{max}$  como critério de estabilidade transitória não se deve somente por que é de fácil aplicação. Através deste critério pode-se simular sistemas teste com modelos de geradores mais detalhados. O valor de  $\delta_{max}$  é frequentemente baseado na experiência do operador. Em geral,  $\delta_{max}$  está na faixa de  $100^\circ$  a  $120^\circ$ . Neste trabalho,  $\delta_{max} = 100^\circ$  (GAN, THOMAS e ZIMMERMAN, 2000). O fluxograma da análise econômica da estabilidade transitória é ilustrado na Figura 4.3.

$$\min \sum_{i=1}^{N_g} C_i(P_{gi}) \quad (4.2)$$

Sujeito a:

$$(4.3)-(4.9)$$

$$|\delta_i - \delta_{coi}|_{max} \leq \delta_{max} \quad (4.10)$$

Logo, a função objetivo neste caso é minimizar o custo de geração (4.2) sujeito às restrições (4.3) – (4.9) e à restrição de estabilidade transitória (4.10). Um FPO com restrição de estabilidade transitória será executado com a inclusão dos PSS, SVC e TCSC.

Os parâmetros dos controladores PSS e FACTS foram determinados utilizando a metodologia empregada na análise técnica. Entretanto, não foi considerada em conjunto a restrição de estabilidade a pequenas perturbações. Neste caso, os PSS e Controladores FACTS foram projetados somente para melhorar a estabilidade transitória.

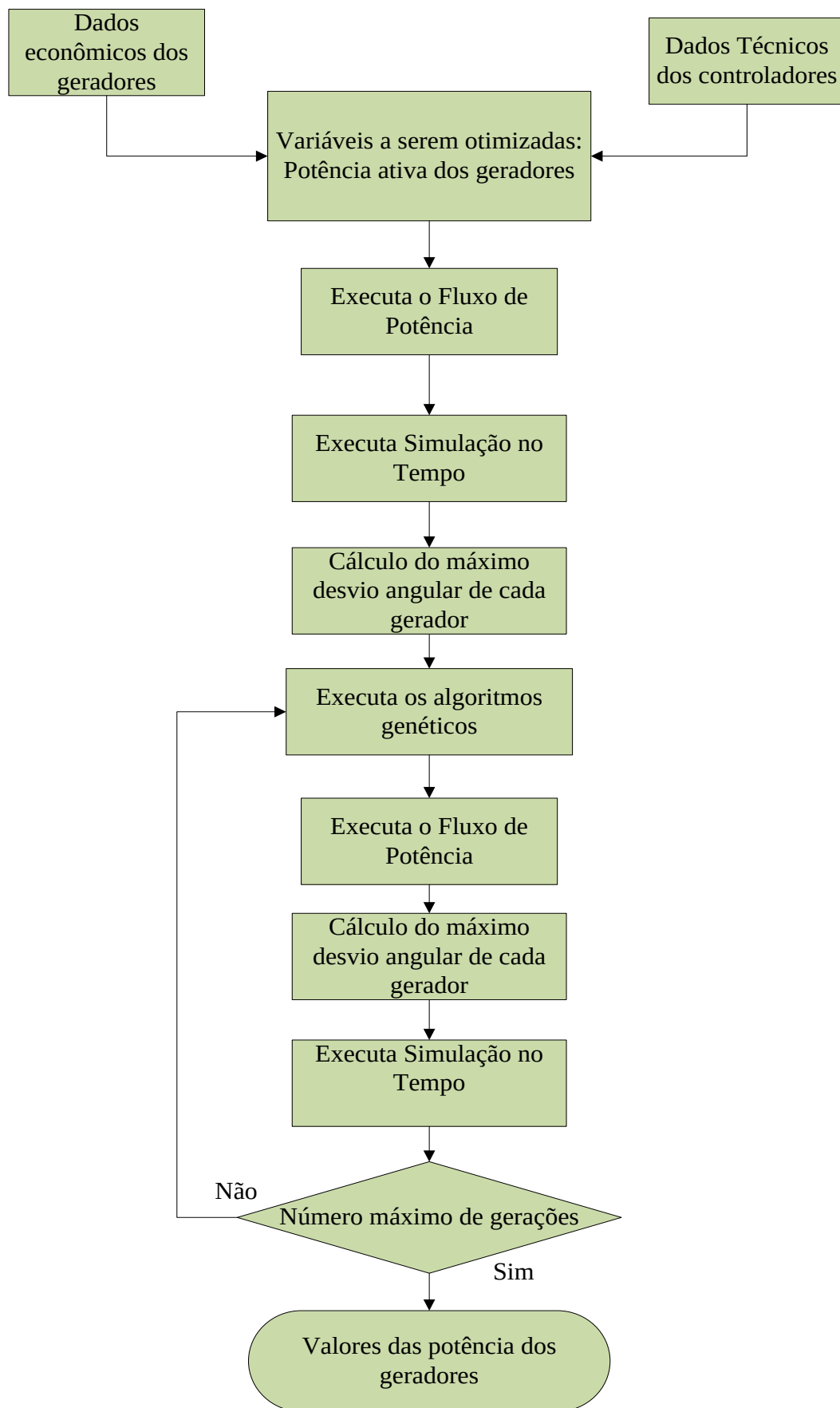


Figura 4.3: Fluxograma para análise econômica da estabilidade transitória.

## 4.4.2. Aplicação a sistemas teste

### 4.4.2.1. Sistema WSCC

Quatro casos foram considerados: caso base, caso PSS, caso PSS+SVC e caso PSS+TCSC. Aplicou-se um curto-circuito trifásico na barra 4 o qual foi eliminado pela abertura da linha 4-6 em 0,280 segundos, tempo que é maior que o tempo crítico de 0,220 segundos. Em todos os casos simulados as tensões calculadas ficaram dentro dos limites mínimo e máximo de 0,9 e 1,1 pu, respectivamente. As curvas de oscilação dos rotores dos geradores foram calculadas com relação ao ângulo do centro de inércia  $\delta_{COI}$ .

#### ➤ Caso base

O caso base equivale ao sistema sem a instalação dos PSS e FACTS e com as potências segundo dados da Tabela B.8. Observa-se que o sistema é instável (ver Figura 4.4).

Um FPO com restrição de estabilidade transitória (TSCOPF) é aplicado no sistema. Neste caso as curvas de oscilação dos geradores indicam que o sistema é estável (ver Figura 4.5) o qual demonstra a utilidade do TSCOPF para melhorar a estabilidade eletromecânica.

#### ➤ Caso PSS

Em cada gerador foi instalado 1 PSS, totalizando 3 PSS instalados no sistema WSCC. Os parâmetros dos PSS seguiram a metodologia empregada na análise técnica. Um FPO foi executado com restrição de estabilidade transitória. O comportamento dos ângulos dos geradores com relação ao COI é ilustrado na Figura 4.6.

#### ➤ Caso PSS+SVC

Três PSS e 1 SVC foram instalados no sistema. Os parâmetros destes controladores seguiram a metodologia utilizada na análise técnica. Após aplicar o TSCOPF no sistema WSCC, observou-se que o sistema comporta-se de modo estável (ver Figura 4.7).

#### ➤ Caso PSS+TCSC

Três PSS e 1 TCSC foram instalados no sistema. Os parâmetros destes controladores seguiu a metodologia utilizada na análise técnica. Após aplicar o TSCOPF no sistema WSCC, observou-se que o sistema comporta-se de modo estável (ver Figura 4.8).

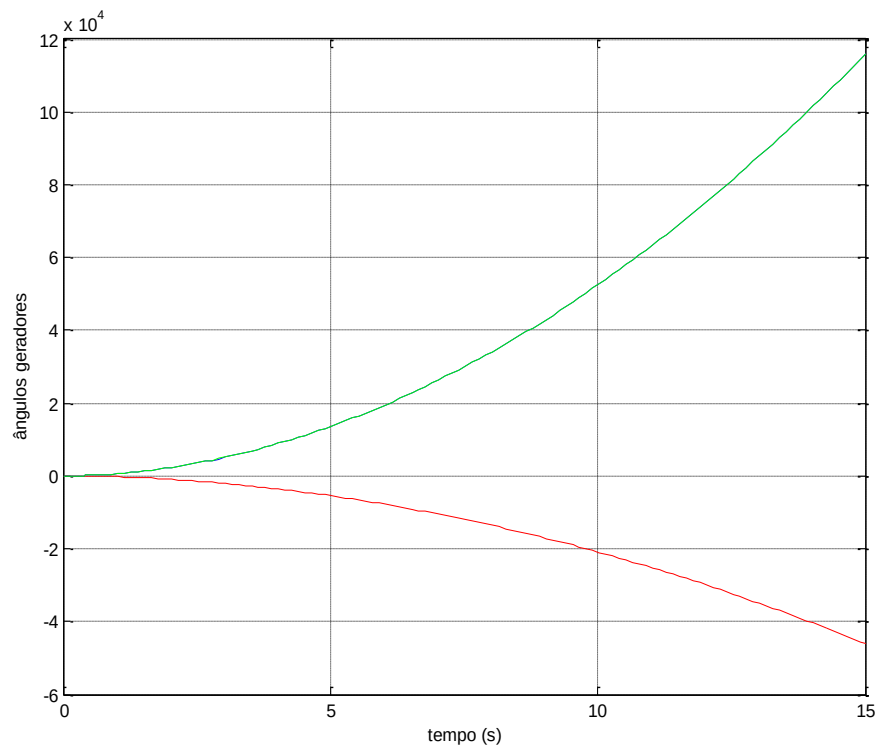


Figura 4.4: Ângulos dos geradores no caso base antes da aplicação do TSCOPF no sistema WSCC.

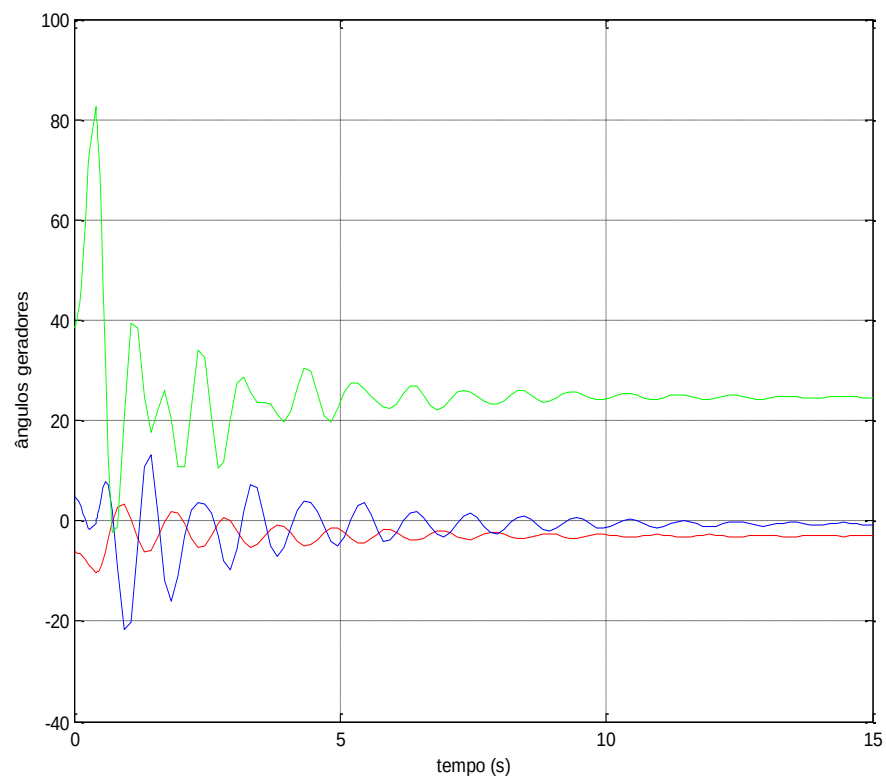


Figura 4.5: Ângulos dos geradores no caso base após a aplicação do TSCOPF no sistema WSCC.



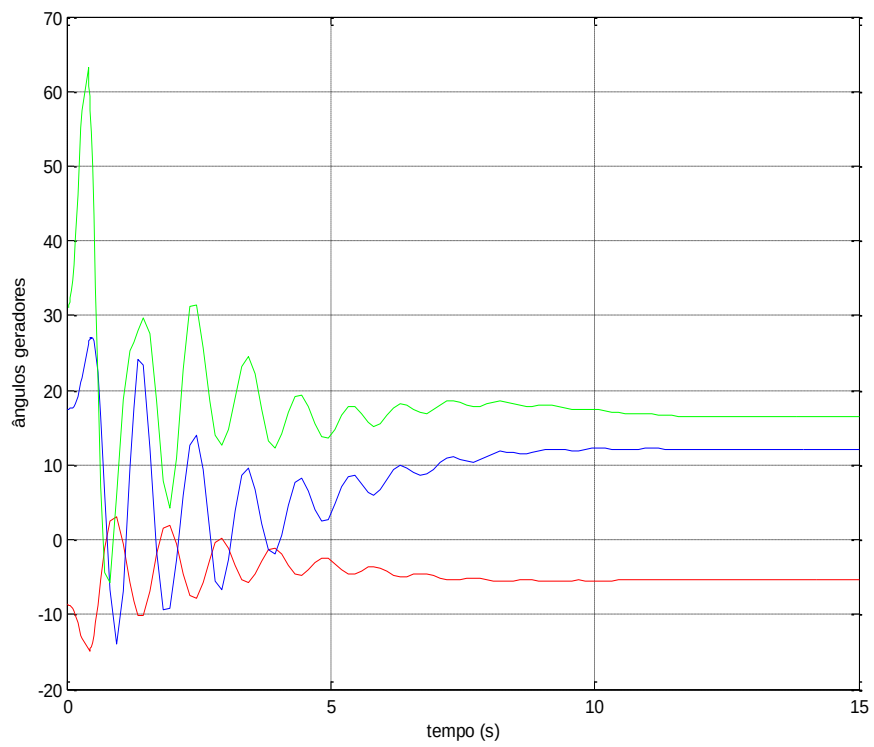


Figura 4.6: Ângulos dos geradores no caso PSS após a aplicação do TSCOPF no sistema WSCC.

