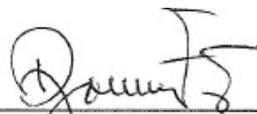


AJUSTE COORDENADO DE ESTABILIZADORES DE SISTEMA DE POTÊNCIA  
USANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

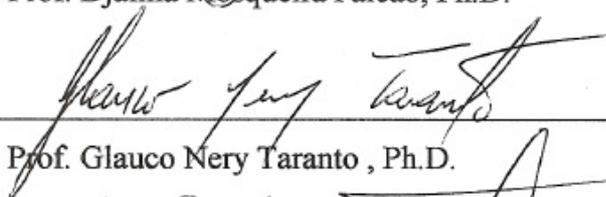
ANTONIO LUIZ BERGAMO DO BOMFIM

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

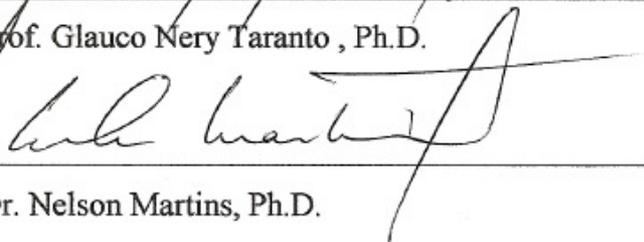
Aprovada por:



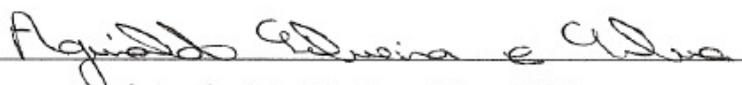
Prof. Djalma Mosqueira Falcão, Ph.D.



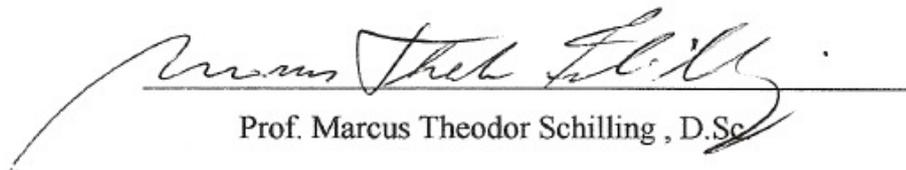
Prof. Glauco Nery Taranto, Ph.D.



Dr. Nelson Martins, Ph.D.



Prof. Aguinaldo Silveira e Silva, Ph.D.



Prof. Marcus Theodor Schilling, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2000

BOMFIM, ANTONIO LUIZ BERGAMO DO

Ajuste Coordenado de Estabilizadores de Sistema de Potência Usando Algoritmos Genéticos [Rio de Janeiro] 2000

XXII, 186 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Elétrica, 2000)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Algoritmos Genéticos Sequencial e Paralelo
2. Ajuste de Estabilizadores de Sistema de Potência

I. COPPE/UFRJ II. Título ( série )

A minha esposa Luzia e aos  
meus filhos, Danielle e Leandro  
pelo apoio e compreensão.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus orientadores, Professores Djalma Mosqueira Falcão e Glauco Nery Taranto pelo apoio, estímulo, confiança e pelos ensinamentos, que se traduziram num aprendizado durante o período de desenvolvimento deste trabalho.

À equipe de desenvolvimento do programa PacDyn, em especial aos Engenheiros Nelson Martins, Hermínio José da Cunha Pereira Pinto, Sérgio Gomes Junior e Paulo Eduardo Quintão, pela disponibilização das versões customizadas que permitiram a obtenção de parte dos resultados desta tese.

Ao CEPEL pela licença de uso dos Programas ANAREDE, ANATEM e PacDyn.

Ao Doutor Nelson Martins pelo apoio e estímulo, e pela experiência transmitida, fruto de inúmeras discussões que tivemos ao longo deste trabalho.

A Professora Carmen Lúcia Tancredo Borges pelas valiosas informações e ajuda para o entendimento da programação paralela.

Ao Engenheiro Heraldo Luís Silveira de Almeida do NACAD-COPPE, pela ajuda na familiarização com o computador paralelo IBM RS/6000 SP.

A ELETROBRAS por ter permitido e me apoiado no desenvolvimento desta tese.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

## AJUSTES COORDENADO DE ESTABILIZADORES DE SISTEMA DE POTÊNCIA USANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

Antonio Luiz Bergamo do Bomfim

Março / 2000

Orientadores: Prof. Djalma Mosqueira Falcão

Prof. Glauco Nery Taranto

Programa: Engenharia Elétrica

Esta tese apresenta uma aplicação da técnica de Algoritmos Genéticos (AGs) ao problema de ajuste de estabilizadores de sistemas de potência. É uma técnica de busca da melhor solução criada por Holland na década de 60, para permitir computadores evoluírem soluções de problemas difíceis, tais como otimização de funções e inteligência artificial. Utiliza múltiplas soluções, representadas pelos “cromossomos”. Operadores genéticos como a Seleção, Cruzamento e Mutação foram aplicados aos cromossomos para evolui-los e alcançar a melhor solução. O AG Simples foi modificado, introduzindo-se a técnica de variação do tamanho e deslocamento da região de busca e a representação do cromossomo em números reais. O AG foi usado para encontrar os parâmetros de controladores convencionais de estrutura fixa, com o objetivo de maximizar os amortecimentos de todos autovalores para um conjunto de condições de operação pré-especificado. Esta técnica foi aplicada à um ajuste global de estabilizadores ao sistema New England com 10 máquinas e ao Sistema Sul/Sudeste brasileiro modificado com 57 máquinas. Combinação com técnicas analíticas para melhorar as soluções foram investigadas. Foi também aplicada uma técnica de paralelização usando 4 nós de um computador IBM SP.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

## COORDINATED TUNING OF POWER SYSTEM STABILIZERS USING GENETIC ALGORITHMS

Antonio Luiz Bergamo do Bomfim

March / 2000

Advisors: Prof. Djalma Mosqueira Falcão

Prof. Glauco Nery Taranto

Department: Electrical Engineering

This thesis presents the application of Genetic Algorithms (GAs) to the coordinated tuning of power system damping controllers. GAs are search procedures based on the mechanics of natural selection and natural genetics. They were developed by John Holland in the sixties, to allow computers to evolve solutions to difficult problems, such as function optimization and artificial intelligence. GAs utilize multiple solutions represented by “chromossomes”. Genetic operators such as Selection, Crossover and Mutation are applied to the chromossomes to evolve to better solutions. A simple GA was modified by introducing a variable searching region and by utilizing real number representation of chromossomes. The GA was used to search the parameters of conventional fixed structure power system damping controllers, with the objective to maximize overall damping over a pre-specified set of operating conditions. The technique is applied for global PSS tuning to the new England 10-machine system and the modified Brazilian South/Southeastern 57-machine system. Combinations with analitic techniques to improve on the solutions were investigated. A parallel implementation was done on a 4-node IBM SP computer.

# SUMÁRIO

|   |      |
|---|------|
| <b>AGRADECIMENTOS</b> .....   | V    |
| <b>SIMBOLOGIA USADA</b> .....   | XVII |
| <b>CAPÍTULO 1</b> .....   | 1    |
| <b>INTRODUÇÃO</b> .....   | 1    |
| 1.1 - ESTRUTURA DA TESE .....   | 5    |
| 1.2 - CONTRIBUIÇÕES DA TESE .....   | 6    |
| 1.3 - PUBLICAÇÕES GERADAS POR ESTA TESE .....                             | 7    |
| • Revistas Intemacionais .....  | 7    |
| • Revistas Nacionais .....  | 7    |
| • Congressos Intemacionais .....  | 7    |
| • Congressos Nacionais .....  | 8    |
| <b>CAPÍTULO 2</b> .....   | 9    |
| <b>AJUSTE DE ESTABILIZADORES DE UM SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA</b> ..... | 9    |
| 2.1 - ESTABILIDADE ELETROMECHANICA .....                                  | 9    |
| 2.1.1 - Modelo Dinâmico de um Sistema Elétrico de Potência .....          | 14   |
| 2.1.2 - Autovalores e Autovetores .....                                   | 15   |
| 2.1.3 - Mode-Shape .....  | 15   |
| 2.1.4 - Resíduo da Função de Transferência .....                          | 17   |
| 2.2 - AJUSTE DE CONTROLADORES DE UM SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA .....    | 18   |
| 2.2.1 - Formulação do Problema .....                                      | 19   |
| 2.2.1.1 - Função de Adequabilidade .....                                  | 22   |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.3 - MÉTODOS ANALÍTICOS DE ALOCAÇÃO DE PÓLOS PARA PROJETO DE ESTABILIZADORES DE SISTEMA DE POTÊNCIA ..... | 23        |
| 2.3.1 - Método Iterativo de Posicionamento de Pólos .....  | 23        |
| 2.3.2 - Método de Posicionamento de Pólos por Nyquist .....  | 27        |
| <b>CAPÍTULO 3 .....</b>  | <b>28</b> |
| <b>ALGORITMOS GENÉTICOS .....</b>  | <b>28</b> |
| 3.1 - PROCEDIMENTOS DE BUSCA DOS ALGORITMOS GENÉTICOS .....  | 29        |
| 3.1.1 - Padrões de Semelhança .....  | 30        |
| 3.2 - REPRESENTAÇÃO DAS VARIÁVEIS NOS CROMOSSOMOS .....  | 31        |
| 3.2.1 - Representação em Binário .....   | 31        |
| 3.2.2 - Representação em Real .....  | 32        |
| 3.2.3 - Qualidades das Representações .....  | 33        |
| 3.3 - OPERADORES GENÉTICOS E DE EVOLUÇÃO .....   | 33        |
| 3.3.1 - Operador Genético de Cruzamento (Crossover) .....  | 34        |
| • Efeito sobre as estruturas representadas em número binário .....   | 34        |
| • Efeito sobre as estruturas representadas em número real .....  | 34        |
| 3.3.1.1 - Tipos de Operadores de Cruzamento .....  | 35        |
| • Cruzamento que utiliza um ponto .....  | 36        |
| • Cruzamento que utiliza dois pontos .....   | 36        |
| • Cruzamento uniforme .....  | 37        |
| 3.3.2 - Operadores Aritméticos de Recombinação .....   | 39        |
| 3.3.3 - Mutação .....  | 41        |
| 3.4 - OPERADOR DE EVOLUÇÃO .....   | 43        |
| 3.4.1 - Seleção .....  | 43        |
| 3.4.2 - Espaço de Amostragem .....   | 43        |
| 3.4.3 - Mecanismo de Amostragem .....  | 43        |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.4.3.1 - Amostragem Histocástica .....  | 44        |
| 3.4.3.2 - Amostragem Determinística .....  | 45        |
| 3.4.3.3 - Amostragem Mista .....   | 45        |
| 3.4.3.4 - Probabilidade de Seleção .....   | 46        |
| 3.4.4 - Mecanismo de Classificação (Rank) .....  | 47        |
| <b>CAPÍTULO 4 .....</b>  | <b>49</b> |
| <b>VARIAÇÃO DA REGIÃO DE BUSCA DO ALGORITMO GENÉTICO .....</b>                                     | <b>49</b> |
| 4.1 - REGIÃO DE BUSCA .....  | 49        |
| 4.2 - VARIAÇÃO DA REGIÃO DE BUSCA .....  | 49        |
| 4.2.1 - Variação do Tamanho da Região de Busca .....   | 52        |
| 4.2.2 - Deslocamento da Região de Busca .....  | 55        |
| 4.2.3 - Efeitos Sobre a Representação do Cromossomo .....  | 61        |
| 4.2.3.1 - Representação em Binário .....   | 62        |
| 4.2.3.2 - Representação em Real .....  | 72        |
| 4.4.5 - Efeito do Deslocamento e da Variação do Tamanho da Região de Busca .....                   | 74        |
| <b>CAPÍTULO 5 .....</b>  | <b>75</b> |
| <b>RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO AO AJUSTE DE ESTABILIZADORES .....</b>            | <b>75</b> |
| 5.1 - APLICAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO PARA AJUSTAR OS ESTABILIZADORES DE UM TCSC E DE UM SVC ..... | 78        |
| 5.1.1 - Característica do Sistema .....  | 79        |
| 5.1.2 - Resultados Numéricos .....   | 81        |
| 5.1.3 - Observações de Caráter Geral .....   | 85        |
| 5.1.3.1 - Efetividade do Método .....  | 85        |

|  |     |
|--|-----|
| 5.1.3.2 - Desempenho dos Controladores .....   | 86  |
| 5.1.3.3 - Requisitos Computacionais .....  | 86  |
| 5.2 - RESULTADOS DO PROJETO DE ESTABILIZAÇÃO DAS MÁQUINAS DO SISTEMA NEW ENGLAND.....                            | 87  |
| 5.2.1 - Características do Sistema .....   | 87  |
| 5.2.2 - Aplicação do Algoritmo Genético, Parâmetros e Métodos Desenvolvidos .....                                | 39  |
| 5.2.3 - Resultados Numéricos .....   | 90  |
| 5.2.4 - Requisitos Computacionais .....  | 94  |
| 5.3 - RESULTADOS DOS TESTES PARA AJUSTES DE ESTABILIZADORES DAS MÁQUINAS DO SISTEMA SUL/SUDESTE BRASILEIRO ..... | 94  |
| 5.3.1 - Características do Sistema .....   | 95  |
| 5.3.2 - Aplicação do Algoritmo Genético .....  | 96  |
| 5.3.3 - Resultados do Sistema Sul/Sudeste .....  | 98  |
| 5.3.4 - Requisitos Computacionais .....  | 105 |
| 5.4 – COMBINAÇÃO DE TÉCNICAS ANALÍTICAS COM O ALGORITMO GENÉTICO NO AJUSTE DE CONTROLADORES .....                | 105 |
| 5.4.1 - Combinação de Técnicas Analíticas com o Algoritmo Genético .....   | 106 |
| 5.4.1.1 - Aplicação ao Sistema New England .....   | 106 |
| 5.4.1.2 - Resultados Obtidos Considerando as Soluções Analíticas .....   | 110 |
| • Resultados Obtidos com os Limites Livres .....   | 111 |
| • Resultados com os Limites da Região de Busca Obtidos das Soluções Analíticas .....                             | 115 |
| 5.4.1.3 - Aplicação ao Sistema Sul/Sudeste Brasileiro .....  | 118 |
| 5.6 - NÚMERO DE BLOCOS COMO UM PARÂMETRO CALCULADO PELO ALGORITMO GENÉTICO .....                                 | 122 |

|   |     |
|---|-----|
| 5.7 - PROJETO DE ESTABILIZADORES BASEADO EM AVANÇO MÁXIMO DE FASE .....                         | 125 |
| 5.8 - CONTORNO DAS RAIZES (“ROOT CONTOUR”) .....  | 125 |
| <b>CAPÍTULO 6</b> .....   | 131 |
| <b>ALGORITMOS GENÉTICOS PARALELO</b> .....  | 131 |
| 6.1 - ALGORITMOS GENÉTICOS PARALELOS .....  | 132 |
| 6.1.1 - Paralelização Mestre/Escravo .....  | 133 |
| 6.1.2 - Paralelização Usando Múltiplas Populações .....   | 136 |
| 6.1.2.1 - Algoritmos Genéticos Paralelos com Granularidade Baixa .....                          | 137 |
| • Migração .....  | 138 |
| • Topologia da Comunicação .....  | 138 |
| 6.1.2.2 - Algoritmos Genéticos Paralelos com Granularidade Alta .....                           | 139 |
| 6.1.2.3 - Algoritmos Genéticos Paralelos Hierárquicos .....                                     | 140 |
| 6.2 - AVALIAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO PARALELO NO PROBLEMA DE AJUSTES DE CONTROLADORES .....    | 141 |
| 6.2.1 - Melhoria do Desempenho do Algoritmo Genético Paralelo .....                             | 146 |
| 6.2.2 - População do Algoritmo Paralelo em cada Processador Igual a um Quarto do Serial .....   | 148 |
| 6.2.3 - População do Algoritmo Paralelo em cada Processador Igual a do Serial ..                | 149 |
| 6.2.4 - Variando o Tamanho da População do Algoritmo Serial e Mantendo Fixa a do Paralelo ..... | 152 |
| 6.2.5 - Algoritmo Genético Paralelo com e sem o Pré-aquecimento .....                           | 154 |

|  |     |
|--|-----|
| 6.2.6 - Efeito da Migração no Algoritmo Genético Paralelo .....  | 155 |
| • Efeito do instante onde e executada a migração .....   | 155 |
| • Efeito da migração nas populações de cada processador .....  | 156 |
| 6.3 - APLICAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO PARALELO AO PROBLEMA<br>DE AJUSTE DE ESTABILIZADORES DE SISTEMA DE POTÊNCIA .....                          | 158 |
| 6.3.1 - Aplicação ao Sistema New England .....   | 158 |
| 6.3.2 - Aplicação ao Sistema Sul/Sudeste Brasileiro .....  | 161 |
| 6.3.2.1 - Ajuste de 22 Controladores .....   | 164 |
| 6.3.2.2 - Ajuste de 33 Controladores com 50 Indivíduos na População<br>sem Considerar a Solução Analítica .....                                  | 166 |
| 6.3.2.3 - Ajuste de 33 Controladores com 20 Indivíduos na População<br>sem Considerar a Solução Analítica .....                                  | 168 |
| 6.3.2.4 - Ajuste de 33 Controladores com 20 Indivíduos na População<br>Considerando Ajuste Obtido pelo Método Analítico .....                    | 171 |
| 6.3.2.5 - Comparação dos Resultados com o Limite Máximo da<br>Frequência Igual a 12,5 rd/s e 30,0 rd/s Considerando a Solução<br>Analítica ..... | 172 |
| • Requisitos Computacionais .....  | 177 |
| <b>CAPÍTULO 07</b> .....   | 179 |
| <b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> .....  | 179 |
| 7.1 – CONCLUSÕES REFERENTES AO ALGORITMO GENÉTICO SERIAL .....   | 181 |
| 7.2 - CONCLUSÕES REFERENTES AO ALGORITMO GENÉTICO PARALELO .....   | 182 |
| 7.3 - TRABALHOS FUTUROS .....  | 190 |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....  | 190 |

# LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 2.1</b> - Sistema estável, com $\Delta T_s > 0$ e $\Delta T_d > 0$ .....  | 11 |
| <b>Figura 2.2</b> - Sistema instável aperiódico, com $\Delta T_s < 0$ e $\Delta T_d > 0$ .....  | 12 |
| <b>Figura 2.3</b> - Sistema instável oscilatório, com $\Delta T_s > 0$ e $\Delta T_d < 0$ .....   | 12 |
| <b>Figura 2.4</b> - Sistema em malha fechada .....  | 20 |
| <b>Figura 2.5</b> - Diagrama de blocos gerador-estabilizador .....  | 27 |
| <b>Figura 3.1</b> - Ilustração dos resultados obtidos pelos tipos de cruzamentos aritméticos.<br>Obtida da Figura 2.3, página 62 da referência [25] .....   | 27 |
| <b>Figura 4.1</b> - Ilustração das regiões de busca inicial (utilizada na variação da região) e<br>global .....   | 52 |
| <b>Figura 4.2</b> - Ilustração das regiões, quando e aplicado um determinado fator à solução<br>elite da região anterior (região 1) .....   | 53 |
| <b>Figura 4.3</b> - Efeito da redução, deslocamento e expansão da região de busca .....   | 56 |
| <b>Figura 4.4</b> - Ilustração da região de busca correspondente as variáveis contidas no cro-<br>mossomo .....   | 61 |
| <b>Figura 4.5</b> - Correspondência entre valor em real e binário das variáveis $V_r$ e $V_b$ , e as su-<br>postas soluções ótimas e a melhor solução naquela discretização .....                               | 68 |
| <b>Figura 4.6</b> - Correspondência entre valor em real e binário das variáveis $V_r$ e $V_b$ , e as su-<br>postas soluções ótimas e a melhor solução na discretização após redução<br>da região de busca ..... | 70 |
| <b>Figura 5.1</b> - Sistema com 6 máquinas, três áreas (A, B e C), um TCSC e um SVC ....  | 79 |
| <b>Figura 5.2</b> - Desempenho dos AGs. Linhas tracejadas: AG simples e linhas sólidas: AG<br>modificado .....  | 85 |
| <b>Figura 5.3</b> - Diagrama Unifilar do Sistema New England .....  | 88 |
| <b>Figura 5.4</b> - Autovalores do sistema em malha aberta .....  | 92 |
| <b>Figura 5.5</b> - Autovalores do sistema em malha fechada com dois blocos de avanço-<br>atraso .....  | 92 |
| <b>Figura 5.6</b> - Autovalores do sistema em malha fechada com três blocos de avanço-<br>atraso .....  | 93 |
| <b>Figura 5.7</b> - Sistema Sul/Sudeste equivalente .....   | 95 |
| <b>Figura 5.8</b> - Autovalores do sistema em malha aberta para os três cenários .....  | 99 |
| <b>Figura 5.9</b> - Autovalores do sistema em malha fechada para os três cenários .....   | 99 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Figura 5.10</b> – Simulação não linear para o cenário 1 .....  | 102 |
| <b>Figura 5.11</b> - Simulação não linear para o cenário 2 .....  | 103 |
| <b>Figura 5.12</b> - Simulação não linear para o cenário 3 .....  | 104 |
| <b>Figura 5.13</b> - Mapeamento dos pólos a malha aberta considerando as 10 condições de operação pré-estabelecidas .....   | 110 |
| <b>Figura 5.14</b> - Efeito da otimização do ganho, de alfa e de omega obtidos pelo AG, considerando os resultados obtidos pelo método 1 na população inicial ..                  | 113 |
| <b>Figura 5.15</b> - Efeito da otimização do ganho, de alfa e de omega obtidos pelo AG, considerando os resultados obtidos pelo método 2 na população inicial ..                  | 114 |
| <b>Figura 5.16</b> - Comparação da evolução do melhor resultado usando as soluções obtidas pelos métodos analíticos 1 e 2 e a pseudo-aleatória .....                              | 114 |
| <b>Figura 5.17</b> - Efeito da otimização do ganho, de alfa e de omega obtidos pelo AG. Resultados obtidos pelo método 1 na população .....                                       | 116 |
| <b>Figura 5.18</b> - Efeito da otimização do ganho, de alfa e de omega obtidos pelo AG. Resultados obtidos pelo método 2 na população inicial .....                               | 117 |
| <b>Figura 5.19</b> - Comparação da evolução do melhor individuo usando as soluções obtidas pelos métodos analíticos 1 e 2 na população inicial e a pseudo-aleatória .....         | 117 |
| <b>Figura 5.20</b> - Autovalores para os quatro melhores ajustes (Tabela 5.20 e Tabela 5.21) obtidos em uma única simulação para as condições de carga pesada, media e leve ..... | 121 |
| <b>Figura 5.21</b> - Mapeamento de pólos e zeros do sistema Sul/Sudeste carga pesada ...  | 121 |
| <b>Figura 5.22</b> - Estrutura de um cromossomo incluindo o número de blocos dos controladores .....  | 122 |
| <b>Figura 5.23</b> - Estrutura de um cromossomo considerando três blocos diferentes nos controladores .....   | 123 |
| <b>Figura 5.24</b> - Mapeamento dos autovalores dos ajustes obtidos pelos métodos direto e indireto .....   | 124 |
| <b>Figura 5.25</b> - Autovalores considerando o limite máximo da frequência igual a 30 rd/s ..  | 127 |
| <b>Figura 5.26</b> - Contorno das raízes para o sistema New England com o intervalo da frequência [1,25 12,5] rd/s e de $\alpha$ [0,1 10,0] .....                                 | 128 |
| <b>Figura 5.27</b> - Contorno das raízes para o sistema New England com o intervalo da frequência [1,25 30,0] rd/s e de $\alpha$ [0,1 10,0] .....                                 | 128 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figura 5.28</b> - Contorno das raízes para o sistema Sul/Sudeste brasileiro com o intervalo da frequência [1,25 12,5] rd/s e de $\alpha$ [0,1 10,0] .....   | 129 |
| <b>Figura 5.29</b> - Contorno das raízes para o sistema Sul/Sudeste brasileiro com o intervalo da frequência [1,25 30,0] rd/s e de $\alpha$ [7,0 10,0] .....   | 129 |
| <b>Figura 6.1</b> - Topologia usada no método de paralelização mestre/escravo .....  | 134 |
| <b>Figura 6.2</b> - Ilustração do método de paralelização do AG que usa granularidade baixa .....  | 139 |
| <b>Figura 6.3</b> - Topologia usada no método com granularidade alta. Cada quadrado corresponde a um processador onde seria alocado um indivíduo ou um conjunto de indivíduos .....  | 139 |
| <b>Figura 6.4</b> - Topologia usada em um AG Paralelo Hierárquico onde tanto no nível superior como no inferior são usadas múltiplas populações (demes) ..   | 140 |
| <b>Figura 6.5</b> - AG Hierárquico onde no nível inferior são executadas as avaliações com o método mestre/escravo e no nível superior é utilizado o método de múltiplas populações .....  | 141 |
| <b>Figura 6.6</b> - Topologia densa usada no computador da IBM R/6000 SP com quatro processadores .....  | 142 |
| <b>Figura 6.7</b> - Evolução do melhor indivíduo ao longo das simulações. Ajuste dos parâmetros do AG considerando 50 indivíduos em cada processador .....   | 146 |
| <b>Figura 6.8</b> - Resultado do algoritmo paralelo (adequabilidade máxima e média) com 50 indivíduos em cada processador e do serial com 200 indivíduos. ....   | 148 |
| <b>Figura 6.9</b> - Resultados do algoritmo paralelo (adequabilidade máxima e média) com 50 indivíduos em cada processador e do serial também com 50 indivíduos .....  | 150 |
| <b>Figura 6.10</b> - Resultados do algoritmo paralelo (adequabilidade máxima e média) com 200 indivíduos em cada processador e do serial também com 200 indivíduos .....   | 151 |
| <b>Figura 6.11</b> - Evolução do melhor indivíduo no algoritmo serial para população com vários tamanho e no algoritmo paralelo com 50 indivíduos em cada processador. Semente do gerador de números no serial foi -25710837 ..... | 152 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figura 6.12</b> - Evolução do melhor indivíduo no algoritmo serial para vários tamanho da população comparado ao paralelo com 50 indivíduos em cada processador ..... | 153 |
| <b>Figura 6.13</b> - Evolução do melhor indivíduo com e sem a estratégia do pré-aquecimento com 50 indivíduos em cada processador .....                                  | 154 |
| <b>Figura 6.14</b> - Evolução do melhor indivíduo no algoritmo paralelo considerando ou não a migração .....   | 156 |
| <b>Figura 6.15</b> - Comportamento evolutivo do melhor indivíduo em cada população ao ser executada a migração. População com 50 indivíduos em cada processador .....    | 157 |
| <b>Figura 6.16</b> - Comportamento evolutivo do melhor indivíduo em cada população ao ser executada a migração. População com 200 indivíduos em cada processador .....   | 157 |
| <b>Figura 6.17</b> - Autovalores do sistema New England para quatro melhores soluções. Tamanho da população em cada processador 50 indivíduos .....                      | 162 |
| <b>Figura 6.18</b> - Autovalores do sistema New England para os ajustes obtidos com 50 e 200 indivíduos em cada processador .....  | 163 |
| <b>Figura 6.19</b> - Autovalores do sistema Sul/Sudeste brasileiro ( 22 estabilizadores) carga pesada .....  | 165 |
| <b>Figura 6.20</b> - Autovalores do sistema Sul/Sudeste brasileiro ( 22 estabilizadores) carga média .....   | 165 |
| <b>Figura 6.21</b> - Autovalores do sistema Sul/Sudeste brasileiro ( 22 estabilizadores) carga leve .....  | 166 |
| <b>Figura 6.22</b> - Autovalores do sistema Sul/Sudeste brasileiro (33 estabilizadores) carga pesada. População com 50 indivíduos em cada processador .....              | 167 |
| <b>Figura 6.23</b> - Autovalores do sistema Sul/Sudeste brasileiro (33 estabilizadores) carga média. População com 50 indivíduos em cada processador .....               | 167 |
| <b>Figura 6.24</b> - Autovalores do sistema Sul/Sudeste brasileiro (33 estabilizadores) carga leve. População com 50 indivíduos em cada processador .....                | 168 |
| <b>Figura 6.25</b> - Autovalores do sistema Sul/Sudeste brasileiro (33 estabilizadores) carga pesada. População com 20 indivíduos em cada processador .....              | 170 |
| <b>Figura 6.26</b> - Autovalores do sistema Sul/Sudeste brasileiro (33 estabilizadores) carga media. População com 20 indivíduos em cada processador .....               | 170 |
| <b>Figura 6.27</b> - Autovalores do sistema Sul/Sudeste brasileiro (33 estabilizadores) carga  |     |

|   |     |
|---|-----|
| leve. População com 20 indivíduos em cada processador .....   | 171 |
| <b>Figura 6.28</b> - Mapeamento dos autovalores da melhor solução em cada processador nas cargas pesada, média e leve .....   | 172 |
| <b>Figura 6.29</b> - Comportamento do AG para obtenção dos ajustes no sistema S/SE ....   | 175 |
| <b>Figura 6.30</b> - Autovalores do Sistema Sul/Sudeste Brasileiro (33 estabilizadores) para as três modalidades de carga. População com 20 indivíduos .....            | 176 |
| <b>Figura 6.31</b> - Resposta no domínio da frequência, considerando a função de transferência $\Delta\omega/\Delta V_{ref}$ e no tempo da máquina de Itaipu 60Hz ..... | 177 |

# LISTA DE TABELAS

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tabela 5.1</b> - Condições de operação do sistema em malha aberta .....  | 80  |
| <b>Tabela 5.2</b> - Parâmetros dos controladores obtidos em várias simulações .....   | 84  |
| <b>Tabela 5.3</b> - Taxa de amortecimento dos Modos 1 e 2 para as condições de operação nominal e as calculadas pelo AG .....                                       | 84  |
| <b>Tabela 5.4</b> - Condições de operação em malha aberta .....   | 88  |
| <b>Tabela 5.5</b> - Parâmetros dos estabilizadores com dois blocos de avanço-atraso .....   | 93  |
| <b>Tabela 5.6</b> - Parâmetros dos estabilizadores com três blocos de avanço-atraso .....   | 9   |
| <b>Tabela 5.7</b> - Condições de fluxo de potência do Sistema Sul/Sudeste. Os cenários 1, 2 e 3 correspondem, respectivamente, as cargas pesada, média e leve ..... | 96  |
| <b>Tabela 5.8</b> - Valor de geração nas regiões Sul, Sudeste e Itaipu .....  | 96  |
| <b>Tabela 5.9</b> - Limites dos parâmetros dos controladores .....  | 98  |
| <b>Tabela 5.10</b> - Parâmetros dos controladores ajustados pelo AG .....   | 100 |
| <b>Tabela 5.11</b> - Condições de operação em malha aberta .....  | 108 |
| <b>Tabela 5.12</b> - Limites dos parâmetros dos controladores .....   | 108 |
| <b>Tabela 5.13</b> - Parâmetros dos estabilizadores com dois blocos (método 1) .....  | 111 |
| <b>Tabela 5.14</b> - Parâmetros dos estabilizadores com dois blocos (método 2) .....  | 111 |
| <b>Tabela 5.15</b> - Solução do AG quando a população inicial contém solução do método 1 .. ..  | 112 |
| <b>Tabela 5.16</b> - Solução do AG quando a população inicial contém solução do método 2 ...  | 112 |
| <b>Tabela 5.17</b> - Solução do AG, quando a população inicial e formada pseudo-aleatoriamente .....  | 113 |
| <b>Tabela 5.18</b> - Solução do AG usando a solução do método 1 na população inicial .....  | 115 |
| <b>Tabela 5.19</b> - Solução do AG usando a solução do método 2 na população inicial .....  | 116 |
| <b>Tabela 5.20</b> - Ajustes <b>A</b> e <b>B</b> utilizando solução analítica como referência para região de busca .....  | 119 |
| <b>Tabela 5.21</b> - Ajustes <b>C</b> e <b>D</b> utilizando a solução analítica como referência para região de busca .....  | 120 |
| <b>Tabela 5.22</b> - Melhores ajustes obtidos com os métodos direto e indireto .....  | 124 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Tabela 6.1</b> – Melhor ajuste obtido nos processadores 0 e 1 .....   | 160 |
| <b>Tabela 6.2</b> – Melhor ajuste obtido nos processadores 2 e 3 .....   | 161 |
| <b>Tabela 6.3</b> - Ajustes obtidos para a população com 50 e 200 indivíduos .....   | 163 |
| <b>Tabela 6.4</b> - Ajustes obtidos nos 4 processadores (20 indivíduos na população) .....   | 169 |
| <b>Tabela 6.5</b> - Ajustes obtidos considerando os limites da frequência [1,25 12,5] rd/s e [1,25 30,0] rd/s e de $\alpha$ [0,1 10,0] e [7,0 10,0], respectivamente ..... | 174 |

# SIMBOLOGIA USADA

- AGs** ..... Algoritmos Genéticos
- ns** ..... ordem do sistema
- A** ..... matriz de estado do sistema
- r** ..... vetor de variáveis algébricas
- x** ..... vetor de variáveis de estado
- $\underline{w}_i^t$  ..... autovetor à esquerda da matriz **A**
- $\underline{v}_i$  ..... autovetor à direita da matriz **A**
- u** ..... vetor de variáveis de entrada , contém os sinais de controle da máquina
- y** ..... vetor de variáveis que podem ser medidas, como tensão e velocidade da máquina
- P** ..... matriz formada pelo conjunto de autovetores linearmente independentes
- B** ..... matriz de entrada
- C** ..... matriz de saída
- D** ..... matriz de alimentação direta
- $\ell$  ..... número de blocos de avanço-atraso
- $K_{ii}$  ..... ganho do i-ésimo estabilizador
- $\alpha_i$  ..... parâmetro que fornece a compensação de fase do bloco de avanço-atraso (ganho dinâmico)
- $\omega_i$  ..... frequência que corresponde a  $\omega_{m\acute{a}x}$  frequência onde ocorre o máximo avanço de fase
- $T_w$  ..... constante de tempo do filtro washout
- m** ..... número de condições de operação pré-selecionadas
- $\zeta$  ..... taxa de amortecimento de um autovalor
- $\beta$**  e **F** ..... valor de adequabilidade de um indivíduo

$P_n$  ..... pólos da função de transferência  
 $R_i$  ..... resíduos referentes aos pólos do sistema ao autovalor  $\lambda_i$   
 $b_i$  ..... i-ésima coluna de  $\mathbf{B}$   
 $c_i$  ..... i-ésima linha de  $\mathbf{C}$   
 $U$  ..... sinal de controle  
 $P_d$  ..... precisão desejada  
 $nb$  ..... tamanho da variável na representação binário  
 $f_k$  ..... valor de adequabilidade de um cromossomo  $k$   
 $tpop$  ..... tamanho da população  
 $F$  ..... valor em escala da adequabilidade  
 $F_k$  ..... valor bruto da adequabilidade  
 $g(.)$  ..... função que transforma o valor bruto da adequabilidade em um valor em escala  
 $P_k$  ..... probabilidade de seleção do  $k$ -ésimo cromossomo  
 $q_c$  ..... probabilidade do melhor cromossomo ser escolhido  
 $k$  ..... classificação do  $k$ -ésimo cromossomo na população  
 $q_0$  ..... probabilidade da adequabilidade do pior cromossomo  
 $P_r$  ..... valor da precisão adotada  
 $X_{m\acute{a}x}, X_{m\acute{i}n}$  ..... limites máximo e mínimo de uma variável  
 $q$  ..... tamanho da variável no cromossomo em binário (número de bits)  
 $Q$  ..... quantidade a ser calculada para escolher um cromossomo para participar de um cruzamento  
 $C_i$  ..... indivíduos contidos na população candidatos ao cruzamento  
 $C_1$  ..... primeiro candidato escolhido para o cruzamento  
 $np$  ..... tamanho da população  
 $n_1$  ..... quantidade de ciclos externos (deslocamento e intervalo expandido)  
 $n_2$  ..... quantidade de ciclos internos (intervalo reduzido)  
 $n_3$  ..... quantidade máxima de gerações especificada em cada ciclo  
 $P_m$  ..... taxa de mutação  
 $P_{m\acute{a}x}$  ..... valor máximo da taxa de mutação (para variação exponencial)

- a** ..... parâmetro que define a velocidade de decréscimo da função exponencial usada para mutação
- ng** ..... número da geração atual
- $\Delta X_{iinic}$  ..... distância do baricentro à fronteira da região inicial para cada variável
- $\Delta X_i$  ..... incremento necessário a cada variável para expansão da região de busca
- $f_r$  ..... fator de redução da região de busca
- $f_d$  ..... fator de deslocamento da região de busca
- $f_e$  ..... fator de expansão da região de busca
- $X'_i$  ..... valores das variáveis contidos no melhor indivíduo deslocados por um fator  $f_d$
- $X'_{imin}$  e  $X'_{imax}$  .. limites inferior e superior da região expandida
- $(b_{v1}, b_{v2})$  ..... coordenada do baricentro da primeira região de busca
- NPDD** ..... número de pontos discretos à direita da referência
- NPDT** ..... número de pontos discretos totais
- $p_{v1}$  ..... precisão desejada para  $V_1$
- $p_{v2}$  ..... precisão desejada para  $V_2$
- $V_{sin3}$  e  $V_{sin4}$  .... tensões sintetizadas para o SVC.
- $V_{sin1}$  e  $V_{sin2}$  .... tensões sintetizadas para o TCSC.
- $T_f$  ..... tempo para executar uma única avaliação
- $T_c$  ..... tempo de comunicação





# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

O ajuste coordenado de controladores de máquinas síncronas de um sistema de potência, para múltiplos pontos de operação, demanda estudos apurados, tempo e ferramentas computacionais robustas, para que possam ser obtidas soluções com melhor, desempenho dinâmico desse sistema. Tanto pelo lado de pequenas perturbações (eventos de maior grau de ocorrência) quanto pelo lado de grandes perturbações (eventos de menor grau de ocorrência) o sistema deve ser estável. Os ajustes são avaliados como adequados se e somente se satisfizerem as condições de um critério de desempenho pós perturbação. Portanto, um sistema de potência deverá sempre ter um desempenho dinâmico estável, levando em consideração todos os esquemas de segurança existentes e alterações na rede.