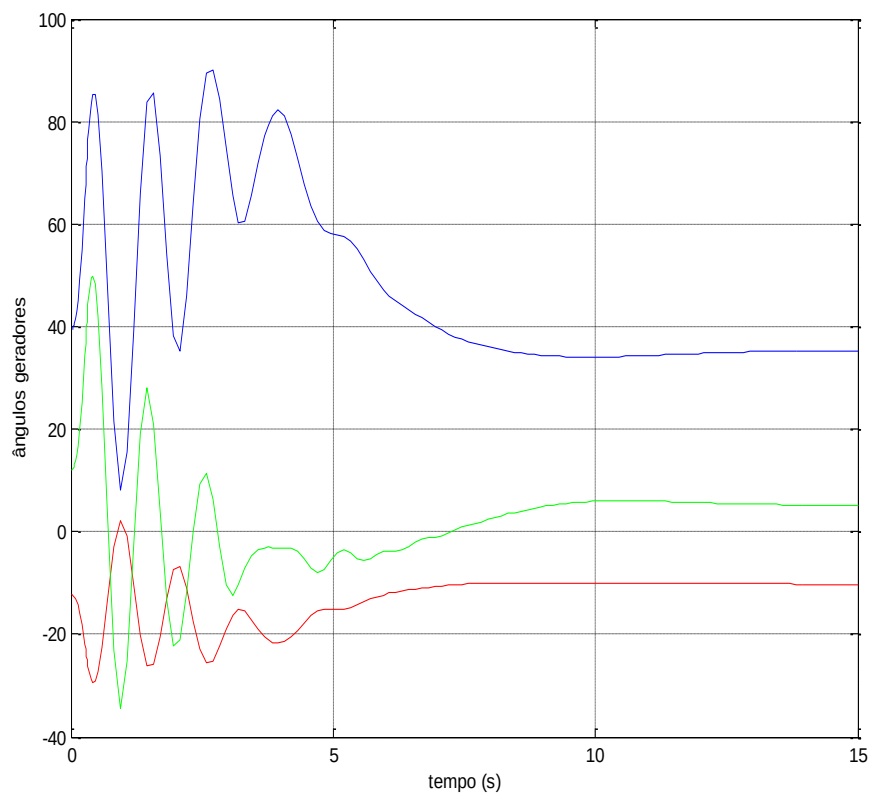


Figura 4.7: Ângulos dos geradores no caso PSS+SVC após a aplicação do TSCOPF no sistema WSCC.

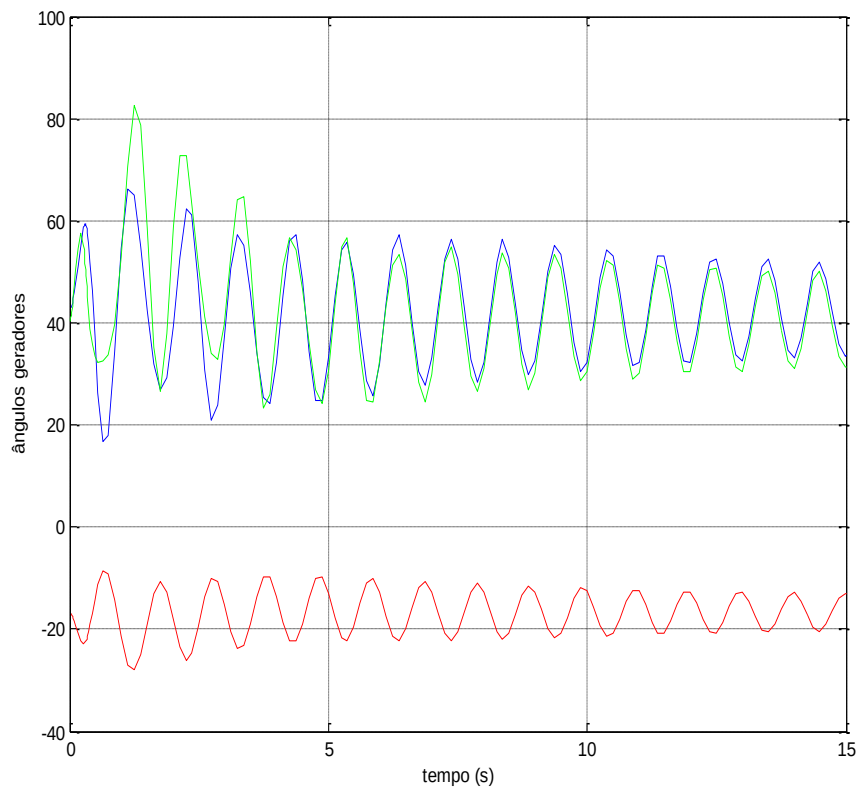


Figura 4.8: Ângulos dos geradores no caso PSS+TCSC após a aplicação do TSCOPF no sistema WSCC.

#### 4.4.2.2. Sistema New England

Aplicou-se um curto-circuito trifásico na barra 29 o qual foi eliminado pela abertura da linha 26-29 em 0,090 segundos, que é maior que o tempo crítico de 0,051 segundos.

##### ➤ Caso base

O caso base equivale ao sistema sem a instalação dos controladores PSS e FACTS e com as potências dos geradores iguais aos dados da Tabela B.12. A Figura 4.9 ilustra o comportamento do ângulo de todos os geradores do sistema com relação ao COI. Observa-se que o sistema é instável.

Após a aplicação do TSCOPF o sistema apresenta um comportamento típico de sistema estável. O comportamento de todos os ângulos com relação ao COI são ilustrados na Figura 4.10. As tensões em todas as barras obedecem aos limites máximos e mínimos exigidos.

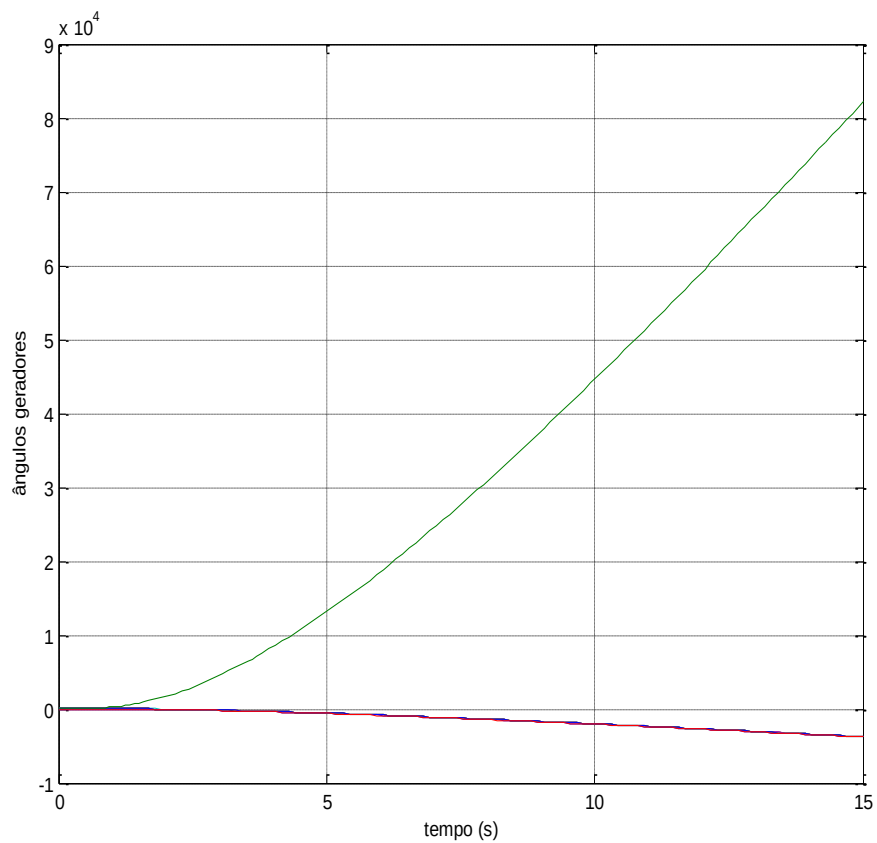


Figura 4.9: Ângulo dos geradores no caso base antes da aplicação do TSCOPF no sistema New England.

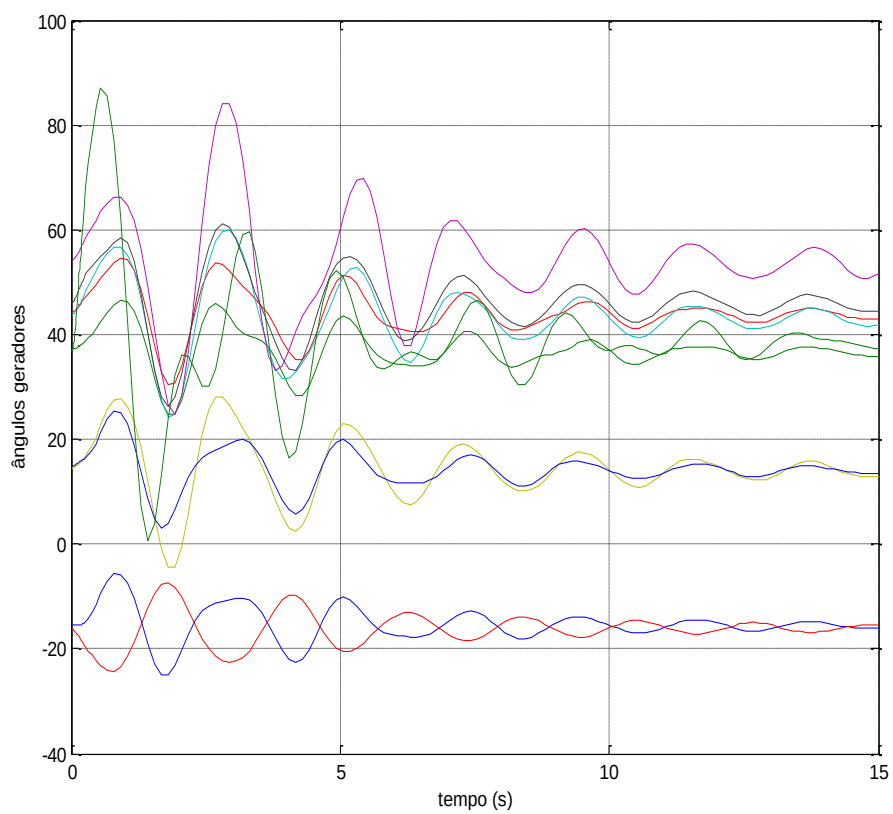


Figura 4.10: Ângulo dos geradores no caso base após a aplicação do TSCOPF no sistema New England.

➤ Caso PSS

Todos os geradores são equipados com PSS, exceto gerador da barra 39. O comportamento de todos os ângulos com relação ao COI são ilustrados na Figura 4.11, após a aplicação do FPO com restrição de estabilidade transitória.

➤ Caso PSS+SVC

Nove PSS e um SVC foram instalados no sistema. O cálculo dos parâmetros destes controladores seguiu a metodologia utilizada na análise técnica. Após aplicar o TSCOPF no sistema New England observou-se que o sistema é estável (ver Figura 4.12).

➤ Caso PSS+TCSC

Nove PSS e 1 TCSC foram instalados no sistema. Os parâmetros destes controladores seguiu a metodologia utilizada na análise técnica. Após aplicar o TSCOPF no sistema New England, observou-se que o sistema comporta-se de modo estável (ver Figura 4.13).

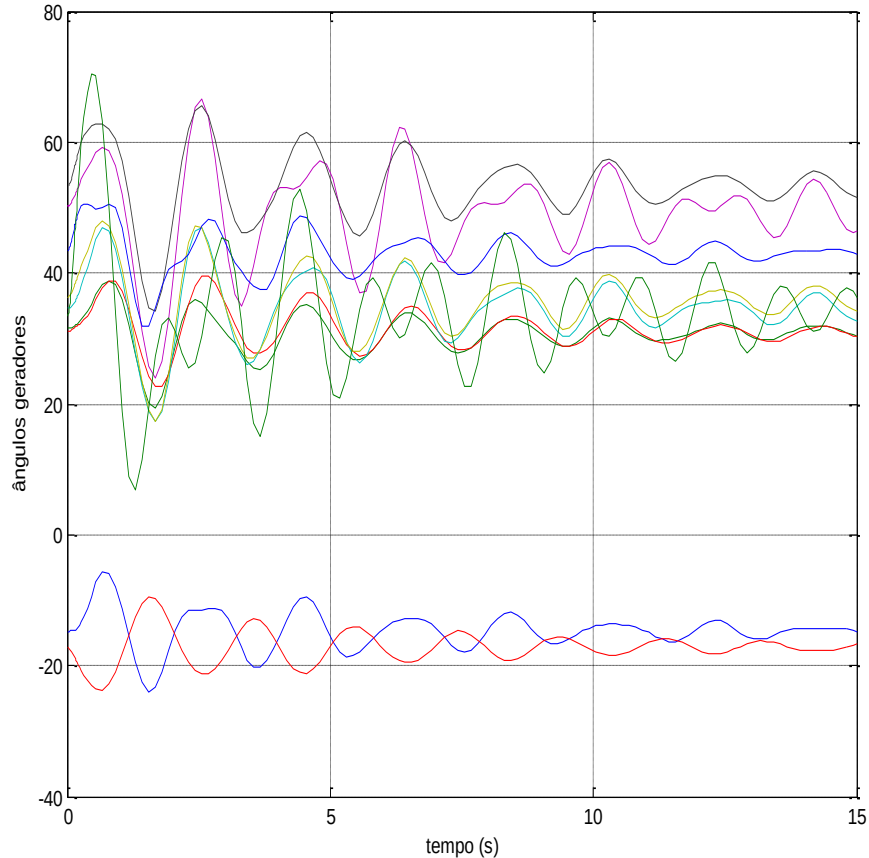


Figura 4.11: Ângulo dos geradores no caso PSS após a aplicação do TSCOPF no sistema New England.

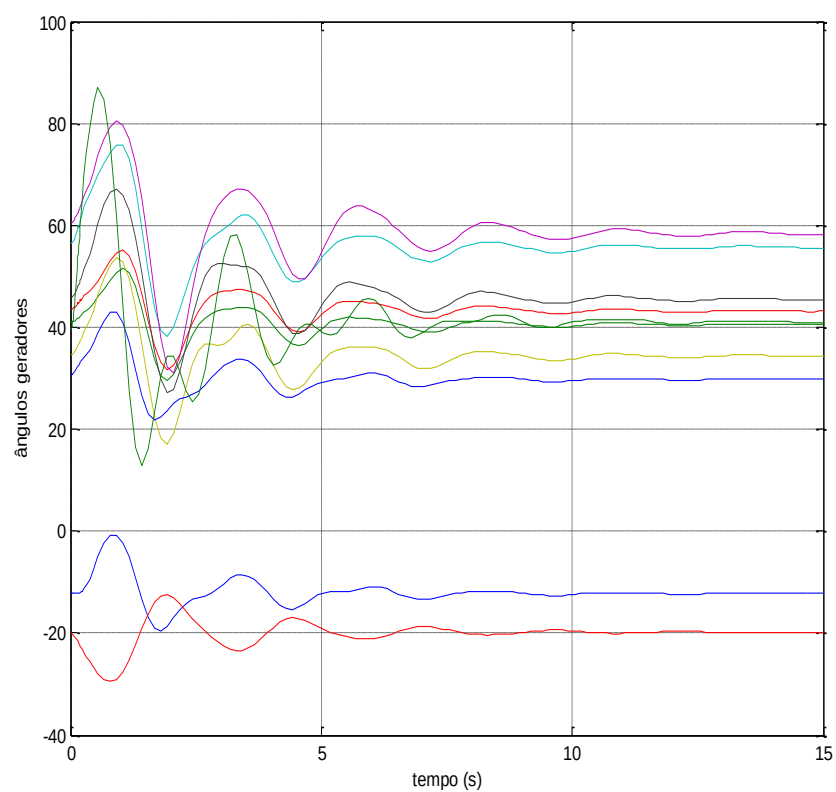


Figura 4.12: Ângulos dos geradores no caso PSS+SVC após a aplicação do TSCOPF no sistema New England.

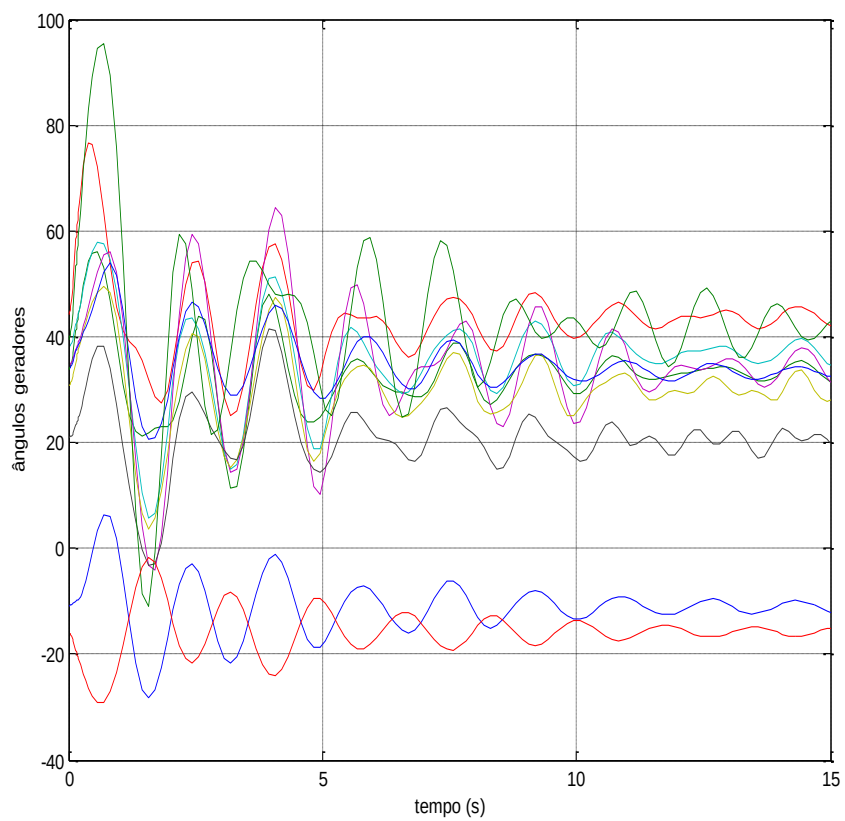


Figura 4.13: : Ângulos dos geradores no caso PSS+TCSC após a aplicação do TSCOPF no sistema New England.

#### 4.4.2.3. Discussão de resultados do FPO com restrição de estabilidade transitória

Os resultados do TSCOPF para os sistemas WSCC e New England são mostrados nas Tabelas 4.5 e 4.6, respectivamente. A inserção de PSS e Controladores FACTS mudam substancialmente os custos de geração considerando a restrição de estabilidade transitória. A configuração PSS+TCSC apresentou os melhores resultados para os dois sistemas teste. Em todas as simulações realizadas todas as restrições foram obedecidas.

Tabela 4.5: Resultado do TSCOPF no sistema WSCC.

| Potência (MW) | Casos  |        |         |          |
|---------------|--------|--------|---------|----------|
|               | Base   | PSS    | PSS+SVC | PSS+TCSC |
| $P_{g1}$      | 159,70 | 148,04 | 93,95   | 31,60    |
| $P_{g2}$      | 55,76  | 87,62  | 160,23  | 161,66   |
| $P_{g3}$      | 102,37 | 82,03  | 64,91   | 125,00   |
| Custo (\$/h)  | 15.985 | 15.820 | 15.600  | 15.501   |

Tabela 4.6: Resultado do TSCOPF no sistema New England.

| Potência (MW) | Casos    |        |         |          |
|---------------|----------|--------|---------|----------|
|               | Base     | PSS    | PSS+SVC | PSS+TCSC |
| $P_{g30}$     | 233,69   | 201,79 | 236,98  | 318,19   |
| $P_{g31}$     | 631,27   | 554,46 | 669,59  | 588,80   |
| $P_{g32}$     | 827,99   | 579,58 | 756,41  | 864,34   |
| $P_{g33}$     | 635,51   | 482,55 | 775,26  | 613,64   |
| $P_{g34}$     | 682,73   | 613,26 | 577,97  | 432,29   |
| $P_{g35}$     | 372,80   | 681,74 | 611,40  | 687,13   |
| $P_{g36}$     | 782,92   | 856,01 | 664,26  | 406,32   |
| $P_{g37}$     | 293,92   | 627,63 | 418,62  | 491,70   |
| $P_{g38}$     | 699,01   | 614,69 | 679,78  | 740,29   |
| $P_{g39}$     | 1.034,80 | 987,88 | 809,77  | 1.046,00 |
| Custo (\$/h)  | 64.784   | 63.627 | 63.040  | 62.946   |

Embora, neste trabalho foi considerado o método tradicional para avaliação da estabilidade transitória (no caso,  $|\delta_i - \delta_{coi}|_{max} \leq 100^\circ$ ), os resultados foram bastante satisfatório para todos os casos. A grande vantagem deste método é a possibilidade de simulação para modelos mais complexos de geradores e controladores. Em contrapartida, a desvantagem é o alto custo computacional quando sistemas de grande porte são considerados no estudo.

A análise da estabilidade a pequenas perturbações não foi considerada no TSCOPF, sendo um assunto a ser considerado futuramente. Também, a função objetivo foi restrita somente ao custo da potência ativa, sendo mais apropriado considerar os custos das potências ativa e reativa.

### 5. Conclusão

Neste capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho e as sugestões de novos tópicos a serem pesquisados em trabalhos futuros.

#### 5.1. Conclusões

- Os resultados apresentados mostraram que num sistema multimáquina, os PSS, SVC e TCSC, podem ser ajustados e sintonizados por técnicas de inteligência artificial para fornecer um desempenho dinâmico satisfatório. O índice dinâmico para a estabilidade a pequenas perturbações foi a menor razão de amortecimento  $\zeta_{min}$  do sistema. Com relação à estabilidade transitória, a área  $A_{dot}$  que representa uma forma de energia foi utilizada como um índice de desempenho.
- Na análise da estabilidade a pequenas perturbações, na qual foram utilizadas as funções objetivo  $F_1$  (definida no plano S) e  $F_2$  (definida no plano Z), a inclusão dos PSS e Controladores FACTS nos sistemas teste mostrou-se bastante eficaz no amortecimento das oscilações eletromecânicas instáveis e fracamente amortecidas. Em todos os sistemas teste, os PSS e Controladores FACTS forneceram o amortecimento requerido, por exemplo como utilizado neste trabalho  $\zeta_{min} = 5\%$ . A função objetivo  $F_2$  foi utilizada em dois sistemas teste de pequeno porte e mostrou-se bastante eficiente.  $F_2$  possui vantagem com relação às outras funções objetivo mencionadas na literatura, principalmente no tempo computacional, pois esta função objetivo não necessita calcular todos os autovalores do sistema em estudo.
- Na análise da estabilidade transitória, onde foi utilizada a função objetivo  $F_3$ , uma nova metodologia foi proposta para coordenar e sintonizar PSS e Controladores FACTS. A metodologia proposta melhora simultaneamente a estabilidade transitória e a estabilidade a pequenas perturbações, ou seja, melhora a estabilidade eletromecânica, sendo considerada uma metodologia robusta. A aplicação em sistemas teste, inclusive uma configuração do sistema Sul-Sudeste brasileiro, validou a metodologia proposta.



- As técnicas de inteligência artificial: algoritmos genéticos, *simulated annealing*, otimização por enxame de partículas e evolução diferencial foram aplicadas para o projeto e sintonização de PSS, POD de Controladores FACTS, e atingiram resultados satisfatórios na aplicação a sistemas teste. Conclui-se que para um certo problema uma determinada técnica IA pode obter os melhores resultados enquanto que para outro problema pode ser uma técnica IA diferente da anterior a que apresente os melhores resultados. Esta característica foi comprovada neste trabalho.
- Por meio da comparação com outras técnicas convencionais, comprovou-se que as técnicas de IA consideradas neste trabalho são uma alternativa para projetar controladores. Num projeto de controladores com técnicas convencionais é necessário um procedimento com múltiplos passos envolvendo várias iterações. O projeto baseado em técnicas de IA, além de ser independente da complexidade do problema, utiliza um caminho sistemático que realiza o processo completo da otimização de parâmetros dos controladores de forma automática.
- Um FPO com restrição de estabilidade a pequenas perturbações e transitória foi proposto neste trabalho na presença de PSS e controladores FACTS. O FPO proposto foi utilizado para avaliar o impacto dos PSS e Controladores FACTS nos custos de geração do sistema de energia elétrica. Os resultados mostraram os benefícios econômicos dos PSS, SVC e TCSC. É importante frisar que para se conseguir este benefícios os parâmetros dos PSS, SVC e TCSC foram sintonizados e coordenados, ou seja, a análise econômica depende da análise técnica.

## 5.2. Trabalhos futuros

Existem várias possibilidades de futuros desenvolvimentos relacionados com este trabalho de pesquisa.

- Implementação de um algoritmo eficiente de cálculo parcial de autovalores para utilizar as funções objetivo  $F_1$  e  $F_2$ . Dessa maneira, não será necessário o cálculo de todos os autovalores da matriz de estado de malha fechada do SEE senão somente aqueles autovalores dominantes. Outra alternativa, é aplicar o algoritmo SARQI (*Subspace Accelerated Rayleigh Quotient Iteration*) utilizado por (ROMMES, MARTINS e FREITAS, 2012) para calcular os autovalores de interesse. Através do

algoritmo SARQI pode-se calcular os autovalores com amortecimento menor do amortecimento mínimo requerido, por exemplo  $\zeta_{\min} = 5\%$ , evitando-se calcular todos os autovalores da matriz de estado do sistema.

- Projetar os PSS e Controladores FACTS para melhorar a estabilidade transitória utilizando o método SIME ou algum método híbrido para calcular outro índice no lugar de  $A_{dot}$ .
- Para resolver o fluxo de potência ótimo com restrição de estabilidade transitória e na presença de Controladores FACTS e PSS, utilizar o método SIME para o cálculo do tempo crítico de eliminação de falta.
- Melhorar o desempenho das técnicas de IA para solução de sistemas de energia elétrica de grande porte.
- Desenvolver um fluxo de potência ótimo com restrição de estabilidade eletromecânica (estabilidade a pequenas perturbações e estabilidade transitória simultaneamente).

## **APÊNDICES**

## Apêndice A

### Técnicas de Inteligência Artificial

Inteligência artificial é um subcampo da otimização estocástica. A otimização estocástica é uma classe geral de algoritmos e técnicas que empregam certo grau de aleatoriedade para encontrar a solução ótima ou a mais ideal de um dado problema. Desde da publicação de Robbins e Monro (ROBBINS e MONRO, 1951), sobre métodos estocásticos de otimização, houve uma intensa pesquisa no desenvolvimento de outras técnicas de IA. A Figura A.1 ilustra de forma resumida a evolução do desenvolvimento das técnicas de IA.

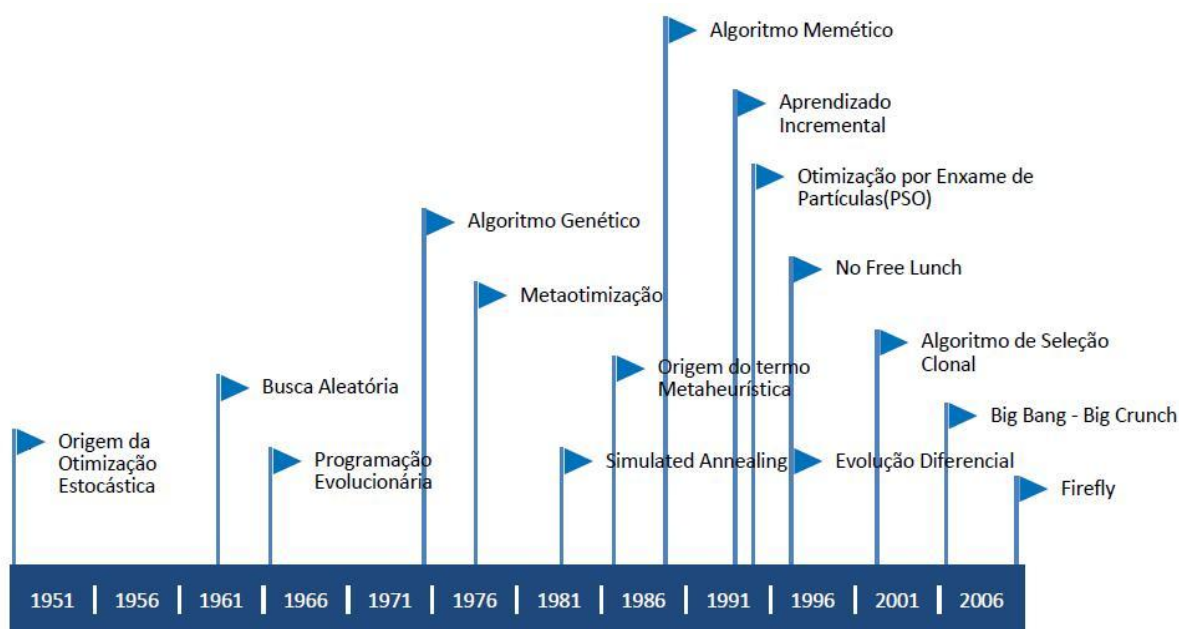


Figura A.1: Linha do tempo das técnicas de IA.

Fonte: Adaptado de (JERONYMO, 2011)

#### ➤ Algoritmos genéticos

Os algoritmos genéticos (AG), desenvolvido por John Holland e seus colaboradores nos anos de 1960 e 1970, é um modelo ou abstração da evolução biológica baseado na teoria da seleção natural de Charles Darwin (MITCHELL, 1997). A população inicial é criada de forma aleatória. Cada solução ou indivíduo da população é denominado cromossomo. Os cromossomos evoluem através de sucessivas iterações denominadas de gerações. Os operadores genéticos: seleção, cruzamento e mutação são aplicados a uma determinada população de modo a transformar a população através de sucessivas gerações. A cada nova geração, os cromossomos são avaliados, através de medidas de adequabilidade (função *fitness* ou objetivo).