As características de um sistema de grande porte é ser intrinsecamente multimodal e de ajuste complexo. A aplicação de uma ferramenta com característica robusta para executar um ajuste coordenado, seria importante. Neste caso seria considerado um critério de estabilidade para o sistema e um conjunto de condições de operação, que se traduziriam nas condições de operação mais severas do sistema. Elas cobririam uma boa parte das possíveis situações do sistema, onde manutenções de equipamentos e linhas de transmissão, configurações de sub-estações e variações de cargas seriam considerados.

Algoritmos de otimização baseados em um único ponto de partida, em ambientes multimodal, podem obter freqüentemente soluções locais, devido a alta dependência da característica da função e do ponto de partida da busca. Somente através de um ponto de partida próximo da solução, desde que não exista solução local na direção da busca, poderia ser alcançada a solução ótima. Porém, num sistema multimodal, sem conhecimento prévio das características do mesmo, seria difícil obter a solução ótima. Uma forma de superar a complexidade da busca envolvida, é a utilização de um algoritmo, que independa das dificuldades do ambiente multimodal e possa obter as melhores soluções sem convergir para soluções locais com evidente robustez.

Uma ferramenta computacional desenvolvida na década de sessenta por Holland tem as características necessária para a busca da melhor solução, baseada na teoria de

Darwin de adaptação ao meio das espécies[6]. Nesta teoria os indivíduos mais aptos, geneticamente, tem a capacidade de se adaptarem às mudanças ambientais. Por serem portadores de genes, que lhes dão essa característica, serão também capazes de propagá-los às novas gerações, recombinao-os. O efeito resultante da recombinação é obter indivíduos mais aptos àquele ambiente. Portanto, esse algoritmo procura simular de forma simples os efeitos ambientais da natureza, as características genéticas dos indivíduos, a seleção natural e o comportamento do indivíduo no ambiente. Foi criado, então, um algoritmo de busca robusto, que denominou-se Algoritmo Genético [6]. Ele independe das características da função que está sob análise (diferenciável, descontínua, não linear e multimodal), utiliza sempre um conjunto de soluções (população) a cada passo de busca (geração), codificadas em estruturas denominadas cromossomos, cuja representação pode ser por números binários, reais ou até mesmo por símbolos. Essas estruturas são avaliadas, selecionadas e recombinadas para gerar um novo conjunto de soluções até a obtenção da solução final, que seria a melhor solução. Esse algoritmo, além das características citadas, tem outras que fortalecem e estimulam a sua aplicação. Como por exemplo, facilidade de implementação, integração com outras ferramentas e ampla aplicabilidade [6, 21].

Esse trabalho é uma aplicação do AG ao problema de ajuste coordenado de estabilizadores de máquinas síncronas de um sistema de potência para múltiplas condições de operação. A matriz de estado utilizada é calculada pelo programa PacDyn [30], para todas as condições de operação e simultaneamente são avaliados os ajustes calculados pelo AG. A finalidade do ajuste é obter o máximo amortecimento possível para um conjunto de pontos de operação, que retratariam o sistema ao longo de um amplo período operativo. Portanto, seria obtido um desempenho satisfatório e global do sistema. Em todas aplicações desta tese todos os autovalores são calculados utilizando o método QR e a avaliação é baseada no autovalor com menor amortecimento.

Quando foram realizadas aplicações em sistemas de pequeno porte, foram consideradas nas condições de operação, a manutenção de linhas de transmissão, variação de carga e variação da potência ativa dos geradores (realocação de despacho de geração).

Quando foi aplicado a um sistema de grande porte, foram considerados apenas três cenários de carga, devido ao elevado tempo despendido no processamento pelo método de cálculo dos autovalores. Não se levou em consideração manutenções no sistema nesta fase de projeto do algoritmo.

Na aplicação do AG, dois tipos de representação do cromossomo foram testadas. A binária, que discretiza o intervalo das variáveis contínuas reais e a real denominada também de representação contínua.

Uma técnica denominada de pré-aquecimento, foi criada e aplicada à população inicial [27]. Nesta técnica um conjunto de soluções com amortecimento acima de um valor especificado é selecionado a priori na população inicial. As demais soluções são criadas pseudo-aleatoriamente até que o total de indivíduos na população seja alcançado. Esta técnica evita convergência do AG para soluções locais ou para soluções instáveis, por melhorar seu condicionamento no início da busca. Um dispêndio extra de tempo para criar um conjunto de indivíduos, com adequabilidade acima de um valor pré-determinado, na população inicial é inevitável, porém este tempo gasto é compensado pelo tempo global de processamento, que será menor. Este fato é devido à contribuição destes indivíduos com seus "*building blocks*" [27], resultando em melhor condicionamento do Algoritmo Genético no início da busca.

Operadores de cruzamento, mutação e de seleção foram implementados para melhorar o desempenho do AG na busca da melhor solução. Dentre os operadores de cruzamento citados na literatura optou-se pelo cruzamento uniforme cujas vantagens sobre os demais métodos é descrita em [19]. A mutação foi implementada com variação exponencial, truncada a partir de um valor especificado [27]. Quanto à representação das variáveis no cromossomo escolheu-se a representação em número real. O cruzamento e a mutação aplicados foram do tipo uniforme [25]. Dois operadores de seleção foram testados, o método da roleta e do torneio [6, 25]. O primeiro produz elevada pressão seletiva que pode ser minimizada utilizando-se o valor de adequabilidade em escala. Mas, o problema da influência dos super cromossomos em dominar a população não é totalmente resolvido [6, 25]. No segundo método, que foi o adotado, a pressão seletiva é controlada pela quantidade de cromossomos escolhidos para participarem do torneio. Um método de seleção também usado foi o elitismo, onde o indivíduo de melhor adequabilidade da população anterior é copiado na população atual substituindo o pior indivíduo.

Resultados preliminares da aplicação do método a três tipos de sistemas de potência são apresentados. Um problema trata do ajuste de estabilizadores de um TCSC e de um SVC de um sistema com três áreas e seis geradores para cinco condições de operação [27]. Nesse estudo foi utilizado o pré-aquecimento. Com relação aos operadores genéticos foram aplicados o cruzamento e a mutação do tipo uniforme. A

taxa de mutação varia exponencialmente e é truncada a partir de um valor especificado, enquanto que a do cruzamento é fixa. Com relação ao operador de seleção utilizou-se o método do torneio e uma estratégia elitista. Outra aplicação trata do projeto de estabilizadores para nove máquinas do sistema New England com 39 barras para 14 condições de operação [17]. Finalmente, aplicou-se o método no sistema de grande porte brasileiro ( Sul / Sudeste ) com 1762 barras , 2515 linhas de transmissão, para ajustar os estabilizadores de 22 geradores para três pontos de operação [17], mais tarde estendida para 33 estabilizadores. Nesses dois últimos estudos foram aplicados, além das técnicas e métodos citados anteriormente, um outro método que foi o da variação dinâmica da região de busca, retratada na variação dos limites máximo e mínimo dos ganhos dos estabilizadores. A meta foi melhorar o desempenho na busca e trabalhar com populações pequenas para reduzir o tempo de processamento.

Os resultados obtidos nestes trabalhos estimularam outras aplicações. Considerou-se na população inicial, resultados de ajustes obtidos por programas analíticos de alocação de pólos, como um ajuste fornecido pelo usuário. Comparações foram feitas para avaliar o desempenho do AG para as situações onde são levadas em consideração ou não, o ajuste obtido pelo método analítico. Uma expansão desta aplicação, foi considerar a fronteira da região de busca inicial, calculada a partir do ajuste obtido pelos métodos analíticos, definindo uma região mais provável de obter a melhor solução e o resultado analítico como um cromossomo na população inicial. O que mostrou ser vantajoso resultando melhor condicionando do AG na execução da busca da melhor solução.

O número de blocos de avanço-atraso da estrutura do estabilizador foi incorporado ao cromossomo. Foi verificado também problemas provenientes desta implementação, que só é válida para blocos iguais na estrutura do estabilizador. Uma estratégia para superar este problema foi criada, onde estruturas de controle com blocos diferentes foram consideradas deixando o AG obter estes valores. No cálculo destes ajustes surgiram constantes de tempo dos blocos iguais ou muito próximas, o que sugeriu a sua simplificação, dessa forma obtendo estruturas com número de blocos reduzido.

Finalmente a aplicação do processamento paralelo ao AG foi realizada. Inicialmente uma descrição e uma análise dos diversos métodos de paralelização foi feita baseada nos artigos [18, 33]. O método escolhido foi aquele denominado de AG com Granularidade Alta, devido a sua principal característica de utilizar um operador de

migração. A arquitetura computacional disponível no computador paralelo com memória distribuída RS/6000 SP da IBM com quatro processadores permitiu utilizar esta estratégia. Neste método uma sub-população (deme), assim denominada, é alocada em cada processador, a migração é executada em instantes pré-especificados. Nesta aplicação foi executada no instante da variação da região de busca. Somente o melhor indivíduo de cada sub-população irá migrar e a nova região de busca será função do melhor indivíduo migrante. Existindo, assim, dois níveis de elitismo. Um no momento da migração e outro intrínseco à população. A intenção dessa aplicação foi de reduzir o tempo de processamento e melhorar a qualidade da solução, comparativamente, ao AG serial.

O AG paralelo foi aplicado também ao sistema Sul/Sudeste brasileiro utilizando resultados de técnicas analíticas. Foram utilizadas como um cromossomo na população inicial e serviram para calcular os limites da região de busca criando assim uma região mais provável de ocorrer uma melhor solução.

O AG paralelo mostrou ter um desempenho melhor na maioria das simulações do que o AG serial em relação ao tempo de processamento. Quanto à qualidade da solução, nos exemplos desta tese, ambos atingiram o mesmo nível de qualidade.

## **1.1 – ESTRUTURA DA TESE**

Esta tese está dividida nos seguintes capítulos:

**CAPÍTULO 2 - AJUSTE DE ESTABILIZADORES DE UM SISTEMA DE POTÊNCIA** descreve a importância do ajuste dos controladores de um sistema de potência, quanto a instabilidade transitória e dinâmica, a complexidade envolvida nesse processo e o ferramental usado para superar estes problemas.

**CAPÍTULO 3 – ALGORITMOS GENÉTICOS** é descrito a origem e as características dessa ferramenta, os métodos utilizados nos diversos tipos de operadores genéticos e suas funções na busca da melhor solução.

**CAPÍTULO 4 – VARIAÇÃO DA REGIÃO DE BUSCA DO ALGORITMO GENÉTICO** é descrita uma técnica nova desenvolvida para melhor condicionar o AG

na busca da melhor solução e reduzir o tempo total de processamento. Esta técnica desloca e varia o tamanho dessa região baseada na melhor solução obtida pelo elitismo.

**CAPÍTULO 5 - RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO AO AJUSTE DE ESTABILIZADORES** são descritos os resultados mostrando a aplicação do AG em três tipos de sistemas de potência, cuja principal aplicação é em um sistema de grande porte Sul/Sudeste brasileiro. São mostrados também resultados da associação de ajustes obtidos por técnicas analíticas com o AG.

**CAPÍTULO 6 – ALGORITMOS GENÉTICOS PARALELOS** são descritas as técnicas de paralelização do AG e a técnica escolhida para esta aplicação. Resultados comparativos com AG serial são mostrados comparando os desempenhos de ambos os tipos de algoritmos.

**CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS** finalmente são descritas as conclusões relativas à aplicação do AG serial e paralelo e trabalhos futuros onde novas técnicas de paralelização, ajuste coordenado, utilizando função multiobjetivo (excitatriz + estabilizador) e aplicação de novas heurísticas de migração no AG paralelo, serão implementados no programa.

## **1.2 – CONTRIBUIÇÕES DA TESE**

A maior contribuição desta tese está na aplicação do AG à um sistema de grande porte, que foi o sistema Sul/Sudeste Brasileiro. Esta tese mostra a viabilidade da sua aplicação à um sistema deste porte, usando algoritmo seqüencial e paralelo, obtendo resultados satisfatórios para um ajuste global.

Outra contribuição, também importante desta tese, está na criação de uma estratégia de busca, que varia dinamicamente a região de busca, tendo como referência a melhor solução. O efeito desta estratégia é direcionar melhor a busca, aumentando o desempenho do Algoritmo Genético, possibilitar o uso de populações pequenas e de regiões de busca menores.

Outra contribuição está no uso de resultados obtidos por técnicas analíticas na população e no dimensionamento da região de busca iniciais, que aumentam a velocidade do algoritmo para obtenção da melhor solução e possibilitam a redução do

tamanho da população, além de contribuir na definição de uma região de busca, onde a obtenção da melhor solução é mais provável.

### **1.3 – PUBLICAÇÕES GERADAS POR ESTA TESE**

#### **Revistas Intemacionais**

1. A. L. B. do Bomfim, G. N. Taranto & D. M. Falcão – “Simultaneous Tuning of Power System Damping Controllers Using Genetic Algorithms” – *IEEE Transactions on Power Systems*, paper PE -233 - PWRS-0-03-1999, to appear in 2000.
2. G. N. Taranto, D. M. Falcão & A. L. B. do Bomfim, discussion on the paper, “Simultaneous Stabilization of Multimachine Power Systems Via Genetic Algorithms”, by Y. L. Abdel-Magid, M. A. Abido, S. Al-Bayat and A. H. Mantawy, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 14, No. 4, pp. 1428-1439, November 1999.

#### **Revistas Nacionais**

1. D. M. Falcão, A.L.B.do Bomfim, C.R.R.Domellas & G.N.Taranto – “Genetic Algorithms in Power System Optimization” – *Revista Eletroevolução*, ed.1, num. 9, pp. 36-41, Setembro de 1997.

#### **Congressos Intemacionais**

1. A. L. B. do Bomfim, G. N. Taranto & D. M. Falcão – “Tuning of Power System Damping Controlers Using Genetic Algorithms” – *Proceedings of the ISAP*, Seoul, South Korea, July 1997.
2. G. N. Taranto, A. L. B. do Bomfim, D. M. Falcão, N. Martins, S. Gomes Jr. & P. E. Quintão – “Combined Use of Analytic and Genetic Algorithms for Robust Coordinated Tuning of Power System Damping Controlers”, *Proceedings of the Bulk Power System Dynamics and Control IV – Restructuring*, Santorini, Greece August 1998.

3. G. N. Taranto, A. L. B. do Bomfim, D. M. Falcão & N. Martins – “Automated Design of Multiple Damping Controllers Using Genetic Algorithms” – *Proceedings of IEEE PES Winter Meeting*, New York, NY, February 1999.

### **Congressos Nacionais**

1. D. M. Falcão, A. L. B. do Bomfim, C. R. R. Domelas & G. N. Taranto, “Genetic Algorithms in Power System Optimization”, *Proceedings of V SEPOPE*, Recife, PE, May 1996.
2. C. R. Domelas, D. M. Falcão & A. L. B. do Bomfim, “Otimização do Despacho de Reativos Utilizando Algoritmos Genéticos”, *Anais do XI CBA*, São Paulo, SP, Setembro 1996.
3. A. L. B. do Bomfim, G. N. Taranto & D. M. Falcão, “Automated Design of Multiple Damping Controllers Using Genetic Algorithms”, *Proceedings of the VII SEPOPE*, Curitiba, PR, May 2000.

## **CAPÍTULO 2**

# **AJUSTE DE ESTABILIZADORES DE UM SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA**

### **2.1. ESTABILIDADE ELETROMECCÂNICA**

A estabilidade de um sistema é uma condição de equilíbrio entre forças opostas. As máquinas síncronas interligadas mantêm-se sincronizadas através de forças restauradoras. No estado de regime permanente existe um equilíbrio entre o torque mecânico motriz e o torque de carga elétrica em cada máquina, fazendo com que a velocidade do rotor permaneça constante. Se o sistema é perturbado, esse equilíbrio é desfeito, resultando em aceleração ou desaceleração dos rotores das máquinas [28].

Se um gerador se acelerar em relação a um outro, a posição angular do seu rotor em relação ao da máquina mais lenta avançará. Esta diferença angular faz com que parte da carga do gerador mais lento se transfira para o gerador mais rápido, dependendo da relação potência-ângulo. Este fenômeno tende a reduzir a diferença de velocidade, e por conseguinte a diferença angular, entre os dois geradores. A relação potência-ângulo é não-linear e, após um certo limite, um aumento na separação angular é acompanhado com uma diminuição da potência transferida; isto faz aumentar ainda mais a separação angular entre as máquinas acarretando o fenômeno da instabilidade, ou perda de sincronismo. Em qualquer situação, a estabilidade do sistema dependerá da existência de torques restauradores suficientes após uma perturbação.

Quando um gerador síncrono perde o sincronismo do resto do sistema, o seu rotor gira numa velocidade maior (ou menor) do que aquela necessária para gerar tensões na frequência do sistema. O deslizamento entre o campo do estator, que corresponde a frequência do sistema, e o campo do rotor resulta em grandes flutuações na potência de saída da máquina, nas correntes e nas tensões, fazendo com que o sistema de proteção isole a máquina do resto do sistema. A perda de sincronismo pode ocorrer entre um gerador e o resto do sistema ou entre grupos de geradores. Neste último caso, o sincronismo poderá ser mantido nos sistemas isolados.

Em sistemas de potência, a variação do torque elétrico de uma máquina síncrona após uma pequena perturbação pode ser decomposta em duas componentes:

$$\Delta T_e = K_s \Delta \delta + K_d \Delta \omega \quad (2.1)$$

$K_s \Delta \delta \Rightarrow$  componente da variação do torque em fase com a perturbação do ângulo do rotor  $\Delta \delta$  (e referida como componente de torque sincronizante);  $K_s$  é o coeficiente de torque sincronizante;

$K_d \Delta \omega \Rightarrow$  componente da variação do torque em fase com a perturbação da velocidade  $\Delta \omega$  (é referida como componente de torque de amortecimento);  $K_d$  é o coeficiente de torque de amortecimento.

A estabilidade do sistema depende da existência das duas componentes de torque para cada máquina síncrona. A falta de suficiente torque de sincronismo resulta numa instabilidade aperiódica do ângulo do rotor. Por outro lado, a falta de suficiente torque de amortecimento resulta numa instabilidade oscilatória do ângulo do rotor [28]. O fenômeno da estabilidade angular em sistemas de potência é usualmente classificado em duas categorias:

- **Estabilidade Transitória (grandes perturbações)** é a habilidade de um sistema de potência se manter em sincronismo quando sujeito a uma grande perturbação, como um curto-circuito trifásico ou a perda de um tronco de transmissão. A resposta do sistema, nesses casos, envolve grandes excursões dos ângulos dos rotores, sendo então altamente influenciados pela relação não linear da potência elétrica com o ângulo do rotor. A estabilidade vai depender do ponto inicial de operação além da natureza e duração da perturbação:
- **Estabilidade frente a pequenas perturbações** é a habilidade do sistema se manter em sincronismo frente a pequenas perturbações. Estas perturbações ocorrem continuamente no sistema devido a pequenas variações de carga e

geração. Uma perturbação é considerada suficientemente pequena se não houver considerável perda de precisão ao se analisar o fenômeno através de um modelo linearizado. A instabilidade resultante pode ser de duas formas:

1. aumento monotônico (aperiódico) no ângulo do rotor devido à falta de suficiente torque sincronizante;
2. oscilações angulares de amplitudes crescentes devido à falta de suficiente torque de amortecimento.

A natureza da resposta do sistema devido a uma pequena perturbação depende de um número de fatores onde se incluem, entre outros, a condição inicial do sistema, o sistema de transmissão e o tipo dos sistemas de excitação utilizados. Para um gerador sem sistema de excitação conectado radialmente a um grande sistema de potência, a instabilidade acontece devido à insuficiência de torque de sincronismo, o que faz com que o sistema perca a estabilidade aperiodicamente. No caso de o gerador possuir sistema de excitação, o que acontece em geral é a perda de sincronismo oscilatória devido à insuficiência de torque de amortecimento. A Figura 2. 1, a Figura 2. 2 e a Figura 2. 3 ilustram a natureza do fenômeno de instabilidade relacionada aos torques de sincronismo e de amortecimento [28].

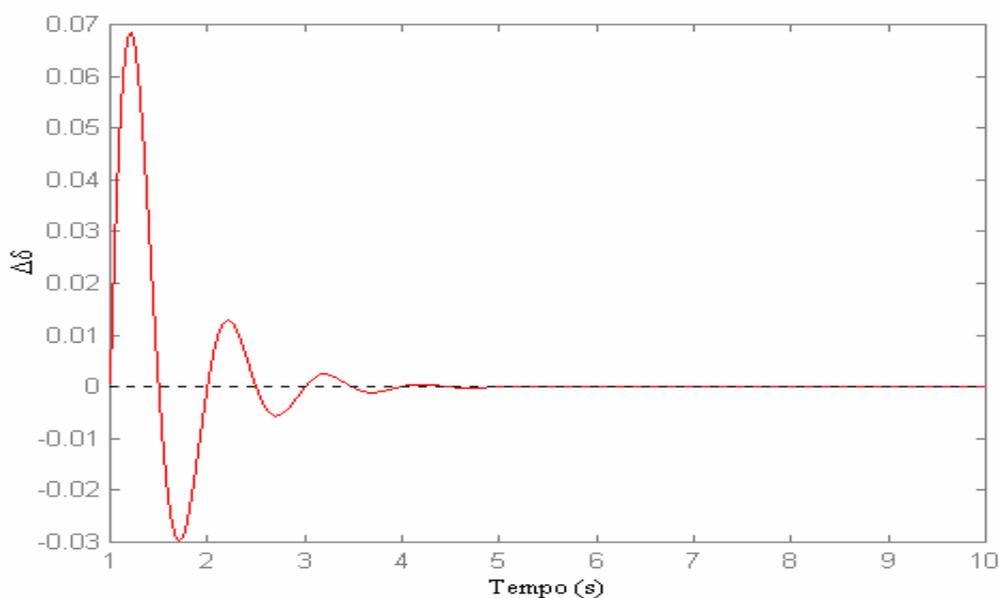


Figura 2. 1 - Sistema Estável, com  $\Delta T_s > 0$  e  $\Delta T_d > 0$ .

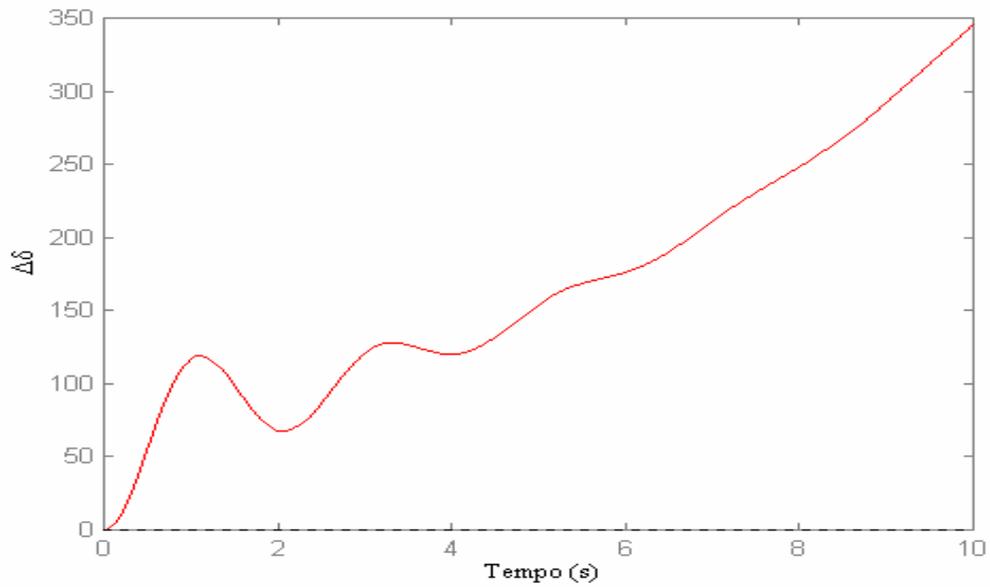


Figura 2. 2 - Sistema Instável Aperiódico, com  $\Delta T_s < 0$  e  $\Delta T_d > 0$ .

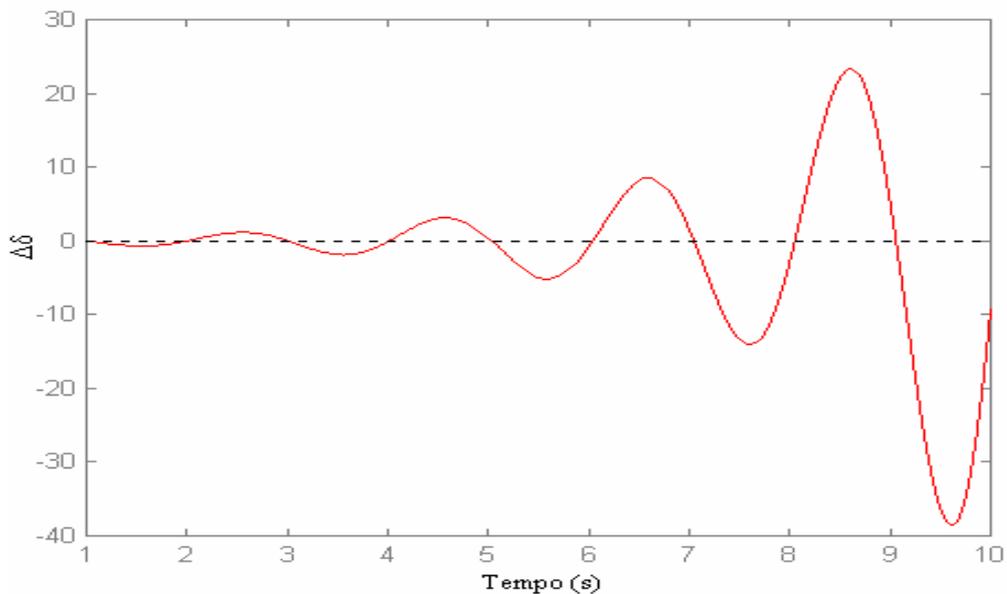


Figura 2. 3 - Sistema Instável Oscilatório, com  $\Delta T_s > 0$  e  $\Delta T_d < 0$ .

Nos sistemas elétricos de potência atuais, a estabilidade frente a pequenas perturbações está quase sempre relacionada com a insuficiência de amortecimento de oscilações. A estabilidade dos seguintes tipos de oscilações são, em geral, avaliadas [28]:

- **Modo inter-máquinas ou intra-planta:** associado às oscilações entre as unidades de uma mesma usina;

- **Modo local:** associado às oscilações entre o conjunto de unidades de uma dada usina e o restante do sistema (relativamente muito maior que o da usina). As frequências naturais dos modos locais ficam em geral na faixa de 1 a 2 Hz;
- **Modo multi-máquinas ou inter-plantas:** associado às oscilações entre usinas eletricamente próximas;
- **Modos de controle:** associados às oscilações causadas por ajuste inadequado dos controles, tais como: sistema de excitação, reguladores de velocidade, compensadores estáticos, conversores HVDC;
- **Modos torsionais:** causados pela interação entre o sistema elétrico e o sistema mecânico constituído pelo conjunto eixo da turbina-rotor do gerador, os quais incluem:
  - interação torsional com os controles do sistema acima citados;
  - ressonância sub-síncrona com o sistema de transmissão contendo compensação série;
  - fadiga torsional causada por chaveamentos na rede elétrica.
- **Modos inter-área:** associados às interligações em corrente alternada entre as diferentes áreas do sistema. São caracterizados pelas oscilações entre grupos de usinas situadas em partes diferentes do sistema relativamente afastadas entre si (conectadas através de uma grande impedância). O modo inter-área usualmente ocorre de duas formas:
  - envolvendo todas as usinas do sistema, as quais se dividem em dois grandes grupos oscilando entre si. A frequência desse tipo de oscilação fica em geral na faixa de 0,1 a 0,3 Hz;

- envolvendo diversas áreas do sistema ou sub-grupos de uma mesma área que oscilam entre si. As frequências nesse caso ficam geralmente na faixa de 0,4 a 0,7 Hz.

### 2.1.1 - Modelo Dinâmico de um Sistema Elétrico de Potência

Em estudos de estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência (SEP), as equações representativas dos modelos dos diversos componentes do sistema formam um conjunto de equações diferenciais e algébricas não-lineares:

$$\dot{\underline{x}} = \mathbf{f}(\underline{x}, \underline{r}) \quad (2.2)$$

$$\underline{0} = \mathbf{g}(\underline{x}, \underline{r}) \quad (2.3)$$

onde

$\underline{x} \Rightarrow$  vetor de variáveis de estado

$\underline{r} \Rightarrow$  vetor de variáveis algébricas

$\underline{0} \Rightarrow$  vetor com todos os elementos nulos

O conjunto das equações diferenciais descreve todos os componentes do sistema com representação dinâmica: máquinas síncronas, sistemas de excitação, estabilizadores de sistemas de potência, reguladores de velocidade, equipamentos FACTS, elos de corrente contínua, motores de indução, cargas dinâmicas e outros. No conjunto das equações algébricas está representada a rede de transmissão em corrente alternada, através da sua formulação por matriz admitância nodal, além de relações algébricas relativas aos diversos equipamentos dinâmicos.

Nos estudos de estabilidade transitória o comportamento dinâmico do sistema é determinado através da simulação no domínio do tempo do conjunto de equações diferenciais e algébricas.

O estudo de estabilidade a pequenas perturbações de um SEP é feito a partir da linearização das equações (2.2) e (2.3) em torno de um ponto de operação  $(\underline{x}_0, \underline{r}_0)$  do sistema:

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{x} \\ \underline{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 \\ \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \underline{x} \\ \Delta \underline{r} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

onde

$$\mathbf{J}_1 = \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\underline{\mathbf{x}}, \underline{\mathbf{r}})}{\partial \underline{\mathbf{x}}} \right|_{\underline{\mathbf{x}}_0, \underline{\mathbf{r}}_0} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{J}_2 = \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\underline{\mathbf{x}}, \underline{\mathbf{r}})}{\partial \underline{\mathbf{r}}} \right|_{\underline{\mathbf{x}}_0, \underline{\mathbf{r}}_0} \quad (2.6)$$

$$\mathbf{J}_3 = \left. \frac{\partial \mathbf{g}(\underline{\mathbf{x}}, \underline{\mathbf{r}})}{\partial \underline{\mathbf{x}}} \right|_{\underline{\mathbf{x}}_0, \underline{\mathbf{r}}_0} \quad (2.7)$$

$$\mathbf{J}_4 = \left. \frac{\partial \mathbf{g}(\underline{\mathbf{x}}, \underline{\mathbf{r}})}{\partial \underline{\mathbf{r}}} \right|_{\underline{\mathbf{x}}_0, \underline{\mathbf{r}}_0} \quad (2.8)$$

formam a matriz Jacobiano do sistema.

A matriz de estados  $\mathbf{A}$  do SEP pode ser obtida pela eliminação das variáveis algébricas da matriz Jacobiano e seus autovalores fornecem informações sobre a estabilidade do sistema em torno do ponto de operação ( $\underline{\mathbf{x}}_0, \underline{\mathbf{r}}_0$ ).

$$\Delta \underline{\mathbf{r}} = -\mathbf{J}_4^{-1} \mathbf{J}_3 \Delta \underline{\mathbf{x}} \quad (2.9)$$

$$\Delta \dot{\underline{\mathbf{x}}} = [\mathbf{J}_1 - \mathbf{J}_2 \mathbf{J}_4^{-1} \mathbf{J}_3] \Delta \underline{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \Delta \underline{\mathbf{x}} \quad (2.10)$$

O símbolo  $\Delta$  representa uma variação incremental em torno do ponto de equilíbrio do SEP.

### 2.1.2 - Autovalores e Autovetores

Os autovalores de uma matriz  $\mathbf{A}$  são definidos como sendo os valores de  $\lambda$  que satisfazem a solução não trivial ( $\underline{\mathbf{v}} \neq \mathbf{0}$ ) da equação:

$$\mathbf{A} \underline{\mathbf{v}} = \lambda \underline{\mathbf{v}} \quad (2.11)$$

onde  $\mathbf{A}$  é uma matriz  $n \times n$  e  $\underline{\mathbf{v}}$  um vetor de dimensão  $n$ .

Dessa forma, os autovalores de uma matriz  $\mathbf{A}$  podem ser calculados através da solução das raízes do seu polinômio ou equação característica, que é definida por:

$$\det|\lambda\mathbf{I} - \mathbf{A}| = 0 \quad (2.12)$$

Para cada autovalor  $\lambda_i$  existe um autovetor coluna associado  $\underline{\mathbf{v}}_i$ , que satisfaz a relação:

$$\mathbf{A}\underline{\mathbf{v}}_i = \lambda_i\underline{\mathbf{v}}_i \quad (2.13)$$

denominado autovetor à direita de  $\mathbf{A}$  associado a  $\lambda_i$ . Da mesma forma, existe um autovetor linha  $\underline{\mathbf{w}}_i^t$ , denominado autovetor à esquerda de  $\mathbf{A}$  associado a  $\lambda_i$ , que satisfaz a seguinte relação:

$$\underline{\mathbf{w}}_i^t\mathbf{A} = \lambda_i\underline{\mathbf{w}}_i^t \quad (2.14)$$

Supondo que a matriz  $\mathbf{A}$  tenha  $n$  autovalores distintos  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  e que  $\mathbf{P}$  seja uma matriz formada pelo conjunto dos autovetores linearmente independentes  $\underline{\mathbf{v}}_1, \underline{\mathbf{v}}_2, \dots, \underline{\mathbf{v}}_n$ . então  $\mathbf{P}$  é uma matriz não singular e pode ser utilizada para colocar a matriz  $\mathbf{A}$  na forma diagonal:

$$\hat{\mathbf{A}} = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & \lambda_n \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

onde  $\mathbf{P}^{-1}$  é formada pelo conjunto dos autovetores  $\underline{\mathbf{w}}_1^t, \underline{\mathbf{w}}_2^t, \dots, \underline{\mathbf{w}}_n^t$ . A matriz  $\mathbf{P}$  é chamada de matriz dos autovetores à direita e a matriz  $\mathbf{P}^{-1}$  é chamada de matriz dos autovetores à esquerda.

O uso da matriz  $\mathbf{A}$  (não esparsa) faz com que a taxa de variação de cada variável de estado do sistema seja uma combinação linear de várias outras, sendo difícil isolar quais parâmetros influenciam de maneira significativa em um certo modo. A diagonalização da matriz  $\mathbf{A}$  tem como objetivo eliminar o acoplamento entre os estados [28].

### 2.1.3 - Mode-Shape

A partir da análise dos autovetores à direita, pode-se verificar o comportamento de todas as grandezas do sistema (variáveis de estado), quando um determinado modo é

excitado. O grau de atividade associado à variável de estado  $\mathbf{x}_k$  para um modo  $i$ , é dado pelo elemento na posição  $ki$  da matriz de autovetores à direita.

Entende-se como mode-shape a visualização da amplitude e da fase de um determinado modo de oscilação, quando analisamos um mesmo tipo de variável de saída (por exemplo, velocidade angular, tensão,...). Portanto, quando se estuda os desvios de velocidade do rotor ( $\Delta\omega$ ) de todos os geradores, e especificamente concentramos a atenção no comportamento de um determinado modo de oscilação, tem-se o que se denomina mode-shape de velocidade. Da mesma forma, obtém-se os mode-shapes de tensão nas barras, potência elétrica dos geradores, fluxo nas linhas, etc.