Um procedimento básico das etapas dos algoritmos genéticos é mostrado na Tabela A.1:

Tabela A.1: Procedimento básico dos algoritmos genéticos

- 1) Inicializar a população de forma aleatória
- 2) Avaliar a função objetivo para todos os indivíduos da população
- 3) Repetir os passo abaixo até que o critério de parada seja satisfeito
  - a) Selecionar os melhores indivíduos para reprodução
  - b) Utilizar as operações genéticas de cruzamento e mutação para gerar os novos descendentes
  - c) Avaliar o resultado da função objetivo para cada novo membro
  - d) Substituir os indivíduos menos aptos pelos novos indivíduos para formar a próxima geração
- 4) O algoritmo para quando um critério de parada é satisfeito.

Dois critérios de parada foram utilizados: máximo número de gerações e tempo limite excedido. No primeiro critério, os AG finalizam quando o número de gerações excedem um valor pré-definido. No segundo critério, a execução do AG interrompe quando o tempo de simulação ultrapassa um valor pré-definido (GUIDE, 2013).

➤ Otimização por enxame de partículas

Otimização por enxame de partículas (PSO- *Particle Swarm Optimization*) é um método de otimização global heurística apresentado por Kennedy e Eberhart em 1995 (KENNEDY e EBERHART, 1995). Foi desenvolvido a partir da inteligência coletiva e é baseado na pesquisa do comportamento de aves e cardumes de peixes. O termo partícula foi adotado para simbolizar os pássaros e representar as possíveis soluções do problema a ser resolvido. Cada partícula é inicializada com uma posição e velocidade de forma aleatória. O parâmetro da experiência individual de cada partícula é simbolizado por  $P_{best}$ . Em contrapartida, o  $G_{best}$  representa o conhecimento do enxame como um todo. A ideia básica desta técnica é que as partículas tem suas velocidades e posições atualizadas dinamicamente de acordo com o histórico das experiências individuais e coletivas de todo o enxame. Para atualizar a velocidade e posição de cada partículas são empregadas as equações (A.1) e (A.2), respectivamente (BIRGE, 2003).

$$V_i^{k+1} = w * V_i^k + C_1 * r_1 * (P_{best_i}^k - X_i^k) + C_2 * r_2 * (G_{best_i}^k - X_i^k) \quad (A.1)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (A.2)$$

Onde:  $i = 1, 2, \dots, N$ , e  $N$  é a quantidade de partículas;  $w$  é o peso de inércia;  $C_1$  e  $C_2$  são as constantes de aceleração;  $r_1$  e  $r_2$  são números aleatórios uniformemente distribuídos no intervalo  $[0,1]$ .

O peso de inércia denota a tendência de uma partícula de continuar se movendo na mesma direção que estava seguindo na iteração anterior. Tipicamente seu valor é limitado entre 0,5 e 0,9 (YANG, 2010). A Figura A.2 ilustra de forma resumida o algoritmos PSO.

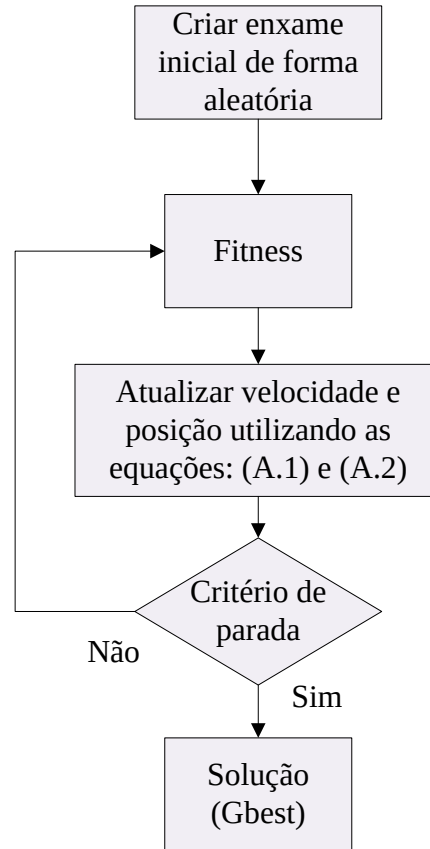


Figura A..2: Fluxograma de um PSO padrão.

A função *fitness* avalia o desempenho de cada partícula. Após a avaliação das partículas, extraem-se os  $P_{best}$  e os  $G_{best}$ . As equações (A.1) e (A.2) são utilizadas para atualizar as velocidades e posições de cada partícula, respectivamente. O critério de para escolhido é o número máximo de iterações.

#### ➤ *Simulated annealing*

*Simulated annealing* ou recozimento simulado foi desenvolvido por *Kirkpatrick, Gellat e Vecchi* (KIRKPATRICK, GELLATT e VECCHI, 1983) e independentemente por

Cerny (CERNY, 1987). Este método foi elaborado em analogia com o algoritmo de Metropolis (METROPOLIS, ROSENBLUTH, *et al.*, 1953). *Simulated annealing* explora uma analogia entre o modo como um metal se resfria e congela numa estrutura cristalina de energia mínima e a busca por um mínimo em qualquer sistema (YANG, 2010).

Um procedimento simplificado do algoritmo *simulated annealing* é mostrado na Tabela A.2:

Tabela A.2: Procedimento básico do algoritmo *simulated annealing*.

|                                                                                       |                                                          |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 1. Inicializar: temperatura inicial $T_0$ ; solução inicial $x_i$ e valor de $\alpha$ |                                                          |
| 2. Calcular o valor da função objetivo $F_i$                                          |                                                          |
| 3. Definir uma nova solução $x_j$                                                     |                                                          |
| 4. Calcular o valor da função objetivo $F_j$                                          |                                                          |
| Se $F_j < F_i$                                                                        |                                                          |
|                                                                                       | $F_j = F_i$ e $i = j$                                    |
| Se não                                                                                |                                                          |
|                                                                                       | $P = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{F_i - F_j}{T}\right)}$ |
| Se $\text{rand}(1) < P$                                                               |                                                          |
|                                                                                       | $F_j = F_i$ e $i = j$                                    |
| Se não                                                                                |                                                          |
| 5. Nova temperatura                                                                   |                                                          |
|                                                                                       | $T = \alpha * T$                                         |
|                                                                                       | Se iteração < Máximo número de iterações                 |
|                                                                                       | Voltar ao passo 3                                        |
| Se não                                                                                |                                                          |
| 6. Fim do algoritmo                                                                   |                                                          |

O algoritmo inicia gerando um estado inicial, a temperatura inicial e um fator de redução  $\alpha$ . Então, a cada iteração, é selecionado aleatoriamente uma amostra dos estados vizinhos da solução atual. Esta nova solução será aceita caso gere uma redução no valor da função objetivo. Sendo o novo valor maior que o anterior, o aceite se dará de acordo com a fórmula da probabilidade de Boltzmann  $P$ . O valor de  $P$  será comparado com um número gerado com distribuição uniforme, obtido na iteração. A solução é aceita se  $P$  for maior que o

número aleatório. Para valores altos de  $T$ , a maioria das soluções será aceita, sendo  $T$  gradualmente reduzido até que o máximo número de iterações seja atendido (GUIDE, 2013).

➤ Evolução diferencial

A evolução diferencial é considerada um método computacional evolutivo e foi proposto por *Storn e Price* (STORN e PRICE, 1997). Neste método de otimização, inicialmente, gera-se uma população de cromossomos  $P$  aleatoriamente dentro de um intervalo pré-definido, obedecendo a expressão (A.3):

$$X_{inicial} = X_{min} + rand[0,1] * (X_{max} - X_{min}) \quad (A.3)$$

A cada iteração do algoritmo aplicam-se os operadores genéticos: seleção, mutação e *cross-over*. A mutação consiste da seleção aleatória de três cromossomos da população:  $X_\alpha$  denominado de pai secundário e os vetores doadores  $X_\beta$  e  $X_\gamma$  gerando um vetor mutante  $v_i$ . O processo é dado pela equação (A.4). A constante  $F_e$  é denominada fator de escala.

$$v_i = X_\alpha + F_e * (X_\beta + X_\gamma) \quad (A.4)$$

Com o objetivo de aumentar a diversidade da população aplica-se o operador *cross-over*. A operação *cross-over* é utilizada para gerar um vetor de teste  $U_i$ , onde esse é obtido substituindo componentes do vetor pai primário  $X_i$ , escolhido aleatoriamente e diferentes dos vetores pai secundário e mutante, por componentes do vetor mutante. A taxa de *cross-over* determina quando um parâmetro deve ser substituído. Existem duas formas básicas de *cross-over* (ROCCA, OLIVERI e MASSA, 2011): *cross-over* binomial e exponencial. Neste trabalho utilizou-se o *cross-over* binomial, o qual se fundamenta na expressão (A.5):

$$U_i = \begin{cases} v_i, & \text{se } r < C_r \\ X_i, & \text{se } r \geq C_r \end{cases} \quad (A.5)$$

Onde:  $r$  é um número com distribuição uniforme entre  $[0,1]$  e  $C_r$  é o fator que define o *cross-over*.

Finalmente na seleção a função objetivo do vetor teste é calculada e comparada com a do vetor pai primário. Se o valor da função objetivo do vetor pai primário da geração anterior for melhor do que a do vetor teste da geração atual, o vetor pai avança para a próxima geração, caso contrário o vetor pai primário é substituído pelo vetor teste na próxima geração (CHENG e HWANG, 2001).

Baseado na descrição acima, construiu-se um fluxograma, ilustrado na Figura A.3, onde tem-se um esquema simplificado da evolução diferencial:



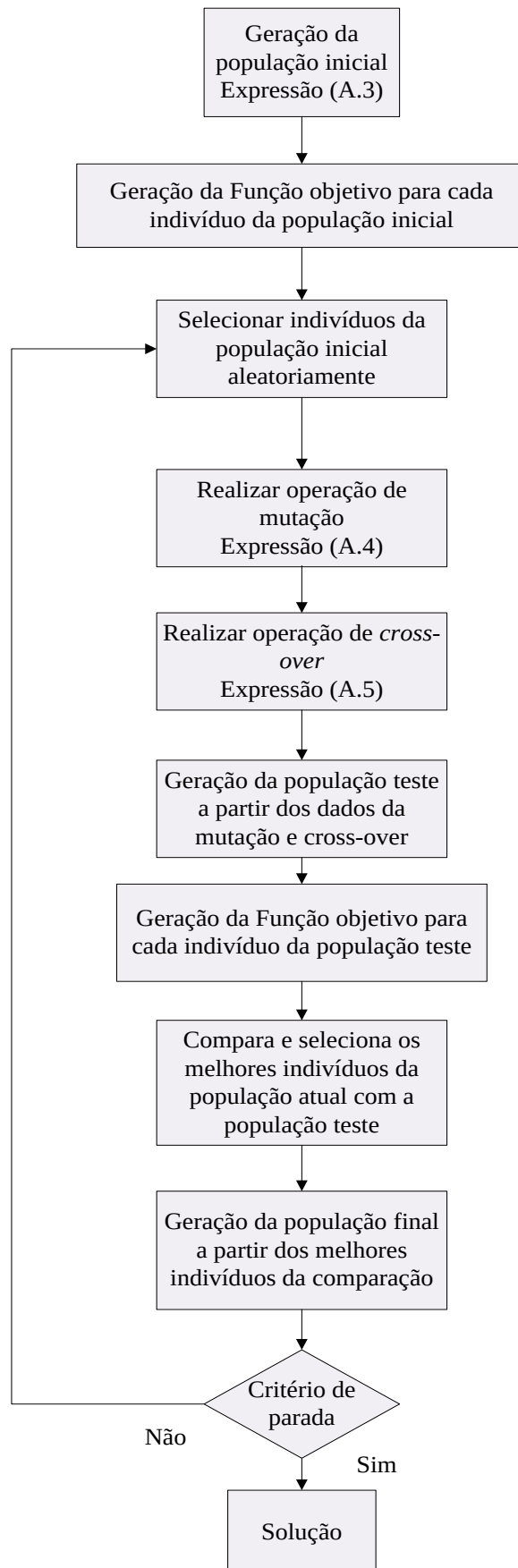


Figura A.3: Fluxograma da evolução diferencial  
Fonte: Adaptado de (PAIVA, 2011)

## Apêndice B

### Dados técnicos dos sistemas teste

- Sistema de 6 barras e 3 geradores

Tabela B.1: Dados de barra do sistema de 3 geradores e 6 barras

| Barra | Tipo  | $V_{barra}$<br>(p.u) | $\theta_{barra}$<br>(graus) | $P_{Ger}$<br>(MW) | $Q_{Ger}$<br>(MVAr) | $P_{carga}$<br>(MW) | $Q_{carga}$<br>(MVAr) | Shunt<br>(MVAr) |
|-------|-------|----------------------|-----------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------|
| 1     | PV    | 1,040                | 50,60                       | 1.404,0           | 434,20              |                     |                       |                 |
| 2     | PV    | 1,040                | 50,60                       | 1.404,0           | 434,20              |                     |                       |                 |
| 3     | PV    | 1,020                | 20,00                       | 800,0             | 466,10              |                     |                       |                 |
| 4     | PQ    | 1,017                | 45,70                       |                   |                     | 1.400,0             | 100,0                 |                 |
| 5     | PQ    | 0,973                | 14,90                       |                   |                     | 2.000,0             | 100,0                 |                 |
| 6     | Slack | 1,000                | 0,00                        | -208,0            | 49,80               |                     |                       |                 |

Tabela B.2: Dados dos geradores do sistema de 3 geradores e 6 barras.

| Gerador | H<br>(s)       | Base<br>(MVA)  | $x'_d$<br>(p.u)   | $x'_q$<br>(p.u)   | $x_d$<br>(p.u) | $x_q$<br>(p.u) | $R_a$<br>(p.u) | $T'_{do}$<br>(s) | $T'_{qo}$<br>(s) | $x_l$<br>(p.u) |
|---------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|----------------|
|         | $x''_d$<br>(s) | $x''_q$<br>(s) | $T''_{do}$<br>(s) | $T''_{qo}$<br>(s) |                |                |                |                  |                  |                |
| 1       | 4,50           | 1.560          | 0,360             | 0,360             | 0,890          | 0,660          | 0,002          | 5,10             | 0,535            | 0,280          |
|         | 0,290          | 0,290          | 0,060             | 0,094             |                |                |                |                  |                  |                |
| 2       | 4,50           | 1.560          | 0,360             | 0,360             | 0,890          | 0,660          | 0,002          | 5,10             | 0,535            | 0,280          |
|         | 0,290          | 0,290          | 0,060             | 0,094             |                |                |                |                  |                  |                |
| 3       | 3,86           | 890            | 0,490             | 0,800             | 1,720          | 1,680          | 0,000          | 5,30             | 0,535            | 0,270          |
|         | 0,340          | 0,340          | 0,048             | 0,066             |                |                |                |                  |                  |                |

Tabela B.3: Dados dos reguladores de tensão do sistema de 3 geradores e 6 barras.

| Gerador | $K_a$<br>(p.u) | $T_a$<br>(s) | Gerador | $K_a$<br>(p.u) | $T_a$<br>(s) | Gerador | $K_a$<br>(p.u) | $T_a$<br>(s) |
|---------|----------------|--------------|---------|----------------|--------------|---------|----------------|--------------|
| -       |                |              | -       |                |              | -       |                |              |
| 1       | 100            | 0,05         | 2       | 100            | 0,05         | 3       | 150            | 0,05         |

- Sistema de 5 barras e 7 geradores

Tabela B.4: Dados de barra do sistema de 5 geradores e 7 barras.

| Barra<br>- | Tipo<br>- | $V_{barra}$<br>(p.u) | $\theta_{barra}$<br>(graus) | $P_{Ger}$<br>(MW) | $Q_{Ger}$<br>(MVar) | $P_{carga}$<br>(MW) | $Q_{carga}$<br>(MVar) | Shunt<br>(MVar) |
|------------|-----------|----------------------|-----------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------|
| 1          | PV        | 1,030                | 24,50                       | 1.658             | -412,3              | 2.405,0             | -467,0                | 179,2           |
| 2          | PV        | 1,030                | 27,20                       | 1.332             | -200,3              | 692,3               | -184,0                | 149,1           |
| 3          | PV        | 1,029                | 26,60                       | 1.540             | -446,7              | 688,2               | -235,0                | 114,2           |
| 4          | PV        | 1,039                | 48,50                       | 6.500             | 1.957,9             | 62,6                | 24,2                  | 36,8            |
| 5          | PQ        | 0,998                | 21,20                       |                   |                     | 845,8               | -9,2                  | 33,0            |
| 6          | PQ        | 0,989                | 21,40                       |                   |                     | -4,9                | 79,9                  | 2.142,0         |
| 7          | Slack     | 0,966                | 0,00                        | -3.164            | 0,0                 | 2.884,0             | -196,0                | 42,0            |

Tabela B.5: Dados dos ramos do sistema de 5 geradores e 7 barras.

| De<br>- | Para<br>- | Circuito<br>- | Resistência<br>(p.u) | Reatância<br>(p.u) | Shunt<br>(MVar) | Tap<br>- |
|---------|-----------|---------------|----------------------|--------------------|-----------------|----------|
| 1       | 3         | 1             | 0,00030              | 0,0038             |                 |          |
| 2       | 3         | 1             | 0,00050              | 0,0076             |                 |          |
| 4       | 6         | 1             | 0,00029              | 0,0073             |                 |          |
| 5       | 1         | 1             | 0,00190              | 0,0245             |                 |          |
| 5       | 2         | 1             | 0,00150              | 0,0225             |                 |          |
| 6       | 5         | 1             |                      | 0,0039             |                 |          |
| 6       | 7         | 1             | 0,00040              | 0,0057             |                 |          |

Tabela B.6: Dados dos geradores do sistema de 5 geradores e 7 barras.

| Gerador | H<br>(s)       | Base<br>(MVA)  | $x'_d$<br>(p.u)   | $x'_q$<br>(p.u)   | $x_d$<br>(p.u) | $x_q$<br>(p.u) | $R_a$<br>(p.u) | $T'_{do}$<br>(s) | $T'_{qo}$<br>(s) | $x_l$<br>(p.u) |
|---------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|----------------|
|         | $x''_d$<br>(s) | $x''_q$<br>(s) | $T''_{do}$<br>(s) | $T''_{qo}$<br>(s) |                |                |                |                  |                  |                |
| 1       | 4,50           | 1.900          | 0,300             | 0,00              | 0,850          | 0,700          | 0,00           | 5,00             | 0,00             | 0,0            |
|         | 0,200          | 0,200          | 0,053             | 0,123             |                |                |                |                  |                  |                |
| 2       | 4,50           | 1.400          | 0,300             | 0,00              | 0,850          | 0,700          | 0,00           | 5,00             | 0,00             | 0,0            |
|         | 0,200          | 0,200          | 0,053             | 0,123             |                |                |                |                  |                  |                |
| 3       | 4,50           | 1.944          | 0,300             | 0,00              | 0,880          | 0,690          | 0,00           | 5,00             | 0,00             | 0,0            |
|         | 0,200          | 0,200          | 0,060             | 0,090             |                |                |                |                  |                  |                |
| 4       | 5,07           | 6.633          | 0,300             | 0,00              | 0,900          | 0,680          | 0,00           | 7,60             | 0,00             | 0,0            |
|         | 0,240          | 0,270          | 0,090             | 0,190             |                |                |                |                  |                  |                |

Tabela B.7: Dados dos reguladores de tensão do sistema do sistema de 5 geradores

| Gerador | $K_a$<br>(p.u) | $T_a$<br>(s) | Gerador | $K_a$<br>(p.u) | $T_a$<br>(s) | Gerador | $K_a$<br>(p.u) | $T_a$<br>(s) |
|---------|----------------|--------------|---------|----------------|--------------|---------|----------------|--------------|
| -       |                |              | -       |                |              | -       |                |              |
| 1       | 100            | 0,05         | 2       | 100            | 0,05         | 3       | 100            | 0,05         |
| 4       | 100            | 0,05         |         |                |              |         |                |              |

- Sistema de 9 barras e 3 geradores

Tabela B.8: Dados de barra do sistema WSCC

| Barra<br>- | Tipo<br>- | $V_{barra}$<br>(p.u) | $\theta_{barra}$<br>(graus) | $P_{Ger}$<br>(MW) | $Q_{Ger}$<br>(MVar) | $P_{carga}$<br>(MW) | $Q_{carga}$<br>(MVar) | Shunt<br>(MVar) |
|------------|-----------|----------------------|-----------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------|
| 1          | Slack     | 1,040                | 0,0                         | 71,52             | 26,99               |                     |                       |                 |
| 2          | PV        | 1,025                | 9,30                        | 163               | 6,73                |                     |                       |                 |
| 3          | PV        | 1,025                | 4,68                        | 85                | -11,02              |                     |                       |                 |
| 4          | PQ        | 1,026                | -2,21                       |                   |                     |                     |                       |                 |
| 5          | PQ        | 0,996                | -3,98                       |                   |                     | 125                 | 50                    |                 |
| 6          | PQ        | 1,013                | -3,68                       |                   |                     | 90                  | 30                    |                 |
| 7          | PQ        | 1,026                | 3,74                        |                   |                     |                     |                       |                 |
| 8          | PQ        | 1,016                | 0,74                        |                   |                     | 100                 | 35                    |                 |
| 9          | PQ        | 1,032                | 1,98                        |                   |                     |                     |                       |                 |

Tabela B.9: Dados dos ramos do sistema WSCC

| De<br>- | Para<br>- | Circuito<br>- | Resistência<br>(p.u) | Reatância<br>(p.u) | Shunt<br>(MVar) | Tap<br>- |
|---------|-----------|---------------|----------------------|--------------------|-----------------|----------|
| 1       | 4         | 1             |                      | 0,0576             |                 | 1,0      |
| 2       | 7         | 1             |                      | 0,0625             |                 | 1,0      |
| 3       | 9         | 1             |                      | 0,0586             |                 | 1,0      |
| 4       | 5         | 1             | 0,0100               | 0,0850             | 17,60           |          |
| 4       | 6         | 1             | 0,0170               | 0,0920             | 15,80           |          |
| 5       | 7         | 1             | 0,0320               | 0,1610             | 30,60           |          |
| 6       | 9         | 1             | 0,0390               | 0,1700             | 35,80           |          |
| 7       | 8         | 1             | 0,0080               | 0,0720             | 14,90           |          |
| 8       | 9         | 1             | 0,0119               | 0,1080             | 20,90           |          |

Tabela B.10: Dados dos geradores do sistema WSCC

| Gerador<br>- | H<br>(s) | Base<br>(MVA) | $x'_d$<br>(p.u) | $x'_q$<br>(p.u) | $x_d$<br>(p.u) | $x_q$<br>(p.u) | $R_a$<br>(p.u) | $T'_{do}$<br>(s) | $T'_{qo}$<br>(s) | $x_l$<br>(p.u) |
|--------------|----------|---------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|----------------|
| 1            | 23,64    | 100,0         | 0,060           | 0,097           | 0,146          | 0,090          | 0,0            | 8,96             | 0,31             | 0,0            |
| 2            | 6,40     | 100,0         | 0,119           | 0,197           | 0,896          | 0,864          | 0,0            | 6,00             | 0,53             | 0,0            |
| 3            | 3,01     | 100,0         | 0,181           | 0,250           | 1,312          | 1,258          | 0,0            | 5,89             | 0,60             | 0,0            |

Tabela B.11: Dados dos reguladores de tensão do sistema WSCC

| Gerador<br>- | $K_a$<br>(p.u) | $T_a$<br>(s) | Gerador<br>- | $K_a$<br>(p.u) | $T_a$<br>(s) | Gerador<br>- | $K_a$<br>(p.u) | $T_a$<br>(s) |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|--------------|
| 1            | 20,0           | 0,20         | 2            | 20,0           | 0,20         | 3            | 20,0           | 0,20         |

- Sistema New England

Tabela B.12: Dados de barras do sistema New England

| Barra<br>- | Tipo<br>- | $V_{barra}$<br>(p.u) | $\theta_{barra}$<br>(graus) | $P_{Ger}$<br>(MW) | $Q_{Ger}$<br>(MVar) | $P_{carga}$<br>(MW) | $Q_{carga}$<br>(MVar) | Shunt<br>(MVar) |
|------------|-----------|----------------------|-----------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------|
| 1          | PQ        | 1,048                | -9,46                       |                   |                     |                     |                       |                 |
| 2          | PQ        | 1,049                | -6,91                       |                   |                     |                     |                       |                 |
| 3          | PQ        | 1,031                | -9,75                       |                   |                     | 322,0               | 2,4                   |                 |
| 4          | PQ        | 1,004                | -10,55                      |                   |                     | 500,0               | 184,0                 |                 |
| 5          | PQ        | 1,005                | -9,36                       |                   |                     |                     |                       |                 |
| 6          | PQ        | 1,007                | -8,66                       |                   |                     |                     |                       |                 |
| 7          | PQ        | 0,997                | -10,86                      |                   |                     | 233,8               | 84,0                  |                 |
| 8          | PQ        | 0,996                | -11,37                      |                   |                     | 522,0               | 176,0                 |                 |
| 9          | PQ        | 1,028                | -11,19                      |                   |                     |                     |                       |                 |
| 10         | PQ        | 1,017                | -6,27                       |                   |                     |                     |                       |                 |
| 11         | PQ        | 1,013                | -7,09                       |                   |                     |                     |                       |                 |
| 12         | PQ        | 1,000                | -7,10                       |                   |                     | 8,50                | 88,0                  |                 |
| 13         | PQ        | 1,014                | -6,99                       |                   |                     |                     |                       |                 |
| 14         | PQ        | 1,012                | -8,66                       |                   |                     |                     |                       |                 |
| 15         | PQ        | 1,016                | -9,08                       |                   |                     | 320,0               | 153,0                 |                 |
| 16         | PQ        | 1,032                | -7,67                       |                   |                     | 329,4               | 32,30                 |                 |
| 17         | PQ        | 1,034                | -8,67                       |                   |                     |                     |                       |                 |
| 18         | PQ        | 1,031                | -9,51                       |                   |                     | 158,0               | 30,0                  |                 |
| 19         | PQ        | 1,050                | -3,05                       |                   |                     |                     |                       |                 |
| 20         | PQ        | 0,991                | -4,46                       |                   |                     | 680,0               | 103,0                 |                 |
| 21         | PQ        | 1,032                | -5,27                       |                   |                     | 274,0               | 115,0                 |                 |
| 22         | PQ        | 1,050                | -0,82                       |                   |                     |                     |                       |                 |
| 23         | PQ        | 1,045                | -1,02                       |                   |                     | 247,5               | 84,6                  |                 |
| 24         | PQ        | 1,038                | -7,55                       |                   |                     | 308,6               | -92,2                 |                 |
| 25         | PQ        | 1,058                | -5,55                       |                   |                     | 224,0               | 47,2                  |                 |
| 26         | PQ        | 1,052                | -6,80                       |                   |                     | 139,0               | 17,0                  |                 |
| 27         | PQ        | 1,038                | -8,81                       |                   |                     | 281,0               | 75,5                  |                 |
| 28         | PQ        | 1,051                | -3,29                       |                   |                     | 206,0               | 27,6                  |                 |

|    |       |       |        |        |       |         |       |  |
|----|-------|-------|--------|--------|-------|---------|-------|--|
| 29 | PQ    | 1,050 | -0,54  |        |       | 283,5   | 26,9  |  |
| 30 | PV    | 1,048 | -4,49  | 250,14 | 146,3 |         |       |  |
| 31 | PV    | 0,982 | 0,12   | 573,22 | 207,1 | 9,20    | 4,60  |  |
| 32 | PV    | 0,983 | 1,73   | 650,20 | 205,3 |         |       |  |
| 33 | PV    | 0,997 | 2,17   | 632,10 | 108,6 |         |       |  |
| 34 | PV    | 1,012 | 0,73   | 508,16 | 166,5 |         |       |  |
| 35 | PV    | 1,049 | 4,14   | 650,20 | 209,3 |         |       |  |
| 36 | PV    | 1,064 | 6,83   | 560,10 | 102,1 |         |       |  |
| 37 | PV    | 1,028 | 1,24   | 540,41 | 0,4   |         |       |  |
| 38 | PV    | 1,027 | 6,52   | 830,23 | 23,0  |         |       |  |
| 39 | Slack | 1,030 | -11,00 | 1.000  | 87,4  | 1.104,0 | 250,0 |  |