#### 2.1.4 - Resíduo de Função de Transferência

Aplicando-se a transformada de Laplace nas equações de estado (2.16) e considerando o estado inicial nulo, obtém-se as seguintes equações:

$$\mathbf{X}(s) = [s\mathbf{I} - \mathbf{A}]^{-1} \mathbf{b}U(s) \quad (2.16)$$

$$\mathbf{Y}(s) = \mathbf{c}\mathbf{X}(s) = \mathbf{c}[s\mathbf{I} - \mathbf{A}]^{-1} \mathbf{b}U(s) \quad (2.17)$$

Logo, a função de transferência  $\mathbf{G}(s)$  que relaciona as variáveis de saída e de entrada será dada por:

$$\mathbf{G}(s) = \frac{\mathbf{Y}(s)}{U(s)} = \mathbf{c}[s\mathbf{I} - \mathbf{A}]^{-1} \mathbf{b} \quad (2.18)$$

Se a matriz de estados  $\mathbf{A}$  pode ser diagonalizada na forma apresentada em (2.15), então pode-se escrever que:

$$\mathbf{G}(s) = \mathbf{c} \left[ s\mathbf{I} - \hat{\mathbf{A}} \right]^{-1} \hat{\mathbf{b}} \quad (2.19)$$

$$\mathbf{G}(s) = \sum_{i=1}^n \frac{\hat{\mathbf{b}}_i \hat{\mathbf{c}}_i}{s - \lambda_i} = \sum_{i=1}^n \frac{\mathbf{R}_i}{s - \lambda_i} \quad (2.20)$$

onde:

$\hat{\mathbf{A}}$  → matriz espectral (Forma de Jordan)

$\hat{\mathbf{b}} = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{b}$  → vetor de controlabilidade modal

$\hat{\mathbf{c}} = \mathbf{cP}$  → vetor de observabilidade modal

$\hat{\mathbf{b}}_i$  → fator de controlabilidade modal

$\hat{\mathbf{c}}_i$  → fator de observabilidade modal

$\mathbf{R}_i$  → resíduo de  $\mathbf{G}(s)$  associado ao autovalor  $\lambda_i$

O maior resíduo indica o melhor local para se instalar um compensador ou a necessidade de se ajustar os controladores existentes. A análise através dos resíduos indica a controlabilidade do modo e quais máquinas podem controlá-lo [15]. No cálculo do resíduo é utilizado o autovetor à esquerda para identificação das máquinas passíveis de terem seus controladores ajustados ou onde seriam implementados novos controladores.

A complexidade do ajuste de um controlador aumenta, quando num sistema multi-máquina o autovalor do sistema, correspondente ao modo cujo amortecimento é desejado ser aumentado, está próximo ou coincidente a um zero e um grupo de máquinas tem maior influência sobre ele. Nessa situação o ajuste de apenas um dos controladores pode não ser suficiente para obter o amortecimento desejado. Teria então, que ser efetuado, um ajuste coordenado nos controladores das máquinas que tem influência nesse modo de oscilação, para obter o melhor desempenho para o sistema. A utilização de ferramentas robustas que fizessem ajustes simultâneos dos controladores, poderiam superar esses problemas. Diversas pesquisas estão sendo realizadas nessa área como pode ser visto nas referências [5, 9, 10, 11, 13].

## 2.2 – AJUSTE DE CONTROLADORES DE UM SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

A análise do ponto de vista de pequenas perturbações é utilizada para ajustes e projetos de controladores das máquinas síncronas. Esses controladores são utilizados para fornecer às máquinas o montante de torque necessário para melhorar o desempenho

dinâmico global do sistema. Essa técnica de análise linear fornece informações sobre as características inerentes ao sistema e auxilia no seu projeto[28].

Existem duas formas de melhorar o desempenho dinâmico de um sistema de potência. Uma aumentando o torque sincronizante das máquinas através dos Reguladores Automático de Tensão (RAT) e a outra aumentando o torque de amortecimento através de sinais adicionais estabilizadores (ESP). A regulação de tensão tem influência direta na estabilidade transitória. As atuais excitatrizes estáticas possuem baixas constantes de tempo de resposta, que quando combinadas com ajustes nos RATs com alto ganho, rápida resposta e elevados limites de saturação, tendem a causar a diminuição do torque de amortecimento em certas condições operativas. Portanto a aplicação dos ESPs [2] é necessária para recompor o torque de amortecimento. Como exemplo podem ser citados, elevados carregamentos no sistema de transmissão, máquinas operando no limite máximo de reativos e configurações críticas para o sistema como manutenção ou indisponibilidade de equipamentos importantes de transmissão ou geração. O efeito da contribuição para o amortecimento das oscilações eletromecânicas do controle da excitação é descrito em [1].

Num sistema de potência os modos eletromecânicos de menor frequência são, de modo geral, os que apresentam menor amortecimento. A contribuição dos enrolamentos amortecedores das máquinas nessas frequências é naturalmente pequena. Nesse caso é importante a identificação dos parâmetros dos controladores, equipamentos, condições de operação (carga/geração) e configurações que possam influenciar no amortecimento dessas oscilações.

Para o problema de ajuste de estabilizadores de sistema de potência é necessário o uso de ferramentas que identifiquem de forma precisa, os modos de oscilação do sistema. Ferramentas baseadas em análise modal permitem identificar os modos eletromecânicos mais críticos (instáveis e pouco amortecidos) e as máquinas que os influenciam. As máquinas mais influentes seriam aquelas cujos estabilizadores seriam candidatos a serem ajustados ou onde seriam instalados os estabilizadores. Nesta análise são identificados grupos coerentes (modo de oscilação local e inter-áreas) e pontos de nó (máquinas que não influenciam no modo que está sob análise). Com base nas informações obtidas por tal ferramenta, pode-se sintetizar controladores, como por exemplo ganhos e constantes de tempo de blocos avanço-atraso, que não irão atuar nos modos pouco amortecidos.

### 2.2.1 – Formulação do Problema

Controladores de sistemas de potência são frequentemente projetados para operar de forma descentralizada. Sinais remotos são considerados pouco confiáveis e são evitados. A robustez dos controladores é assegurada considerando o desempenho do sistema de controle para diferentes condições de operação. A escolha dessas condições é baseada na experiência de especialistas e em estudos de simulação. Ferramentas robustas são importantes para uma aplicação de ajuste global dos controladores de um sistema de potência.

O ajuste de estabilizadores de um sistema de potência tipicamente utiliza um modelo linearizado num ponto de operação. A análise é feita aplicando-se pequenas variações em torno de um ponto de operação, representado pelas equações de estado. No domínio da frequência, a função de transferência associada à equação de estado está relacionada na expressão (2.21).

Considerando que  $P_i(s)$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ , seja a representação do conjunto de  $m$  pontos de operação pré-selecionados e  $K_d(s)$  uma matriz de transferência diagonal de ordem  $p$  (número de controladores). Definindo o sinal de erro como sendo  $e = y_{ref} - y$  onde  $y_{ref}$  é um nível de referência constante para o sinal  $y$ . O projeto de controle descentralizado requer uma lei de controle dada por  $u = K_d(s) * e$ . Baseado nesta lei de controle, o sistema deverá ser estável em malha fechada (Figura 2.4) e não deverá ter nenhum autovalor com amortecimento menor do que um mínimo pré-especificado em todas as  $m$  condições de operação.

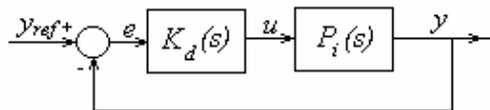


Figura 2.4 - Sistema em malha fechada.

Para cada um dos  $p$  controladores, é suposto uma estrutura clássica de controle. O modelo dinâmico consiste de um ganho constante, um filtro *washout* e estágios de avanço-atraso como mostrado a seguir:

$$\mathbf{K}_{ii}(s) = \mathbf{K}_{ii} \cdot \frac{\mathbf{T}_w s}{1 + \mathbf{T}_w s} \cdot \left( \frac{1 + \frac{\sqrt{\alpha_i}}{\omega_i} s}{1 + \frac{1}{\omega_i \sqrt{\alpha_i}} s} \right)^\ell \quad (2.21)$$

onde:

$$\mathbf{i} = 1, 2, \dots, \mathbf{p}$$

$\mathbf{K}_{ii}$  → ganho do estabilizador.

$\omega_i$  → corresponde a  $\omega_{m\acute{a}x}$  frequência onde ocorre o máximo avanço de fase.

$\alpha_i$  → parâmetro que fornece a compensação de fase do bloco avanço-atraso.

$\ell$  → número de blocos de avanço-atraso.

A constante de tempo  $\mathbf{T}_w$  associada ao *filtro washout* não é crítica. A principal consideração é que ela não deve ser muito pequena, para não alterar os sinais na faixa de frequência de interesse. Por essa razão,  $\mathbf{T}_w$  é considerado um parâmetro conhecido. Portanto,  $\mathbf{K}_{ii}$ ,  $\alpha_i$  e  $\omega_i$  são os parâmetros a serem determinados.

A formulação do problema como um problema de otimização é baseada numa função não analítica, relacionada à soma dos amortecimentos dos autovalores das matrizes de todas as condições de operação pré-selecionadas do sistema, cuja expressão é dada por:

$$\text{MáxF} = \sum_{i=1}^m \left[ \sum_{j=1}^n (\zeta_j) \right]_i \quad (2.22)$$

onde:

$\zeta$  → taxa de amortecimento de um autovalor

O conjunto de restrições do problema de otimização, é formado pelos limites dos parâmetros  $\mathbf{K}_{ii}$ ,  $\alpha_i$  e  $\omega_i$  e do critério de desempenho do autovalor com o menor amortecimento dentre todos aqueles obtidos em todos pontos de operação utilizados.

$$K_{ii \min} \leq K_{ii} \leq K_{ii \max} \quad (2.23)$$

$$\alpha_{i \min} \leq \alpha_i \leq \alpha_{i \max} \quad (2.24)$$

$$\omega_{i \min} \leq \omega_i \leq \omega_{i \max} \quad (2.25)$$

$$(\zeta_j)_i \geq \zeta_{i \min} \quad (2.26)$$

Uma vez definidos o critério de ajuste e as restrições a que estarão sujeitos os parâmetros dos controladores, os elementos para o problema de otimização passam a ser definidos.

### 2.2.1.1 – Função de Adequabilidade

O problema a ser resolvido é um problema complexo de otimização com uma função objetivo implícita, que depende da avaliação dos autovalores da matriz de estado do sistema. Este problema é muito difícil de ser resolvido utilizando métodos convencionais de otimização.

A definição da função objetivo é de fundamental importância para que a solução obtida seja funcional. Por ter valores sempre positivo evita valor negativo de adequabilidade. Cada valor representa a classificação de uma solução de ajuste com relação ao autovalor de menor amortecimento no conjunto de pontos de operação. Utilizada para avaliar a solução de ajuste, para os pontos de operação considerados, segue o critério:

| Avaliação       | Faixa de amortecimento   |
|-----------------|--|
| 0,0 .....       | Se qualquer $(\zeta_j)_i \leq \bar{\zeta}_0$   |
| $\beta_0$ ..... | Se todos $(\zeta_j)_i > \bar{\zeta}_0$ ..... e se qualquer $(\zeta_j)_i \leq \bar{\zeta}_1$          |
| $\beta_1$ ..... | Se todos $(\zeta_j)_i > \bar{\zeta}_1$ ..... e se qualquer $(\zeta_j)_i \leq \bar{\zeta}_2$          |
| ⋮               |  |
| $\beta_k$ ..... | Se todos $(\zeta_j)_i > \bar{\zeta}_{k-1}$ ..... e se qualquer $(\zeta_j)_i \leq \bar{\zeta}_{\min}$ |
| F .....         | Se todos $(\zeta_j)_i \geq \bar{\zeta}_{\min}$ <span style="float: right;">(2.27)</span>             |

onde :

$$0 < \beta_0 < \beta_1 < \dots < \beta_k < F$$

$$\bar{\zeta}_0 < \bar{\zeta}_1 < \bar{\zeta}_2 < \dots < \bar{\zeta}_{k-1} < \bar{\zeta}_{\min}$$

Os valores  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k, F$  são escalares positivos e pré-definidos para discernir soluções estáveis com restrição de desempenho não satisfeita. Inicialmente, utilizados para discernir soluções instáveis  $\beta_0=0$  (instável) e  $\beta_1=10,0$  (estável). Posteriormente, utilizados para discernir soluções estáveis com todas restrições satisfeitas. Estes valores indicam o grau de desempenho dinâmico do sistema.

Os valores  $\bar{\zeta}_0, \bar{\zeta}_1, \bar{\zeta}_2, \dots, \bar{\zeta}_{k-1}, \bar{\zeta}_{\min}$  são as taxas de amortecimento dos autovalores.

## **2.3 – MÉTODOS ANALÍTICOS DE ALOCAÇÃO DE PÓLOS PARA PROJETO DE ESTABILIZADORES DE SISTEMA DE POTÊNCIA**

A pesquisa de um algoritmo robusto para ajuste de controladores de um sistema de potência, usando técnicas analíticas, tem mostrado alguns resultados satisfatórios. Neste trabalho não será discutida a eficiência destes algoritmos, mas a maneira deles ajudarem o AG na busca da solução. Serão descritos os métodos de alocação de pólos utilizados para cálculo de um ajuste, que foi introduzido na primeira população do AG, como um indivíduo fornecido pelo usuário. Baseado neste ajuste foram também calculadas as fronteiras da região de busca, que é o intervalo de busca de cada variável.

### **2.3.1 – Método Iterativo de Posicionamento de Pólos**

Este método foi proposto inicialmente em [37] para o caso de ajuste de ESPs, e estendido em [42] para o caso de ajuste coordenado de ESPs e controles suplementares de dispositivos FACTS.

É um procedimento iterativo que executa ajustes de controladores, considerando em cada estágio, as interações dinâmicas com as demais máquinas e controladores.

Supondo que é desejado ajustar um controlador para um sistema máquina barra infinita, a equação linearizada para este sistema é expressa por:

$$s\mathbf{X}(s) = \mathbf{A}.\mathbf{X}(s) + \mathbf{B}.\mathbf{U}(s) \quad (2.28)$$

$$\mathbf{Y}(s) = \mathbf{C}.\mathbf{X}(s) \quad (2.29)$$

com:

$$\mathbf{B} = [\mathbf{0} \cdots \mathbf{0} b_i \mathbf{0} \cdots \mathbf{0}]^T$$

$$\mathbf{C} = [\mathbf{0} \cdots \mathbf{0} c_i \mathbf{0} \cdots \mathbf{0}]$$

Considerando também que a função de transferência do estabilizador que se deseja aplicar ao gerador tenha a seguinte estrutura:

$$\frac{\mathbf{U}(s)}{\mathbf{Y}(s)} = \mathbf{K} \left( \frac{1 + s\mathbf{T}_1}{1 + s\mathbf{T}_2} \right)^\ell = \mathbf{F}(s) \quad (2.30)$$

Neste método os parâmetros  $\ell$  e  $\mathbf{T}_2$  são pré especificados e constantes. Os parâmetros  $\mathbf{K}$  e  $\mathbf{T}_1$  são os parâmetros a serem determinados, tal que os autovalores dominantes sejam alocados nos valores desejados ( $\lambda, \lambda^*$ ).

Através das equações (2.28), (2.29) e (2.30) pode ser mostrado que a equação característica do sistema em malha fechada é dada por:

$$\mathbf{I} - \mathbf{C}(\mathbf{sI} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}.\mathbf{F}(s) = \mathbf{0} \quad (2.31)$$

explicitando o valor de  $\mathbf{F}(s)$  obtém-se a equação

$$\mathbf{F}(s) = [\mathbf{C}(\mathbf{sI} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}]^{-1} \quad (2.32)$$

Da equação (2.32) os parâmetros do estabilizador  $\mathbf{K}$  e  $\mathbf{T}_1$  desejados podem ser calculados substituindo  $s$  pelo autovalor  $\lambda$ , local onde se deseja posicionar o autovalor dominante. A solução de ajuste é obtida equacionando os termos em real e imaginário em cada lado da equação (2.30). Duas considerações importantes podem ser feitas:

1. A estrutura de  $\mathbf{B}$  e  $\mathbf{C}(\lambda\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$  não precisam ser avaliadas completamente. É suficiente calcular apenas o elemento na  $j$ -ésima linha e  $i$ -ésima coluna da matriz  $(\lambda\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ .
2. O elemento desejado no item anterior pode ser calculado eficientemente fatorando  $(\lambda\mathbf{I} - \mathbf{A})$  em uma matriz triangular inferior  $\mathbf{L}$  e uma matriz triangular superior  $\mathbf{P}$ . Considerando que  $\mathbf{V} = (\lambda\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ . O elemento desejado é obtido resolvendo a equação  $\mathbf{L}\mathbf{P}\mathbf{V}_i = \mathbf{I}_i$  onde  $\mathbf{V}_i$  é o  $i$ -ésimo elemento da coluna da matriz  $\mathbf{V}$  e  $\mathbf{I}_i$  é a  $i$ -ésima coluna da matriz unidade. A quantidade de cálculos requerida e o tempo computacional despendido serão o mínimo através da exploração da esparsidade de  $\mathbf{I}_i$ .

Estendendo este desenvolvimento para um sistema multi-máquinas com uma barra de referência, considerando que  $N$  seja o total de máquinas, existirão  $N$  pares de autovalores complexos conjugados associados às oscilações dos rotores. O objetivo principal seria posicionar alguns ou todos os autovalores nos locais desejados, no lado esquerdo do plano complexo.

O conjunto de equações características que dá a relação não-linear entre os parâmetros dos estabilizadores e os autovalores, é obtido da mesma forma que no procedimento utilizado no sistema máquina-barra infinita. As equações linearizadas de um dado sistema multi-máquinas a ser usado para cálculo dos parâmetros dos estabilizadores da  $i$ -ésima máquina são expressos na forma:

$$s\mathbf{X}_k = (\mathbf{A}_k + \mathbf{B}_k\mathbf{C}_k\mathbf{F}_k)\mathbf{X}_k + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^N \mathbf{A}_{kj}\mathbf{X}_j \quad (2.33)$$

onde  $k = 1 \dots n$        $k \neq i$

$$s\mathbf{X}_i = \mathbf{A}_i\mathbf{X}_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \mathbf{A}_{ij}\mathbf{X}_j + \mathbf{B}_i\mathbf{V}_i \quad (2.34)$$

$$\mathbf{Y}_i = \mathbf{C}_i\mathbf{X}_i \quad (2.35)$$

$$\mathbf{U}_i = \mathbf{F}_i\mathbf{Y}_i \quad (2.36)$$

onde

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{K}_i \cdot \left[ \frac{(\mathbf{1} + s\mathbf{T}_1)}{(\mathbf{1} + s\mathbf{T}_2)} \right]^{p_i} \quad (2.37)$$

Um algoritmo para calcular os parâmetros desejados dos estabilizadores para um sistema multi-máquina pode então ser escrito:

1. Para cada  $i = 1 \dots N$  especificar os autovalores desejados  $(\lambda_i, \lambda_i^*)$  e os valores iniciais de  $(\mathbf{K}_i, \mathbf{T}_{1i})$ .
2. Para cada  $i = 1 \dots N$ , formar a equação (2.32) usando os últimos valores dos parâmetros dos estabilizadores e resolver para  $(\mathbf{K}_i, \mathbf{T}_{1i})$ .
3. Se  $|(\Delta\mathbf{K}_i, \Delta\mathbf{T}_{1i})|$  para  $i = 1 \dots N$  estiver dentro de uma tolerância pré-especificada executar o passo 4, caso contrário voltar ao passo 2.
4. Calcular os autovalores do sistema em malha fechada e parar o processamento.

Este procedimento iterativo executa seqüencialmente os ajustes dos controladores considerando em cada estágio, as interações dinâmicas com os restantes das máquinas e controladores. Supondo que em uma dada iteração o controlador do dispositivo ( $i$ ) está sendo ajustado, a função de transferência do controlador tem uma estrutura mostrada em (2.37), a equação característica para o sistema em malha fechada será:

$$\mathbf{1} - \mathbf{F}_i(s) \cdot \mathbf{P}_i(s) = \mathbf{0} \quad (2.38)$$

e  $(\lambda_i, \lambda_i^*)$  um lugar especificado para posicionar o pólo do sistema em malha fechada.

Denominando por  $\mathbf{e} + \mathbf{jf}$  o valor de  $\mathbf{K}_{ii}(\lambda)$ , obtido de:

$$\mathbf{e} + \mathbf{jf} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{P}_i(\lambda)} \quad (2.39)$$

e  $\mathbf{P}_i(\lambda)$  é obtido através da expressão

$$\mathbf{P}_i(s) = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D} \quad (2.40)$$

Os parâmetros da estrutura de controle são calculados resolvendo a expressão (2.40). Este procedimento é repetido para cada controlador, cujos parâmetros serão ajustados.

O critério de convergência é satisfeito, quando o maior desvio absoluto entre os autovalores posicionados numa iteração  $q$  e aqueles posicionados na iteração  $q - 1$  tornar-se menor do que uma tolerância pré-especificada.

### 2.3.2 – Método de Posicionamento de Pólos por Nyquist

O projeto de estabilizadores pelo método do diagrama de Nyquist mostrado em [39] consiste em traçar o lugar geométrico para a função de transferência do gerador  $G(s)$  no plano complexo do valor da função de transferência  $G(j\omega)$  quando  $\omega$  varia de  $-\infty$  a  $+\infty$ . O ajuste é feito, considerando a função de transferência de malha aberta  $F(s) = G(s) \cdot H(s)$  obtida do diagrama de blocos do gerador-estabilizador Figura 2. 5 como mostrada a seguir:

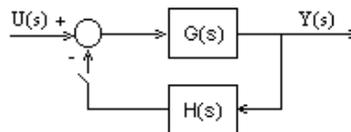


Figura 2. 5 – Diagrama de blocos gerador-estabilizador.

Uma generalização deste método foi proposta em [43] onde o autovalor associado à frequência, que se deseja ajustar o estabilizador, é posicionado na linha de amortecimento desejada.

## CAPÍTULO 3

### ALGORITMOS GENÉTICOS

Os AGs foram desenvolvidos por Holland [6] na década de sessenta, baseado na teoria da evolução de Darwin. Imitam de forma simples os efeitos naturais do ambiente no ser vivo e como a natureza resolve problemas difíceis de otimização. Matematicamente, simulam de forma simplificada o processo de evolução natural utilizando técnicas estocásticas. O tema central da pesquisa sobre AGs é a robustez, o balanço entre a eficiência e a eficácia necessárias para sobrevivência em diversos ambientes.

Em [6] a forma original do AG é descrita. Em [22, 24, 25] novas técnicas são apresentadas. Além disso, outras publicações e livros são listados em [20], que é uma coletânea bibliográfica sobre o assunto.

Os AGs são técnicas estocásticas de busca baseadas no mecanismo de seleção natural e genética. Diferem das técnicas convencionais por utilizarem um conjunto de soluções codificadas de tamanho definido, denominado população, a qual, geralmente é criada de forma pseudo-aleatória. Cada solução ou indivíduo na população é denominado cromossomo. Um cromossomo é uma estrutura representada por símbolos, como por exemplo, números binários ou reais. Estes cromossomos evoluem através de sucessivas iterações chamadas gerações. Uma determinada população de uma geração é criada aplicando-se os operadores genéticos de recombinação (cruzamento e mutação) e de evolução (seleção). Em cada nova geração, os cromossomos são avaliados, através de medidas de adequabilidade (função objetivo). Após um número de gerações o algoritmo converge para uma solução, que representa a melhor solução encontrada pelo algoritmo, a qual tem grande chance de ser a solução ótima global. Esse procedimento básico é mostrado a seguir:

*Início*

*$t=0$*

*Cria uma população inicial  $P(t)$*

*Avalia  $P(t)$*

*Executa este ciclo enquanto um critério de parada não for alcançado*

*Recombina os indivíduos de  $P(t)$  para obter  $C(t)$*

*Avalia  $C(t)$*

*Seleciona  $P(t+1)$  de  $C(t)$*

*$t = t+1$*

*continua*

*fim*

onde:

$t \rightarrow$  representa o contador de geração

Os AGs diferem dos métodos convencionais de otimização de busca em vários aspectos como descrito em [6, 21]:

- Operam em um conjunto de soluções codificadas, não com as próprias soluções.
- Executam o procedimento de busca partindo de um conjunto de soluções, não de uma única solução.
- Usam apenas os valores da função adequabilidade, não derivadas ou outros conhecimentos auxiliares.
- Usam regras de transição probabilísticas, não regras determinísticas.

### **3.1 – PROCEDIMENTOS DE BUSCA DOS ALGORITMOS GENÉTICOS**

Como descrito em [25] a busca é um dos métodos universais para resolver um problema onde não se pode determinar a priori uma seqüência de passos que leva à solução. A busca pode ser executada através de duas estratégias: a cega e a heurística. A estratégia cega não usa informações sobre o domínio do problema. A estratégia heurística usa informações adicionais de acordo com o conhecimento de um especialista sobre o problema, melhor direcionando a busca. Duas questões importantes são evidentes nestas estratégias:

- Exploração do espaço de busca (*exploration*).
- Aproveitamento da melhor solução (*exploitation*)

Os AGs são uma classe de métodos de busca de propósito geral, método de busca que independe dos domínios. Os AGs combinam elementos de busca dirigida e

estocástica, onde um balanço entre o aproveitamento da melhor solução e a exploração do espaço de busca é executado. No início da busca genética, existe uma população altamente aleatória, com grande diversidade e adequabilidade média baixa. Através dos operadores genéticos essa busca é executada explorando inicialmente, todo espaço de busca (*exploration*). Quando soluções de alta adequabilidade são obtidas, esses operadores executam a exploração na vizinhança dessas soluções (*exploitation*). Os operadores são projetados, também, como métodos de busca de propósito geral e executam essencialmente uma busca cega, o que não garantiria alcançar a melhor solução. O tipo de busca que um operador executa seria determinado pelo ambiente do sistema genético, não pelo operador propriamente dito.

Os AGs trabalham manipulando estruturas codificadas que contém parte da estrutura ótima. Estes segmentos são propagados em parte ou no todo, pelos operadores genéticos de recombinação e de evolução, para as populações futuras. O teorema do esquema (*scheme*) e a hipótese dos blocos construtores (*building blocks*) [6, 22] mostram a essência do mecanismo de manipulação das estruturas.

### 3.1.1 - Padrões de Semelhança

O interesse maior não está em uma única estrutura, mas sim nas semelhanças entre estruturas de alta adequabilidade, que podem guiar a busca, por conterem partes da solução ótima. Esse padrão de semelhança é denominado de esquema. Um esquema é um padrão de semelhança que descreve um conjunto de estruturas semelhantes em certas posições [6, 23]. Supondo o esquema

$$\boxed{* * 0 1 1} \tag{3.1}$$

o símbolo \* pode ser **0** ou **1**. As estruturas que podem ser obtidas desse esquema são :

|   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |

(3.2)

que representam as soluções possíveis, recombinao 0 e 1 nas posições que tem \* no esquema dado.

Permutando os 0 e 1 à direita do esquema obtém-se um conjunto de esquemas que é denominado de “*schemata*”. A busca do AG pela estrutura ótima pode ser vista como uma competição entre “*schemata*” para aumentar o número de seus exemplares na população seguinte.

### 3.2 – REPRESENTAÇÃO DAS VARIÁVEIS NOS CROMOSSOMOS

Existem vários tipos de representação, porém, serão analisadas apenas a representação binária e a real. Um cromossomo é um arranjo concatenado de variáveis, codificadas ou não, que representam as grandezas de interesse de um sistema sob análise. Estas estruturas são manipuladas pelo AG e seus valores correspondentes no espaço de soluções reais são inseridos no modelo do sistema. Um valor, que representa o efeito das variáveis deste cromossomo no sistema, é retornado para o AG e avaliado.

#### -Representação em binário

A representação em binário transforma o intervalo contínuo em que está contida a variável real em um intervalo discreto. Nesta representação a distância de Hamming entre dois números binários consecutivos é diferente de 1. Para superar este problema Gray criou estruturas originárias dos números binários que foram denominadas de códigos de Gray [6]. O problema da distância de Hamming é mais evidente, quando as variáveis sendo representadas por cinco bits, por exemplo, deseja-se passar do valor 15 para o 16 como mostrado a seguir.

$$\begin{array}{cc}
 \text{Número 15} & \text{Número 16} \\
 \boxed{0\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1} & \boxed{1\ 0\ 0\ 0\ 0}
 \end{array} \tag{3.3}$$

Nesta representação o tamanho do cromossomo depende da precisão que se deseja nos valores das variáveis. Quanto maior a precisão ( $P_d$ ) maior será o tamanho do cromossomo ( $n$ ). Esta precisão é obtida quando é definido o número de partes que se

deseja discretizar o intervalo em que está contida uma determinada variável. A expressão a seguir define a precisão que se deseja.

Supondo que o intervalo correspondente a variável  $X$  seja  $[X_{\min}, X_{\max}]$

$$P_d = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{2^n - 1} \quad (3.4)$$

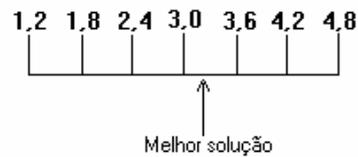
onde:

$P_d$  → precisão desejada

$n$  → tamanho do binário correspondente a variável  $X$

$2^n - 1$  → número de partes que se deseja discretizar a variável  $X$

Por discretizar um intervalo contínuo, a melhor solução pode se localizar entre dois pontos discretos e adjacentes. Supondo que o intervalo contínuo em que está contida a variável  $Y$  seja  $[1,2 \quad 4,8]$  e sua discretização ilustrada a seguir.



(3.5)

Logo a obtenção deste ponto é pouco provável necessitando aumentar a precisão, conseqüentemente, o tamanho do cromossomo.

### -Representação em real

Na representação em real o intervalo ao qual pertence uma variável permanece contínuo. O tamanho do cromossomo é igual ao número de variáveis utilizadas na aplicação, como mostrado a seguir. Supondo um cromossomo  $P_1$  com duas variáveis  $V_1$  e  $V_2$  representadas em real. Seu tamanho será igual 2.

$$P_1 \Rightarrow \begin{array}{|c|c|} \hline V_1 & V_2 \\ \hline 345.78 & 98.21 \\ \hline \end{array}$$

(3.6)

A precisão desejada nos valores das variáveis representadas em real, contidas no cromossomo, depende do computador que está sendo utilizado, não depende mais do tamanho do cromossomo. No exemplo anterior a precisão utilizada foi até o segundo dígito decimal.

### **-Qualidades das representações**

A escolha entre as duas representações depende da dimensão do cromossomo que está sendo representado. Se o número de elementos do cromossomo for muito grande, por exemplo da ordem de centenas de elementos, a representação em real será a mais adequada, por ser menor a quantidade de recombinações a serem executadas ao longo do processo de busca. Se o tamanho do cromossomo for pequeno, da ordem de dezenas de elementos, ambas as representações podem ser usadas, porque o tempo gasto para recombinação ao longo de todo processamento será menor. Cabe ressaltar que o tamanho do cromossomo em quantidade de *bits* também depende da precisão desejada, para as variáveis, na representação em binário, o que não ocorre na representação em real.

## **3.3 – OPERADORES GENÉTICOS E DE EVOLUÇÃO**

Basicamente dois tipos de operadores são usados no AG:

- Operadores genéticos: cruzamento e mutação.
- Operadores de evolução: seleção.

Os operadores genéticos imitam o processo hereditário dos genes para criar novos indivíduos a cada geração. O operador de evolução imita o processo da evolução, onde somente indivíduos com melhor adequabilidade sobrevivem para participar de uma nova população a cada geração.

### **3.3.1 – Operador Genético de Cruzamento (*Crossover*)**

É o operador mais importante. Atua sobre dois cromossomos selecionados aleatoriamente, gerando outros através da combinação das características de ambos. Contribui para propagar os blocos construtores, partes da solução ótima contidas nesses

cromossomos, para as gerações futuras. Mediante uma taxa de cruzamento, controla-se o número esperado de indivíduos que serão submetidos a um determinado tipo de cruzamento. Maior taxa de cruzamento permite uma maior exploração do espaço de busca e reduz a chance de obtenção de uma solução local. Se essa taxa for muito elevada, resultará em muitos indivíduos com um valor baixo de adequabilidade. Maior tempo computacional será despendido na exploração de regiões não promissoras do espaço de busca. Existirá assim, um valor de taxa de cruzamento que será um compromisso entre a melhor exploração da região de busca e o menor tempo para explorá-la.

### Efeito sobre estruturas representadas em número binário

O cruzamento tem um efeito disruptivo sobre os cromossomos. Neste caso dependerá do ponto escolhido pseudo-aleatoriamente por este operador. Na ilustração a seguir pode ser analisado este efeito. Considerando dois cromossomos escolhidos  $P_1$  e  $P_2$  com duas variáveis  $V_1$  e  $V_2$ , para participarem de um cruzamento.

$$\begin{array}{l}
 P_1 \Rightarrow \left| \begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|}
 & & V_1 & & & & V_2 & & & & \\
 \hline
 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & \\
 \hline
 \end{array} \right| \\
 \\
 P_2 \Rightarrow \left| \begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|}
 & & V_1 & & & & V_2 & & & & \\
 \hline
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & \\
 \hline
 \end{array} \right|
 \end{array} \tag{3.7}$$

Pode ser observado no exemplo que a maior probabilidade de ocorrer um ponto de cruzamento é no valor em binário correspondente a uma determinada variável. Além de parte ou de toda variável ser trocada entre os cromossomos escolhidos seu valor é alterado. Essa probabilidade aumenta quanto maior for o tamanho da variável no cromossomo, que está relacionado à precisão adotada. Portanto, os pontos concatenadores das variáveis tem muito menor probabilidade de serem escolhidos. O primeiro efeito altera o valor da variável, enquanto que, o segundo não. Ambos os efeitos se verificam nos cruzamentos de um ponto, de dois pontos e de múltiplos pontos.

No cruzamento uniforme este efeito se dá apenas nos valores das variáveis. Neste tipo de cruzamento somente os *bits* das posições escolhidas são trocados tendo por base uma máscara. Não é utilizada a troca de blocos de valores adjacentes de ambos cromossomos.

### - Efeito sobre estruturas representadas em número real

O efeito do operador de cruzamento nesta representação apenas se verifica nos pontos de concatenação. Para que haja um efeito mais amplo e semelhante aos da representação em binário, utiliza-se os operadores aritméticos. Estes alterarão os valores das respectivas variáveis durante o cruzamento, além da troca entre os cromossomos escolhidos. Considerando dois cromossomos escolhidos  $P_1$  e  $P_2$ , com duas variáveis  $V_1$  e  $V_2$  representadas em real, para participarem de um cruzamento.

$$\begin{aligned}
 P_1 &\Rightarrow \left[ \begin{array}{c|c} V_1 & V_2 \\ \hline 345.78 & 98.21 \end{array} \right] \\
 P_2 &\Rightarrow \left[ \begin{array}{c|c} V_1 & V_2 \\ \hline 137.64 & 10.56 \end{array} \right]
 \end{aligned}
 \tag{3.8}$$

Como pode ser observado no cruzamento, sem aplicação dos operadores aritméticos, os valores de cada posição são trocados sem sofrerem alterações.

#### 3.3.1.2 – Tipos de Operadores de Cruzamento

Vários métodos de cruzamento foram desenvolvidos. Cada método possui uma característica peculiar, cuja intenção principal é melhor direcionar o AG na busca da melhor solução. Melhorando, assim, seu desempenho quanto à rapidez de obtenção da melhor solução.

#### - Cruzamento que utiliza um ponto

Após selecionar um par de cromossomos, um ponto na estrutura é escolhido pseudo-aleatoriamente. A partir deste ponto será feita a troca do segmento à esquerda ou à direita de ambos os cromossomos. Um exemplo a seguir ilustra esse efeito. Supondo que os seguintes cromossomos foram selecionados e o ponto escolhido para cruzamento o ponto 2.

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{cc}
 X1 & X2 \\
 P1 \Rightarrow & \left[ \begin{array}{c|c} 1 & 0 & 0 & | & 1 & 0 & 1 \end{array} \right] \\
 & \uparrow \\
 & 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad 6 \\
 & \downarrow \\
 P2 \Rightarrow & \left[ \begin{array}{c|c} 0 & 1 & 1 & | & 0 & 1 & 1 \end{array} \right]
 \end{array}
 \end{array}
 \tag{3.9}$$

O resultado da combinação dos segmentos à esquerda de cada cromossomo será:

$$\begin{array}{r}
 \text{X1} \quad \text{X2} \\
 \text{C1} \Rightarrow |101|011| \\
 \text{C2} \Rightarrow |010|101|
 \end{array} \tag{3.10}$$

Pode ser observado que as extremidades do cromossomo sempre participarão do cruzamento, independentemente do ponto escolhido.

#### - Cruzamento que Utiliza Dois Pontos

Após selecionar um par de cromossomos, dois pontos nas estruturas são escolhidos pseudo-aleatoriamente. Os segmentos dos dois cromossomos, entre estes dois pontos são trocados. Um exemplo a seguir ilustra esse efeito. Supondo que os seguintes cromossomos foram selecionados e os pontos escolhidos para cruzamento o ponto 2 e o 4.

$$\begin{array}{r}
 \text{X1} \quad \text{X2} \\
 \text{P1} \Rightarrow |101|101| \\
 \quad \quad \quad \begin{array}{cccccc}
 & \uparrow & & \uparrow & & \\
 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\
 & \downarrow & & \downarrow & & & \\
 \text{P2} \Rightarrow |011|011|
 \end{array}
 \end{array} \tag{3.11}$$

O resultado da combinação dos dois segmentos entre os dois pontos será:

$$\begin{array}{r}
 \text{X1} \quad \text{X2} \\
 \text{C1} \Rightarrow |101|011| \\
 \text{C2} \Rightarrow |010|101|
 \end{array} \tag{3.12}$$

Esse tipo de cruzamento minimiza o problema do cruzamento de 1 ponto no que tange aos *bits* das extremidades da estrutura.

#### - Cruzamento Uniforme

Após selecionado um par de cromossomos as posições nos cromossomos, que terão seus valores trocados, são escolhidas através de uma máscara, que é um cromossomo gerado pseudo-aleatoriamente. A troca de valores é efetuada, quando o *bit* da máscara for 1 [24]. Um exemplo a seguir ilustra esse efeito. Supondo que os

seguintes cromossomos foram selecionados e as posições escolhidas foram a 2 e a 4 para terem seus valores trocados.

$$\begin{array}{r}
 \begin{array}{cc}
 X1 & X2 \\
 \hline
 P1 \Rightarrow & |1,0,0|1,0,1| \\
 & \uparrow \quad \uparrow \\
 & 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad 6 \\
 & \downarrow \quad \downarrow \\
 P2 \Rightarrow & |0,1,1|0,1,1|
 \end{array} \\
 \end{array} \tag{3.13}$$

O resultado da combinação destes cromossomos será:

$$\begin{array}{r}
 \begin{array}{cc}
 X1 & X2 \\
 \hline
 C1 \Rightarrow & |1,1,0|0,1,1| \\
 C2 \Rightarrow & |0,0,1|1,0,1|
 \end{array} \\
 \end{array} \tag{3.14}$$

Esse tipo de técnica de cruzamento tem capacidade disruptiva (quebra dos blocos construtores) maior do que os anteriores. Em [19] uma análise é feita mostrando as vantagens do seu uso. Esse método é benéfico quando a população é pequena, para fornecer uma amostra mais precisa de um espaço de busca complexo. Conclusões desse estudo mostraram que:

- Esse tipo de cruzamento alcançou melhor balanço entre exploração e o aproveitamento da melhor solução.
- Seu efeito disruptivo pode ser controlado variando-se a probabilidade de ocorrer a troca dos valores das posições escolhidas, alcançando apropriado balanço entre exploração e aproveitamento das melhores soluções.

Comparando estes três tipos de cruzamento pode-se dizer:

- **Quanto a exploração da região de busca.**

O cruzamento uniforme troca os *bits* independentemente da sua posição, mas são mais disruptivos, porém mais exploratórios ao longo de todo processo de busca. Os

cruzamentos de um e dois pontos preservam os esquemas, mas são menos exploratórios, quando a população torna-se homogênea.

- **Quanto ao tamanho da população**

Uma relação entre tamanho da população e o tipo de cruzamento foi observado através de estudos empíricos. O cruzamento uniforme é mais adequado para populações pequenas, enquanto que para populações grandes, o cruzamento menos disruptivo é melhor, no caso o de um ou o de dois pontos poderiam ser aplicados. O cruzamento uniforme ajuda a sustentar uma busca altamente exploratória em populações pequenas. A alta diversidade nas populações grandes reduz a necessidade de exploração e tornam o cruzamento de um e dois pontos mais adequados.

### 3.3.2 - Operadores Aritméticos de Recombinação

Existe uma outra linha de operadores genéticos de cruzamento aplicáveis no caso da representação em real. Este tipo de cruzamento é denominado operador aritmético [22, 25]. O cruzamento aritmético é definido como a combinação de dois cromossomos representados por vetores  $V_1$  e  $V_2$ . O resultado é obtido através das expressões

$$V_1 = V_1 + (1 - \lambda)V_2 \quad (3.15)$$

$$V_2 = V_2 + (1 - \lambda)V_1 \quad (3.16)$$

onde:  $\lambda \in (0,1)$ .

A base desse conceito vem da teoria de conjuntos convexos. Geralmente, a média ponderada de dois vetores  $X_1$  e  $X_2$  é calculada por :

$$\lambda_1 X_1 + \lambda_2 X_2 \quad (3.17)$$

sendo os fatores  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  restritos à condições:

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 1 \quad \lambda_1 > 0 \quad \text{e} \quad \lambda_2 > 0 \quad (3.18)$$

A forma ponderada mostrada em 3.17 é conhecida como combinação convexa. Se a condição de não negatividade dos fatores é relaxada, a combinação é conhecida

como combinação afim. Se é desejado que os fatores estejam em qualquer ponto do espaço real, a combinação é conhecida como linear.

Semelhantemente, os operadores aritméticos de cruzamento são definidos como a combinação de dois cromossomos, representados pelos vetores  $\mathbf{X}_1$  e  $\mathbf{X}_2$ :

$$\mathbf{X}_1 = \lambda_1 \mathbf{X}_1 + \lambda_2 \mathbf{X}_2 \quad (3.19)$$

$$\mathbf{X}_2 = \lambda_2 \mathbf{X}_1 + \lambda_1 \mathbf{X}_2 \quad (3.20)$$

Dependendo das restrições dos fatores  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ , são produzidos três tipos de cruzamentos, que são denominados de cruzamento convexo, cruzamento afim e cruzamento linear.

A Figura 3. 1 mostra essas combinações no espaço a duas dimensões. Os resultados do cruzamento convexo ficam no interior da linha contínua, os do cruzamento afim um pertence a linha contínua e o outro à linha tracejada e os do cruzamento linear estarão em qualquer ponto do espaço real.

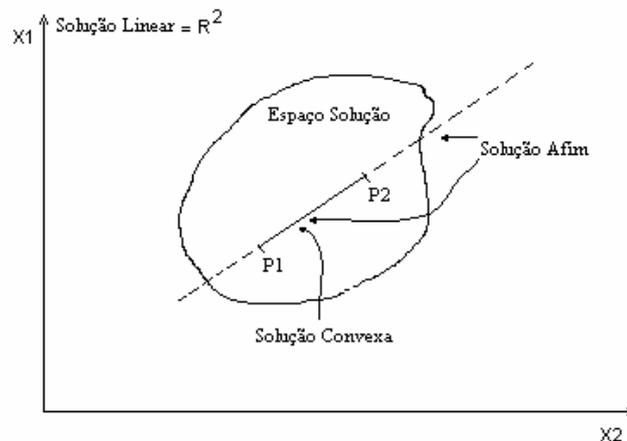


Figura 3. 1 – Ilustração dos resultados dos tipos de cruzamentos aritméticos.

Obtida da Figura 2.3, página 62 da referência [25].

Soluções inviáveis podem resultar quando é aplicado o cruzamento linear ou afim como pode ser observado na Figura 3.1. O que não é um problema crítico, desde que isso pode ser minimizado usando eficientemente funções de penalidades, durante todo processo de busca do AG e as soluções inviáveis também participarão do processo evolucionário. O ponto importante é a determinação dos valores apropriados para esses fatores. Geralmente, quando é aplicado cruzamento afim ou linear a um problema específico, os valores absolutos dos fatores estariam restritos a limites máximo e

mínimo, de acordo com o domínio da restrição, a fim de forçar a busca genética dentro de uma área razoável.

### 3.3.3 – Mutação

A mutação é um operador secundário, que produz mudanças aleatórias espontâneas em vários cromossomos [25]. No AG tem as seguintes funções:

- Substituir genes perdidos da população durante o processo de seleção.
- Fornecer genes que não estavam presentes na população inicial.

O efeito da mutação é aumentar a diversidade da população reduzindo a possibilidade de estagná-la (indivíduos iguais). Poderá introduzir genes bons ou ruins. Estes últimos poderão ser eliminados na população seguinte através da seleção. A taxa de mutação é definida como o percentual do número total de genes da população que irão mutar. Controla a quantidade de novos genes que serão introduzidos na população por tentativas. Se essa taxa for muito baixa, muitos genes deixarão de serem usados nas populações iniciais. Se muito elevada existirá maior perturbação aleatória no ambiente. Assim, soluções resultantes estarão perdendo a semelhança com aquelas das quais se originaram. Portanto, o histórico da busca será perdido. Este fato influenciará na habilidade do AG de aprender a encontrar a melhor solução.

Na mutação quando as variáveis estão representadas por *bits* 0 e 1, a posição escolhida terá seu valor mudado para 0 se for 1 ou para 1 se for 0. Um exemplo ilustrativo a seguir mostra esse efeito. Supondo uma estrutura com representação em binário de duas variáveis e as posições escolhidas para serem mutadas a 2 e a 4.

$$\begin{array}{cccccc}
 & X1 & & X2 & & \\
 C1 \Rightarrow & | & 1 & 1 & 1 & 0 & | & 0 & 1 & 1 & 1 & | \\
 & & \uparrow & & \uparrow & & & & & & & \\
 & & 1 & 2 & 3 & 4 & & 5 & 6 & & & 
 \end{array} \tag{3.21}$$

Após a mutação o novo cromossomo terá a seguinte forma:

$$C'1 \Rightarrow | 1 0 1 0 | 1 1 1 1 | \tag{3.22}$$

Considerando agora que a representação das variáveis no cromossomo seja em em real. Um gene escolhido é mutado, escolhendo-se um valor pseudo-aleatoriamente dentro do intervalo correspondente àquela variável. Supondo uma estrutura com duas variáveis

$$C1 \Rightarrow \begin{array}{cc} X1 & X2 \\ \hline 34,78 & 2,32 \\ \hline 1 & 2 \end{array} \quad (3.23)$$

e os intervalos onde estão contidas as variáveis sejam:

$$\begin{aligned} X_1 &\in (20,0 , 50,0) \\ X_2 &\in (-5,0 , 7,0) \end{aligned} \quad (3.24)$$

Considerando que a posição escolhida para sofrer mutação seja a de número 2. Um número real que substituirá o valor dessa posição, será obtido através do gerador de números pseudo-aleatórios, dentro do intervalo correspondente a variável X2. Supondo que esse número foi -4,3, então, o novo cromossomo será

$$C1 \Rightarrow \begin{array}{cc} X1 & X2 \\ \hline 34,78 & -4,3 \\ \hline \end{array} \quad (3.25)$$

Esse tipo de mutação é denominado de mutação uniforme. Essa denominação é devido a probabilidade de qualquer número ser escolhido, no intervalo pertencente àquela variável, ser a mesma, ou seja, a distribuição dos números contidos nesse intervalo é considerada uniforme.

### 3.4 – OPERADOR DE EVOLUÇÃO

#### 3.4.1 – Seleção

O princípio que rege os AGs é essencialmente a seleção. A seleção tem a função de guiar os AGs na direção de regiões promissoras do espaço de busca. Ela fornece a força necessária para direcionar o AG no seu exercício de busca. Esta força, denominada de pressão seletiva, é exercida pela dominância de soluções de alta adequabilidade no início e ao longo de todo processo de busca. Quando é elevada no

início, pode ser crítica, dependendo do tipo de seleção que é usada. A busca terminará prematuramente (obtenção de soluções locais), quando a pressão seletiva for grande. Por outro lado, quando a pressão seletiva for pequena, a busca se realizará mais lentamente do que o necessário. Isso mostra que existirá um compromisso entre a menor pressão seletiva e melhor desempenho do AG.

Existem três questões básicas envolvidas no processo de seleção. Cada uma tem influência significativa na pressão seletiva e, conseqüentemente, no comportamento do AG. Estas questões são: o espaço de amostragem, o mecanismo de amostragem e a probabilidade de seleção.

### **3.4.2 Espaço de Amostragem**

O procedimento de seleção cria uma nova população a cada geração, baseada em todas as soluções originais e as resultantes da aplicação dos operadores genéticos. Isso cria um problema de espaço de amostragem. Um espaço de amostragem é caracterizado por dois fatores: o tamanho e os componentes. O espaço de amostragem usual tem uma quantidade fixa de indivíduos, que é definida como tamanho da população e contém soluções resultantes de recombinações, que por sua vez contém partes das soluções originais. O espaço de amostragem ampliado contém todas as soluções tanto as originais como as resultantes de recombinações.

### **3.4.3 - Mecanismo de Amostragem**

O mecanismo de amostragem está relacionado ao problema de como selecionar uma solução na região de amostragem. Três mecanismos de amostragem tem sido usados para selecionar cromossomos: amostragem estocástica, amostragem determinística e amostragem mista.

#### **3.4.3.1 - Amostragem Estocástica**

Uma característica desse método é a determinação do número de cópias que cada cromossomo irá receber baseado na probabilidade de sua adequabilidade [25]. A fase de seleção é composta de duas etapas:

- Determinação do valor esperado da quantidade de cromossomos.
- Conversão dos valores esperados em número de cromossomos resultantes.

Um valor esperado para um cromossomo é um número real que indica o número médio de descendentes que um cromossomo receberá na próxima população. O procedimento de amostragem é usado para converter o valor real esperado em quantidade de soluções resultantes de recombinações.

Esse método criado por Holland [6] é denominado de seleção proporcional ou da roleta. A idéia básica é determinar a probabilidade de seleção para cada cromossomo, proporcional ao seu valor de adequabilidade. A expressão para cálculo da probabilidade de seleção de um cromossomo  $P_k$  é a seguinte:

$$P_k = \frac{f_k}{\sum_{j=1}^{t_{pop}} f_k} \quad (3.26)$$

onde

$f_k$  → valor de adequabilidade do cromossomo  $k$

$f_k$  → valor de adequabilidade dos demais cromossomos da população

$t_{pop}$  → tamanho da população

e o valor esperado  $E_k$  é calculado por:

$$E_k = t_{pop} * P_k \quad (3.27)$$

A consideração principal é manter o número esperado de cópias para cada cromossomo na geração seguinte. O que significa evitar a duplicação de cromossomos na população. Existem duas razões para o uso dessa estratégia:

- Prevenir que super-cromossomos tenham muitas cópias na população seguinte, o que provocaria a convergência prematura para soluções locais.
- Manter uma diversidade na população tal que a mesma contenha mais informações para busca genética (mais segmentos da estrutura ótima).

Um problema que pode ocorrer, quando o cromossomo duplicado é descartado, é a redução do tamanho da população, que ficará menor do que o especificado. Nesse caso, o procedimento de inicialização da população seria ativado para preencher as lacunas existentes.

#### 3.4.3.2 – Amostragem Determinística

Este método seleciona os melhores cromossomos do espaço de amostragem e os copia na população seguinte. A seleção elitista [23] faz parte desse tipo de amostragem. Nela o melhor cromossomo da população atual é passado à população seguinte, substituindo o cromossomo com pior índice de adequabilidade. Essa estratégia evita a perda de soluções boas e de blocos construtores pertencentes à solução ótima, propagando-os para população seguinte.

A seleção por truncagem e por blocos pertencem também a esse tipo de amostragem. Neste caso todos cromossomos são classificados por seus níveis de adequabilidade e os melhores são selecionados.

A amostragem determinística de Brindle é baseada no conceito do número esperado de cópias. Cada cromossomo recebe um número de cópias de acordo com a parte inteira do valor esperado. Os demais componentes da população são escolhidos considerando a parte fracionária do valor esperado.

#### 3.4.3.3 – Amostragem Mista

Esse método contém, simultaneamente, as características estocásticas e as determinísticas. Um exemplo é a seleção através do torneio [21, 23], uma escolha pseudo-aleatória de um conjunto de indivíduos é feita e o melhor deles é selecionado. A quantidade de cromossomos contido nesse conjunto é denominado de tamanho do torneio. O tamanho do torneio influencia na pressão seletiva. Quanto maior o número de indivíduos participantes do torneio mais pressão seletiva será imposta na escolha de um cromossomo. Maior será a possibilidade de convergir para soluções locais.

Dentro dessa mesma linha existe o método proposto por Wetzel, onde probabilidades de seleção são calculadas e pares sucessivos de cromossomos são escolhidos usando o método de seleção proporcional. Escolhido um par de cromossomos, o de maior índice de adequabilidade é inserido na nova população.

A amostragem estocástica dos restos, proposta por Brindle é uma versão modificada da sua amostragem determinística. Nesse método cada cromossomo é alocado de acordo com a parte inteira do número esperado de cópias. Os demais competem de acordo com a parte fracionária do valor esperado até completar a população.

#### 3.4.3.4 - Probabilidade de Seleção

A probabilidade de seleção de um cromossomo no método da roleta é proporcional à adequabilidade do cromossomo. Algumas propriedades desse método são: a tendência de um número pequeno de super cromossomos dominarem o processo de seleção, no início do procedimento de busca e a competição entre cromossomos diminui, quando a população está praticamente convergida nas últimas gerações. Um comportamento aleatório de busca surgirá, podendo contribuir para provocar convergência prematura do AG a uma solução local.

Mecanismos de escalamento e classificação (*rank*) foram propostos para minimizar esses problemas. O método de escalamento mapeia os valores de adequabilidade bruto para valores reais positivos. A probabilidade de adequabilidade de cada cromossomo é determinada pelos valores em escala. A adequabilidade em escala tem duas intenções:

- Manter uma razoável diferença entre as adequabilidades relativas e evitar valores negativos.
- Precaver-se da dominância de super-cromossomos durante a seleção, a fim de evitar uma competição maior no início, estimulando-a no fim.

Diversos métodos de escalamento do valor de adequabilidade foram sugeridos na literatura e podem ser encontrados em [6, 22]. Basicamente o procedimento para fazer o escalamento é expresso por:

$$\mathbf{F}'_k = \mathbf{g}(\mathbf{F}_k) \quad (3.28)$$

onde:

$\mathbf{F}$  → valor em escala da adequabilidade

$\mathbf{F}_k$  → valor bruto da adequabilidade

$\mathbf{g}(\cdot)$  → função que transforma o valor bruto de adequabilidade em escala

Os tipos de escalamento podem ser: escalamento linear, escalamento dinâmico linear, truncagem sigma, escalamento através de exponenciação, escalamento logarítmico, escalamento por janelamento, escalamento por normalização e seleção de Boltzman são encontrados em maior detalhe em [6, 22, 25].

#### 3.4.4 – Mecanismo de Classificação (Rank)

O mecanismo de classificação ignora os valores da função objetivo e usa uma classificação dos cromossomos, ao invés de determinar suas probabilidades de adequabilidade.

Baker introduziu a noção de seleção por classificação no AG para superar os problemas do uso direto da adequabilidade. A idéia é ordenar a população da melhor para a pior solução e alocar a probabilidade de seleção de cada cromossomo de acordo com essa classificação. Dois métodos foram desenvolvidos: classificação linear e a exponencial.

A classificação linear é expressa por:

$$P_k = q_c - (k - 1)^r \quad (3.29)$$

onde:

$P_k$  → probabilidade de seleção do k-ésimo cromossomo

$q_c$  → probabilidade do melhor cromossomo

$k$  → classificação do k-ésimo cromossomo na população

O fator  $r$  é calculado pela expressão:

$$r = \frac{q_c - q_0}{t_{pop} - 1} \quad (3.30)$$

onde:

$t_{pop}$  → tamanho da população

$q_0$  → probabilidade de adequabilidade do pior cromossomo

quando  $q_0 = 0$  maior pressão seletiva é exercida.

Michalewicz [22] propôs um método da classificação exponencial cujo valor é calculado por:

$$P_k = q_c * (1 - q_c)^{(k-1)} \quad (3.31)$$

onde maior valor de  $q_c$  implica em forte pressão seletiva.

Hancock propôs outro método de classificação exponencial expresso por:

$$P_k = q_c^{(k-1)} \quad (3.32)$$

onde  $q_c$  é tipicamente igual a **0.99**. O melhor cromossomo tem adequabilidade 1 quando  $k = 1$  e os demais  $q_c^{(pop-1)}$ .

## CAPÍTULO 4

# VARIAÇÃO DA REGIÃO DE BUSCA DO ALGORITMO GENÉTICO

### 4.1 – REGIÃO DE BUSCA

A busca da melhor solução é executada em uma região definida através dos intervalos onde estão contidas as variáveis representadas no cromossomo. Uma forma de melhorar o desempenho do AG na busca desta solução seria variar, durante o processamento, os limites das variáveis, criando novas regiões baseadas na melhor solução da região anterior. O efeito dessa variação seria no tamanho e na localização dessa região na região global de busca. Experimentos mostraram que o uso desta técnica é computacionalmente mais eficiente do que o uso de um espaço de busca muito grande, com fronteiras fixas desde o início da busca. Outra vantagem do uso de limites adaptativos decorre de que uma escolha errada, ou o desconhecimento dos limites das variáveis pelo projetista, eventualmente serão corrigidos durante o processo de busca.

### 4.2 – VARIAÇÃO DA REGIÃO DE BUSCA

Na literatura pode ser encontrada diversas técnicas que foram desenvolvidas para direcionar melhor a busca durante a execução do AG. Uma delas descrita na referência [32] utiliza um tipo de cruzamento que denominou-se “cruzamento direcionado”. Neste método o primeiro candidato  $C_1$  é escolhido através do método normal de seleção. O segundo escolhido através do cálculo de uma quantidade, que leva em consideração a adequabilidade entre o primeiro candidato e cada um dos outros  $C_i$ , pertencentes àquela população, e a distância entre eles e o primeiro candidato. A expressão que selecionará o segundo candidato tem a seguinte forma:

$$Q(C_i, C_1) = \frac{(\text{adequabilidade}(C_i) - \text{adequabilidade}(C_1))}{\text{distância}(C_i, C_1)} \quad (4.1)$$

onde:

$Q$  → quantidade a ser calculada

$C_i$  → indivíduos contidos na população

$C_1$  → primeiro candidato

$i=1, \dots, n$  ( $n$  → tamanho da população)

O valor de adequabilidade dentre os indivíduos  $C_i$  que maximiza  $Q$  será o indivíduo escolhido como segundo candidato. Esta técnica dota o AG de uma ferramenta direcional de busca de modo que se obtenha uma solução mais próxima possível do ótimo global.

Além dessa estratégia de seleção de indivíduos para o cruzamento, uma outra também foi implementada a qual denominou-se de estratégia de substituição. Ela leva em consideração a adequabilidade dos indivíduos e a proximidade deles na população cuja meta é substituir um indivíduo que tenha uma adequabilidade baixa e esteja relativamente próximo ao indivíduo que está sendo introduzido.

Uma técnica, que também procura direcionar melhor a busca do AG, foi desenvolvida nesta tese, estimulado pela técnica descrita anteriormente. Esta técnica, denominada de variação da região de busca, foi fundamentada em uma das características dos AGs [25]. Sua meta é reduzir a quantidade de avaliação de indivíduos com baixa adequabilidade e o tamanho da população e direcionar melhor a busca. Este fato é devido que, na região de busca global, a maioria das soluções é de baixa adequabilidade. Evitando muitos destes cálculos o tempo gasto neles seria economizado.

Os AGs trabalham em duas etapas distintas, durante o processo de busca da melhor solução. Inicialmente executam a busca da melhor solução em toda região de busca (*exploration*), definida pelos limites das variáveis contidas no cromossomo. Finalmente, encontrada uma solução de alta adequabilidade a busca se dará na sua vizinhança (*exploitation*). Baseado nesta característica, pode-se dizer que em cada uma dessas etapas, existem diferenças entre as estruturas contidas na população e em um determinado indivíduo. Esta diferença está relacionada à quantidade de "*buildings blocks*" contida na população ou em um indivíduo. Denominando a quantidade de "*buildings blocks*" numa população ou num indivíduo de "*densidade de buildings blocks*", pode-se dizer que no início da busca a densidade destes blocos será menor tanto na população como também em cada indivíduo. Logo, a adequabilidade dos

indivíduos será baixa nesta etapa inicial. Por outro lado, essa densidade será elevada, quando uma solução de alto desempenho for encontrada, corresponde a um indivíduo com alta densidade de “*buildings blocks*”. Esta solução será recombinação propagando seus melhores blocos. Logo, a adequabilidade dos indivíduos aumentará tanto na população como nos indivíduos. Baseado nestas características, criou-se uma estratégia de busca onde são utilizadas regiões de busca pequenas. Estas regiões são reduzidas e deslocadas e expandidas ao longo da busca. Característica que descreve uma dinâmica da região de busca.

O objetivo desta técnica é diminuir o tempo de processamento, utilizando populações e quantidade de gerações menores e se precaver de erros e desconhecimento dos limites das variáveis. A propriedade da região de busca reduzida é permitir ao AG buscar em torno da solução elite soluções com maiores desempenho (*exploitation*). A propriedade de deslocamento e expansão é de melhorar a direção da busca, desde que se tenha como referência a solução elite da região reduzida (*exploration*).

Utilizando limites fixos para as variáveis, o AG pode obter uma solução local, desde que a melhor solução esteja fora da região de busca. Isto indica o desconhecimento dos verdadeiros limites das variáveis ou erro em estimar estes limites. Neste caso será necessário uma segunda tentativa com novos limites. Estes novos limites são calculados, tendo por base a melhor solução obtida na primeira tentativa. Outra alternativa é a utilização de uma região de busca bastante ampla e maior quantidade de indivíduos na população. Dessa forma, pode-se obter num único processamento, a melhor solução. Este procedimento exigiria mais tempo, e se os limites estivessem errados, todo processamento estaria perdido.

Uma forma de superar estes problemas é a utilização de limites que variam ao longo do processamento. Estes limites modificam as dimensões da região de busca em instantes pré-determinados. Assim, podem ser utilizado regiões pequenas de busca, menor número de indivíduos na população e um número menor de gerações. Dessa forma o AG encontra mais rapidamente a melhor solução nestas regiões, que servem de referência para a nova região a ser criada. O efeito benéfico dessa variação está no melhor direcionamento da busca.

A forma de executar esta variação é, inicialmente, especificar um intervalo para cada variável, baseado num conhecimento básico do problema. Se os limites físicos do sistema sob análise são conhecidos, a primeira região de busca considera estes limites para obter uma estimativa inicial desta região (Figura 4. 1). Neste caso a estimativa

inicial tem por base os limites físicos, conhecidos, do problema. Se estes limites não são conhecidos, a busca pode ser iniciada a partir de uma região qualquer tendo por base algum conhecimento do problema. Ao longo do processamento, essa região se modificará em tamanho (redução ou expansão) e posição (deslocamento) a cada conjunto pré-especificado de gerações. A Figura 4. 1 ilustra as regiões de busca global e inicial no espaço  $\mathfrak{R}^2$ .

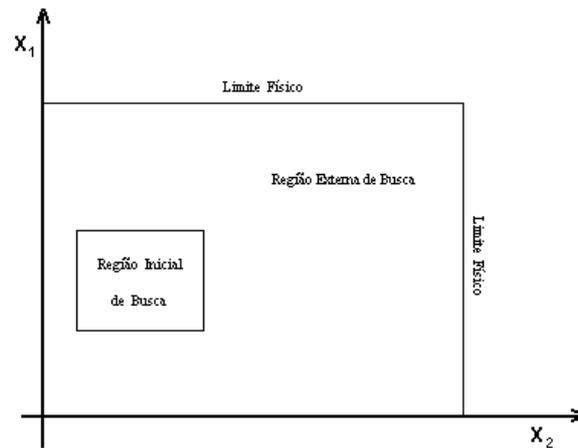


Figura 4. 1 – Ilustração das regiões de busca inicial (utilizada na variação da região) e global.

#### 4.2.1 – Variação do Tamanho da Região de Busca

A variação do tamanho da região de busca, leva em consideração o ponto que corresponde à melhor solução da região anterior, selecionado pelo elitismo. Esta análise é mostrada para regiões no espaço  $\mathfrak{R}^2$  para mais fácil compreensão dessa técnica. Após esta análise, esse raciocínio será estendido para regiões no espaço  $\mathfrak{R}^n$ .

Nesta técnica considera-se que a solução escolhida pelo elitismo é o baricentro da nova região de busca. Aplicando-se um fator a cada variável contida nesta solução, podem ser obtidas três tipos de regiões de tamanhos diferentes. Suas características, relativamente ao tamanho da região anterior, são as seguintes:

- Igual a região de busca anterior .
- Menor do que a região de busca anterior.
- Maior do que a região de busca anterior.

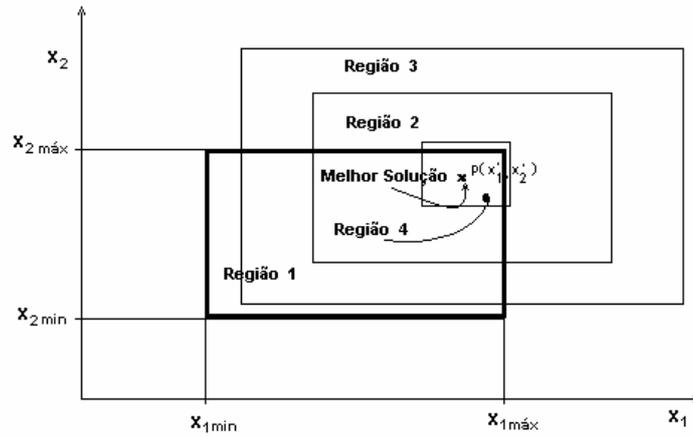


Figura 4. 2 – Ilustração das regiões, quando é aplicado um determinado fator à solução elite da região anterior (região 1).

Na Figura 4. 2, considerando que a região 1 é a região atual de busca, deseja-se após um determinado número de gerações criar uma nova região de busca, baseada na solução elite  $P(X'_1, X'_2)$ . A distância do baricentro desta região à sua fronteira é calculada pela expressão:

$$\Delta X_1 = \frac{X_{1máx} - X_{1min}}{2} \quad \Delta X_2 = \frac{X_{2máx} - X_{2min}}{2} \quad (4. 2)$$

Se é desejado que a nova região (região 2) tenha o mesmo tamanho da região 1 é necessário que o incremento às coordenadas do ponto  $P(X'_1, X'_2)$ , que é o baricentro da nova região, sejam dados por:

$$\Delta X'_1 = \frac{X_{1máx} - X_{1min}}{2} \quad \Delta X'_2 = \frac{X_{2máx} - X_{2min}}{2} \quad (4. 3)$$

Se é desejado que a nova região (região 4) seja menor do que a região 1, é necessário que esse incremento satisfaça às desigualdades:

$$\Delta X'_1 < \frac{X_{1máx} - X_{1min}}{2} \quad \Delta X'_2 < \frac{X_{2máx} - X_{2min}}{2} \quad (4. 4)$$

Se é desejado que a nova região (região 3) seja maior do que a região 1, é necessário que esse incremento satisfaça às desigualdades:

$$\Delta X_1' > \frac{X_{1\max} - X_{1\min}}{2} \quad \Delta X_2' > \frac{X_{2\max} - X_{2\min}}{2} \quad (4.5)$$

A determinação dos fatores para variar o tamanho da nova região é baseada nos limites especificados no início do processamento. Para cada situação descrita anteriormente, teremos valores diferentes para estes fatores.

Para obtenção de uma região de busca igual à anterior (equivalência) este fator é calculado através das igualdades:

$$f_{x'1} = \frac{\Delta X_1}{X_1} \quad f_{x'2} = \frac{\Delta X_2}{X_2} \quad (4.6)$$

Para obtenção de uma região de busca menor do que a anterior (redução) este fator é escolhido satisfazendo as desigualdades:

$$f_{x'1} < \frac{\Delta X_1}{X_1} \quad f_{x'2} < \frac{\Delta X_2}{X_2} \quad (4.7)$$

Para obtenção uma região de busca maior do que a anterior (expansão) este fator é escolhido satisfazendo as desigualdades:

$$f_{x'1} > \frac{\Delta X_1}{X_1} \quad f_{x'2} > \frac{\Delta X_2}{X_2} \quad (4.8)$$

Os novos limites seriam calculados em função destes fatores através das expressões:

$$X_{1\min}' = X_1'(1 + f \cdot f_{x'1}) \quad X_{2\min}' = X_2'(1 - f \cdot f_{x'2}) \quad (4.9)$$

$$X_{1\max}' = X_1'(1 + f \cdot f_{x'1}) \quad X_{2\max}' = X_2'(1 + f \cdot f_{x'2}) \quad (4.10)$$

onde o fator  $f$  definirá o tamanho da nova região, relativamente à região inicial. Assim:

- se  $f = 1.0$  a nova região terá tamanho igual à região inicial
- se  $f < 1.0$  a nova região será menor do que à região inicial
- se  $f > 1.0$  a nova região será maior do que à região inicial

Analisando as expressões 1 e 2 podemos dizer, quanto à forma da nova região, que:

- Se um mesmo percentual de redução ou expansão  $f$  for aplicado aos fatores  $f_{x_1}$  e  $f_{x_2}$ , a forma da região obtida com os novos limites é preservada, diferindo apenas no tamanho.
- Se percentuais diferentes de redução ou expansão  $f_1$  e  $f_2$  forem aplicados aos fatores  $f_{x_1}$  e  $f_{x_2}$ , a região resultante terá forma diferente da região anterior.

Na combinação de fatores diferentes para cada variável, pode ser utilizada, por exemplo; um valor para  $f \cdot f_{x_1} > \Delta X_1 / X_1'$  (expansão) para a variável  $X_1$  e um valor para  $f \cdot f_{x_2} < \Delta X_2 / X_2'$  (redução) para a variável  $X_2$ , a forma e o tamanho da região a ser criada será diferente da anterior. Esta combinação pode levar a um efeito de uma rotação de 90 graus na região atual.

Estes fatores podem ter sinais positivos ou negativos, que se traduzem em mudança da direção da busca. Podem, também, variar ao longo do processamento ou serem calculados pelo AG a cada geração. Podem ser, também, calculados após determinado número de gerações, de acordo com a trajetória desejada para executar a busca da melhor solução. Estes fatores também podem ser um parâmetro ajustado pelo AG, nesta opção seria calculado um valor ótimo para estes parâmetros.

#### **4.2.2 – Deslocamento da Região de Busca**

O deslocamento da região de busca é obtido movendo, inicialmente, o ponto representado pela solução elite, através da aplicação de um fator de deslocamento  $f_d > 1.0$ . A nova região é obtida a partir deste ponto que será o seu baricentro. Após o

deslocamento aplica-se um fator de expansão  $f_e > 1.0$  ao incremento  $\Delta X_1$  e  $\Delta X_2$ , que será maior do que o incremento usado para executar o deslocamento, para criar a nova região maior que a anterior. Esta região abrangerá pontos que ainda não foram disponibilizados para os operadores genéticos para recombinação, além de alguns já existentes.

Dependendo dos fatores de deslocamento e de expansão, a nova região envolverá a solução elite e parte da região de busca anterior. O deslocamento e a expansão sempre são executados após a redução da região de busca.

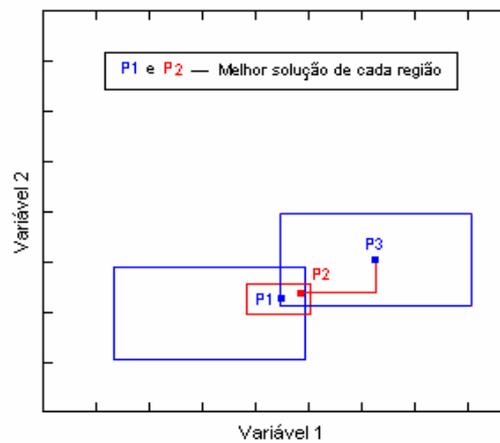


Figura 4. 3 – Efeito da redução, deslocamento e expansão da região de busca.

Analisando-se a Figura 4. 3, é suposto que o ponto  $P_1$  seja o baricentro da região reduzida e tem coordenada  $(X_{11}, X_{12})$ . O ponto  $P_2$  representa a melhor solução da região reduzida e tem coordenadas  $(X_{21}, X_{22})$ . O ponto  $P_3$  representa o ponto obtido pelo deslocamento do ponto  $P_2$  e tem coordenadas  $(X_{31}, X_{32})$  após aplicado um fator de deslocamento  $f_d > 1.0$ . O novo ponto a partir do qual será criada a nova região de busca será o baricentro da nova região agora expandida. Ele é obtido pelas expressões:

$$X_{31} = f_d \cdot X_{21} \quad X_{32} = f_d \cdot X_{22} \quad (4. 11)$$

Após deslocar o ponto representado pela melhor solução da região anterior, a nova região é criada. O tamanho desta região pode ser igual, maior ou menor do que a região inicial. Dependendo dos valores dos fatores de deslocamento e de expansão, esta nova região poderá envolver ou não a melhor solução.