Tabela B.13: Dados dos ramos do sistema New England

| De | Para | Circuito | Resistência<br>(p.u) | Reatância<br>(p.u) | Shunt<br>(MVar) | Tap<br>- |
|----|------|----------|----------------------|--------------------|-----------------|----------|
| 1  | 2    | 1        | 0,0035               | 0,0411             | 69,87           |          |
| 1  | 39   | 1        | 0,0010               | 0,0250             | 75,00           |          |
| 2  | 3    | 1        | 0,0013               | 0,0151             | 25,72           |          |
| 2  | 25   | 1        | 0,0070               | 0,0086             | 14,60           |          |
| 2  | 30   | 1        |                      | 0,0181             |                 | 1,025    |
| 3  | 4    | 1        | 0,0013               | 0,0213             | 22,14           |          |
| 3  | 18   | 1        | 0,0011               | 0,0133             | 21,38           |          |
| 4  | 5    | 1        | 0,0008               | 0,0128             | 13,42           |          |
| 4  | 14   | 1        | 0,0008               | 0,0129             | 13,82           |          |
| 5  | 6    | 1        | 0,0002               | 0,0026             | 4,34            |          |
| 5  | 8    | 1        | 0,0008               | 0,0112             | 14,76           |          |
| 6  | 7    | 1        | 0,0006               | 0,0092             | 11,30           |          |
| 6  | 11   | 1        | 0,0007               | 0,0082             | 13,89           |          |
| 6  | 31   | 1        |                      | 0,0250             |                 | 1,070    |
| 7  | 8    | 1        | 0,0004               | 0,0046             | 7,80            |          |
| 8  | 9    | 1        | 0,0023               | 0,0363             | 38,04           |          |
| 9  | 39   | 1        | 0,0010               | 0,0250             | 120,00          |          |
| 10 | 11   | 1        | 0,0004               | 0,0043             | 7,29            |          |



|    |    |   |        |        |        |       |
|----|----|---|--------|--------|--------|-------|
| 10 | 13 | 1 | 0,0004 | 0,0043 | 7,29   |       |
| 10 | 32 | 1 |        | 0,0200 |        | 1,070 |
| 12 | 11 | 1 | 0,0016 | 0,0435 |        | 1,006 |
| 12 | 13 | 1 | 0,0016 | 0,0435 |        | 1,006 |
| 13 | 14 | 1 | 0,0009 | 0,0101 | 17,23  |       |
| 14 | 15 | 1 | 0,0018 | 0,0217 | 36,60  |       |
| 15 | 16 | 1 | 0,0009 | 0,0094 | 17,10  |       |
| 16 | 17 | 1 | 0,0007 | 0,0089 | 13,42  |       |
| 16 | 19 | 1 | 0,0016 | 0,0195 | 30,40  |       |
| 16 | 21 | 1 | 0,0008 | 0,0135 | 25,48  |       |
| 16 | 24 | 1 | 0,0003 | 0,0059 | 6,80   |       |
| 17 | 18 | 1 | 0,0007 | 0,0082 | 13,19  |       |
| 17 | 27 | 1 | 0,0013 | 0,0173 | 32,16  |       |
| 19 | 20 | 1 | 0,0007 | 0,0138 |        | 1,060 |
| 19 | 33 | 1 | 0,0007 | 0,0142 |        | 1,070 |
| 20 | 34 | 1 | 0,0009 | 0,0180 |        | 1,009 |
| 21 | 22 | 1 | 0,0008 | 0,0140 | 25,65  |       |
| 22 | 23 | 1 | 0,0006 | 0,0096 | 18,46  |       |
| 22 | 35 | 1 |        | 0,0143 |        | 1,025 |
| 23 | 24 | 1 | 0,0022 | 0,0350 | 36,10  |       |
| 23 | 36 | 1 | 0,0005 | 0,0272 |        |       |
| 25 | 26 | 1 | 0,0032 | 0,0323 | 51,30  |       |
| 25 | 37 | 1 | 0,0006 | 0,0232 |        | 1,025 |
| 26 | 27 | 1 | 0,0014 | 0,0147 | 23,96  |       |
| 26 | 28 | 1 | 0,0043 | 0,0474 | 78,02  |       |
| 26 | 29 | 1 | 0,0057 | 0,0625 | 102,90 |       |
| 28 | 29 | 1 | 0,0014 | 0,0151 | 24,90  |       |
| 29 | 38 | 1 | 0,0008 | 0,0156 |        | 1,025 |

Tabela B.14: Dados dos geradores do sistema New England

| Gerador<br>- | H<br>(s) | Base<br>(MVA) | $x'_d$<br>(p.u) | $x'_q$<br>(p.u) | $x_d$<br>(p.u) | $x_q$<br>(p.u) | $R_a$<br>(p.u) | $T'_{do}$<br>(s) | $T'_{qo}$<br>(s) | $x_l$<br>(p.u) |
|--------------|----------|---------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|----------------|
| 30           | 42,0     | 100,0         | 0,031           | 0,008           | 0,100          | 0,069          | 0,0            | 10,20            | 0,10             | 0,012          |
| 31           | 30,3     | 100,0         | 0,069           | 0,170           | 0,295          | 0,282          | 0,0            | 6,56             | 1,50             | 0,035          |
| 32           | 35,8     | 100,0         | 0,053           | 0,087           | 0,249          | 0,237          | 0,0            | 5,70             | 1,50             | 0,030          |
| 33           | 28,6     | 100,0         | 0,043           | 0,166           | 0,262          | 0,258          | 0,0            | 5,69             | 1,50             | 0,029          |
| 34           | 26,0     | 100,0         | 0,132           | 0,166           | 0,670          | 0,620          | 0,0            | 5,40             | 0,44             | 0,054          |
| 35           | 34,8     | 100,0         | 0,050           | 0,081           | 0,254          | 0,241          | 0,0            | 7,30             | 0,40             | 0,022          |
| 36           | 26,4     | 100,0         | 0,049           | 0,186           | 0,295          | 0,292          | 0,0            | 5,66             | 1,50             | 0,032          |
| 37           | 24,3     | 100,0         | 0,057           | 0,091           | 0,290          | 0,280          | 0,0            | 6,70             | 0,41             | 0,028          |
| 38           | 34,5     | 100,0         | 0,057           | 0,059           | 0,210          | 0,205          | 0,0            | 4,79             | 1,96             | 0,030          |
| 39           | 500,0    | 100,0         | 0,006           | 0,008           | 0,020          | 0,019          | 0,0            | 7,00             | 0,70             | 0,003          |

Tabela B.15: Dados dos reguladores de tensão do sistema New England

| Gerador<br>- | $K_a$<br>(p.u) | $T_a$<br>(s) | Gerador<br>- | $K_a$<br>(p.u) | $T_a$<br>(s) |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|--------------|
| 30           | 5,00           | 0,06         | 35           | 5,00           | 0,02         |
| 31           | 6,20           | 0,05         | 36           | 40,00          | 0,02         |
| 32           | 5,00           | 0,06         | 37           | 5,00           | 0,02         |
| 33           | 5,00           | 0,06         | 38           | 40,00          | 0,02         |
| 34           | 40,00          | 0,02         | 39           | -              | -            |

- Sistema Sul-Sudeste brasileiro

Tabela B.16: Dados de geradores do sistema Sul-Sudeste brasileiro

| Gerador | H<br>(s)       | Base<br>(MVA)  | $x'_d$<br>(p.u)   | $x'_q$<br>(p.u)   | $x_d$<br>(p.u) | $x_q$<br>(p.u) | $R_a$<br>(p.u) | $T'_{do}$<br>(s) | $T'_{qo}$<br>(s) | $x_l$<br>(p.u) |
|---------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|----------------|
|         | $x''_d$<br>(s) | $x''_q$<br>(s) | $T''_{do}$<br>(s) | $T''_{qo}$<br>(s) |                |                |                |                  |                  |                |
| 12      | 9,08           | 500,0          | 0,190             | 0,150             | 0,618          | 0,369          | 0,0            | 5,60             | 1,50             | 0,0            |
|         | 0,156          | 0,00           | 0,080             | 0,150             |                |                |                |                  |                  |                |
| 14      | 2,58           | 300,0          | 0,431             | 0,150             | 1,313          | 0,862          | 0,0            | 8,13             | 1,50             | 0,0            |
|         | 0,380          | 0,00           | 0,048             | 0,140             |                |                |                |                  |                  |                |
| 16      | 8,18           | 700,0          | 0,182             | 0,150             | 0,524          | 0,354          | 0,0            | 5,50             | 1,50             | 0,0            |
|         | 0,128          | 0,00           | 0,085             | 0,221             |                |                |                |                  |                  |                |
| 18      | 15,73          | 500,0          | 0,071             | 0,150             | 0,200          | 0,142          | 0,0            | 8,30             | 1,50             | 0,0            |
|         | 0,054          | 0,00           | 0,060             | 0,030             |                |                |                |                  |                  |                |
| 20      | 9,59           | 700,0          | 0,173             | 0,150             | 0,557          | 0,331          | 0,0            | 5,40             | 1,50             | 0,0            |
|         | 0,131          | 0,00           | 0,080             | 0,120             |                |                |                |                  |                  |                |
| 22      | 1,59           | 600,0          | 0,695             | 0,150             | 1,751          | 1,048          | 0,0            | 5,00             | 1,50             | 0,0            |
|         | 0,565          | 0,00           | 0,050             | 0,100             |                |                |                |                  |                  |                |
| 26      | 2,55           | 200,0          | 0,357             | 0,150             | 1,035          | 0,714          | 0,0            | 3,50             | 1,50             | 0,0            |
|         | 0,238          | 0,00           | 0,063             | 0,036             |                |                |                |                  |                  |                |
| 30      | 7,73           | 200,0          | 0,133             | 0,150             | 0,727          | 0,716          | 0,0            | 5,36             | 1,50             | 0,0            |
|         | 0,112          | 0,00           | 0,042             | 0,253             |                |                |                |                  |                  |                |
| 31      | 4,12           | 200,0          | 0,194             | 0,150             | 1,556          | 1,512          | 0,0            | 7,20             | 1,50             | 0,0            |
|         | 0,115          | 0,00           | 0,060             | 0,107             |                |                |                |                  |                  |                |
| 44      | 3,20           | 200,0          | 0,220             | 0,150             | 0,900          | 0,525          | 0,0            | 8,00             | 1,50             | 0,0            |
|         | 0,100          | 0,00           | 0,060             | 0,200             |                |                |                |                  |                  |                |
| 48      | 4,80           | 300,0          | 0,123             | 0,150             | 0,566          | 0,333          | 0,0            | 9,00             | 1,50             | 0,0            |
|         | 0,073          | 0,00           | 0,060             | 0,200             |                |                |                |                  |                  |                |
| 50      | 4,80           | 100,0          | 0,123             | 0,150             | 0,566          | 0,333          | 0,0            | 9,00             | 1,50             | 0,0            |
|         | 0,083          | 0,00           | 0,060             | 0,200             |                |                |                |                  |                  |                |
| 250     | 11,48          | 100,0          | 0,104             | 0,150             | 0,449          | 0,260          | 0,0            | 9,69             | 1,50             | 0,0            |

|     |       |         |       |       |       |       |     |      |      |     |
|-----|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-----|------|------|-----|
|     | 0,065 | 0,00    | 0,054 | 0,085 |       |       |     |      |      |     |
| 253 | 6,09  | 100,0   | 0,218 | 0,150 | 0,900 | 0,528 | 0,0 | 7,79 | 1,50 | 0,0 |
|     | 0,134 | 0,00    | 0,059 | 0,085 |       |       |     |      |      |     |
| 300 | 14,80 | 300,0   | 0,102 | 0,150 | 0,296 | 0,220 | 0,0 | 7,00 | 1,50 | 0,0 |
|     | 0,081 | 0,00    | 0,065 | 0,085 |       |       |     |      |      |     |
| 301 | 4,75  | 400,0   | 0,248 | 0,150 | 0,870 | 0,517 | 0,0 | 3,14 | 1,50 | 0,0 |
|     | 0,125 | 0,00    | 0,060 | 0,107 |       |       |     |      |      |     |
| 303 | 17,62 | 600,0   | 0,088 | 0,150 | 0,335 | 0,227 | 0,0 | 7,00 | 1,50 | 0,0 |
|     | 0,067 | 0,00    | 0,066 | 0,140 |       |       |     |      |      |     |
| 305 | 4,22  | 400,0   | 0,320 | 0,150 | 1,070 | 0,689 | 0,0 | 3,26 | 1,50 | 0,0 |
|     | 0,227 | 0,00    | 0,030 | 0,065 |       |       |     |      |      |     |
| 401 | 8,49  | 100,0   | 0,142 | 0,150 | 0,450 | 0,263 | 0,0 | 6,44 | 1,50 | 0,0 |
|     | 0,104 | 0,00    | 0,060 | 0,060 |       |       |     |      |      |     |
| 402 | 14,77 | 100,0   | 0,073 | 0,150 | 0,242 | 0,141 | 0,0 | 7,08 | 1,50 | 0,0 |
|     | 0,052 | 0,00    | 0,052 | 0,060 |       |       |     |      |      |     |
| 404 | 6,74  | 200,0   | 0,150 | 0,150 | 1,118 | 1,096 | 0,0 | 5,50 | 1,50 | 0,0 |
|     | 0,078 | 0,00    | 0,078 | 0,078 |       |       |     |      |      |     |
| 500 | 11,05 | 500,0   | 0,104 | 0,150 | 0,364 | 0,228 | 0,0 | 6,20 | 1,50 | 0,0 |
|     | 0,080 | 0,00    | 0,043 | 0,074 |       |       |     |      |      |     |
| 501 | 6,54  | 1900,0  | 0,182 | 0,150 | 0,511 | 0,410 | 0,0 | 4,28 | 1,50 | 0,0 |
|     | 0,147 | 0,00    | 0,040 | 0,100 |       |       |     |      |      |     |
| 502 | 5,04  | 1.000,0 | 0,241 | 0,150 | 0,758 | 0,491 | 0,0 | 3,93 | 1,50 | 0,0 |
|     | 0,161 | 0,00    | 0,067 | 0,137 |       |       |     |      |      |     |
| 506 | 2,58  | 200,0   | 0,500 | 0,150 | 1,520 | 0,860 | 0,0 | 3,00 | 1,50 | 0,0 |
|     | 0,280 | 0,00    | 0,280 | 0,080 |       |       |     |      |      |     |
| 507 | 10,00 | 400,0   | 0,168 | 0,150 | 0,477 | 0,309 | 0,0 | 6,85 | 1,50 | 0,0 |
|     | 0,124 | 0,00    | 0,030 | 0,090 |       |       |     |      |      |     |
| 512 | 0,49  | 400,0   | 2,277 | 0,150 | 5,722 | 3,777 | 0,0 | 5,10 | 1,50 | 0,0 |
|     | 1,833 | 0,00    | 0,060 | 0,060 |       |       |     |      |      |     |
| 514 | 5,39  | 400,0   | 0,230 | 0,150 | 0,684 | 0,460 | 0,0 | 4,15 | 1,50 | 0,0 |
|     | 0,182 | 0,00    | 0,022 | 0,028 |       |       |     |      |      |     |
| 518 | 4,48  | 200,0   | 0,285 | 0,150 | 0,790 | 0,500 | 0,0 | 4,68 | 1,50 | 0,0 |