Considerando que, os incrementos necessários para deslocar o ponto  $P_2$  para  $P_3$  sejam  $\Delta X_{21}$  e  $\Delta X_{22}$ , a expressão para calculá-los é dada por:

$$\Delta X_{21} = (f_d - 1.0) \cdot X_{21} \quad \Delta X_{22} = (f_d - 1.0) \cdot X_{22} \quad (4.12)$$

A distância do baricentro da região inicial à sua fronteira é  $\Delta X_{1ini}$  e  $\Delta X_{2ini}$ . As características da nova região a ser criada dependerá do valor do fator de expansão  $f_e$ , aplicado a esses incrementos. Considerando que a região expandida tenha mesmo tamanho da região inicial  $f_e = 1.0$ , então os novos limites serão:

$$X_{31min} = X_{31} - f_e \cdot \Delta X_{1ini} \quad X_{32min} = X_{32} - f_e \cdot \Delta X_{1ini} \quad (4.13)$$

$$X_{31máx} = X_{31} + f_e \cdot \Delta X_{1ini} \quad X_{32máx} = X_{32} + f_e \cdot \Delta X_{1ini} \quad (4.14)$$

Uma análise das expressões em (4.17 e 4.18) pode-se chegar as seguintes conclusões:

- Se,  $f_e \Delta X_{1ini} = \Delta X_{21}$  e  $f_e \Delta X_{1ini} = \Delta X_{22}$ , a solução elite que foi a base para obtenção do ponto  $P_3$ , pertencerá à fronteira da nova região e parte da região anterior pertencerá a nova região.
- Se  $f_e \Delta X_{1ini} > \Delta X_{21}$  e  $f_e \Delta X_{1ini} > \Delta X_{22}$ , a solução elite estará contida na nova região e também parte da região anterior.
- Se  $f_e \Delta X_{1ini} < \Delta X_{21}$  e  $f_e \Delta X_{1ini} < \Delta X_{22}$ , as duas regiões podem ser disjuntas e a solução elite da qual esta região se originou não pertencerá a ela.

Resumindo, a forma de variar os intervalos onde estão contidas as variáveis, é feita através da aplicação de fatores que modifiquem seus limites. Estes limites são sempre conhecidos ao longo do processamento. Três etapas básicas são executadas neste procedimento:

- Iniciada a busca em uma região especificada, após um determinado número de gerações, a região de busca é reduzida. Um fator é aplicado aos limites de cada variável para criar a nova região menor do que a inicial. Essa nova região por ser menor, permite que seja encontrada, mais rapidamente, uma solução ainda melhor do que aquela que a originou, se existir. Estes limites são obtidos, utilizando como referência a solução de melhor adequabilidade da região anterior, selecionada pelo elitismo. O fator de redução dos limites denominado de  $f_r$  tem os valores no intervalo  $0.0 < f_r < 1.0$ . Neste caso menor quantidade de gerações são utilizadas.
- Após executado um determinado número de gerações com a região reduzida, cria-se uma nova região de busca. Esta nova região é baseada, também, na melhor solução, deslocada por um fator e expandida neste ponto. Esta região é obtida aplicando-se um fator denominado de fator de deslocamento ( $f_d > 1.0$ ). Sua função é deslocar o ponto representado pela solução de melhor adequabilidade, selecionada pelo elitismo. Baseado neste novo ponto, baricentro da nova região, calculam-se os novos limites. Estes valores são obtidos aplicando-se um fator denominado de fator de expansão  $f_e > 1.0$ . O tamanho da nova região tem como referência o incremento calculado pela distância do baricentro a fronteira da região inicial. O importante nesta etapa é criar uma região maior do que a anterior (região reduzida). Isto permite que a solução elite esteja contida na nova região e outros valores estejam disponíveis para serem recombinaados pela mutação. Esta nova região pode conter ou não parte da anterior ou a solução da qual se originou.
- A cada nova região criada a taxa de mutação é reinicializada, devido ao fato do uso da variação exponencial desta taxa.

De modo geral os ciclos, onde a região é reduzida, executam a busca na vizinhança da melhor solução da região (*exploitation*), podendo conter ou não parte desta região. Os ciclos onde a região de busca é deslocada e expandida, soluções externas à região anterior ficam disponíveis para serem recombinaadas. A busca é executada em toda região expandida (*exploration*). Respeitando-se os limites físicos do

problema, a busca da solução mais adequada é melhor direcionada ao longo de todo processamento. Um algoritmo para executar esse procedimento é mostrado a seguir.

*Ler dados de entrada*

*Inicializar o gerador de números pseudo-aleatório*

*Criar a primeira a população*

*Executar o pré-aquecimento*

*Executar este ciclo  $n_1$  vezes (deslocamento e expansão)*

*Executar este ciclo  $n_2$  vezes (redução)*

*Executar este ciclo  $n_3$  vezes de acordo com o número  
de gerações especificado*

*Calcular cada geração*

*Executar o elitismo*

*Continuar*

*Modificar a quantidade de gerações (opcional).*

*Aplicar o fator de redução  $0.0 < f_r < 1.0$*

*aos valores obtidos na melhor solução  
(solução elite).*

*Reinicializar a taxa de mutação  $p_m = p_{m\acute{a}x}$  .*

*Continua*

*Modificar a quantidade de gerações (opcional).*

*Aplicar um fator de deslocamento  $f_d > 1.0$  aos valores  
obtidos na melhor solução (solução elite).*

*Calcular os novos intervalos, aplicando-se um fator de  
expansão que pode ser  $f_e \geq 1.0$  ou  $f_e < 1.0$  ao ponto  
deslocado.*

*Reinicializar a taxa de mutação  $p_m = p_{m\acute{a}x}$  .*

*Continuar*

*Fim*

onde :

$n_1$  → quantidade de ciclos externos (deslocamento e intervalo expandido)

$n_2$  → quantidade de ciclos internos (intervalo reduzido)

$n_3 \rightarrow$  quantidade máxima de gerações especificada em cada ciclo

$P_m \rightarrow$  taxa de mutação variável exponencialmente

$p_{m\acute{a}x} \rightarrow$  valor máximo da taxa de mutação

Generalizando, numa representação onde teríamos  $n$  variáveis na estrutura do cromossomo (representação no espaço  $\mathfrak{R}^n$ ), o efeito da variação dinâmica dos limites corresponderia a um hipercubo se deslocando na hiper-região de busca, a procura da melhor solução. Este hipercubo sofreria a ação de redução, deslocamento e expansão, respeitando-se os limites físicos do sistema.

Deste ponto de vista, os novos limites, para redução da região de busca considerando  $n$  variáveis na estrutura do cromossomo  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , seriam:

$$\begin{aligned}
 X_{1\min} &= X_1(1 - f * f_{x1}) & X_{1\max} &= X_1(1 + f * f_{x1}) \\
 X_{2\min} &= X_2(1 - f * f_{x2}) & X_{2\max} &= X_2(1 + f * f_{x2}) \\
 \vdots & & \vdots & \\
 X_{n\min} &= X_n(1 - f * f_{xn}) & X_{n\max} &= X_n(1 + f * f_{xn})
 \end{aligned} \tag{4.15}$$

Os novos limites para expansão da região de busca, considerando que seu tamanho seja igual ao da região inicial, após deslocamento do ponto correspondente a melhor solução é obtido aplicando o incremento

$$\begin{aligned}
 \Delta X_1 &= \Delta X_{1\text{inic}} \\
 \Delta X_2 &= \Delta X_{2\text{inic}} \\
 \vdots & \quad \quad \quad \vdots \\
 \Delta X_n &= \Delta X_{n\text{inic}}
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

onde:

$\Delta X_{i\text{inic}} \rightarrow$  distância do baricentro à fronteira da região inicial para cada variável

$\Delta X_i \rightarrow$  incremento necessário a cada variável para expansão da região de busca

seriam:

$$X'_{1\min} = X'_1 - f_e * \Delta X_1 \qquad X'_{1\max} = X'_1 + f_e * \Delta X_1$$

$$\begin{array}{ll}
\mathbf{X}'_{2\min} = \mathbf{X}'_2 - \mathbf{f}_e * \Delta\mathbf{X}_2 & \mathbf{X}'_{2\max} = \mathbf{X}'_2 + \mathbf{f}_e * \Delta\mathbf{X}_2 \\
: & : \\
\mathbf{X}'_{n\min} = \mathbf{X}'_n - \mathbf{f}_e * \Delta\mathbf{X}_n & \mathbf{X}'_{n\max} = \mathbf{X}'_n + \mathbf{f}_e * \Delta\mathbf{X}_n
\end{array} \quad (4.17)$$

onde:

$\mathbf{f}_e$  → fator de expansão da região de busca

$\mathbf{X}'_i$  → valores das variáveis contidos no melhor indivíduo deslocados por um fator  $\mathbf{f}_d$

$\mathbf{X}'_{i\min}$  e  $\mathbf{X}'_{i\max}$  → limites inferior e superior da região expandida

$i=1,\dots,n$  ( $n$  → igual ao tamanho da população)

Ilustrando através de gráficos, a Figura 4.5 mostra este efeito.

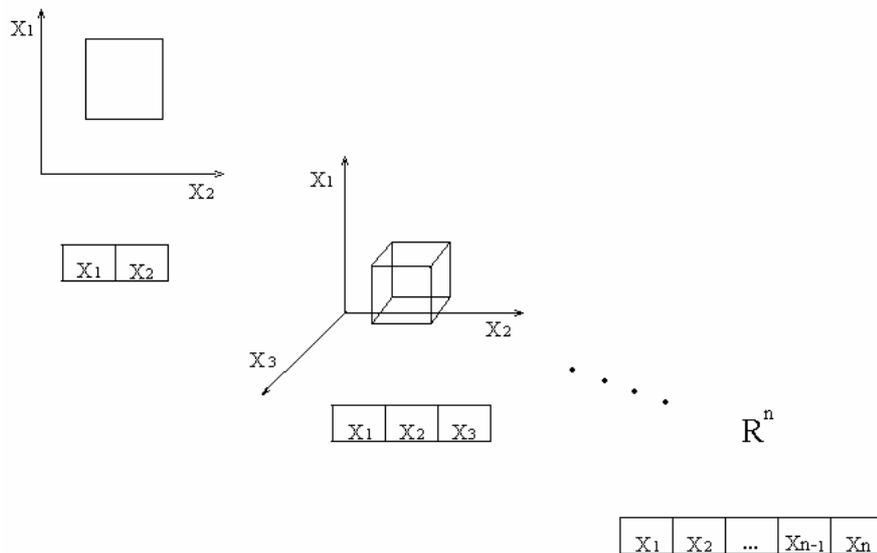


Figura 4. 4 – Ilustração da região de busca correspondente às variáveis contidas no cromossomo.

### 4.2.3 - Efeitos Sobre a Representação do Cromossomo

As variáveis são representadas nos cromossomos por números binários ou reais ou símbolos, usando uma representação concatenada de múltiplos parâmetros. Os

limites superiores e inferiores das variáveis são estabelecidos, baseados no conhecimento prévio do sistema sob análise ou simplesmente aleatório desde que não se tenha informação sobre o sistema.

A variação dos limites das variáveis ao longo da busca tem influência diferente no valor das variáveis na estrutura do cromossomo, dependendo da representação ser em binário ou real. A variação dos limites tem influência direta nos valores em real das variáveis e na precisão utilizada, quando a representação é em binário. Enquanto que, na representação em real a precisão depende do computador que está sendo utilizado. A seguir, uma análise é feita para estes dois tipos de representações das variáveis no cromossomo.

#### 4.2.3.1 - Representação em Binário

A representação em binário discretiza o intervalo contínuo onde os valores das variáveis estão contidos. Dessa forma a redução, o deslocamento e a expansão da região de busca provocarão variações dos valores das variáveis ao longo do processamento. Este fato é devido à dependência direta do valor da variável com o intervalo ao qual pertence. Isso pode ser verificado na expressão (4.22), onde nesse tipo de representação do cromossomo, é necessário fazer a decodificação para obtenção do valor em real da variável. As estruturas em binário não são alteradas, o que significa dizer que os blocos construtores (*building blocks*) permanecem nas estruturas binárias. Os valores em real das variáveis estão sujeitos aos novos intervalos, quando a região de busca varia. Portanto, são diferentes dos valores da região anterior. Todos os valores contidos nos cromossomos seriam modificados. Além disso, a expressão (4.22) mostra que, o número de partes que um intervalo é discretizado, permanece constante. Significa dizer que, a precisão no cálculo do valor em real das variáveis é aumentada, quando a região de busca é reduzida.

Na representação em binário, o valor em real obtido do mapeamento do intervalo contínuo correspondente a uma variável, é calculado com uma precisão pré-determinada ( $P_d$ ). Esta precisão é obtida pela expressão:

$$P_d = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{2^n - 1} \quad (4.18)$$

O fator  $2^n - 1$  indica em quantas vezes o intervalo contínuo, correspondente a uma variável, foi discretizado ( $n$  é o tamanho em binário da variável no cromossomo).

Nesta representação o tamanho do cromossomo varia de acordo com a precisão adotada no cálculo do valor da variável.

Um exemplo ilustrativo para mostrar esse efeito é mostrado a seguir. Supondo que uma população tenha as seguintes características:

- Número de indivíduos na população: 6
- Número de variáveis no cromossomo: 2
- Tamanho das variáveis no cromossomo: 4 bits
- Intervalos onde estão contidas as variáveis, que definem a fronteira da região inicial:

$$X_1 \rightarrow [10, 25] \quad X_2 \rightarrow [-5, 30] \quad (4.19)$$

que em determinada geração é constituída pelos os seguintes indivíduos:

$$\begin{aligned}
 I_1 &\Rightarrow \boxed{1|0|0|0|1|0|0|1} \\
 I_2 &\Rightarrow \boxed{1|0|1|1|1|0|0|0} \\
 I_3 &\Rightarrow \boxed{0|0|1|1|0|1|0|1} \\
 I_4 &\Rightarrow \boxed{0|1|1|0|1|1|0|0} \\
 I_5 &\Rightarrow \boxed{1|0|1|1|1|1|0|0} \\
 I_6 &\Rightarrow \boxed{1|0|0|1|1|1|1|1}
 \end{aligned} \quad (4.20)$$

Considerando que o indivíduo  $I_2$  seja o de maior adequabilidade, selecionado pela estratégia elitista

$$I_2 \Rightarrow \boxed{1|0|1|1|1|0|0|0} \quad (4.21)$$

A expressão que decodifica essas estruturas é dada por :

$$X_i = X_{i\min} + \frac{(X_{i\max} - X_{i\min})}{2^N - 1} \cdot INTX_i \quad (4.22)$$

Pode ser observado na expressão (4.22) a dependência do valor da variável em real  $X_i$ , com o intervalo no qual está contida  $[X_{i\min}, X_{i\max}]$ , com valor da estrutura decodificada em inteiro  $INTX_i$  e com a precisão desejada, definida no denominador.

Os valores decodificados da estrutura  $I_2$  são  $INTX_1 = 11$  e  $INTX_2 = 8$ . O valor em real de  $X_1$  e  $X_2$ , calculado através da expressão (4.22), são respectivamente 21,0 e 13,67. A distância do baricentro da região inicial, até a fronteira do respectivo intervalo é obtida pelas expressões:

$$\Delta X_1 = \frac{X_{1\max} - X_{1\min}}{2} \quad \Delta X_2 = \frac{X_{2\max} - X_{2\min}}{2} \quad (4.23)$$

cujos valores são  $\Delta X_1 = 7,5$  e  $\Delta X_2 = 17,5$ . Relativo ao novo ponto definido por  $X_1$  e  $X_2$  será o baricentro da nova região, calculado por:

$$f_{x1} = \frac{\Delta X_1}{X_1} \quad f_{x2} = \frac{\Delta X_2}{X_2} \quad (4.24)$$

cujos valores são  $f_{x1} = 0,36$  e  $f_{x2} = 1,28$ .

Executando, inicialmente, uma redução da região de busca através da aplicação de um fator  $f_r = 0,3$ , os novos limites serão obtidos pelas expressões:

$$X_{1\min} = X_1(1 - f_r * f_{x1}) \quad X_{1\max} = X_1(1 + f_r * f_{x1}) \quad (4.25)$$

$$X_{2\min} = X_2(1 - f_r * f_{x2}) \quad X_{2\max} = X_2(1 + f_r * f_{x2}) \quad (4.26)$$

cujos valores são os seguintes:

$$X_{1\min} = 18,73 \quad X_{1\max} = 23,25 \quad (4.27)$$

$$X_{2\min} = 8,42 \quad X_{2\max} = 18,92 \quad (4.28)$$

Os pontos dos intervalos correspondentes às estruturas em binário, das variáveis  $X_1$  e  $X_2$  (melhor solução), são os mesmos  $INTX_1 = 11$  e  $INTX_2 = 8$ , respectivamente.

Os novos valores das variáveis em real na nova região, correspondentes aos intervalos  $[18,73 \ 23,25]$  e  $[8,42 \ 18,92]$  de  $X_1$  e  $X_2$ , respectivamente, obtidos através da decodificação serão:

$$X_1 = 22,05 \quad \text{e} \quad X_2 = 14,02 \quad (4.29)$$

As estruturas em binário são preservadas, porém os valores em real das variáveis correspondentes a essas estruturas serão diferentes da população anterior e próximos ao baricentro por causa da redução da região de busca. A nova região tem como baricentro a solução elite da população anterior, sua presença nessa nova região é, então, garantida. Além disso, como esta região é menor, a obtenção da melhor solução se dará mais rapidamente, porque a densidade populacional é maior em torno da melhor solução. Para evitar que as adequabilidades dos indivíduos da nova região sejam muito diferentes, uma boa opção seria deixar a população estagnar ou ficar próximo da estagnação, ou seja, quando o desvio padrão de cada indivíduo for, relativamente, pequeno. Portanto, a variação da região de busca não terá grande influência nos valores das variáveis, mas sim na adequabilidade. Se existir limitações físicas no processo analisado, este deve ser respeitado. A nova região não ultrapassará os limites mínimos e máximos.

O procedimento seguinte seria de deslocamento e expansão após um número especificado de gerações. Neste caso será considerada a mesma população, por se tratar apenas de um exemplo ilustrativo. O efeito qualitativo do deslocamento e da expansão seria o mesmo se fosse executado um conjunto de gerações. Como descrito anteriormente, se existirem limitações físicas no processo, estas deverão ser respeitadas.

Fazendo as mesmas considerações anteriores com relação a redução da região, o ponto representativo da melhor solução seria  $X_1 = 21,0$  e  $X_2 = 13,67$ . Aplicando um fator de deslocamento  $f_d = 1,4$ , obtém-se o baricentro da nova região. O novo ponto terá a seguinte coordenada:

$$X'_1 = 29,4 \quad \text{e} \quad X'_2 = 19,14 \quad (4.30)$$

Baseado na distância do baricentro à fronteira da região de busca inicial  $\Delta X_1$  e  $\Delta X_2$  aplicando-os ao novo ponto, obtém-se os limites da nova região. Estes incrementos tem os seguintes valores  $\Delta X_1 = 7,5$  e  $\Delta X_2 = 17,5$ . Os limites da nova região deslocada serão calculados pelas expressões:

$$X'_{1\min} = X'_1 - f_e \cdot \Delta X_1 \quad X'_{2\min} = X'_2 - f_e \cdot \Delta X_2 \quad (4.31)$$

$$X'_{1\max} = X'_1 + f_e \cdot \Delta X_1 \quad X'_{2\max} = X'_2 + f_e \cdot \Delta X_2 \quad (4.32)$$

É desejado que a nova região envolva a solução elite da região anterior. Para que esse efeito seja verificado é aplicado um fator de expansão  $f_e = 1.0$ . Os novos limites serão:

$$X'_{1\min} = 21,9 \quad X'_{2\min} = 1,64 \quad (4.33)$$

$$X'_{1\max} = 36,9 \quad X'_{2\max} = 36,64 \quad (4.34)$$

A estrutura representativa da solução elite não é alterada, mas os valores em real serão diferentes. Os novos valores serão:

$$X'_1 = 32,9 \quad X'_2 = 20,31 \quad (4.35)$$

Pode ser observado que, a nova região contém a solução elite anterior (21,0 , 13,67). O tamanho em binário para cada variável é constante ao longo do processamento, significando que o número de pontos em que o intervalo é discretizado também é constante. Um efeito se verificará na precisão dos resultados em real, quando for executada a decodificação. Quando a região é reduzida, a precisão no cálculo dos valores em real será maior. Nesta etapa, o tamanho dos intervalos das variáveis são menores e o número de partes que são discretizados nestes intervalos é fixa durante todo processamento. Efeito contrário ocorre na expansão da região de busca. Nesta região a precisão no cálculo dos valores em real é reduzida por ser mantida a mesma discretização.

De maneira geral podemos dizer que, na etapa onde o intervalo é reduzido, a precisão de cálculo dos valores das variáveis é aumentada. Por outro lado, se for ampliado a precisão diminuirá, porque o tamanho do cromossomo permanece constante

ao longo de todo processamento. Uma estratégia de criar uma região que tenha o mesmo tamanho da região inicial, quando for aplicado o procedimento de expansão, é mais adequado para evitar perda de precisão.

O cruzamento e a mutação, considerando as regiões criadas em cada etapa do processamento, introduzirão modificações nos resultados. Estas alterações podem diminuir a adequabilidade média da população.

A estrutura em binário mapeia os valores em real no intervalo correspondente a uma variável. Entretanto, o resultado do procedimento descrito anteriormente seria a modificação drástica dos valores em real de cada variável, porém as estruturas em binário seriam preservadas. Os valores em real após a decodificação das estruturas serão diferentes dos valores existentes antes da variação do tamanho da região, o que não seria desejado e adequado. Uma estratégia adequada para minimizar este problema seria deixar a população se aproximar da estagnação. Neste ponto a densidade de “*building blocks*” é alta e os indivíduos bastante semelhantes. A nova região conteria estes indivíduos, porém suas estruturas decodificadas resultariam em valores diferentes daqueles da região anterior. Mesmo o melhor indivíduo teria seus parâmetros também alterados.

Uma estratégia foi adotada para que pelo menos o indivíduo de melhor adequabilidade tenha seu valor em real preservado. Ele seria tomado como referência para determinar os limites baseado na estrutura em binário. A quantidade de partes, na representação em binário, que o intervalo de uma determinada variável é discretizado, é sempre par. Logo não existirá um ponto central, mas sim dois pontos discretos centrais. O procedimento considera a solução elite como sendo um destes pontos centrais. A partir daí, seria definido, quantas partes discretas à direita e à esquerda da solução elite existiria, baseado no tamanho das variáveis em binário. Então, os limites seriam calculados e a solução elite não seria mais o baricentro desta região. O que não implicaria em problemas para encontrar a melhor solução. Os demais cromossomos teriam seus valores em real alterados, mas próximos do cromossomo de maior adequabilidade por estarem próximos da estagnação. Um exemplo para melhor entendimento é mostrado a seguir.

Supondo que a variável representada em um cromossomo seja um binário de 4 bits. Existirão, então, 16 pontos discretos no intervalo da respectiva variável. É considerado que o intervalo contínuo, onde os valores em real das variáveis  $V_1$  e  $V_2$

estejam contidos seja  $[17,00, 48,08]$  e  $[-10,00, 15,00]$ , respectivamente. A Figura 4. 5 mostra a correspondência de valores reais e binários neste intervalo e os dois pontos centrais do intervalo discreto.

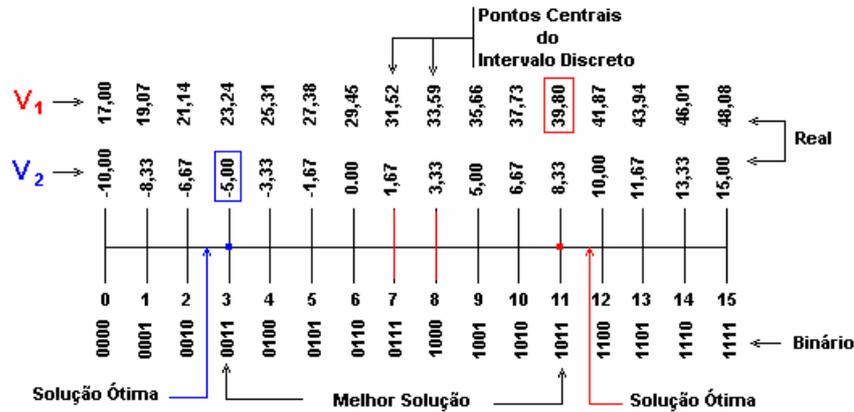


Figura 4. 5 – Correspondência entre valor em real e binário das variáveis  $V_1$  e  $V_2$  e as supostas soluções ótimas e a melhor solução naquela discretização.

Os limites superiores e inferiores do novo intervalo será calculado da seguinte maneira:

- Calcula-se inicialmente as distâncias do baricentro da primeira região de busca à sua fronteira  $\Delta V_1$  e  $\Delta V_2$ . Seus valores serão a referência para criação das demais regiões.

$$\Delta V_1 = \frac{48,08 - 17,0}{2} = 15,54 \quad \text{e} \quad \Delta V_2 = \frac{15,0 + 10,0}{2,0} = 12,5 \quad (4.36)$$

$$b_{v_1} = 17,0 + 15,54 = 32,54 \quad \text{e} \quad b_{v_2} = -10,0 + 12,5 = 2,5 \quad (4.37)$$

onde:

$(b_{v_1}, b_{v_2}) \rightarrow$  é a coordenada do baricentro da região de busca

O baricentro da nova região será  $(32,54, 2,5)$ . Na Figura 4. 5 pode ser identificado que os dois pontos centrais próximos do baricentro são 31,54 e 33,59 para variável  $V_1$  e 1,67 e 3,33 para variável  $V_2$ . As estruturas em binário correspondente são 0111 e 1000 para ambas as variáveis. Escolhido os valores à direita do baricentro a

estrutura binária correspondente será 1000. Este valor em binário corresponderá sempre à solução elite referência para criação das demais regiões.

Se for executada a redução da região de busca através de um fator de redução  $f_r = 0.2$  o procedimento para cálculo dos limites será:

Calculando o montante de redução  $\Delta r$  da região

$$\Delta r_{v_1} = 0,2 * 15,54 = 3,11 \quad e \quad \Delta r_{v_2} = 0,2 * 12,5 = 2,5 \quad (4.38)$$

A solução elite terá a estrutura em binário correspondente a 1000. O limite superior dependerá do número de partes discretas à direita desta referência. Nesta situação existirão 7 pontos. Este valor é calculado pela seguinte expressão:

$$NPDD = \frac{NPDT}{2} - 1 \quad (4.39)$$

onde:

$NPDD \rightarrow$  número de pontos discretos à direita da referência

$NPDT \rightarrow$  número de pontos discretos totais

Neste exemplo,  $NPDT = 16$ , logo  $NPDD = 7$ . A precisão desejada para cada variável será obtida por

$$p_{v_1} = \frac{2 * \Delta r_{v_1}}{NPDT - 1} \quad e \quad p_{v_2} = \frac{2 * \Delta r_{v_2}}{NPDT - 1} \quad (4.40)$$

$$p_{v_1} = \frac{2 * 3,11}{16 - 1} = 0,41 \quad e \quad p_{v_2} = \frac{2 * 2,5}{16 - 1} = 0,33 \quad (4.41)$$

onde:

$p_{v_1} \rightarrow$  precisão desejada para  $V_1$

$p_{v_2} \rightarrow$  precisão desejada para  $V_2$

Os valores dos limites superiores das variáveis serão obtidos através das expressões em função da solução elite  $V_{1e} = 39,80$  e  $V_{2e} = -5,00$ .

$$V_{1máx} = V_{1e} + NPDD * p_{v_1} \quad e \quad V_{2máx} = V_{2e} + NPDD * p_{v_2} \quad (4.42)$$

$$V_{1máx} = 39,80 + 7 * 0,41 = 42,67 \quad e \quad V_{2máx} = -5,00 + 7 * 0,33 = -2,69 \quad (4.43)$$

e os inferiores serão calculados também em função da precisão adotada

$$V_{1\text{mín}} = V_{1e} - p_{V_1} * (NPDD + 1) \quad \text{e} \quad V_{2\text{mín}} = V_{2e} - p_{V_2} * (NPDD + 1) \quad (4.44)$$

$$V_{1\text{mín}} = 39,80 - 0,41 * (7 + 1) = 36,52 \quad (4.45)$$

$$V_{2\text{mín}} = -5,00 - 0,33 * (7 + 1) = -7,64 \quad (4.46)$$

assim os novos limites de  $V_1$  e  $V_2$  serão respectivamente  $[36,52, 42,67]$  e  $[-7,64, -2,69]$ .

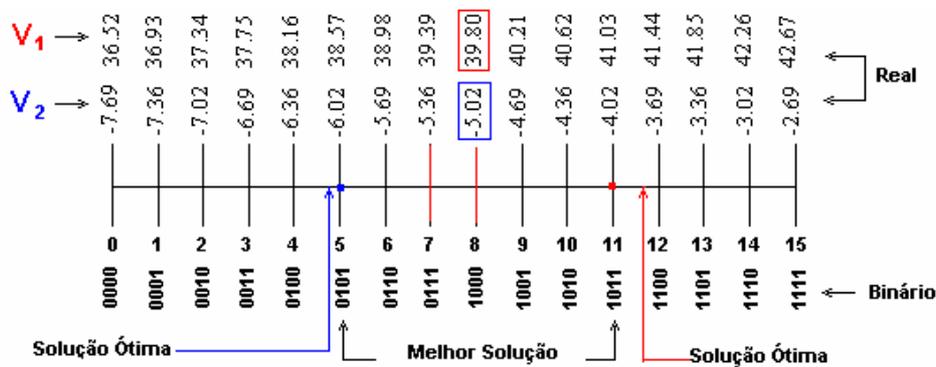


Figura 4. 6 – Correspondência entre valor em real e binário das variáveis  $V_1$  e  $V_2$  e as supostas soluções ótimas e a melhor solução na discretização após redução da região de busca.

Se for executada a expansão da região de busca o procedimento para cálculo dos limites terá os mesmos passos executados para redução da região. A expansão é executada após deslocar a solução elite da região reduzida através de um fator de deslocamento  $f_d$ . Supondo que esta solução seja  $(38,57 \quad -5,99)$ . Aplicando um fator de deslocamento  $f_d = 1,2$  o incremento para deslocar este ponto será:

$$V_{d1} = f_d * V_{r1} \quad \text{e} \quad V_{d2} = f_d * V_{r2} \quad (4.47)$$

$$V_{d1} = 1,2 * 41,03 = 49,23 \quad \text{e} \quad V_{d2} = 1,2 * (-6,02) = -7,22 \quad (4.48)$$

O ponto considerando a solução elite deslocada será  $(49,23, -7,22)$ . Os limites da região expandida são calculados através deste ponto somando à sua coordenada a distância do baricentro da primeira região às suas fronteiras. O montante  $\Delta e$  para criar a

região expandida com mesmo tamanho da inicial, aplicado o fator de expansão  $f_e = 1.0$  será:

$$\Delta e_{v_1} = f_e * \Delta V_1 \quad e \quad \Delta e_{v_2} = f_e * \Delta V_2 \quad (4.49)$$

$$\Delta e_{v_1} = 1,0 * 15,54 = 15,54 \quad e \quad \Delta e_{v_2} = 1,0 * 12,5 = 12,5 \quad (4.50)$$

A precisão desejada para cada variável na região expandida será obtida por

$$p_{ve1} = \frac{2 * \Delta e_{v_1}}{NPDT - 1} \quad e \quad p_{ve2} = \frac{2 * \Delta e_{v_2}}{NPDT - 1} \quad (4.51)$$

$$p_{ve1} = \frac{2 * 15,54}{16 - 1} = 2,07 \quad e \quad p_{ve2} = \frac{2 * 12,5}{16 - 1} = 1,67 \quad (4.52)$$

A nova região de busca expandida terá como limites máximo

$$V_{e1m\acute{a}x} = V_{d1} + NPDD * p_{ve1} \quad e \quad V_{e2m\acute{a}x} = V_{d2} + NPDD * p_{ve2} \quad (4.53)$$

$$V_{e1m\acute{a}x} = 49,23 + 7 * 2,07 = 63,72 \quad e \quad V_{e2m\acute{a}x} = -7,22 + 7 * 1,67 = 4,47 \quad (4.54)$$

os limites inferiores são calculados levando em consideração a precisão adotada no cálculo das variáveis.

$$V_{e1m\grave{m}n} = V_{d1} - p_{ve1} * (NPDD + 1) \quad V_{e2m\grave{m}n} = V_{d2} - p_{ve2} * (NPDD + 1) \quad (4.55)$$

$$V_{1m\grave{m}n} = 49,23 - 2,07 * (7 + 1) = 32,67 \quad V_{2m\grave{m}n} = -7,22 - 1,67 * (7 + 1) = -20,58 \quad (4.56)$$

assim os novos limites de  $V_{e1}$  e  $V_{e2}$  serão respectivamente  $[32,67 \quad 63,72]$  e  $[-20,58 \quad 4,44]$ .

Como pode ser observado a solução elite, referência de cada região, terá sempre a estrutura em binário 1000. Isto significa que, o valor em real é preservado, porém o cromossomo correspondente tem sua estrutura binária alterada. Esta estrutura é obtida no início do processamento baseada no número de pontos que o intervalo foi discretizado. Como a população está próxima da estagnação as demais estruturas terão seus valores em real não muito distante dos valores da região anterior. Este

procedimento minimizaria o efeito da variação da região de busca, quando a representação do cromossomo for em binário.

#### 4.2.3.2- Representação em Real

Na representação em real a precisão depende apenas da precisão do computador que está sendo utilizado. O tamanho do cromossomo é igual ao número de variáveis que fora estipulado na aplicação. Os parâmetros do cromossomo são os verdadeiros valores de ajuste. Nesta representação, os valores das variáveis nos cromossomos não variam, quando são executadas a expansão ou a redução da região de busca. Esta região pode ser também disjunta da anterior, que não irá alterar os valores contidos nos cromossomos. Estes valores só serão alterados, quando for executada a mutação uniforme. O valor da posição escolhida se modificará, porque estão sendo utilizados valores contidos na nova região de busca. Considerando a mesma população anterior com as variáveis representadas pelos correspondentes valores em real nas estruturas dos cromossomos.

$$\begin{array}{l}
 I_1 \rightarrow \left[ \begin{array}{c|c} 18,0 & 16,0 \end{array} \right] \\
 I_2 \rightarrow \left[ \begin{array}{c|c} 21,0 & 13,67 \end{array} \right] \\
 I_3 \rightarrow \left[ \begin{array}{c|c} 13,0 & 6,67 \end{array} \right] \\
 I_4 \rightarrow \left[ \begin{array}{c|c} 16,0 & 23,0 \end{array} \right] \\
 I_5 \rightarrow \left[ \begin{array}{c|c} 21,0 & 23,0 \end{array} \right] \\
 I_6 \rightarrow \left[ \begin{array}{c|c} 19,0 & 30,0 \end{array} \right]
 \end{array} \tag{4.57}$$

Supondo que a melhor solução seja a representada pelo indivíduo I<sub>2</sub> a mesma da do exemplo anterior

$$I_2 \rightarrow \left[ \begin{array}{c|c} x_1 & x_2 \\ \hline 21,0 & 13,67 \end{array} \right] \tag{4.58}$$

A distância do baricentro, da região definida pelos limites das variáveis, até sua fronteira é a mesma do exemplo anterior, cujos valores são  $\Delta X_1' = 7,5$  e  $\Delta X_2' = 17,5$ .

O fator de proporcionalidade relativo ao novo ponto, definido pela solução elite, tem os seguintes valores  $f_{x_1} = 0,36$  e  $f_{x_2} = 1,28$ .

Executando, inicialmente, uma redução da região de busca, através da aplicação de um fator  $f_r = 0,3$ , os novos limites serão:

$$\begin{aligned} X_{1\min} &= 18,73 & X_{1\max} &= 23,25 \\ X_{2\min} &= 8,42 & X_{2\max} &= 18,92 \end{aligned} \quad (4.59)$$

Pelo motivo de não ser necessário decodificar o cromossomo, a estrutura em real da solução elite permanecerá inalterada. O ponto representado pelos valores contidos nesta estrutura será o baricentro da nova região e é pertinente a ela. Neste caso, valores contidos nos outros cromossomos, podem não estar contidos nos novos intervalos, o que não implicará em problemas na busca da melhor solução. Os valores contidos na nova região serão recombinaados somente através da mutação, que os inserirá nos cromossomos. O cruzamento apenas recombinará os valores contidos na população, independentemente de pertencerem ou não a nova região.

Após um determinado número especificado de gerações, procede-se ao deslocamento e a expansão da região de busca. Considerando a mesma população, o ponto representativo da melhor solução será  $X_1 = 21,0$  e  $X_2 = 13,67$ . Aplicando um fator de deslocamento  $f_d = 1,4$ , obtém-se o baricentro da nova região. O novo ponto terá a seguinte coordenada:

$$X'_1 = 29,4 \text{ e } X'_2 = 19,14 \quad (4.60)$$

Os incrementos para calcular os novos limites, tem os seguintes valores  $\Delta X_1 = 8,4$  e  $\Delta X_2 = 5,47$ . Os limites da nova região deslocada, considerando que, ela envolva a solução elite da região anterior, foram calculados aplicando o mesmo fator de expansão  $f_e = 1,2$ . E seus valores serão:

$$\begin{aligned} X'_{1\min} &= 21,90 & X'_{2\min} &= 1,64 \\ X'_{1\max} &= 36,90 & X'_{2\max} &= 36,64 \end{aligned} \quad (4.61)$$

A estrutura representativa da solução elite não é alterada e está contida na nova região. O efeito da redução e da expansão da região de busca, na representação em real, não modifica a precisão dos resultados. Esta precisão é dependente apenas do computador que é utilizado.

Resumindo, nas etapas onde o intervalo é reduzido ou expandido os valores contidos na estrutura da melhor solução não são alterados. O cruzamento terá a função de recombinar os valores contidos na população. A mutação terá a função de recombinar valores contidos na nova região de busca que ficaram disponíveis.

Uma forma de definir o instante para modificar as regiões seria aquele onde os “*building blocks*” são mais numerosos. Esta referência pode ser a adequabilidade média da população ou o desvio padrão médio.

#### **4.4.5- Efeito do Deslocamento e da Variação do Tamanho da Região de Busca**

A variação do tamanho da região de busca tem o objetivo de manipular um número menor de soluções de baixa adequabilidade, despendendo menos tempo de processamento. Por outro lado, disponibiliza novos valores para serem recombinados, quando do deslocamento e expansão da região de busca. Esta técnica permite usar populações menores e menos gerações. A busca é executada de maneira direcionada, utilizando a solução elite como referência para criação da nova região. Na região reduzida a exploração é executada nas vizinhanças da melhor solução. Durante um determinado número de gerações, menor do que na região expandida. Se o ótimo estiver próximo desta solução rapidamente será encontrado.

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO AO AJUSTE DE ESTABILIZADORES

No AG utilizado nesta aplicação a população inicial foi criada pseudo-aleatoriamente ou foi criado um conjunto de soluções com amortecimento acima de um valor pré-especificado e o restante da população foi criado pseudo-aleatoriamente até que o número máximo de indivíduos na população fosse alcançado.

A técnica de seleção usada foi a do torneio, cuja vantagem é de minimizar a pressão seletiva exercida pelo indivíduo de mais alta adequabilidade no início do processo. Essa pressão seletiva pode ser controlada pelo número de indivíduos no torneio. Quanto menor o número de indivíduos no torneio menor a pressão seletiva. Uma estratégia elitista também foi usada. Nesse caso o melhor indivíduo da população atual estará sempre presente na população seguinte, substituindo o indivíduo com pior adequabilidade da população atual. Isso garante que blocos construtores bons sejam propagados à população seguinte e evita a perda da melhor solução a cada geração.

O cruzamento uniforme foi utilizado por se mostrar mais vantajosa sua aplicação. Primeiro, porque cada variável ou *bit* são passíveis de serem recombinados em toda estrutura, com a mesma probabilidade. O contrário ocorre no cruzamento de um ponto onde as extremidades sempre participam do cruzamento. Segundo, por estar sendo usada população de tamanho pequeno. Apesar de ser mais disruptivo é mais exploratório ao longo de toda busca, enquanto que, os cruzamentos de um e de dois pontos são menos exploratórios, quando a população torna-se homogênea.

A mutação que foi implementada utiliza uma taxa ( $P_m$ ) exponencialmente decrescente a cada geração. Inicialmente tem um valor máximo e decresce exponencialmente até alcançar um valor mínimo, ambos especificados. A expressão que define essa variação é dada por:

$$P_m = P_{m\text{máx}} e^{a.ng} \quad (5.1)$$

onde:

$P_m$  → probabilidade de ocorrer a mutação

$P_{m\text{máx}}$  → probabilidade máxima de mutação

- a** → fator que define o decréscimo da exponencial  
**ng** → número da geração

O tipo de mutação utilizada varia de acordo com a representação da variável no cromossomo. Se a representação for em número binário a mutação a ser usada é a tradicional, troca-se o *bit* da posição sorteada pelo oposto. Por outro lado, se a representação for em número real, a mutação uniforme deve ser usada, onde o valor da posição escolhida é modificado, substituindo-o por um valor escolhido, pseudo-aleatoriamente, no intervalo que essa variável está contida.

Foi aplicada a técnica de variação da região de busca descrita no capítulo 4 para melhorar o desempenho do AG.

A regra de parada é aquela mais divulgada na literatura. O processamento termina quando o número máximo de gerações especificado é alcançado.

O algoritmo utilizado na aplicação a que se propõe este trabalho é mostrado a seguir.

*Início*

*Parâmetros do AG*

*Número de indivíduos na população*

*Tamanho do cromossomo*

*Número de variáveis no cromossomo*

*Número de indivíduos no torneio*

*Taxa de cruzamento*

*Taxa de mutação*

*Tipo de estratégia de seleção*

*Definição da região de busca*

*t=0*

*Cria a primeira população P(t)*

*Executa o pré-aquecimento. Cria um conjunto de indivíduos com adequabilidade acima de um valor especificado.*

*Complementa a população criando pseudo-aleatoriamente os demais indivíduos.*

*Avaliação da população inicial P(t)*

*Cálculo dos autovalores de todos pontos de operação*

*Cálculo das gerações:*

*Executar este ciclo  $n_g$  vezes (número de gerações iniciais)*

*Seleciona através do torneio*

*Aplica cruzamento uniforme*

*Aplica a mutação (variação exponencial)*

*Avaliação de  $P(t)$ . Cálculo dos autovalores de todos pontos de operação*

*Aplica o elitismo*

*Continua*

*Executar este ciclo  $n_g$  vezes (número de vezes que a redução, o deslocamento e expansão serão executados).*

*Modificar a quantidade de gerações para a redução da região de busca (opcional).*

*Aplicar o fator de redução  $0.0 < f_r < 1.0$*

*aos valores obtidos na melhor solução (solução elite).*

*Reiniciar a taxa de mutação  $p_m = p_{m\acute{a}x}$ .*

*$n_g = n_2$  (número de gerações com a região reduzida)*

*Cálculo das gerações*

*Modificar a quantidade de gerações para a expansão da região de busca (opcional).*

*Aplicar um fator de deslocamento  $f_d > 1.0$  aos valores obtidos na melhor solução (solução elite).*

*Calcular os novos intervalos, aplicando-se um fator de expansão que pode ser  $f_e \geq 1.0$  ou  $f_e < 1.0$  ao ponto deslocado.*

*Reinicializar a taxa de mutação  $p_m = p_{m\acute{a}x}$ .*

*$n_g = n_1$  (número de gerações com a região deslocada e expandida)*

*Cálculo das gerações*

*Continue*

*Fim*

onde  $t \rightarrow$  representa o contador de gerações

Ao longo dos testes e análises para conhecer o potencial do AG, verificou-se que esta é uma ferramenta robusta, versátil, de fácil implementação e de fácil integração com outras ferramentas. Fato este que motivou e estimulou sua aplicação na área de controle de sistema de potência. Além desta aplicação, outras na área de sistema de potência podem ser encontradas na referência [8].

A aplicação desta técnica de busca num problema de controle, proposta desta tese, iniciou-se com o ajuste dos controladores de amortecimento de um TCSC e de um SVC [26, 27, 29]. Foram consideradas cinco condições de operação para este sistema de pequeno porte composto de 6 geradores, 14 barras, um TCSC e um SVC. Uma segunda aplicação foi projetar os estabilizadores do sistema New England para 9 geradores. Nesta aplicação catorze condições de operação foram consideradas. Foram contempladas manutenções em linhas de transmissão e variação de carga e de geração [17] para criar estas condições de operação. Nesta aplicação foi analisado o desempenho do sistema quando as estruturas dos estabilizadores continham 2 ou 3 blocos de avanço-atraso. Estimulado pelos resultados das aplicações citadas anteriormente, uma aplicação a um sistema de grande porte foi realizada. Neste estudo foi considerado o sistema de potência Sul/Sudeste, onde foram ajustados 22 estabilizadores para três condições de operação (cargas pesada, média e leve) [17]. Nesta aplicação foi analisado o desempenho do sistema com 2 blocos de avanço-atraso na estrutura dos estabilizadores. O número de blocos não foi considerado como parâmetro a ser calculado pelo AG. Mais tarde foram feitas simulações considerando o número de blocos do estabilizador calculado pelo AG. No sistema Sul/Sudeste o número de máquinas a ter os seus estabilizadores ajustados ou projetados foi estendido para 33, aumentando a complexidade do problema. Uma extensão desta aplicação considerou-se os ajustes obtidos por métodos analíticos como um ajuste fornecido para o AG. Este ajuste seria um dos cromossomos da população inicial. Além disso, foram considerados também na análise, os limites da região de busca sendo uma função deste ajuste. Por último, foi implementado no AG, o cálculo do número de blocos de avanço e atraso para cada estabilizador. Este valor foi considerado um parâmetro do cromossomo.

## 5.1 – APLICAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO PARA AJUSTAR OS ESTABILIZADORES DE UM TCSC E DE UM SVC

Neste teste o objetivo foi ajustar os estabilizadores de um TCSC e de um SVC, para obter a maior taxa de amortecimento possível em 5 condições de operação pré-estabelecidas. Outra aplicação nesta mesma linha é descrita na referência [7] e conceitos para aplicação de dispositivos FACTS são mostrados em [3, 4].

### 5.1.1 – Característica do Sistema

Todos os geradores deste sistema são modelados com seis variáveis de estado com parâmetros idênticos. Todas excitatrizes são representadas por duas variáveis de estado com parâmetros idênticos. O sistema é analisado sob duas condições nominais de fluxo de potência. Na primeira condição, denominada de sistema com fluxo nominal direto (SFND) onde as máquinas 3 e 4 exportam 640 MW e as máquinas 5 e 6 exportam 610 MW. A maior parte da potência ativa exportada é consumida pela carga L3. Na segunda condição, o fluxo de potência no caminho onde se encontra o TCSC tem o sentido contrário ao da primeira condição, devido a redução da carga L3 e aumento da carga L10. Os geradores 1 e 2 exportam 710 MW e os geradores 3 e 4 exportam 650 MW. Por causa da inversão do fluxo, essa condição foi denominada de sistema com fluxo nominal reverso (SFNR). A Figura 5. 1 mostra a localização dos geradores, do TCSC, do SVC e das cargas neste sistema.

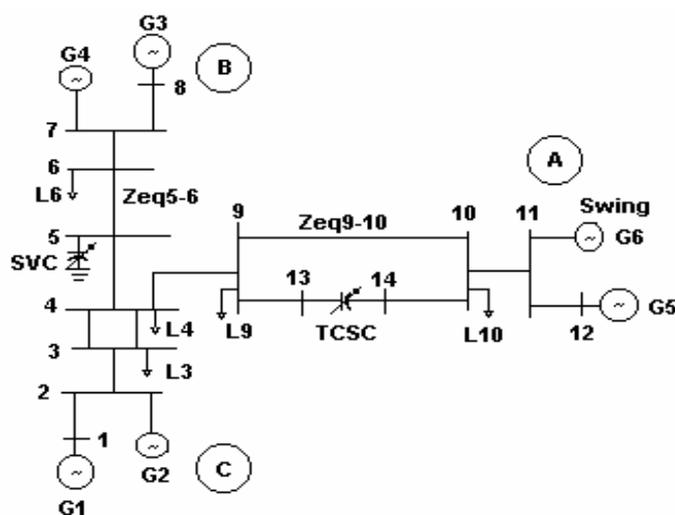


Figura 5. 1 – Sistema com 6 máquinas, três áreas (A, B e C), o TCSC e o SVC.

Em ambas condições nominais o sistema apresenta os mesmos modos de oscilação. Existem duas frequências eletromecânicas caracterizadas como modo inter-área do sistema. Um dos modos inter-área (Modo 1) consiste do grupo de máquinas da área **B** oscilando contra os grupos de máquinas da área **A** e **C**. O outro modo (Modo 2), consiste do grupo de máquinas da área **A** oscilando contra as máquinas da área **C**. Os outros três modos de oscilação eletromecânica, são modos locais de cada área. A motivação deste projeto é a aplicação de um estabilizador a SVC localizado na Barra 5 para aumentar o amortecimento do Modo 1 e a um TCSC localizado em uma das linhas que interligam a área **A** ao restante do sistema, entre as Barras 13 e 14 para aumentar o amortecimento do Modo 2.

Para um projeto robusto, o controlador deve ser capaz de fornecer amortecimento adicional para condições de operação usuais do sistema. Além das duas condições nominais de operação, considerou-se também as condições de operação com o sistema de transmissão mais fraco. Estes pontos de operação são caracterizados como: sistema com interligação fraca na transmissão onde está localizado o SVC (CS1), sistema com interligação fraca na transmissão onde está localizado o TCSC (CS2) ambos na condição nominal de fluxo direto e, por último, sistema com interligação fraca na transmissão onde está localizado o TCSC (CS3), na condição de fluxo reverso. As frequências  $f(\text{Hz})$  e as taxas de amortecimento  $\zeta(\%)$  dos modos inter-áreas são mostrados na Tabela 5. 1.

Tabela 5. 1 - Condições de operação do sistema em malha aberta.

| Sistema | Zeq5-6       | Zeq9-10   | L3                  | L10                 | Modo 1(SVC) |             | Modo2(TCSC) |             |
|---------|--------------|-----------|---------------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|         | Pu           | Pu        | MW MVA <sub>r</sub> | MW MVA <sub>r</sub> | F(Hz)       | $\zeta(\%)$ | F(Hz)       | $\zeta(\%)$ |
| SFND    | 0,08 +j0,8   | 0,04+j0,4 | 3000+j1000          | 400 +j 100          | 0,60        | 1,94        | 1,21        | 4,24        |
| SFNR    | 0,08 +j0,8   | 0,04+j0,4 | 400 +j 100          | 3000+j1000          | 0,62        | 3,7         | 1,12        | 3,67        |
| CS1     | 0,095 +j0,95 | 0,04+j0,4 | 3000+j1000          | 400 +j 100          | 0,39        | -8,63       | 1,19        | 4,10        |
| CS2     | 0,08 +j0,8   | 0,28+j2,8 | 3000+j1000          | 400 +j 100          | 0,44        | -6,33       | 1,03        | 3,99        |
| CS3     | 0,08 +j0,8   | 0,28+j2,8 | 400 +j 100          | 3000+j1000          | 0,74        | 13,44       | 0,77        | -4,93       |

A aplicação dos sinais estabilizadores nos TCSC e SVC está descrita nas referências [4, 10]. O sinal utilizado no estabilizador do SVC para amortecer o modo 1 é a diferença angular entre os ângulos das tensões sintetizadas, tendo como referência as

impedâncias relativas da área A e B ao ponto onde será aplicado o SVC, tomando por base a tensão e a corrente no SVC.

$$\theta_{\text{svc}} = \arg[V_{\text{sin}3}] - \arg[V_{\text{sin}4}] \quad (5.2)$$

Da mesma forma, para que o TCSC amortea o modo 2, é utilizado como sinal estabilizador a diferença angular entre os ângulos da tensão sintetizada, tendo como referência as impedâncias relativas da área A e C ao ponto onde será aplicado o TCSC, tomando por base a tensão e a corrente no TCSC.

$$\theta_{\text{tcsc}} = \arg[V_{\text{sin}1}] - \arg[V_{\text{sin}2}] \quad (5.3)$$

Os sinais  $\theta_{\text{svc}}$  e  $\theta_{\text{TCSC}}$  são sintetizados através dos sinais locais de corrente e tensão medidos nos equipamentos. A utilização destes sinais substitui de forma aproximada os sinais de velocidade dos geradores das áreas remotas.

### 5.1.2 – Resultados Numéricos

O processo de ajuste foi baseado no projeto convencional de controladores tendo por base a condição SFND. A constante de tempo do filtro “washout” foi considerada  $T_w = 10\text{s}$ . Foi considerado uma estrutura com 2 blocos de avanço-atraso para ambos estabilizadores. Os valores dos parâmetros do controlador projetado para condição nominal descrita na Tabela 5.1 são:

$$\mathbf{K}_{\text{svc}} = 0,3 \quad \alpha_{\text{svc}} = 5,0 \quad \omega_{\text{svc}} = 0,6 \text{ Hz} \quad (5.4)$$

$$\mathbf{K}_{\text{TCSC}} = 0,8 \quad \alpha_{\text{TCSC}} = 5,0 \quad \omega_{\text{TCSC}} = 1,21 \text{ Hz} \quad (5.5)$$

Os limites dos parâmetros de controle para o AG foram:

$$5,0 \leq \mathbf{K}_{ii} \leq 5,0 \quad (5.6)$$

$$0,1 \leq \alpha_i \leq 10,0 \quad (5.7)$$

Não foi considerado para a frequência um intervalo, mas apenas o valor fixo mostrado nas expressões 5.4 e 5.5.

O valor mínimo da taxa de amortecimento considerada aceitável em qualquer das condições de operação foi de 9,0 %. Os sinais estabilizadores para o controlador do SVC e do TCSC são obtidos do módulo do ângulo da tensão terminal no SVC ( $|\theta_{\text{svc}}|$ ) e do módulo do ângulo da corrente no TCSC ( $|\theta_{\text{TCSC}}|$ ). O parâmetro  $\beta$  usado na definição da função de adequabilidade, inicialmente, teve os seguintes valores:

$$\beta_1 = 0,0 \quad \text{Se } (\zeta_j)_i \leq 0.0 \quad (\text{condição instável}) \quad (5.8)$$

$$\beta_2 = 10,0 \quad \text{Se } (\zeta_j)_i \geq 0.0 \quad (\text{condição estável}) \quad (5.9)$$

Esta forma de classificação dos resultados obtidos pelo AG, em geral, leva à obtenção de soluções locais, porque só considera duas condições: estável e instável. Por outro lado, torna-se difícil o AG discernir as melhores soluções. Dependendo do método de seleção usado, pode não ser obtida uma solução de melhor desempenho para o sistema. Um exemplo é a seleção pelo método da roleta onde a escolha dos indivíduos é proporcional à sua adequabilidade. Devido a quantidade de indivíduos usada na população inicial, a maioria deles ou todos podem corresponder a soluções instáveis  $\beta_1=0,0$ . Se existir indivíduos com adequabilidade  $\beta_2=10,0$  os indivíduos selecionados para cruzamento terão todos um valor de adequabilidade igual a **10,0**. As soluções com  $\beta_1=0,0$  serão prontamente eliminadas, não contribuindo com seus “*building blocks*”. Um efeito sobre a população poderá ser a estagnação em um ponto. A partir deste instante o AG não poderá discernir dentre os indivíduos aquele de melhor adequabilidade. Todos indivíduos estáveis, com qualquer taxa de amortecimento, estarão sendo classificados com o mesmo valor. Significando que soluções com baixa taxa de amortecimento, terão o mesmo grau de influência daquelas com amortecimento elevado. Este resultado indica que, qualquer ajuste é satisfatório, o que não é verdade. Se usado o mesmo método de seleção e apenas existir soluções  $\beta_1=0,0$ , a solução escolhida será a primeira do conjunto. A nova população criada será este indivíduo repetido tantas vezes quanto for o tamanho da população. Uma forma de minimizar esse problema foi criar outros intervalos para classificação. Cada intervalo de taxa de amortecimento teria um determinado valor  $\beta_i$ . Portanto, haveria maior flexibilidade e melhor direcionamento da busca efetuada pelo AG. Haveria um melhor discernimento entre os níveis de amortecimento das soluções ao longo da busca. Então, os intervalos

de taxa de amortecimento criados, com seus respectivos valores de avaliação, para essa aplicação foram:

$$\begin{aligned}
 \beta_0 &= 0,0 && \text{Se qualquer } (\zeta_j)_i \leq 0,0 && \text{( condição instável )} \\
 \beta_1 &= 10,0 && \text{Se todos } (\zeta_j)_i > 0,0 \text{ e se qualquer } (\zeta_j)_i \leq 0,01 \\
 \beta_2 &= 20,0 && \text{Se todos } (\zeta_j)_i > 0,01 \text{ e se qualquer } (\zeta_j)_i \leq 0,02 \\
 &\vdots && && \\
 \beta_9 &= 90,0 && \text{Se todos } (\zeta_j)_i > 0,08 \text{ e se qualquer } (\zeta_j)_i \leq 0,09 \\
 F &= \sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^m \zeta_j)_i && \text{Se todos } (\zeta_j)_i > 0,09
 \end{aligned} \tag{5.8}$$

Com esta função de adequabilidade, o AG continuou convergindo algumas vezes para soluções locais ou demorava para obter a melhor solução. Pensou-se, então, num procedimento que pudesse melhorar o desempenho do AG e obter redução do tempo de processamento. A solução foi criar, quando da formação da população inicial, um conjunto de indivíduos com adequabilidade acima de um valor pré-determinado. Após a criação deste conjunto, os demais indivíduos seriam criados, pseudo-aleatoriamente até completar a população. Esse método mostrou ser satisfatório para a finalidade a que se propunha. Uma redução do tempo total de processamento e melhor desempenho do AG foi obtido, no que se refere a obtenção de soluções locais. A princípio parece que o tempo despendido para encontrar estes indivíduos aumentará o tempo total de simulação. Porém isto não se verificou pelo fato desses novos indivíduos possuírem “*building blocks*” desejáveis acarretando a aceleração do processo de convergência. Este procedimento foi denominado de pré-aquecimento [27]. Foi observado que, dependendo da semente do gerador de números pseudo-aleatórios, maior tempo poderá ser despendido para obter este conjunto de indivíduos. A compensação estaria no tempo total de processamento, que será reduzido. Este efeito é devido ao conjunto inicial de indivíduos e aqueles que por ventura forem gerados após o pré-aquecimento, conterem blocos construtores (“*buiding blocks*”) componentes da solução ótima. Foi observado que, existe um compromisso entre o tamanho do conjunto inicial de indivíduos e o tempo total de processamento para obtenção da melhor solução. O tamanho deste

conjunto foi determinado empiricamente, a quantidade que se mostrou mais adequado foi de 7 indivíduos. Esta quantidade está relacionada ao tamanho da população.

Várias versões do AG foram testadas, usando diferentes esquemas de seleção, de tipos de cruzamento e de mutação. Os melhores resultados foram obtidos utilizando o método de seleção pelo torneio, cruzamento uniforme, uma estratégia elitista e taxa de mutação variável exponencialmente, além do pré-aquecimento. Os parâmetros utilizados no AG foram os seguintes:

- Representação das variáveis no cromossomo: em binário
- Tamanho da população: 100 indivíduos
- Tamanho da variável representada no cromossomo: 20 *bits*
- Tamanho do cromossomo: 80 *bits*
- Taxa de cruzamento: 0,60 (probabilidade de ocorrer ou não o cruzamento)
- Taxa de cruzamento uniforme: 0,4 (probabilidade de serem trocados os *bits* da posição escolhida de cada indivíduo);
- Taxa de mutação (variação exponencial): 0,004 (inicial) e 0,001 (final);
- Número de variáveis no cromossomo: 4;
- Número máximo de gerações: 40;
- Número de indivíduos no pré-aquecimento: 7;
- Número de indivíduos no torneio: 3;

As frequências para as quais os controladores foram ajustados são: 0,6 Hz para o controlador do SVC e 1,21 Hz para o controlador do TCSC. Estes valores foram obtidos de uma análise modal onde foram identificados os modos de oscilação que são influenciados por esses equipamentos.

Diversas simulações utilizando sementes diferentes no gerador de números pseudo-aleatórios foram executadas. Foram obtidos controladores levemente diferentes uns dos outros. Uma amostra de algum desses resultados está na Tabela 5. 2.

O ajuste denominado nominal na Tabela 5.2, foi obtido unicamente utilizando-se técnicas de controle clássico.

Tabela 5. 2 – Parâmetros dos controladores obtidos em várias simulações.

| Ajustes Obtidos | SVC  |          | TCSC |          |
|-----------------|------|----------|------|----------|
|                 | K    | $\alpha$ | K    | $\alpha$ |
| Nominal         | 0,3  | 5,00     | 0,80 | 5,00     |
| A1              | 0,98 | 1,87     | 2,80 | 4,06     |
| A2              | 0,86 | 1,89     | 3,25 | 3,91     |
| A3              | 0,88 | 1,95     | 2,81 | 3,86     |
| A4              | 1,14 | 1,94     | 1,85 | 5,05     |

A

Tabela 5. 3 mostra a taxa de amortecimento dos Modos 1 e 2, quando são usados o ajuste nominal e os ajustes apresentados na Tabela 5. 2.

Tabela 5. 3 – Taxa de amortecimento dos Modos 1 e 2 para as condições de operação nominal e as calculadas pelo AG.

| Ajustes Obtidos | SFND $\zeta(\%)$ |       | SFNR $\zeta(\%)$ |       | CS1 $\zeta(\%)$ |       | CS2 $\zeta(\%)$ |       | CS3 $\zeta(\%)$ |      |
|-----------------|------------------|-------|------------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|------|
|                 | Mod1             | Mod2  | Mod1             | Mod2  | Mod1            | Mod2  | Mod1            | Mod2  | Mod1            | Mod2 |
| Nominal         | 12,11            | 10,91 | 14,02            | 3,19  | 0,99            | 11,10 | 12,94           | 31,03 | 18,70           | 8,08 |
| A1              | 11,62            | 16,00 | 12,01            | 12,36 | 11,94           | 17,66 | 27,77           | 28,87 | 14,07           | 9,01 |
| A2              | 11,44            | 17,36 | 10,80            | 13,81 | 10,28           | 19,09 | 25,09           | 26,26 | 12,21           | 9,09 |
| A3              | 11,43            | 15,56 | 11,89            | 11,65 | 10,65           | 17,11 | 26,02           | 28,60 | 13,95           | 9,01 |
| A4              | 12,24            | 14,02 | 15,19            | 9,64  | 15,13           | 15,74 | 33,33           | 49,88 | 18,84           | 9,01 |

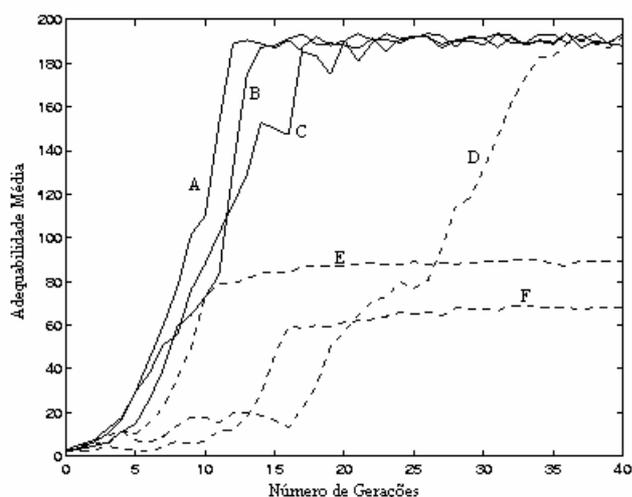


Figura 5. 2 – Desempenho dos AGs. Linhas tracejadas: AG simples e linhas sólidas: AG modificado.

Na Figura 5. 2, as curvas A, B e C do AG com as modificações relatadas nesse trabalho e do AG simples descrito em [6] curvas D, E e F, mostram o desempenho do AG nesta aplicação. Nesta figura as seis curvas mostradas são os resultados dos AGs para três sementes diferentes no gerador de números pseudo-aleatórios. Os pares de curvas A-E, B-D e C-F tem a mesma semente no gerador de números pseudo-aleatório. As curvas A, B e C mostram um melhor desempenho do AG modificado onde é obtida a melhor solução para todas sementes do gerador de números. As curvas D, E e F mostram que apenas a melhor solução é obtida com uma das sementes ( curva D ), porém com maior tempo do que o AG modificado. Estas curvas correspondem, respectivamente, aos ajustes A1, A2, A3 e A4 mostrados na Tabela 5. 2 e na Tabela 5.3 são mostradas as taxas de amortecimento obtidas para os modos de oscilação 1 e 2 para cada um desses ajustes.

O cálculo das matrizes do modelo de espaço de estados, definido no Capítulo 2, foi executado pelo programa PacDyn [31] e consideradas como dados de entrada do AG.

### **5.1.3 – Observações de Caráter Geral**

A experiência com o AG usado no problema de ajustes de controladores do sistemas de potência utilizado nesta etapa do trabalho, mostrou que o AG tem um potencial grande a ser explorado para este tipo de aplicação. Os resultados mostraram uma característica robusta e outras que são relacionadas a seguir.

#### **5.1.3.1 – Efetividade do Método**

O AG aplicado em ajuste de controladores, usando o procedimento de inicialização, descrito anteriormente, mostrou ser robusto e obteve ajustes para os controladores, satisfazendo o critério de projeto. A execução do AG com diferentes sementes no gerador de números pseudo-aleatório produziu um conjunto diferente de ajustes. Verificou-se que eles estão dentro de uma região relativamente pequena do espaço de busca, indicando que os resultados devem estar próximos da solução ótima global. Neste primeiro teste verificou-se que se a população inicial não contivesse qualquer ajuste estável, o AG poderia convergir, freqüentemente, para solução local. O tempo total de processamento para obtenção da solução ótima pode aumentar. Como

pode ser visto na Figura 5. 2, o AG modificado apresenta um desempenho de convergência mais robusto do que o AG simples. Nas simulações feitas o algoritmo modificado sempre encontrou uma solução que satisfazia o critério de projeto. Além disso ele alcançou a melhor solução mais rapidamente do que o algoritmo simples.

#### 5.1.3.2 – Desempenho dos Controladores

O processo de ajuste é feito, simultaneamente, para vários pontos de operação. Na

Tabela 5. 3 pode ser visto que os controladores ajustados tem um desempenho satisfatório dentro do critério de amortecimento mínimo desejado. Pode ser verificado também que o Modo 2 na condição CS3 mostrou ser a condição limitante do sistema. Esta condição é limitante dentro das características especificadas para o projeto, porque mesmo variando os parâmetros do AG, não é obtida solução com maior amortecimento.

#### 5.1.3.3 – Requisitos Computacionais

O tempo de simulação do AG foi considerado adequado para um estudo de projeto. Nesse primeiro trabalho foi usada uma estação de trabalho DEC5000 modelo 260. O tempo médio total para execução do AG foi cerca de 55 minutos, onde 14 minutos foram despendidos no processo de inicialização com 7 indivíduos satisfazendo o critério de estabilidade. Conforme pode ser observado na Figura 5. 3, a obtenção da melhor solução com o AG modificado se deu de modo geral em torno de 20 gerações. Significando que, um método de parada mais elaborado pode reduzir o tempo computacional.

Os resultados deste primeiro sistema geraram um método robusto para o ajuste dos estabilizadores de um sistema de potência usando AG. Os resultados indicaram que o método é efetivo para encontrar soluções para o problema de ajustes com aceitável esforço computacional. Estes resultados estimularam a aplicação num sistema de maior porte como mostrado a seguir.

## 5.2 – RESULTADOS DO PROJETO DE ESTABILIZAÇÃO DAS MÁQUINAS DO SISTEMA NEW ENGLAND

Neste teste o objetivo foi projetar os estabilizadores para 9 máquinas, para obter a maior taxa de amortecimento possível em 14 condições de operação pré-selecionadas.

### 5.2.1 – Características do Sistema

O sistema de potência New England é um sistema teste bastante conhecido, consistindo de 9 máquinas síncronas e 39 barras. Seu diagrama unifilar (Figura 5. 3) e dados podem ser encontrados em [12]. Nesse sistema teste, todas unidades geradoras são consideradas passíveis de terem estabilizadores, exceto a máquina da barra 39, que foi modelada como uma barra infinita. O sinal de velocidade do eixo do gerador foi escolhido como o sinal de realimentação. Ressalta-se que outros sinais ou combinações de sinais poderiam ter sido empregados nessa aplicação. Todas as cargas ativas e reativas foram representadas por modelos de impedância constante. O sistema de excitação é representado por excitatriz rotativa. O modelo de máquina usado é o modelo 6, denominação no PacDyn [31] para todas as máquinas.

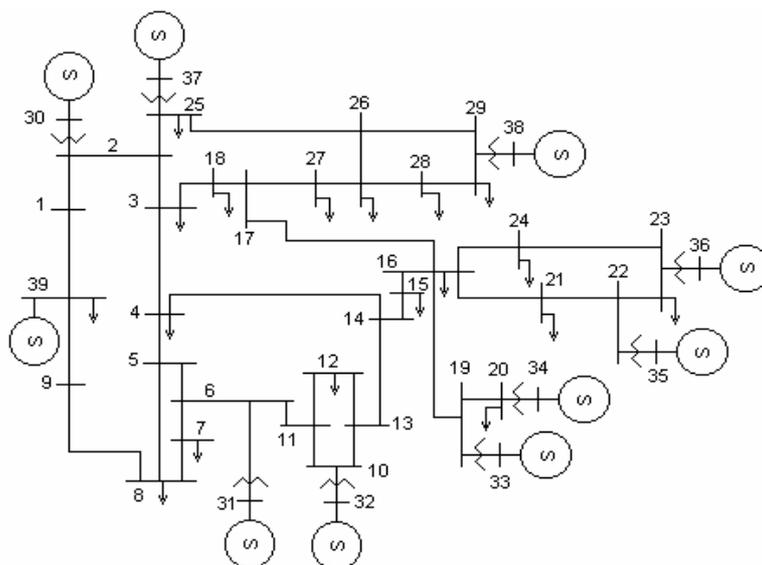


Figura 5. 3 – Diagrama Unifilar do Sistema New England.

A Tabela 5.4 mostra as configurações do sistema para as 14 condições operativas pré-selecionadas, em malha aberta, onde sete delas são iguais às condições de operação usadas em [13].

Tabela 5.4 – Condições de operação em malha aberta.

| Condições | Configurações   |
|-----------|---|
| 1         | Caso Base   |
| 2         | Linhas 3-18 e 25-26 desligadas  |
| 3         | Linhas 17-16 e 4-14 desligadas  |
| 4         | Linha 6-11 desligada  |
| 5         | 1200 MW de aumento de carga com a barra de referência assumindo a variação. |
| 6         | Linhas 16-17, 4-14, e 25-26 desligadas                                      |
| 7         | Linhas 16-17, 4-14, 25-26 e 1-39 desligadas                                 |
| 8         | Linha 21-22 desligada   |
| 9         | Linha 9-39 desligada  |
| 10        | Redução de 30% de carga   |
| 11        | Aumento de 15% de carga   |
| 12        | Aumento de 20% de carga   |
| 13        | Redução de 20% de carga   |
| 14        | Aumento de 50% de carga nas barras 16 e 21 e a linha 21-22 desligada        |

### 5.2.2 – Aplicação do Algoritmo Genético, Parâmetros e Métodos Desenvolvidos

No procedimento dos ajustes, a constante de tempo do filtro “washout” considerada foi  $T_w = 5s$ . Como as máquinas deste sistema originalmente não tem estabilizadores, uma estimativa inicial para o intervalo no qual está contido os valores do ganho foi considerada. O intervalo onde está contido os valores do ganho é mostrado a seguir.

$$0,0 \leq K_{ii} \leq 100,0 \quad (5.10)$$

Além disso, considerou-se também a frequência como um parâmetro a ser calculado pelo AG. O intervalo considerado foi o espectro eletromecânico.

$$1,25 \leq \omega_{ii} \leq 12,56 \text{ rd/s} \quad (5.11)$$

Para o parâmetro  $\alpha$  que está relacionado à compensação de fase de cada bloco avanço-atraso, considerou-se os seguintes limites:

$$0,1 \leq \alpha_{ii} \leq 10,0 \quad (5.12)$$

Na avaliação do desempenho dinâmico do sistema foi considerado um compensador com dois ou três blocos de avanço-atraso.

Na função de adequabilidade foi considerado um intervalo de taxa de amortecimento onde soluções instáveis tiveram um peso não nulo no conjunto de soluções iniciais pré-selecionadas. Essa consideração tem a finalidade de reduzir o tempo de formação do conjunto inicial e, conseqüentemente, o tempo total de processamento. Um outro fato benéfico para o AG seria, ao considerar soluções inviáveis (instáveis) próximas da fronteira viável (amortecimento positivo), essas soluções contribuiriam com blocos construtores bons contidos na solução ótima (teorema dos esquemata [6]). Estas soluções, se levadas em consideração, podem contribuir de forma satisfatória para o desempenho do AG. A função de adequabilidade usada é definida como:

|                      |             |                          |                                       |
|----------------------|-------------|--------------------------|---------------------------------------|
| $\beta_0 = 0,0$      | Se qualquer | $(\zeta_j)_i \leq -0,15$ | ( condição instável )                 |
| $\beta_1 = 2,0$      | Se todos    | $(\zeta_j)_i > -0,15$    | e se qualquer $(\zeta_j)_i \leq 0,0$  |
| $\beta_2 = 10,0$     | Se todos    | $(\zeta_j)_i > 0,0$      | e se qualquer $(\zeta_j)_i \leq 0,01$ |
| $\beta_3 = 20,0$     | Se todos    | $(\zeta_j)_i > 0,01$     | e se qualquer $(\zeta_j)_i \leq 0,02$ |
| :                    | :           | :                        | :                                     |
| $\beta_{15} = 150,0$ | Se todos    | $(\zeta_j)_i > 0,14$     | e se qualquer $(\zeta_j)_i \leq 0,15$ |
| <b>F</b>             | Se todos    | $(\zeta_j)_i > 0,15$     |                                       |

Os parâmetros do AG utilizados neste sistema foram:

- Representação das variáveis no cromossomo: binária;
- Tamanho da população: 250 indivíduos (soluções);
- Tamanho da variável representada no cromossomo: 20 *bits*;
- Tamanho do cromossomo: 540 *bits*;
- Taxa de cruzamento: 0,70 (probabilidade de ocorrer ou não o cruzamento);
- Taxa de cruzamento uniforme: 0,4 (probabilidade de serem trocados os *bits* da posição escolhida de ambos indivíduos);
- Taxa de mutação (variação exponencial): 0,004 (inicial) e 0,001 (final);
- Número de variáveis no cromossomo: 27;

- Número máximo de gerações a cada variação dinâmica da região de busca: redução 5 e deslocamento e expansão 10;
- Número de indivíduos no pré-aquecimento: 7;
- Número de indivíduos no torneio: 3;

Foi também considerada a variação dinâmica dos limites das variáveis e o pré-aquecimento.