|       |       |       |       |       |       |       |     |      |      |     |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|------|------|-----|
|       | 0,200 | 0,200 | 0,040 | 0,070 |       |       |     |      |      |     |
| 519   | 5,31  | 300,0 | 0,500 | 0,150 | 1,100 | 0,630 | 0,0 | 7,00 | 1,50 | 0,0 |
|       | 0,380 | 0,380 | 0,031 | 0,029 |       |       |     |      |      |     |
| 532   | 5,85  | 100,0 | 0,150 | 0,150 | 0,724 | 0,476 | 0,0 | 11,0 | 1,50 | 0,0 |
|       | 0,097 | 0,00  | 0,120 | 0,150 |       |       |     |      |      |     |
| 533   | 5,85  | 100,0 | 0,150 | 0,150 | 0,724 | 0,476 | 0,0 | 11,0 | 1,50 | 0,0 |
|       | 0,097 | 0,00  | 0,120 | 0,150 |       |       |     |      |      |     |
| 1.107 | 37,37 | 100,0 | 0,040 | 0,150 | 0,122 | 0,092 | 0,0 | 7,60 | 1,50 | 0,0 |
|       | 0,032 | 0,00  | 0,090 | 0,190 |       |       |     |      |      |     |
| 753   | 3,12  | 300,0 | 0,369 | 0,150 | 1,059 | 0,720 | 0,0 | 4,17 | 1,50 | 0,0 |
|       | 0,270 | 0,00  | 0,060 | 0,090 |       |       |     |      |      |     |
| 805   | 18,60 | 100,0 | 0,072 | 0,150 | 0,219 | 0,163 | 0,0 | 7,92 | 1,50 | 0,0 |
|       | 0,057 | 0,00  | 0,060 | 0,090 |       |       |     |      |      |     |
| 806   | 18,60 | 300,0 | 0,072 | 0,150 | 0,219 | 0,163 | 0,0 | 7,92 | 1,50 | 0,0 |
|       | 0,057 | 0,00  | 0,060 | 0,090 |       |       |     |      |      |     |
| 811   | 1,61  | 400,0 | 0,364 | 0,150 | 1,457 | 0,962 | 0,0 | 6,10 | 1,50 | 0,0 |
|       | 0,255 | 0,00  | 0,060 | 0,090 |       |       |     |      |      |     |
| 907   | 1,78  | 200,0 | 0,270 | 0,150 | 2,648 | 2,648 | 0,0 | 5,00 | 1,50 | 0,0 |
|       | 0,162 | 0,00  | 0,030 | 0,070 |       |       |     |      |      |     |
| 909   | 2,53  | 200,0 | 0,306 | 0,150 | 2,400 | 2,400 | 0,0 | 5,00 | 1,50 | 0,0 |
|       | 0,213 | 0,00  | 0,030 | 0,060 |       |       |     |      |      |     |
| 911   | 4,84  | 200,0 | 0,201 | 0,150 | 1,484 | 1,484 | 0,0 | 4,89 | 1,50 | 0,0 |
|       | 0,154 | 0,00  | 0,030 | 0,056 |       |       |     |      |      |     |
| 917   | 5,65  | 200,0 | 0,196 | 0,150 | 0,676 | 0,478 | 0,0 | 4,91 | 1,50 | 0,0 |
|       | 0,150 | 0,00  | 0,030 | 0,040 |       |       |     |      |      |     |
| 919   | 6,58  | 200,0 | 0,182 | 0,150 | 0,658 | 0,329 | 0,0 | 8,81 | 1,50 | 0,0 |
|       | 0,135 | 0,00  | 0,050 | 0,070 |       |       |     |      |      |     |
| 920   | 6,54  | 200,0 | 0,188 | 0,150 | 0,570 | 0,373 | 0,0 | 8,98 | 1,50 | 0,0 |
|       | 0,158 | 0,00  | 0,035 | 0,075 |       |       |     |      |      |     |
| 925   | 14,32 | 200,0 | 0,085 | 0,150 | 0,248 | 0,168 | 0,0 | 10,0 | 1,50 | 0,0 |
|       | 0,062 | 0,00  | 0,040 | 0,130 |       |       |     |      |      |     |
| 927   | 14,32 | 100,0 | 0,085 | 0,150 | 0,248 | 0,168 | 0,0 | 10,0 | 1,50 | 0,0 |

|       |       |       |       |       |       |       |     |      |      |     |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|------|------|-----|
|       | 0,062 | 0,00  | 0,040 | 0,130 |       |       |     |      |      |     |
| 928   | 14,32 | 100,0 | 0,085 | 0,150 | 0,248 | 0,168 | 0,0 | 10,0 | 1,50 | 0,0 |
|       | 0,062 | 0,00  | 0,040 | 0,130 |       |       |     |      |      |     |
| 1.158 | 5,08  | 400,0 | 0,220 | 0,150 | 0,842 | 0,582 | 0,0 | 9,55 | 1,50 | 0,0 |
|       | 0,174 | 0,00  | 0,095 | 0,125 |       |       |     |      |      |     |
| 1.162 | 1,93  | 600,0 | 1,620 | 0,150 | 4,862 | 3,218 | 0,0 | 6,10 | 1,50 | 0,0 |
|       | 1,022 | 0,00  | 0,105 | 0,180 |       |       |     |      |      |     |
| 1.171 | 2,49  | 200,0 | 0,242 | 0,150 | 2,303 | 2,303 | 0,0 | 5,00 | 1,50 | 0,0 |
|       | 0,181 | 0,00  | 0,060 | 0,057 |       |       |     |      |      |     |
| 1.175 | 2,25  | 200,0 | 0,414 | 0,150 | 1,424 | 1,062 | 0,0 | 7,32 | 1,50 | 0,0 |
|       | 0,360 | 0,00  | 0,031 | 0,051 |       |       |     |      |      |     |

Tabela B.17: Dados dos reguladores de tensão do sistema Sul-Sudeste brasileiro

| Gerador | $K_a$ | $T_a$ | Gerador | $K_a$ | $T_a$ |
|---------|-------|-------|---------|-------|-------|
| -       | (p.u) | (s)   | -       | (p.u) | (s)   |
| 12      | 56,0  | 0,05  | 507     | 68,5  | 0,05  |
| 14      | 81,3  | 0,05  | 512     | 51,0  | 0,05  |
| 16      | 55,0  | 0,05  | 514     | 41,5  | 0,05  |
| 18      | 83,0  | 0,05  | 518     | 46,8  | 0,05  |
| 20      | 32,0  | 0,05  | 519     | 70,0  | 0,05  |
| 22      | 50,0  | 0,05  | 532     | 115,0 | 0,05  |
| 26      | 30,0  | 0,05  | 533     | 115,0 | 0,05  |
| 30      | 53,6  | 0,05  | 1.107   | 76,0  | 0,05  |
| 31      | 72,0  | 0,05  | 753     | 35,0  | 0,05  |
| 44      | 80,0  | 0,05  | 805     | 79,2  | 0,05  |
| 48      | 90,0  | 0,05  | 806     | 79,2  | 0,05  |
| 50      | 90,0  | 0,05  | 811     | 61,0  | 0,05  |
| 250     | 96,9  | 0,05  | 907     | 50,0  | 0,05  |
| 253     | 77,9  | 0,05  | 909     | 50,0  | 0,05  |
| 300     | 70,0  | 0,05  | 911     | 48,9  | 0,05  |
| 301     | 31,4  | 0,05  | 917     | 55,1  | 0,05  |
| 303     | 70,0  | 0,05  | 919     | 88,1  | 0,05  |

|     |      |      |       |       |      |
|-----|------|------|-------|-------|------|
| 305 | 32,6 | 0,05 | 920   | 89,8  | 0,05 |
| 401 | 54,4 | 0,05 | 925   | 100,0 | 0,05 |
| 402 | 70,8 | 0,05 | 927   | 100,0 | 0,05 |
| 404 | 55,0 | 0,05 | 928   | 100,0 | 0,05 |
| 500 | 62,0 | 0,05 | 1.158 | 9,55  | 0,05 |
| 501 | 42,8 | 0,05 | 1.162 | 61,0  | 0,05 |
| 502 | 39,3 | 0,05 | 1.171 | 50,0  | 0,05 |
| 506 | 30,0 | 0,05 | 1.175 | 73,2  | 0,05 |

## Apêndice C

### Dados econômicos dos sistemas teste

Para todos os sistema considerados na análise econômica, adotou-se os seguintes limites para tensão nas barras:

$$0,90 \leq V_i \leq 1,10 \text{ pu}$$

- Sistema de 9 barras e 3 geradores

Tabela C.1: Dados econômicos dos geradores do sistema WSCC

| Gerador | $a$     | $b$      | $c$        | $P_{min}$ | $P_{max}$ |
|---------|---------|----------|------------|-----------|-----------|
| 1       | 0,03546 | 38,30553 | 1.243,5311 | 25        | 250       |
| 2       | 0,02110 | 36,32782 | 165,5696   | 25        | 270       |
| 3       | 0,01799 | 38,27041 | 1.356,6592 | 35        | 285       |

- Sistema New England

Tabela C.2: Dados econômicos dos geradores do sistema New England

| Gerador | $a$     | $b$  | $c$ | $P_{min}$ | $P_{max}$ |
|---------|---------|------|-----|-----------|-----------|
| 30      | 0,01930 | 6,90 | 0,0 | 10        | 402,5     |
| 31      | 0,01110 | 3,70 | 0,0 | 10        | 747,5     |
| 32      | 0,01040 | 2,80 | 0,0 | 10        | 920,0     |
| 33      | 0,00880 | 4,70 | 0,0 | 10        | 862,5     |
| 34      | 0,01280 | 2,80 | 0,0 | 10        | 747,5     |
| 35      | 0,00940 | 3,70 | 0,0 | 10        | 862,5     |
| 36      | 0,00990 | 4,80 | 0,0 | 10        | 862,5     |
| 37      | 0,01130 | 3,60 | 0,0 | 10        | 805,0     |
| 38      | 0,00710 | 3,70 | 0,0 | 10        | 1.035,0   |
| 39      | 0,00640 | 3,90 | 0,0 | 10        | 1.380,0   |



## Apêndice D

### Modelos de geradores

As Tabelas D.1 e D.2 apresentam os principais modelos de geradores síncronos utilizados nos programas computacionais PSAT (MILANO, 2005) e PacDyn (CEPEL, 2011), respectivamente.

Tabela D.1: Modelos de geradores do aplicativo PSAT

| Modelo | $T'_{d0}$ | $T'_{q0}$ | $T''_{d0}$ | $T''_{q0}$ | $x_d$ | $x'_d$ | $x''_d$ | $x_q$ | $x'_q$ | $x''_q$ |
|--------|-----------|-----------|------------|------------|-------|--------|---------|-------|--------|---------|
| II     |           |           |            |            |       | *      |         |       |        |         |
| III    | *         |           |            |            | *     | *      |         | *     |        |         |
| IV     | *         | *         |            |            | *     | *      |         | *     | *      |         |
| V.1    | *         | *         |            | *          | *     | *      |         | *     | *      |         |
| V.2    | *         |           | *          | *          | *     | *      | *       | *     |        | *       |
| V.3    | *         |           |            |            | *     | *      |         | *     |        |         |
| VI     | *         | *         | *          | *          | *     | *      | *       | *     | *      | *       |

Tabela D.2: Modelos de geradores do PacDyn

| Modelo | $T'_{d0}$ | $T'_{q0}$ | $T''_{d0}$ | $T''_{q0}$ | $x_d$ | $x'_d$ | $x''_d$ | $x_q$ | $x'_q$ | $x''_q$ |
|--------|-----------|-----------|------------|------------|-------|--------|---------|-------|--------|---------|
| I      |           |           |            |            |       | *      |         |       | *      |         |
| II     | *         |           |            |            | *     | *      |         |       | *      |         |
| III    | *         | *         |            |            | *     | *      |         | *     | *      |         |
| IV     | *         |           | *          | *          | *     | *      | *       | *     | *      | *       |
| V      | *         | *         | *          | *          | *     | *      | *       | *     | *      | *       |
| VI     | *         |           | *          | *          | *     | *      | *       | *     |        | *       |

## REFERÊNCIAS

- ABD-ELAZIM, S. M.; ALI, E. S. "Bacteria foraging optimization algorithm based SVC damping controller design for power system stability enhancement." *Electric Power System Research*, v. 43, n. 1, p. 933-940, July 2012.
- ABD-ELAZIM, S. M.; ALI, E. S. "Coordinated design of PSSs and SVC via bacteria foraging optimization in a multimachine power system." *International Electrical Power and Energy Systems*, v. 41, n. 1, p. 44-53, April 2012.
- ABDEL-MAGID, Y. L. et al. "Simultaneous stabilizers of multimachine power systems via genetic algorithms." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 14, n. 4, p. 1428-1438, November 1999.
- ABDEL-MAGID, Y. L.; ABIDO, M. A. "Optimal multiobjective design of robust power system stabilizers using genetic algorithms." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 18, n. 3, p. 1125-1132, August 2003.
- ABIDO, M. A. "Robust design of multimachine power system stabilizers using simulated annealing." *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 15, n. 3, p. 297-304, September 2000.
- ABIDO, M. A. "An efficient heuristic optimization technique for robust power system stabilizer design." *Electrical Power and Energy Systems*, v. 58, n. 2, p. 53-62, June 2001.
- ABIDO, M. A. "Optimal design of power system stabilizers using particle swarm optimization." *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 17, n. 3, p. 406-413, September 2002.
- ABIDO, M. A.; ABDEL-MAGID, Y. L. "Adaptive tuning of power system stabilizers using radial basis function networks." *Electric Power System Research*, v. 49, n. 1, p. 21-29, February 1999.
- ABIDO, M. A.; ABDEL-MAGID, Y. L. "Robust design of multimachine power system stabilizers using tabu search algorithm." *IEE Proceedings- Generation, Transmission and Distribution*, v. 147, n. 6, p. 387-394, November 2000.
- ALABDULJABBAR, A. A.; MILANOVIC, J. V. "Assessment of techno-economic contribution of FACTS devices to power system operation." *Electric Power Systems Research*, v. 80, n. 10, p. 1247-1255, October 2010.

- ALHASAWI, F. B.; MILANOVIC, J. V. "Techno- economic contribution of FACTS devices to the operation of power system with high level to wind power integration." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 27, n. 3, p. 1414-1421, Aug. 2012.
- ALI, E. S.; ABD-ELAZIM, S. M. "Coordinated design of PSSs and TCSC via bacteria swarm optimization algorithm in a multimachine power system." *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, v. 36, n. 1, p. 84-92, December 2011.
- ALI, E. S.; ABD-ELAZIM, S. M. "TCSC damping controller design based on bacteria foraging optimization algorithm for a multimachine power system." *International Journal of Eletrical Power & Energy Systems*, v. 37, n. 1, p. 23-30, May 2012.
- ALKHATIB, H.; DUVEAU, J. "Dynamic genetic algorithms for robust design of multimachine power system stabilizers." *Electrical Power and Energy Systems*, v. 45, n. 1, p. 242-251, February 2013.
- ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. A. *Power System Control and Stability*. 2<sup>a</sup>. ed. Ames: The Iowa State University Press, 2003.
- AYAN, K.; KILIÇ, U. "Solution of transient stability- constrained optimal power flow using artificial bee colony algorithm." *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, v. 21, p. 360-372, 2013.
- AYRES, H. M. et al. "A didactic procedurefor designing power oscillation dampers of FACTS devices." *Simulation Modelling Practice and Theory*, v. 18, n. 6, p. 896-909, June 2010.
- BIRGE, B. "PSOt- a particle swarm optimization Toolbox for use with MatLab." *Swarm Intelligence Symposium*, April 2003. 182-186.
- BOUKATIM, G. E. et al. "A comparison of classical, robust, and decentralized control designs for multiple power system stabilizers." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 15, n. 4, p. 1287-1292, November 2000.
- BYERLY, R. T.; BENNON, R. J.; SHERMAN, D. E. "Eigenvalue analysis of synchronizing power flow oscillations in large electric power systems." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-101, n. 1, p. 235-243, January 1982.
- CAI, H. R.; CHUNG, C. Y.; WONG, K. P. "Application of differential evolution algorithm for transient stability constrained optimal power flow." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 23, n. 2, p. 719-728, May 2008.
- CAI, L.; ERLICH, I. "Simultaneous coordinated tuning of PSS and FACTS damping controllers in large power systems." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 20, n. 1, p. 294-300, February 2005.