### 5.2.3 – Resultados Numéricos

A Figura 5. 4 mostra o mapeamento dos pólos em malha aberta para as 14 condições de operação descritas na Tabela 5.4 e as respectivas linhas do lugar geométrico das taxas de amortecimento constantes, para 5%, 10% e 15%. Foram considerados nos ajustes dos estabilizadores dois ou três blocos de avanço-atraso. Pode ser visto na Tabela 5.5 e 5.7 que a compensação de fase obtida é em avanço.

Considerando dois blocos de avanço-atraso na estrutura dos estabilizadores, o resultado obtido pelo AG (Figura 5. 5), mostra que para algumas condições de operação, a taxa de amortecimento mínima especificada 15% ( $\beta_{15}=150$ ) não foi alcançada. Pode também ser verificado que modos locais foram deslocados para frequências mais elevadas do que as de malha aberta. Isso ocorre frequentemente devido a falta de compensação em avanço. Considerando a estrutura do controlador com três blocos de avanço-atraso, os fatos relatados anteriormente não mais ocorreram. A taxa de amortecimento mínimo especificada de 15% foi alcançada em todas as 14 condições de operação, como mostrado na Figura 5. 6.

Na Tabela 5.5 são apresentados os parâmetros encontrados pelo AG para uma estrutura com dois blocos de avanço-atraso. Pode ser verificado que a maioria dos valores de  $\alpha$  estão próximos ao limite superior, o que indica a necessidade de mais compensação de fase em avanço, como previamente mencionado. A Tabela 5.7 mostra os valores dos parâmetros para uma estrutura com três blocos de avanço-atraso que seriam a melhor solução do problema citado anteriormente. Pode ser verificado que os valores do parâmetro  $\alpha$  na maioria dos controladores foram reduzidos. Indicativo de aumento da compensação de fase e de redução da frequência dos modos, que tiveram suas frequências majoradas no caso das estruturas com dois blocos de avanço-atraso.

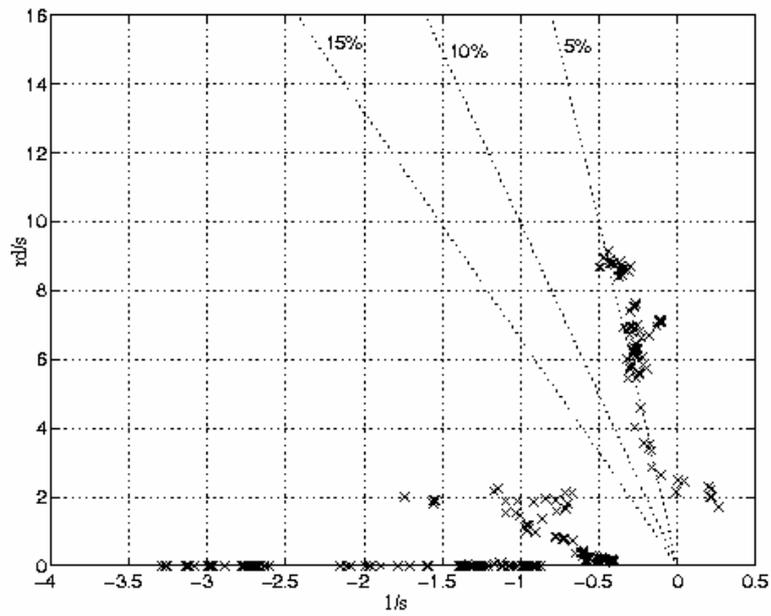


Figura 5. 4 - Autovalores do sistema em malha aberta.

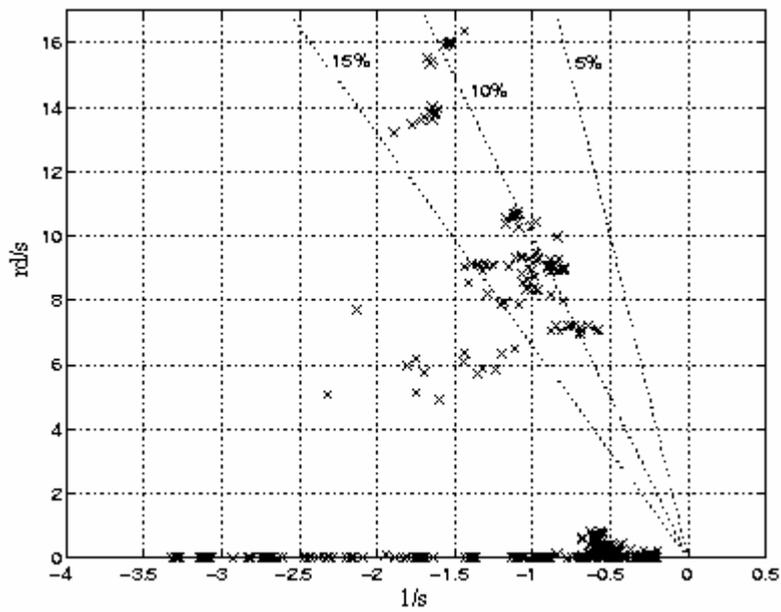


Figura 5. 5 - Autovalores do sistema em malha fechada com dois blocos de avanço-atraso.

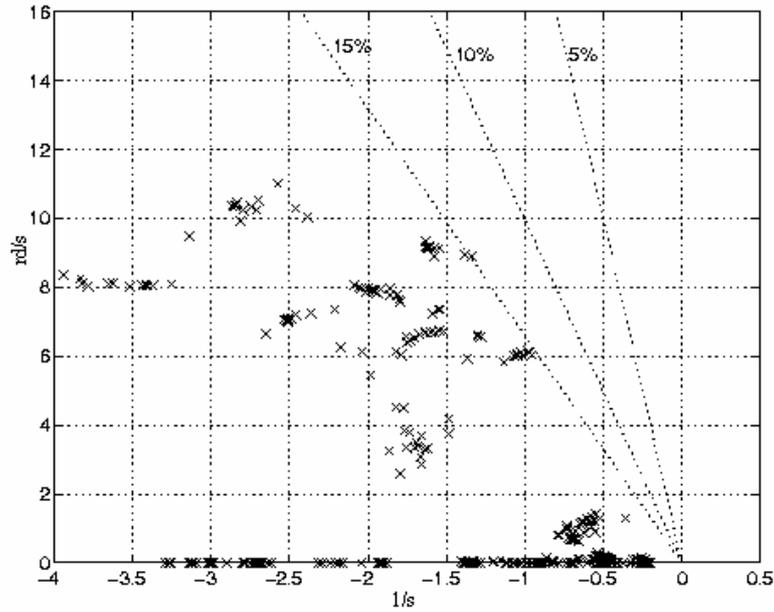


Figura 5. 6 - Autovalores do sistema em malha fechada com três blocos de avanço-atraso.

Tabela 5. 5 – Parâmetros dos estabilizadores com dois blocos de avanço-atraso.

| Gerador | K      | $\alpha$ | $\omega$ |
|---------|--------|----------|----------|
| 30      | 189,50 | 9,9      | 7,2      |
| 31      | 68,70  | 9,8      | 6,7      |
| 32      | 0,50   | 8,8      | 11,5     |
| 33      | 3,44   | 1,5      | 9,8      |
| 34      | 27,90  | 9,1      | 7,6      |
| 35      | 78,55  | 9,9      | 6,6      |
| 36      | 96,60  | 9,5      | 11,5     |
| 37      | 113,30 | 8,8      | 8,3      |
| 38      | 147,40 | 9,9      | 10,5     |

Tabela 5. 6 – Parâmetros dos estabilizadores com três blocos de avanço-atraso.

| Gerador | K    | $\alpha$ | $\omega$ |
|---------|------|----------|----------|
| 30      | 97,3 | 7,6      | 6,3      |
| 31      | 65,0 | 8,9      | 12,5     |
| 32      | 79,2 | 9,2      | 11,2     |
| 33      | 38,0 | 9,8      | 12,2     |
| 34      | 4,8  | 5,4      | 8,8      |
| 35      | 96,7 | 5,5      | 9,8      |
| 36      | 39,3 | 5,7      | 10,6     |
| 37      | 74,5 | 8,3      | 10,4     |
| 38      | 33,7 | 7,9      | 11,6     |

#### **5.2.4 – Requisitos Computacionais**

A execução dos ajustes coordenado dos estabilizadores foi feita usando um nó de um computador IBM RS6000SP, que é equivalente a uma estação IBM RS6000 modelo 590, usando o programa codificado em FORTRAN 90. O tempo de CPU despendido para uma geração foi de aproximadamente 12 minutos em média. A maior parte desse tempo é gasta na solução do algoritmo QR (250 x 14 soluções completas de autovalores de uma matriz de ordem 89) [16].

### **5.3 – RESULTADOS DOS TESTES PARA AJUSTES DE ESTABILIZADORES DAS MÁQUINAS DO SISTEMA SUL/SUDESTE BRASILEIRO**

Nesse teste o objetivo foi ajustar 22 estabilizadores para a maior taxa de amortecimento possível em três condições de operação pré-selecionadas. Como o problema nesse caso é mais complexo e o método de cálculo dos autovalores usado é o QR, o tempo total despendido nas simulações é elevado. Portanto, foram usadas apenas três condições de operação que caracterizam o sistema nas cargas pesada, média e leve.

#### **5.3.1 – Características do Sistema**

O sistema usado para aplicação do método de ajuste através do AG é um equivalente do Sistema de Potência Sul/Sudeste Brasileiro. Este equivalente compreende 1762 barras, 2515 linhas e transformadores e 57 máquinas síncronas. Todas as máquinas são representadas por modelos que consideram os efeitos subtransitórios e, todos os RAT's das máquinas que tem estabilizadores foram modelados com estruturas semelhantes, consistindo de um ganho elevado e uma pequena constante de tempo. Os reguladores de velocidade não foram representados nas simulações frente a pequenas perturbações. O sistema contém um elo CC que não foi dinamicamente representado. As cargas ativas foram modeladas com um percentual de corrente constante e impedância constante, que variam de acordo com as características das cargas das áreas consideradas. Se residencial 75% e 25% , se industrial 50% e 50% no Sudeste e 40% e 60% no Sul, respectivamente, impedância constante e potência constante. As cargas reativas foram modeladas com 100% de impedância constante. A representação de espaço de estado em malha aberta do sistema tem 384 variáveis de estado. A Figura 5. 7

descreve de maneira geral o sistema explicitando o complexo de geração de Itaipu. A Tabela 5. 7 apresenta as condições de fluxo de potência e a Tabela 5. 8 mostra a geração total das regiões nos três cenários selecionados.

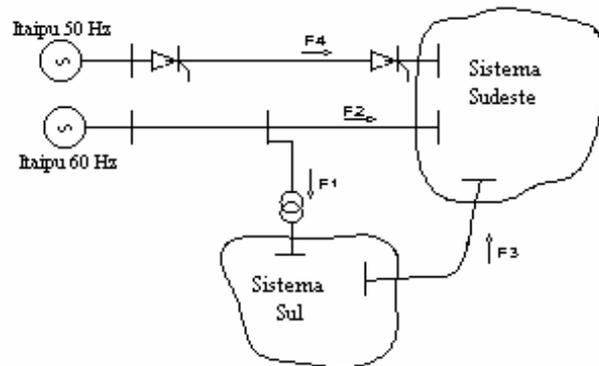


Figura 5. 7 – Sistema Sul/Sudeste equivalente.

Tabela 5. 7 – Condições de fluxo de potência do Sistema Sul/Sudeste. Os cenários 1, 2 e 3 correspondem, respectivamente, às cargas pesada, média e leve.

| Cenários | F1 (MW) | F2 (MW) | F3 (MW) | F4 (MW) |
|----------|---------|---------|---------|---------|
| 1        | 1260    | 4100    | 142     | 5122    |
| 2        | 744     | 4526    | 181     | 5214    |
| 3        | 321     | 4370    | 192     | 4000    |

Tabela 5. 8 – Valor de geração nas regiões Sul, Sudeste e Itaipu.

| Cenários | SE (MW) | S (MW) | Itaipu (MW) |
|----------|---------|--------|-------------|
| 1        | 21750   | 6400   | 10600       |
| 2        | 17300   | 6300   | 10600       |
| 3        | 11600   | 4000   | 8800        |

O objetivo é coordenar o ajuste de 22 estabilizadores que tem como sinal estabilizador a velocidade do rotor cuja estrutura é dada pela expressão (2.21). Um estabilizador com dois blocos de avanço-atraso ( $l=2$ ), foi escolhido, baseado nas estruturas existentes no banco de dados de estabilidade. A representação de espaço de estado em malha fechada tem 450 variáveis de estado.

### 5.3.2 – Aplicação do Algoritmo Genético

A representação binária das variáveis nos cromossomos foi inicialmente testada. Considerando a estrutura do estabilizador com dois blocos de avanço-atraso tem-se um espaço de busca de dimensão 66 (3 parâmetros x 22 estabilizadores). Na representação binária cada variável tem 20 *bits*, o tamanho dos cromossomos seria de 1320 *bits*. Numa população de 100 indivíduos esses cromossomos trariam um problema relativo ao dispêndio de tempo para obtenção da solução, provocado pelo grande número de recombinações e de mutações necessárias para alcançar a melhor solução. Também o AG poderia convergir para soluções locais com maior frequência.

Uma forma de superar esse problema foi a implementação de novo tipo de representação e novo método de mutação no AG. A representação da variável no cromossomo passou a ser através de números reais ao invés da representação binária. A população é obtida pseudo-aleatoriamente de acordo com os limites especificados para cada variável. O resultado foi um cromossomo de tamanho igual ao número de parâmetros representados na estrutura cromossômica, no caso 66, reduzindo assim o número de recombinações necessárias para obter a melhor solução. Um dos benefícios dessa representação está na precisão dos valores das variáveis, que passa a depender diretamente do tipo de computador que está sendo utilizado, não mais do tamanho do cromossomo.

Um novo método de mutação teve que ser implementado por causa desse tipo de representação. Essa mutação substitui o valor da posição escolhida por outro gerado pseudo-aleatoriamente, dentro do intervalo associado à variável que corresponde àquela posição. Essa mutação é denominada de mutação uniforme [25], por causa da probabilidade de um valor do intervalo a ser escolhido estar numa distribuição uniforme. Os parâmetros do AG foram os seguintes:

- Representação das variáveis no cromossomo: real;
- Tamanho da população: 80 indivíduos (soluções);
- Tamanho da variável representada no cromossomo: 1 (o próprio valor);
- Tamanho do cromossomo: 66 variáveis;
- Taxa de cruzamento: 0,80 (probabilidade de ocorrer ou não o cruzamento);

- Taxa de cruzamento uniforme: 0,3 (probabilidade de serem trocados os parâmetros da posição escolhida de ambos indivíduos);
- Taxa de mutação (variação exponencial): 0,1 (inicial) e 0,03 (final);
- Número de variáveis no cromossomo: 66;
- Número máximo de gerações a cada variação dinâmica do intervalo: 20;
- Número de indivíduos no pré-aquecimento: 7;
- Número de indivíduos no torneio: 5;

Tabela 5. 9 – Limites dos parâmetros dos controladores.

| Parâmetros | S/SE      |           |
|------------|-----------|-----------|
|            | Lim. Mín. | Lim. Máx. |
| K          | 0,0       | 30,0      |
| $\alpha$   | 0,1       | 10,0      |
| $\omega$   | 1,25      | 12,56     |

A Tabela 5. 9 mostra os limites iniciais dos parâmetros do estabilizador no cromossomo. Os limites dos ganhos são os valores iniciais. Os limites de  $\alpha$  e  $\omega$  são mantidos fixos durante o processo de busca. A função de adequabilidade é a mesma usada para o sistema New England item 5.2.2.

### 5.3.3 – Resultados do Sistema Sul/Sudeste

A Figura 5. 8 mostra os pólos em malha aberta para os três cenários previstos e a Figura 5. 9 mostra os pólos em malha fechada após a aplicação do método de ajuste usando o AG, para os três cenários. Observa-se que existe um modo com valor de taxa de amortecimento próximo à linha de 5% nos três cenários. Mais investigações foram feitas baseada na análise modal [15] que mostraram, que esse modo, corresponde ao modo local das máquinas da usina de Xavantes que não são equipadas com estabilizadores. A deficiência de controlabilidade deste modo do sistema, impede a melhoria do mínimo amortecimento. Essa deficiência é eliminada quando se considera a existência de um estabilizador na máquina de Xavantes. Na Tabela 5. 10 estão relacionados os parâmetros dos controladores calculados pelo AG.

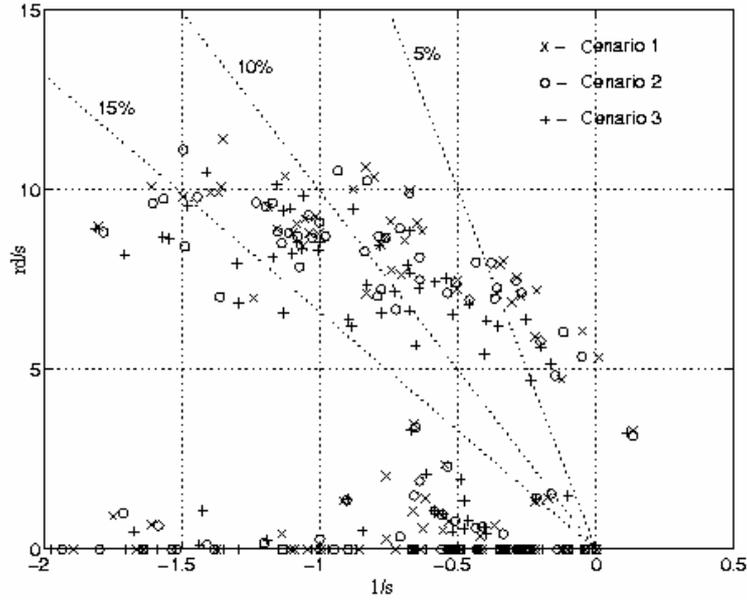


Figura 5. 8 – Autovalores do sistema em malha aberta para os três cenários

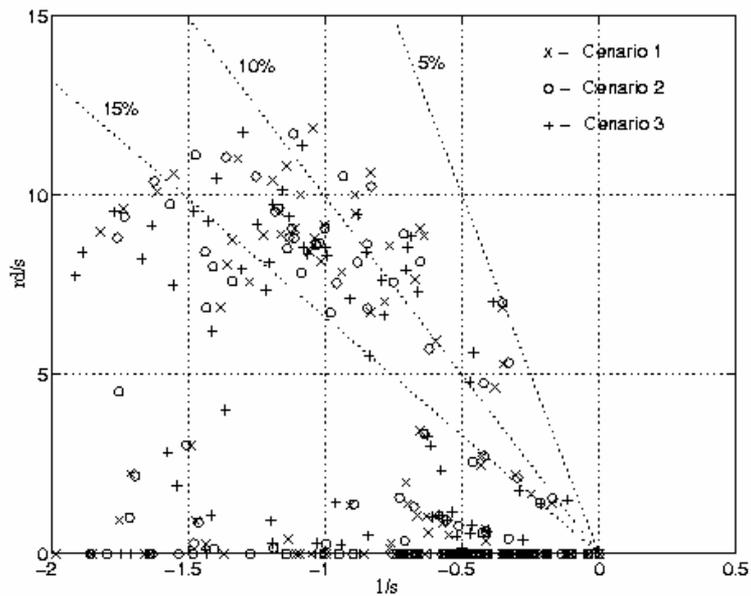


Figura 5. 9 – Autovalores do sistema em malha fechada para os três cenários.

O fato de não se ter obtido um amortecimento mínimo maior foi devido a um zero multivariável, na malha de controle, coincidente com o pólo localizado próximo da linha de amortecimento de 5%. Uma forma de aumentar este amortecimento seria a implementação de um estabilizador nas máquinas desta usina.

Observa-se na Tabela 5. 10 que o valor do parâmetro  $\alpha$  de cada estabilizador não atingiu o limite máximo. Este fato é um indicativo de que não há necessidade de aumentar a compensação de fase, ou seja, não é necessário mais blocos de avanço-

atraso. Experiências também foram feitas utilizando três blocos de avanço-atraso. Nesse caso o AG não obteve soluções iguais ou melhores do que as obtidas com as estruturas de dois blocos avanço-atraso.

Tabela 5. 10 – Parâmetros dos controladores ajustados pelo AG para 2 blocos de avanço-atraso.

| Geradores              | K     | $\alpha$ | $\omega$ |
|------------------------|-------|----------|----------|
| Itumbiara (18)         | 19,54 | 3,03     | 8,84     |
| Marimbondo (20)        | 27,29 | 4,24     | 8,05     |
| Emborcação (300)       | 20,36 | 5,19     | 9,35     |
| Nova Ponte (302)       | 0,26  | 5,68     | 12,22    |
| São Simão (303)        | 10,92 | 4,32     | 3,20     |
| Volta Grande (305)     | 13,53 | 8,80     | 12,35    |
| Água Vermelha (500)    | 14,62 | 8,72     | 4,04     |
| Ilha Solteira (501)    | 11,19 | 8,52     | 2,70     |
| Capivara (507)         | 27,59 | 2,15     | 2,43     |
| Rosana (511)           | 20,80 | 1,67     | 7,22     |
| Taquaruçu (513)        | 11,49 | 1,26     | 7,91     |
| Nova Avanhandava (518) | 1,45  | 9,32     | 5,04     |
| Três Irmãos (520)      | 9,39  | 0,97     | 8,59     |
| G. B. Munhoz (800)     | 24,51 | 0,89     | 4,28     |
| Salto Segredo (810)    | 9,38  | 5,48     | 3,71     |
| Itauba (1158)          | 18,42 | 7,57     | 7,23     |
| Itaipu 60 Hz (1107)    | 3,17  | 4,76     | 11,63    |
| J. Lacerda D (913)     | 13,30 | 1,30     | 10,56    |
| Passo Fundo (917)      | 1,96  | 2,35     | 9,90     |
| Salto Osório 1-4 (919) | 21,48 | 3,04     | 8,96     |
| Salto Osório 5-6 (920) | 14,66 | 1,94     | 5,75     |
| Salto Santiago (925)   | 15,64 | 0,11     | 7,73     |

Para avaliar o comportamento não linear do Sistema Sul/Sudeste com os 22 estabilizadores ajustados pelo AG, simulações no tempo com modelo não linear completo foram executadas usando o programa Anatem [30]. No instante 0,1 s uma falta monofásica foi aplicada na barra de Cachoeira Paulista 500 kV. A falta foi

eliminada em 80 ms através da abertura de uma linha de transmissão Cachoeira Paulista-Adrianópolis 500 kV e permanece fora de serviço. A Figura 5. 10, Figura 5. 11 e Figura 5. 12 mostram o ângulo do rotor do gerador de Itaipu 60 Hz e das máquinas de Nilo Peçanha e Fontes, em relação ao ângulo da barra de Ilha Solteira ( tomada como referência angular ), quando o sistema está operando nos Cenários 1, 2 e 3, respectivamente.

Estes resultados mostraram que o ajuste feito pelo AG foi robusto e foi obtido um desempenho dinâmico satisfatório para os três cenários considerados.

## Carga Pesada

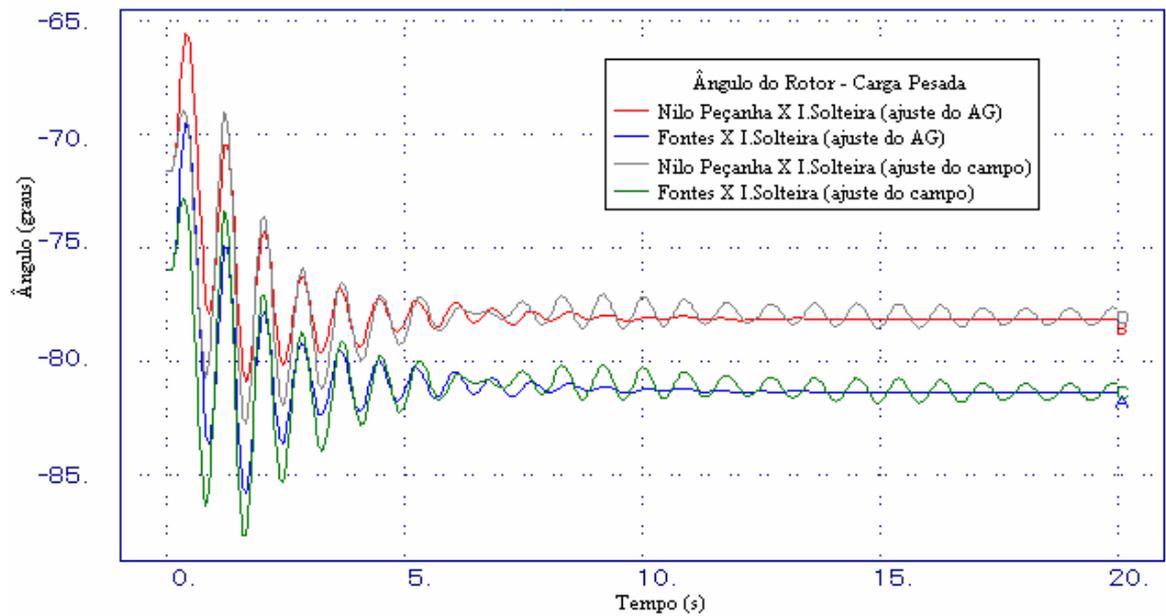
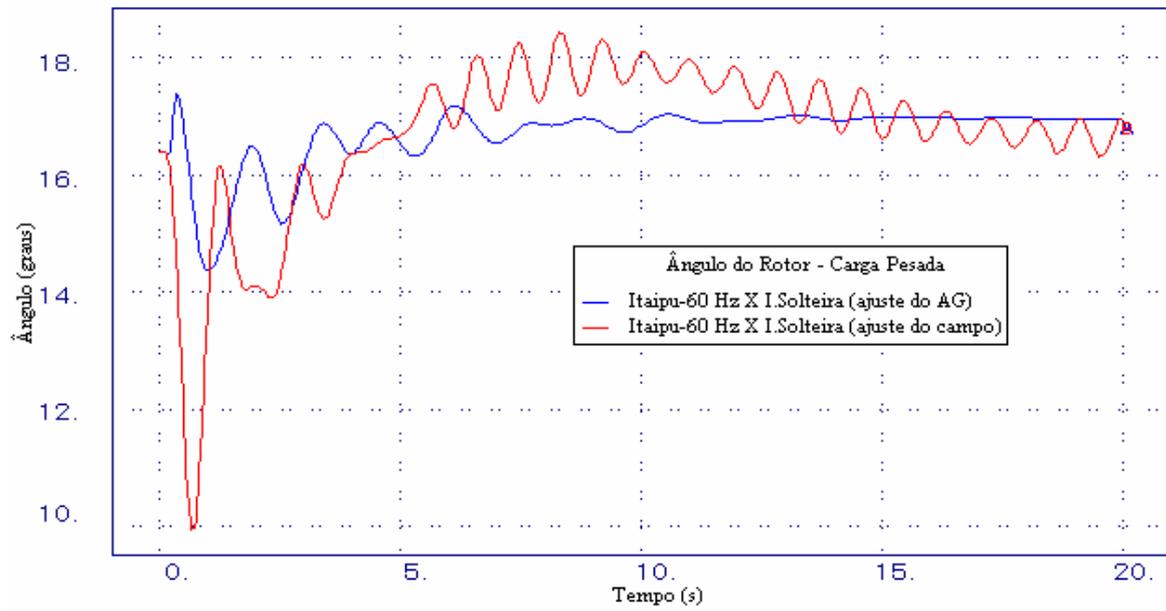


Figura 5. 10 - Simulação não-linear para o Cenário 1.

### Carga Média

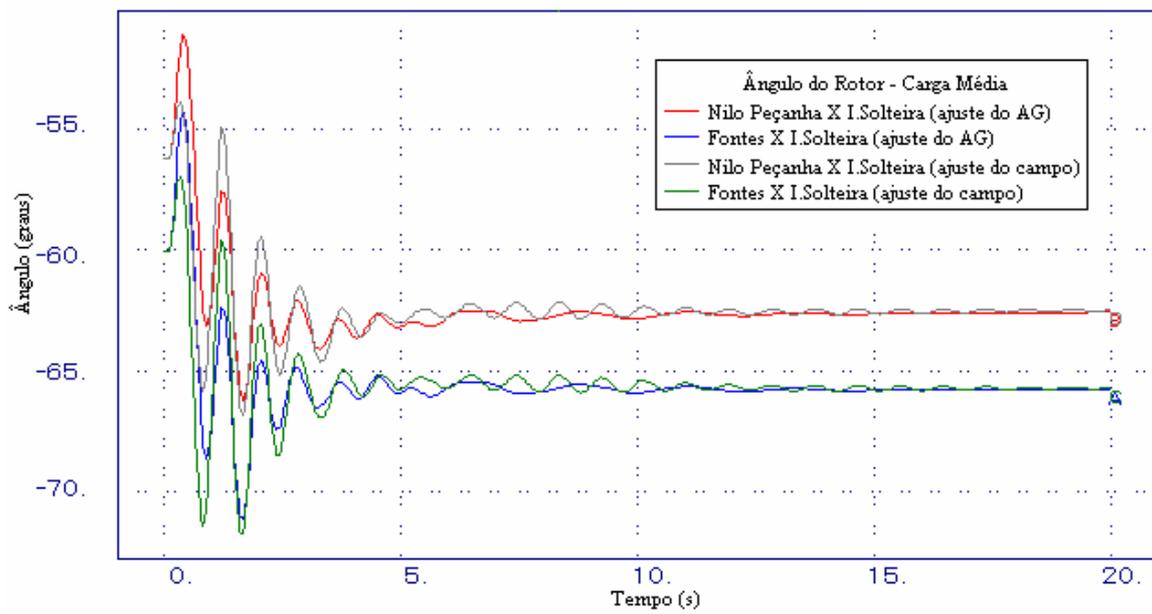
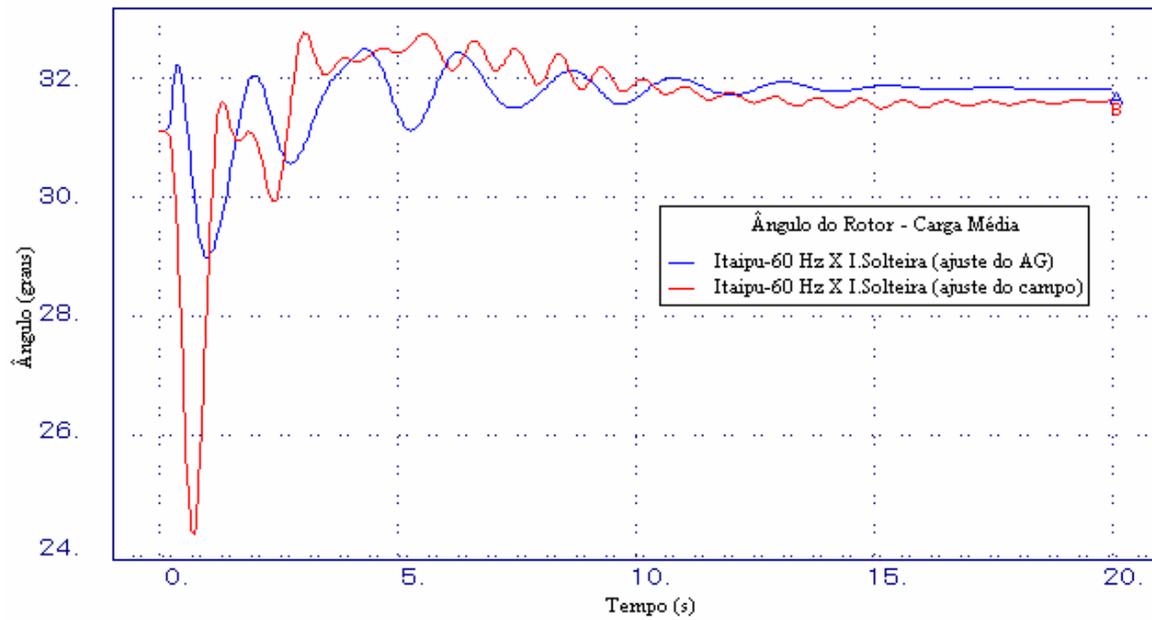


Figura 5. 11 - Simulação não linear para o Cenário 2.

### Carga Leve

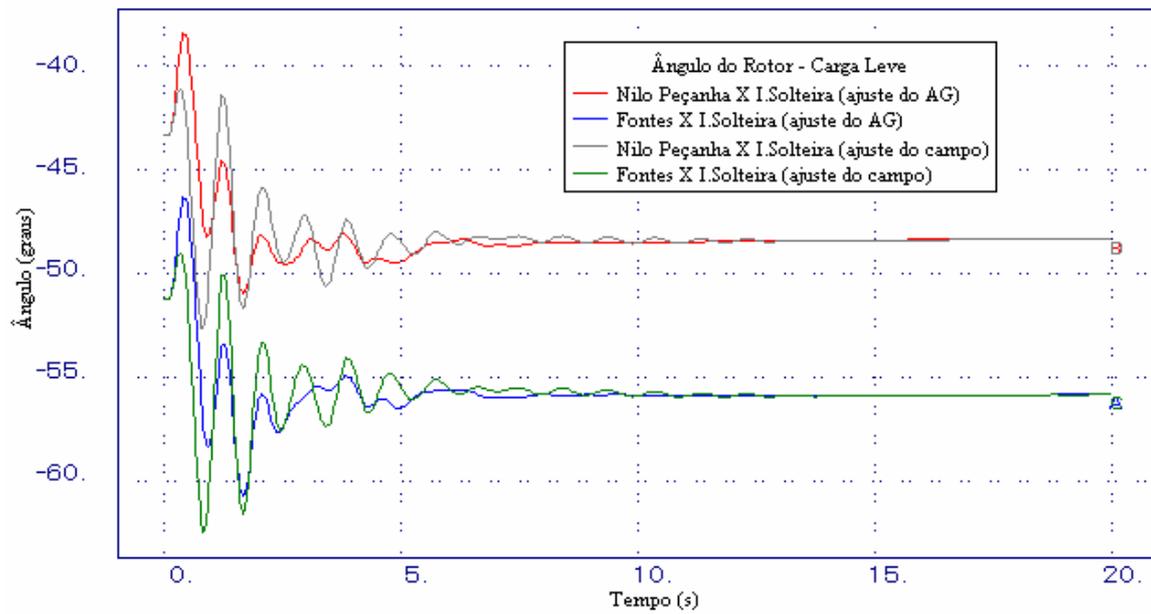
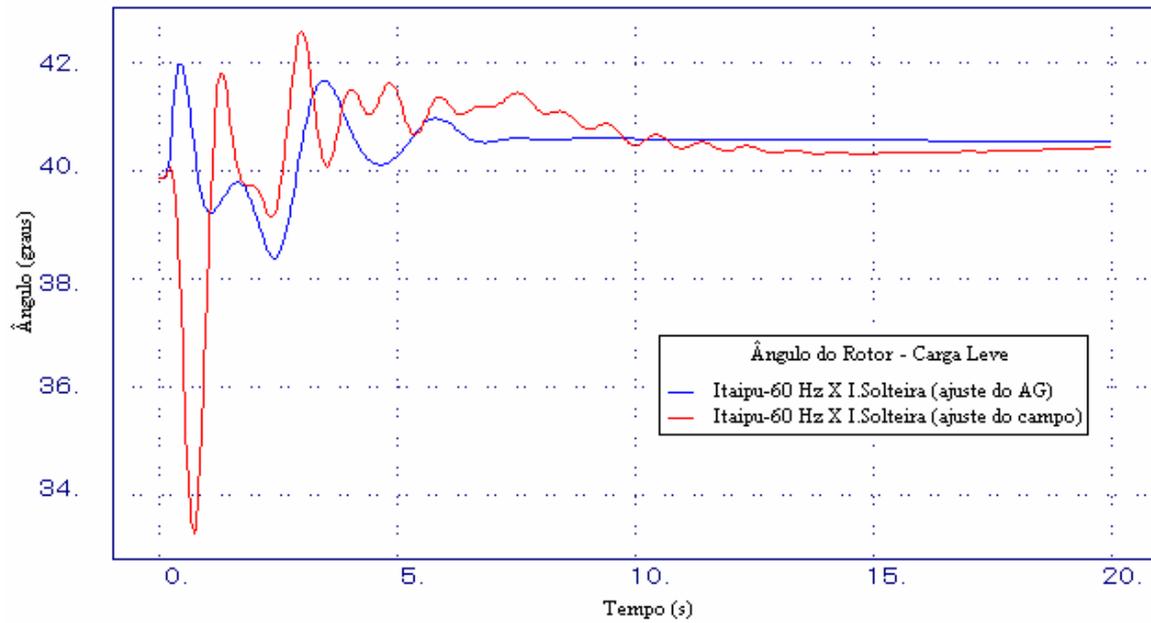


Figura 5. 12 - Simulação não linear para o Cenário 3

### **5.3.4 – Requisitos Computacionais**

O tempo de CPU gasto para cálculo de uma geração é de aproximadamente, uma hora em média o que corresponde ao cálculo dos autovalores, pelo algoritmo QR, de uma matriz de ordem 450, realizado 240 vezes ( 3 cenários x 80 indivíduos ). Como descrito anteriormente, por se tratar de um problema de projeto, os tempos conseguidos são bastantes encorajadores. Estas simulações foram executadas em um nó de um computador IBM RS6000 SP equivalente a uma estação IBM RS6000 modelo 590.