- CEPEL. *Programa de Análise de Redes- Manual do Usuário*. v. 09.04.05, 2009.
- CEPEL. *Manual do Programa ANATEM*. versão 10.4.5. 2010.
- CEPEL. *Manual do Programa PacDyn*. versão 9.4.1. 2011.
- CERNY, V. "Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: an efficient simulation algorithm." *Journal of Optimization Theory and Application*, v. 45, n. 1, p. 41-51, January 1987.
- CHENG, S.; HWANG, C. "Optimal approximation of linear systems by differential evolution algorithm." *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics- Part A: Systems and Humans*, v. 31, n. 6, p. 698-707, November 2001.
- CONDREN, J.; GEDRA, T. W. "Expected- security- cost optimal power flow with small signal stability constraints." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 21, n. 4, p. 1736-1743, November 2006.
- DE MARCO, F. J.; MARTINS, N.; FERRAZ, J. C. R. "An automatic method for power system stabilizers phase compensation design." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 28, n. 2, p. 997-1007, May 2013.
- DE MENEZES, M. M.; DE ARAÚJO, P. B. "Ajuste coordenado de parâmetros dos controladores ESP e TCSC-POD." *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE*, Goiânia, 2012. 01-06.
- DO BOMFIM, A. L.; TARANTO, G. N.; FALCÃO, D. M. "Simultaneous tuning of power system damping controllers using genetic algorithms." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 15, n. 1, p. 163-169, February 2000.
- FERREIRA, C. M. B. M. "Análise da estabilidade transitória de sistemas elétricos de energia utilizando formulações híbridas." Tese de Doutorado, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Porto, 2005.
- FU, C.; BOSE, A. "Contingency ranking based on severity indices in dynamic security analysis." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 14, n. 3, p. 980-986, August 1999.
- FURINI, M. A.; DE MOURA, R. F.; DE ARAÚJO, P. B. "Ajuste de parâmetros de controladores UPFC POD utilizando algoritmos genéticos." *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE*, Goiânia, 15-18 Maio 2012. 01-06.
- GAN, D.; THOMAS, J.; ZIMMERMAN, R. D. "Stability- constrained optimal power flow." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 15, n. 2, p. 535-540, May 2000.
- GIBBARD, M.; VOWLES, D. "Design of power system stabilizers for a multi-generator power station." *Power System Technology*, Perth, 04-07 December 2000. 1167-1171.

- GOLKAR, M. A.; ZARRINGHALAMEI, M. "Coordinated design of PSS and STATCOM parameters for power system stability improvement using genetic algorithm." *Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering*, v. 8, n. 2, p. 80-88, March 2009.
- GÓMES-EXPÓSITO, A.; CONEJO, A.; CAÑIZARES, C. *Electric Energy Systems Analysis and Operation*. USA: CRC Press, 2009.
- GROUP, I. W. "Excitation system models for power system stability studies." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 100, n. 2, p. 494-509, February 1981.
- GUIDE, U. *Global Optimization Toolbox*. 2013.
- HAUER, J.; DEMEURE, C.; SCHARF, L. "Initial results in Prony analysis of power system response signals." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 5, n. 1, p. 80-90, February 1990.
- HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission System*. New York: Wiley-IEEE Press, 2000.
- HSU, Y. et al. "Application of power system stabilizers and static var compensators." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 3, n. 4, p. 1464-1470, November 1988.
- JERONYMO, D. C. "Metaheurística aplicadas ao problema de despacho econômico de energia elétrica." Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2011.
- JIANG, Q.; GENG, G. "A reduced- space interior point method for transient stability constrained optimal power flow." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 25, n. 3, p. 1232-1240, August 2010.
- JIANG, Z. "Design of power system stabilizers using synergetic control theory." *Power Engineering Society General Meeting*, Tampa, 24-28 June 2007. 1-8.
- KAMWA, I.; GRONDIN, R.; TRUDEL, G. "IEEE PSS2B versus PSS4B: the limits of performance of modern power system stabilizers." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 20, n. 2, p. 903-915, May 2005.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. "Particle Swarm Optimization." *Neural Networks*, Perth, November 1995. 1942-1948.
- KIRKPATRICK, S.; GELLATT, C.; VECCHI, M. "Optimization by simulated annealing." *Science*, v. 220, n. 4598, p. 671-680, May 1983.
- KODSI, S. K. M.; CAÑIZARES, C. A. "Stability- constrained optimal power flow and its application to pricing power system stabilizers." *Power Symposium Annual North American*, October 2005. 120-126.

- KOKANOS, B. L.; KARADY, G. G. "Associante Hermite expansion small signal mode estimation." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 25, n. 2, p. 999-1006, May 2010.
- KUNDUR, P. *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill, 1994.
- KUNDUR, P. et al. "Definition and classification of power system stability." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 27, n. 3, p. 1387-1401, August 2004.
- LI, P. et al. "Eigenvalue- optimization- based optimal power flow with small- signal constraints." *IET Generation, Transmission and Distribution*, v. 7, n. 5, p. 440-450, January 2013.
- LOF, P. A. et al. "Fast calculation of a voltage stability index." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 7, n. 1, p. 54-64, February 1992.
- MARTINS, N.; LIMA, L. T. G. "Eigenvalue and frequency domain analysis of small-signal electromechanical stability problems." in *Proc. IEEE Symp. Application of Eigenanalysis and Frequency Domain Methods for System Dynamic Performance*, p. 17-33, 1989.
- MARTINS, N.; LIMA, L. T. G. "Determination of Suitable Locations for Power System Stabilizers and Static VAR Compensators for Damping Electromechanical Oscillations in Large Scale Power Systems." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 5, n. 4, p. 1455-1469, November 1990.
- MARTINS, N.; PELLANDA, P. C.; ROMMES, J. "Computation of transfer function dominant zeros with applications to oscillation damping control of large power systems." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 22, n. 4, p. 1657-1664, November 2007.
- METROPOLIS, N. et al. "Equation of state calculations by fast computing machines." *The Journal of Chemical Physics*, v. 21, n. 6, p. 1087-1092, June 1953.
- MILANO, F. *Power System Analysis Toolbox*. versão 2.1.6. 2005.
- MISHRA, S.; TRIPATHY, M.; NANDA, J. "Multi-machine power system stabilizer design by rule based bacteria foraging." *Electric Power System Research*, v. 77, n. 12, p. 1595-1607, October 2007.
- MITCHELL, M. *An Introduction to Genetic Algorithms*. Massachusetts Institute of Technology, 1997.
- MITRA, P. et al. "Performance of a fuzzy power stabilizer with tie line active power deviation feedback." *Power System Conference and Exposition*, Atlanta, October 2006. 884-889.
- MO, N. et al. "Transient stability constrained optimal power flow using particle swarm optimization." *IET Generation, Transmission and Distribution*, v. 1, n. 3, p. 476-483, May 2007.

- MONDAL, D.; CHAKRABARTI, A.; SENGUPTA, A. "Optimal placement and parameter setting of SVC and TCSC using PSO to mitigate small signal stability problem." *Electric Power System Research*, v. 42, n. 1, p. 334-340, November 2012.
- NAMBU, M.; OHSAWA, Y. "Development of an advanced power system stabilizer using a strict linearization approach." *IEEE Transaction on Power Systems*, v. 11, n. 2, p. 813-818, May 1996.
- NEVES, M. S. "Modelagem de carga em sistemas de energia elétrica: modelo matemático e sua validação com testes de campo." Universidade Federal de Juiz de Fora. Dissertação de Mestrado. 2008.
- OTHMAN, H. et al. "On the design of robust power system stabilizers." *IEEE Proc of 28<sup>a</sup> conf. on Dec. and Control*, December 1989. 1853-1857.
- PAI, M. A. *Energy Function Analysis for Power System Stability*. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 1989.
- PAIVA, A. L. D. O. "Aplicação do método de evolução diferencial à otimização de um ciclo de refrigeração por compressão de vapor de dois estágios através da análise exérgica." Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dezembro 2011.
- PANDA, S. "Differential evolutionary algorithm for TCSC- based controller design." *Simulated Modelling Practice and Theory*, v. 17, n. 10, p. 1618-1634, July 2009.
- PANDA, S.; PADHY, N. P. "Optimal location and controller design of STATCOM for power system stability improvement using PSO." *Journal of the Franklin Institute*, v. 345, n. 2, p. 166-181, March 2008.
- PAUCAR, V. L. "Métodos computacionais baseados na função de energia para análise direta da estabilidade transitória de sistemas de energia elétrica." Tese de Doutorado. Universidade de Campinas. Campinas. 1998.
- PAVELLA, M.; ERNST, D.; RUIZ-VEGA, D. *Transient Stability of Power Systems: A Unified Approach to Assessment and Control*. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- PAVELLA, M.; MURTHY, P. G. *Transient Stability of Power Systems (Theory and Practice)*. Chichester: John Wiley & Sons, 1994.
- PEREZ-ARRIAGA, I. J.; VERGHESES, G. C.; SCHWEPPE, F. C. "Selective modal analysis of very large systems with applications to electric power systems, part I and II." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 101, n. 9, p. 3126-3134, September 1982.

- PIZZANO-MARTÍNEZ, A.; FUERTE-ESQUIVEL, C. R.; RUIZ-VEGA, D. "A new practical approach to transient stability- constrained optimal power flow." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 26, n. 3, p. 1686-1696, August 2011.
- RABIH, A. J.; PAL, B. C.; MARTINS, N. "A sequential conic programming approach for the coordinated and robust design of power system stabilizers." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 25, n. 3, p. 1627-1637, August 2010.
- RAO, P. S.; SEN, I. "Robust tuning of power system stabilizers using QFT." *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, v. 7, n. 4, p. 478-486, July 1999.
- ROBBINS, H.; MONRO, S. "A stochastic approximation method." *Annal of Mathematical Statistics*, v. 22, n. 3, p. 400-407, 1951.
- ROCCA, P.; OLIVERI, G.; MASSA, A. "Differential evolution as applied to electromagnetic." *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, v. 53, n. 1, p. 38-49, February 2011.
- ROGERS, G. *Power System Oscillations*. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- ROMMES, J.; MARTINS, N.; FREITAS, F. D. "Computing righthmost eigenvalues for small-signal stability assessment of large-scale power systems." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 25, n. 2, p. 929-938, May 2012.
- ROUCO, L.; PÉREZ-ARRIAGA, I. J. "Multi-area Analysis of Small Signal Stability in Large Electric Power Systems by SMA." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 8, n. 3, p. 1257-1265, August 1993.
- SALIM, R. H.; RAMOS, R. A.; BRETAS, N. G. "Analysis of the Small Signal Dynamic Performance of Synchronous Generators under Unbalanced Operating Conditions." *Power and Energy Society General Meeting*, Minneapolis, p. 1-6, July 2010.
- SAMANI, E. R.; SEIFI, H.; SHEIKL-EL-ESLAMI, M. K. "A framework for PSS pricing as an ancillary service in a competitive electricity market." *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, v. 46, p. 221-227, November 2012.
- SCAVONI, F. E. et al. "Design of robust power system controllers using linear matrix inequalities." *IEEE Power Tech Conf.*, Porto, 10-13 September 2001.
- SHAYEGHI, H. et al. "A robust PSSs design using PSO in a multi-machine environment." *Energy Conversion and Management*, v. 51, n. 4, p. 696-702, April 2010.
- SHAYEGHI, H. et al. "TCSC robust damping controller design based on particle swarm optimization for a multi-machine power system." *Energy Conversion and Management*, v. 51, n. 10, p. 1873-1882, March 2010.



- SHAYEGHI, H. et al. "Tuning of damping controller for UPFC using quantum particle swarm optimizer." *Energy Conversion and Management*, v. 51, n. 11, p. 2299-2306, April 2010.
- SONG, Y. H.; JOHNS, A. T. *Flexible AC Transmission System (FACTS)*. London: United Kingdom: The Institute of Electrical Engineers, 1999.
- STEVENSON, W. D. *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*. McGraw-Hill, 1986.
- STORN, R.; PRICE, K. "Differential evolution- a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces." *Journal of Global Optimization*, v. 11, n. 4, p. 341-359, December 1997.
- TANGPATIPHAN, K.; YOKOYAMA, A. "Evolutionary programming incorporating neural network for transient stability constrained optimal power flow." *Power System Technology and IEEE Power India Conference*, October 2008. 1-8.
- TIRANUCHIT, A.; THOMAS, R. J. "A posturing strategy against voltage instabilities in electric power system." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 3, n. 1, p. 87-93, February 1988.
- UCHIDA, N.; NAGOA, T. "A new eigen-analysis method of steady-state stability studies for large power systems: S matrix method." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 3, n. 2, p. 706-714, May 1988.
- WANG, S. "A novel objective function and algorithm for optimal PSS parameter design in a multi-machine power system." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 28, n. 1, p. 522-531, February 2013.
- WERNER, H.; KORBA, P.; YANG, T. C. "Robust tuning of power system stabilizers using LMI- techniques." *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, v. 11, n. 1, p. 147-152, January 2003.
- WOOD, A. J.; WOLLENBERG, B. F. *Power Generation, Operation and Control*. London: John Wiley & Sons, 1996.
- WU, C.; HSU, Y. "Design of self-tuning PID power system stabilizer for multi-machine power system." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 3, n. 3, p. 1059-1064, August 1988.
- XU, Y. et al. "A hybrid method for transient stability- constrained optimal power flow computation." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 27, n. 4, p. 1769-1777, November 2012.
- YANG, X. *Engineering Optimization: An Introduction with Metaheuristic Applications*. John Wiley & Sons, 2010.

- YUAN, S. Q.; FANG, D. Z. "Robust PSS parameters design using a trajectory sensitivity approach." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 24, n. 2, p. 1011-1018, May 2009.
- YUAN, Y.; KUBOKAWA, J.; SASAKI, H. "A solution of optimal power flow with multicontingency transient stability constraints." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 18, n. 3, p. 1094-1102, August 2003.
- ZÁRATE-MIÑANO, R.; MILANO, F.; CONEJO, A. J. "An OPF methodology to ensure small-signal stability." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 26, n. 3, p. 1050-1061, August 2011.
- ZHENENKO, G. N.; FOUAD, A. A. "Steady-State stability Analysis with Frequency Methods: Optimization of Excitation." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-103, n. 4, p. 715-722, April 1984.