## **5.4 – COMBINAÇÃO DE TÉCNICAS ANALÍTICAS COM O ALGORITMO GENÉTICO NO AJUSTE DE CONTROLADORES**

O projeto coordenado de múltiplos controladores em um sistema de potência requer várias especificações a fim de assegurar a operação do sistema com uma margem adequada de estabilidade. Isso deve ser verificado ao longo de todo período de operação, levando-se em consideração manutenção de equipamentos e de linhas de transmissão, além das condições normais de operação. Uma infinidade de pontos de operação corresponderiam a estas condições. Para minimizar este problema é escolhido um conjunto de pontos de operação mais representativo, de acordo com o conhecimento do sistema.

A utilização de técnicas analíticas para fornecer um ajuste que seria incluído na população inicial do AG, melhoraria seu desempenho, direcionando mais efetivamente a busca. Esta informação fornecida pelo método analítico, também contribuiria para reduzir o tempo de processamento, porque alguns passos na busca seriam eliminados. Desde que esta solução seja adequada para o ajuste ela indica um ponto da região de busca onde em torno do qual uma melhor solução existiria.

Dois métodos analíticos foram utilizados. O de posicionamento parcial de pólos originalmente proposto em [37] e estendido para comportar ajustes de dispositivos FACTS [42] (método 1) e o método de posicionamento de pólos por Nyquist [44] (método 2). Neste último método o ajuste é feito, considerando a máquina mais influente no modo de oscilação e define-se o amortecimento desejado. Estas soluções são introduzidas no AG na forma de um cromossomo na população inicial. A função objetivo do AG assegura que um grande número de condições de operação, considerando a rede alterada ou não, sejam levadas em conta simultaneamente durante o

ajuste. O valor final, baseado no autovalor de menor amortecimento dentre todos os pontos de operação, será o conjunto de parâmetros ótimos que asseguram um desempenho adequado para todas condições prováveis de operação. O método analítico representa um refinamento no processo de inicialização pseudo-aleatório.

O AG executa uma busca cega, que é minimizada, quando é utilizada a variação do tamanho da região de busca e o pré-aquecimento. Além disso, a agregação de técnicas analíticas para cálculo de um ajuste é importante para aumentar seu desempenho durante a busca. O ajuste calculado por essa técnica indicaria um ponto da região de busca onde é mais provável a localização da melhor solução. Introduzido como um indivíduo na população re combinado com os demais, através dos operadores genéticos, direcionaria melhor a busca. Outro ponto importante está relacionado aos limites da região de busca. Podem ser calculados levando em consideração os ajustes obtidos pelo método analítico. Estes limites definirão uma região mais provável de ocorrer a melhor solução.

Estes métodos foram aplicados a um único ponto de operação de um sistema de potência. O contrário ocorre com o AG onde é usado um conjunto de pontos de operação. O ajuste é feito de forma simultânea, tendo como referência o autovalor com menor amortecimento considerando todos pontos de operação.

#### **5.4.1 – Combinação de Técnicas Analíticas com o Algoritmo Genético**

Dois sistemas foram analisados com esta técnica híbrida. Um foi o sistema New England com 39 barras e 9 estabilizadores e 10 pontos de operação. O outro foi o sistema Sul/Sudeste brasileiro modificado com 1762 barras e 50 geradores, considerando 22 estabilizadores a serem ajustados. Mais tarde este último foi estendido para 33 estabilizadores aumentando a complexidade do problema.

##### **5.4.1.1 – Aplicação ao Sistema New England**

O desempenho adequado de um sistema de controle para diferentes condições de operação assegura a robustez dos controladores. Para que estas condições reflitam os principais pontos de operação do sistema, considerando a rede alterada ou não, sua escolha depende da experiência e de estudos de simulação.

Foi utilizado um modelo típico para pequenas perturbações na representação dos controladores. O modelo da estrutura de controle clássica considerado é o mesmo mostrado no capítulo 4. Neste estudo foi considerado dois blocos em avanço e atraso e o sinal estabilizador foi a velocidade do rotor da máquina. A função washout usada tem a constante de tempo  $T\omega=10s$ . Os parâmetros  $K_i$ ,  $\alpha_i$  e  $\omega_i$ ,  $i = 1,2,\dots,p$  são os parâmetros a serem calculados pelo AG. A função objetivo e o critério de ajuste são os mesmos utilizados no item 5.2.2. Os parâmetros do AG que foram usados são os mesmos considerados no item 5.3.2. Exceto quanto à população inicial, onde o ajuste calculado pelo método analítico é introduzido nesta população na forma de um cromossomo. Posteriormente será re combinado através dos operadores genéticos propagando os “*building blocks*“ contidos nele.

A excitatriz utilizada em cada gerador foi de primeira ordem do tipo estática, cujo modelo é mostrado a seguir.

$$E_{fd} = \frac{K_a}{1 + sT_a}(V_t - V_{ref} - V_{pss}) \quad (5.13)$$

onde:

- $K_a \rightarrow$  é o ganho da excitatriz
- $E_{fd} \rightarrow$  é a tensão terminal do gerador
- $V_t \rightarrow$  é a tensão terminal do gerador
- $V_{ref} \rightarrow$  é a tensão de referência do gerador
- $V_{pss} \rightarrow$  é a tensão obtida no estabilizador
- $T_a \rightarrow$  constante de tempo da excitatriz

o ganho  $K_a$  é calculado pela expressão:

$$K_a = \frac{T'_{do}}{2T_a} \quad (5.14)$$

onde:

- $T'_{do} \rightarrow$  constante de tempo transitória do gerador

Foram consideradas 10 condições de operação pré-selecionadas que estão relacionadas na Tabela 5.11.

A função de transferência do estabilizador usada é igual àquela apresentada no item 4.1. Os limites superiores e inferiores dos parâmetros do controlador, que definem a região de busca inicial para o AG, estão relacionados na Tabela 5.12.

Tabela 5. 11 - Condições de operação em malha aberta.

| Sistema | Configuração  |
|---------|---|
| 1       | Caso Base   |
| 2       | Linhas 3-18 e 25-26 desligadas  |
| 3       | Linhas 17-16 e 4-14 desligadas  |
| 4       | Linha 6-11 desligada  |
| 5       | 1200 MW de aumento de carga com a barra de referência assumindo a variação. |
| 6       | Linhas 16-17, 4-14, e 25-26 desligadas                                      |
| 7       | Linhas 16-17, 4-14, 25-26 e 1-39 desligadas                                 |
| 8       | Linha 21-22 desligada   |
| 9       | Linha 9-39 desligada  |
| 10      | Aumento de 15% de carga   |

Tabela 5. 12 – Limites dos parâmetros dos controladores.

| Parâmetros | New England |           |
|------------|-------------|-----------|
|            | Lim. Mín.   | Lim. Máx. |
| K          | 0,0         | 100,0     |
| $\alpha$   | 0,1         | 10,0      |
| $\omega$   | 1,25        | 12,56     |

A função objetivo usada é baseada no autovalor com menor amortecimento dentre todos pontos de operação, mostrada a seguir.

|                      |             |                          |                                       |
|----------------------|-------------|--------------------------|---------------------------------------|
| $\beta_0 = 0,0$      | Se qualquer | $(\zeta_j)_i \leq -0,15$ | ( condição instável )                 |
| $\beta_1 = 2,0$      | Se todos    | $(\zeta_j)_i > -0,15$    | e se qualquer $(\zeta_j)_i \leq 0,0$  |
| $\beta_2 = 10,0$     | Se todos    | $(\zeta_j)_i > 0,0$      | e se qualquer $(\zeta_j)_i \leq 0,01$ |
| $\beta_3 = 20,0$     | Se todos    | $(\zeta_j)_i > 0,01$     | e se qualquer $(\zeta_j)_i \leq 0,02$ |
| :                    | :           | :                        | :                                     |
| $\beta_{15} = 200,0$ | Se todos    | $(\zeta_j)_i > 0,19$     | e se qualquer $(\zeta_j)_i \leq 0,20$ |
| <b>F</b>             | Se todos    | $(\zeta_j)_i > 0,20$     |                                       |

Os parâmetros do AG são mostrados a seguir.

- Representação das variáveis no cromossomo: real
- Tamanho da população: 250 indivíduos
- Tamanho do cromossomo: 27
- Taxa de cruzamento: 0,70 (probabilidade de ocorrer ou não o cruzamento)
- Taxa de cruzamento uniforme: 0,4 (probabilidade de serem trocados os *bits* da posição escolhida de ambos indivíduos);
- Taxa de mutação (variação exponencial): 0,1 (inicial) e 0,03 (final);
- Número de variáveis no cromossomo: 27;
- Número de geração inicial: 10;
- Número de geração na redução da região de busca: 5;
- Número de geração na expansão da região de busca: 10;
- Número de indivíduos no pré-aquecimento: 7;
- Número de indivíduos no torneio: 3;

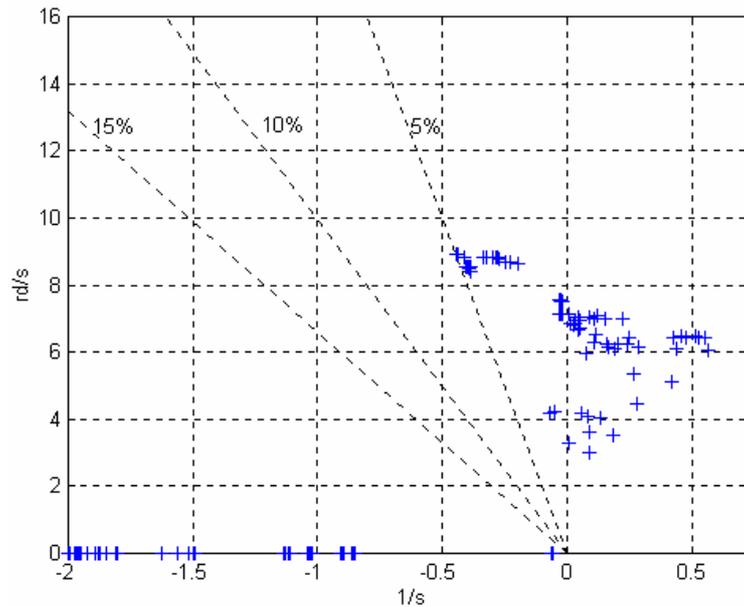


Figura 5. 13 – Mapeamento dos pólos à malha aberta considerando as 10 condições de operação pré-estabelecidas.

A Figura 5. 13 mostra o mapeamento dos pólos em malha aberta para as 10 condições de operação. O objetivo é obter o maior valor possível de amortecimento para o autovalor com menor amortecimento.

#### 5.4.1.2 – Resultados Obtidos Considerando as Soluções Analíticas

Os resultados foram analisados a partir de dois enfoques. Um foi considerando os limites dos parâmetros do controlador sendo aqueles mostrados na Tabela 5. 12. Este foi denominado de limite livre, nesta condição foram feitos testes considerando a solução analítica participando da população inicial e outro onde toda população foi criada pseudo-aleatoriamente. Outro teste considerou os limites da região de busca, baseados nas soluções analíticas obtidas pelos métodos 1 e 2, que também participaram da população inicial. Os limites máximos e mínimos foram respectivamente 1,5 e 0,5 do valor do parâmetro projetado por esses métodos. Estes resultados foram comparados aos do método pseudo-aleatório com limites livres.

- **Resultados Obtidos com Limites livres**

Nestas simulações a solução foi obtida introduzindo a solução analítica na população inicial, considerando os limites da região de busca livres. Estes resultados foram comparados ao obtido com a população inicial obtida pseudo-aleatoriamente.

A Tabela 5. 13 mostra os parâmetros encontrados pelo método 1, considerando o caso base e um caso de rede alterada. A Tabela 5. 14 mostra os parâmetros encontrados pelo método 2, considerando apenas o caso base.

Tabela 5. 13 – Parâmetros dos estabilizadores com dois blocos (método 1).

| Gerador | K         | $\alpha$ | $\omega$  |
|---------|-----------|----------|-----------|
| 30      | 8,3/35,4  | 4,9/3,0  | 9,0/11,5  |
| 31      | 9,3/6,9   | 2,4/5,0  | 12,8/9,0  |
| 32      | 10,2/11,8 | 3,8/2,5  | 10,3/12,5 |
| 33      | 1,8/1,3   | 5,2/6,3  | 8,7/8,0   |
| 34      | 10,7/2,3  | 2,5/2,5  | 12,7/12,5 |
| 35      | 7,4/5,8   | 4,4/4,3  | 9,5/9,7   |
| 37      | 1,4/1,5   | 6,9/8,0  | 7,6/7,1   |
| 38      | 11,2/8,9  | 3,8/4,5  | 10,3/9,4  |
| 39      | 38,1/31,1 | 7,3/7,2  | 7,4/7,5   |

Tabela 5. 14 – Parâmetros dos estabilizadores com dois blocos (método 2).

| Gerador | K    | $\alpha$ | $\omega$ |
|---------|------|----------|----------|
| 30      | 15,0 | 4,7      | 7,3      |
| 31      | 6,2  | 3,1      | 6,0      |
| 32      | 5,3  | 3,2      | 6,5      |
| 33      | 4,0  | 4,4      | 8,0      |
| 34      | 14,7 | 2,2      | 4,7      |
| 35      | 3,6  | 4,4      | 7,4      |
| 37      | 2,8  | 4,9      | 8,1      |
| 38      | 6,1  | 3,1      | 6,8      |
| 39      | 15,0 | 3,2      | 5,4      |

A Tabela 5. 15 e a Tabela 5. 16 mostram as soluções analíticas otimizadas pelo AG, quando a população inicial contém as soluções dadas na Tabela 5. 13 e a Tabela 5.14. Além disso, a mostra a solução obtida com o AG quando a população inicial é criada pseudo-aleatoriamente.

Tabela 5. 15 – Solução do AG quando a população inicial contém o solução do método 1.

| Gerador | K    | $\alpha$ | $\omega$ |
|---------|------|----------|----------|
| 30      | 88,4 | 5,9      | 9,4      |
| 31      | 6,8  | 4,9      | 11,7     |
| 32      | 11,7 | 2,5      | 10,8     |
| 33      | 2,2  | 6,1      | 6,8      |
| 34      | 50,4 | 3,8      | 12,5     |
| 35      | 7,0  | 5,2      | 9,6      |
| 37      | 1,4  | 7,9      | 8,9      |
| 38      | 25,9 | 4,5      | 9,6      |
| 39      | 31,1 | 5,4      | 9,1      |

Tabela 5. 16 – Solução do AG quando a população inicial contém o solução do método 2.

| Gerador | K    | $\alpha$ | $\omega$ |
|---------|------|----------|----------|
| 30      | 14,9 | 6,7      | 8,2      |
| 31      | 6,1  | 3,2      | 5,8      |
| 32      | 24,0 | 3,1      | 12,2     |
| 33      | 4,0  | 4,3      | 7,9      |
| 34      | 14,7 | 3,8      | 7,6      |
| 35      | 5,8  | 4,4      | 7,4      |
| 37      | 2,8  | 4,8      | 8,0      |
| 38      | 14,7 | 4,4      | 7,8      |
| 39      | 62,4 | 1,4      | 2,3      |

Tabela 5. 17 – Solução do AG, quando a população inicial é formada pseudo-aleatoriamente.

| Gerador | K    | $\alpha$ | $\omega$ |
|---------|------|----------|----------|
| 30      | 62,6 | 5,3      | 8,1      |
| 31      | 11,3 | 6,3      | 10,4     |
| 32      | 3,9  | 3,4      | 7,5      |
| 33      | 8,0  | 2,2      | 10,7     |
| 34      | 39,9 | 8,3      | 12,2     |
| 35      | 8,6  | 7,5      | 11,1     |
| 37      | 12,1 | 6,4      | 12,5     |
| 38      | 6,5  | 2,8      | 7,7      |
| 39      | 14,1 | 9,2      | 9,2      |

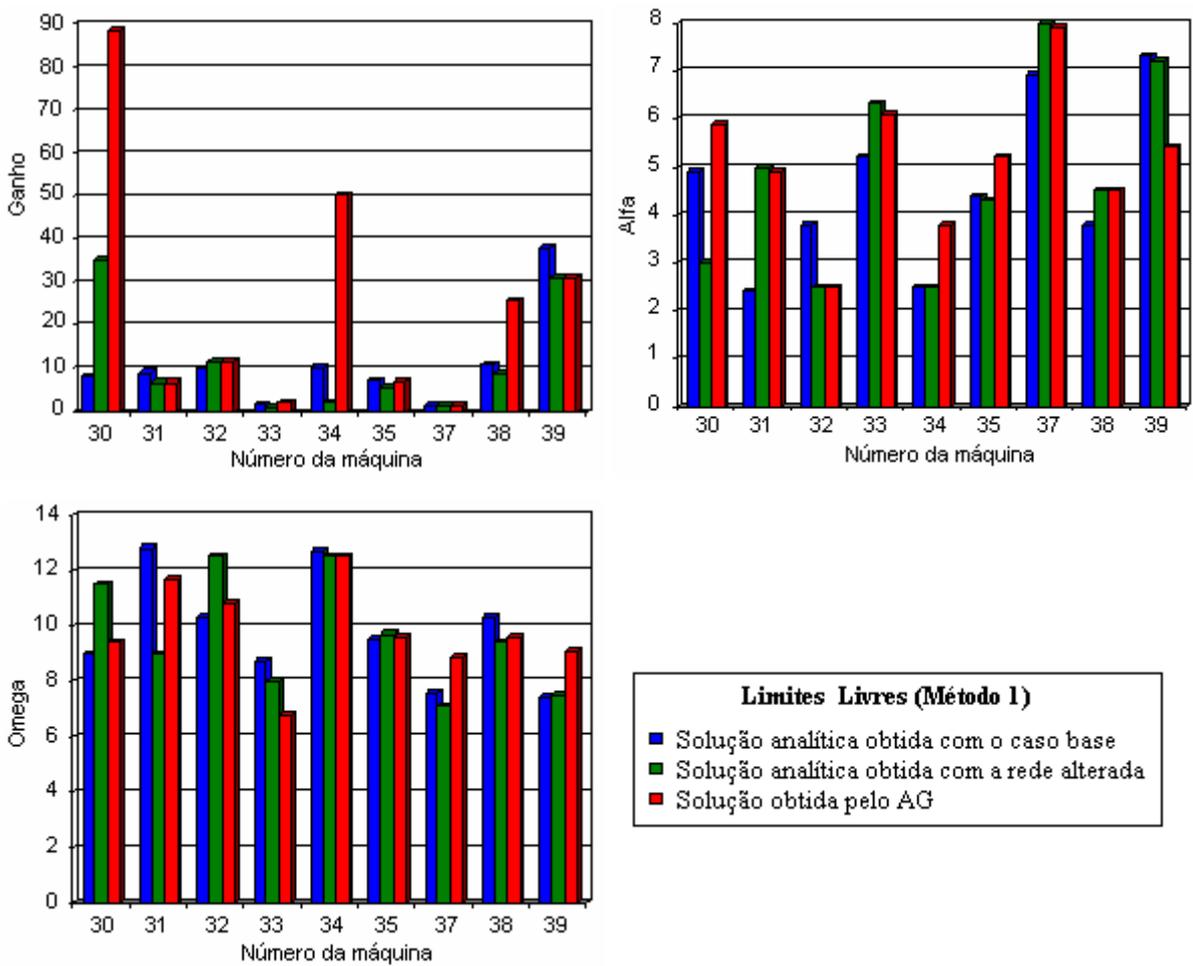


Figura 5. 14 – Efeito da otimização do ganho, de alfa e de omega obtidos pelo AG, considerando os resultados obtidos pelo método 1 na população inicial.

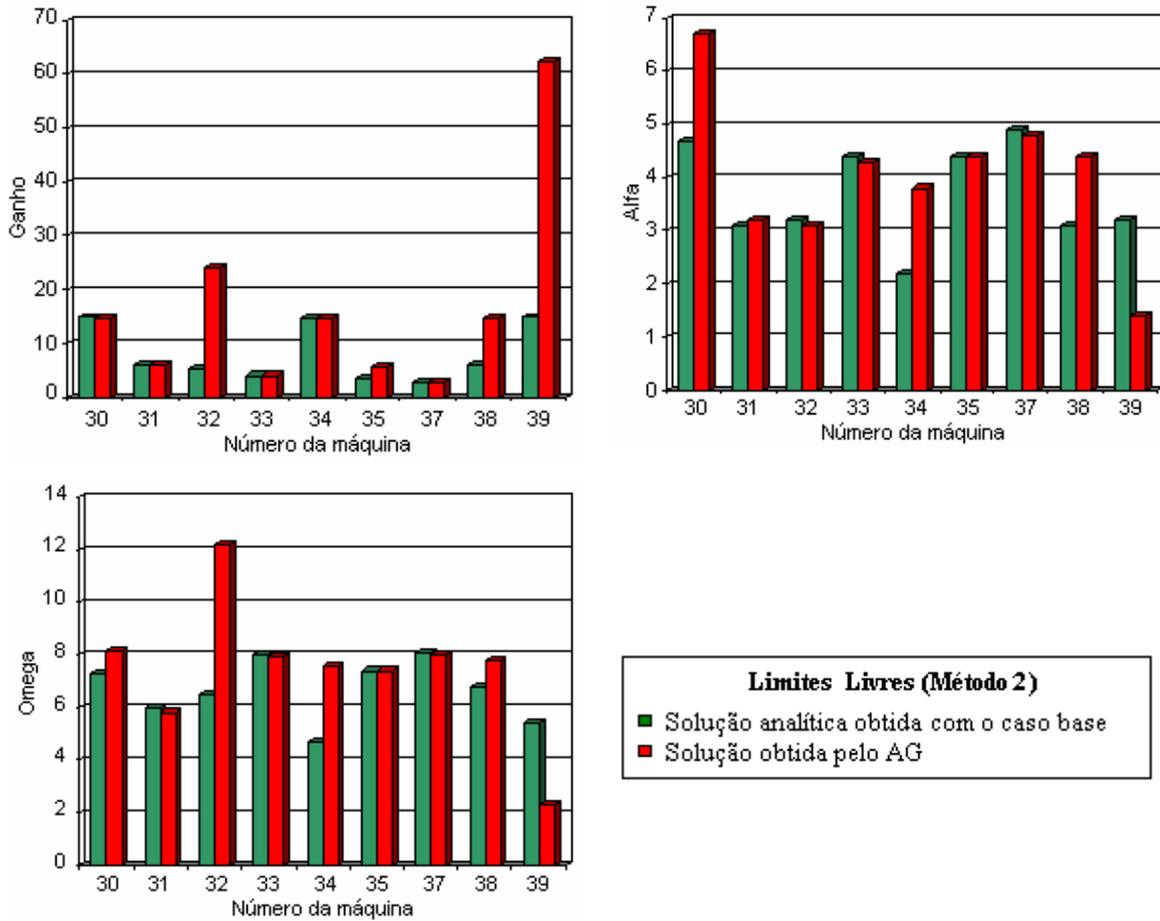


Figura 5. 15 – Efeito da otimização do ganho, de alfa e de omega obtidos pelo AG, considerando os resultados obtidos pelo método 2 na população inicial.

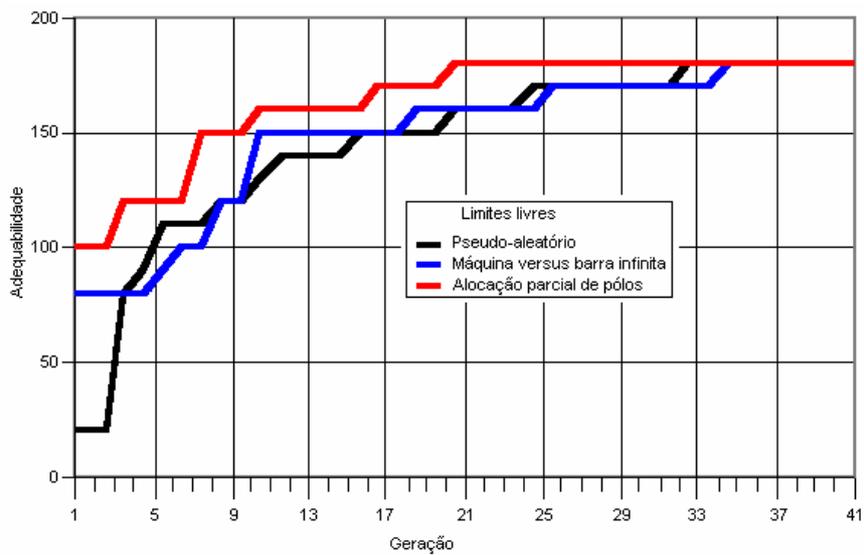


Figura 5. 16 – Comparação da evolução do melhor resultado usando as soluções obtidas pelos métodos analíticos 1 e 2 e a pseudo-aleatória.

Nos resultados mostrados na Figura 5. 14 e na Figura 5. 15 indicam que o AG otimiza as soluções analíticas, melhorando o desempenho do sistema. Na Figura 5. 16 é mostrado, sob a forma de comparação, como o melhor indivíduo evolui considerando na população inicial as soluções obtidas pelos métodos analíticos. Pode ser observado que, a participação destas soluções na população inicial, contribui para o aumento dos “*building blocks* “ na população e nos indivíduos, através dos operadores genéticos. Assim, as soluções analíticas indicarão uma direção para busca e também em torno da qual é mais provável encontrar uma solução melhor. Estas características condicionam melhor a busca executada pelo Algoritmo Genético como mostrado no gráfico da Figura 5. 15.

#### •Resultados com os Limites da Região de Busca Obtidos das Soluções Analíticas

Nestas simulações além das soluções analíticas fazerem parte da população inicial, os limites da região de busca foram determinados considerando os valores obtidos nestas soluções. A Tabela 5.18 e a Tabela 5. 19 mostram as soluções otimizadas pelo AG quando a população inicial contém os estabilizadores dados na Tabela 5. 13 e na Tabela 5. 14, respectivamente. Os limites máximo e mínimo foram calculados aplicando os fatores 1,5 e 0,5 aos ajustes obtidos pelos métodos analíticos, respectivamente.

Tabela 5. 18 – Solução do Algoritmo Genético solução do método 1 na população inicial.

| Gerador | K    | $\alpha$ | $\omega$ |
|---------|------|----------|----------|
| 30      | 17,2 | 6,2      | 8,7      |
| 31      | 5,7  | 5,5      | 5,3      |
| 32      | 17,9 | 5,7      | 10,4     |
| 33      | 2,2  | 3,8      | 5,1      |
| 34      | 14,8 | 3,4      | 7,9      |
| 35      | 8,8  | 4,3      | 9,4      |
| 37      | 2,0  | 7,9      | 8,5      |
| 38      | 14,7 | 4,4      | 6,7      |
| 39      | 39,3 | 5,0      | 5,3      |

Tabela 5. 19 – Solução do Algoritmo Genético solução do método 2 na população inicial.

| Gerador | K    | $\alpha$ | $\omega$ |
|---------|------|----------|----------|
| 30      | 20,4 | 6,5      | 8,7      |
| 31      | 8,5  | 4,0      | 5,3      |
| 32      | 4,4  | 4,9      | 10,4     |
| 33      | 5,0  | 3,2      | 5,1      |
| 34      | 19,6 | 3,0      | 7,9      |
| 35      | 4,6  | 4,1      | 9,4      |
| 37      | 3,5  | 5,7      | 8,5      |
| 38      | 8,7  | 3,4      | 6,7      |
| 39      | 22,5 | 2,8      | 5,3      |

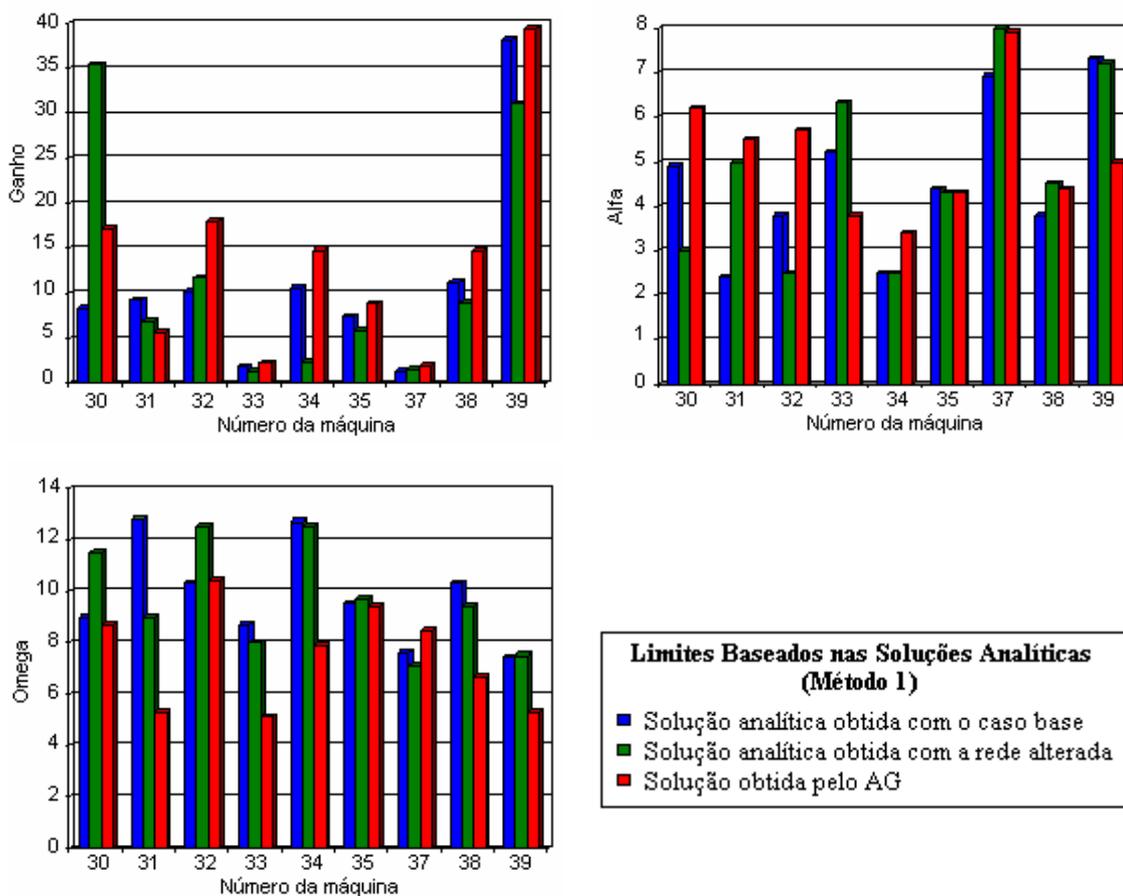


Figura 5. 17 – Efeito da otimização do ganho, de alfa e de omega obtidos pelo AG. Resultados obtidos pelo método 1 na população.

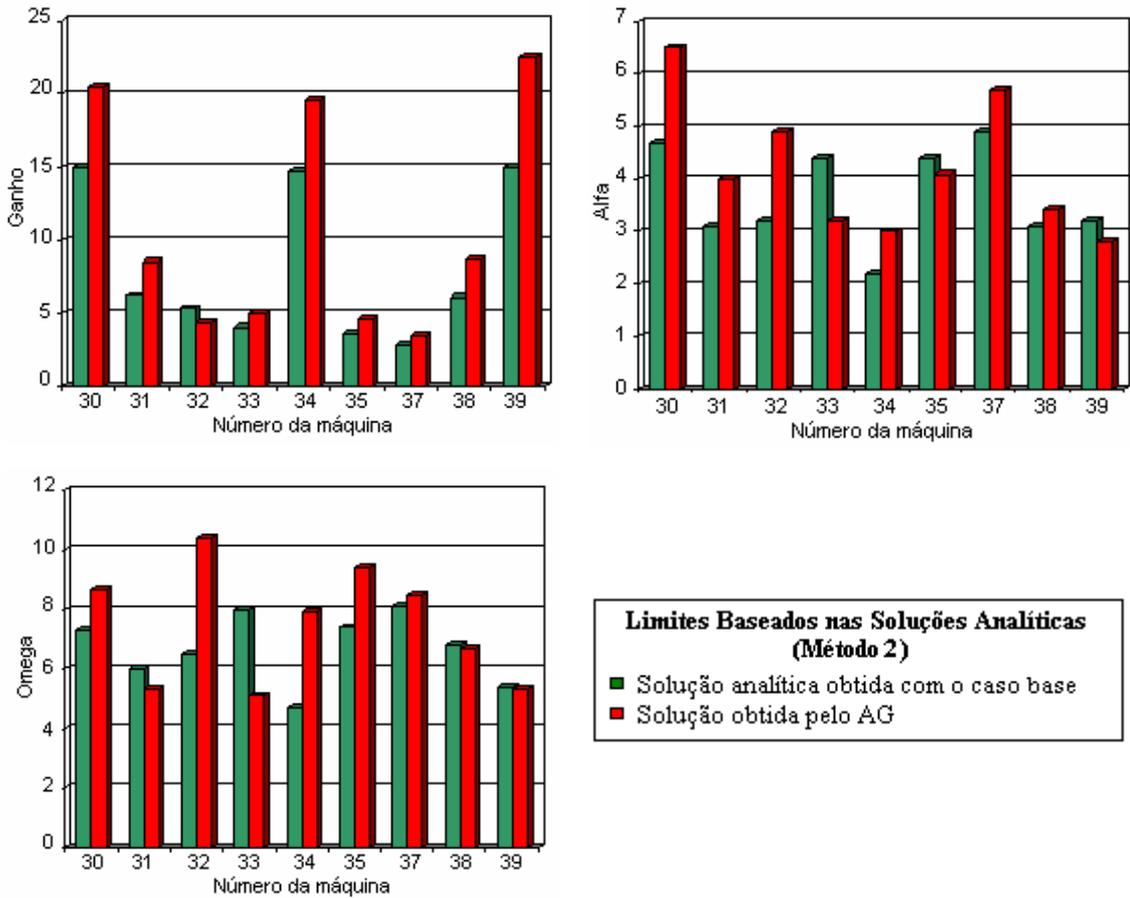


Figura 5. 18 – Efeito da otimização do ganho, de alfa e de omega obtidos pelo AG. Resultados obtidos pelo método 2 na população inicial.

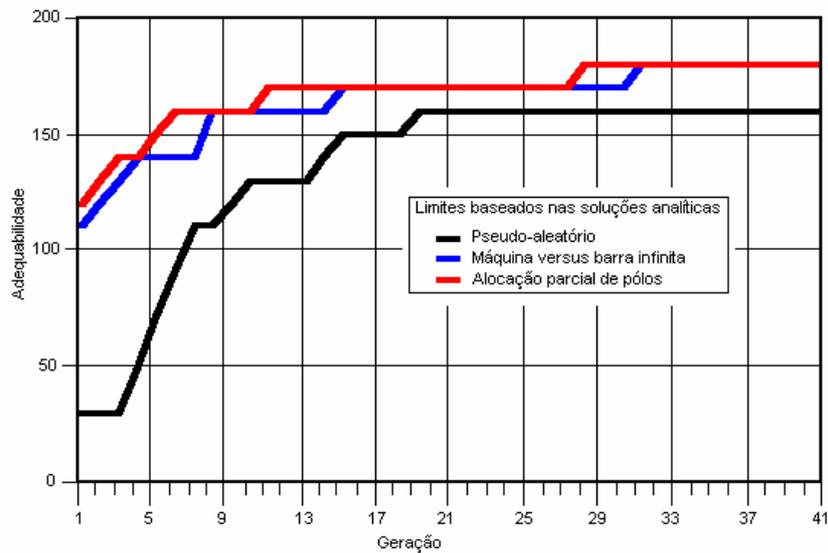


Figura 5. 19 – Comparação da evolução do melhor indivíduo usando as soluções obtidas pelos métodos analíticos 1 e 2 na população inicial e a pseudo-aleatória.

Os gráficos da Figura 5. 17 e da Figura 5. 18 mostram também que o AG otimiza as soluções analíticas. É verificado que um melhor direcionamento da busca é obtido, devido ao fato dos limites da região de busca serem definidos pelos ajustes analíticos e a população inicial conter esta solução. Então, existirá uma maior probabilidade de ser obtida uma solução melhor.

Utilizando as soluções analíticas e calculando os limites da região de busca em função destas soluções, a densidade de “*buildings blocks*” aumenta tanto na população como também nos indivíduos. A consequência disso é uma maior quantidade de soluções estáveis desde o início da simulação, sendo predominantes na população. O desempenho do AG melhora significativamente como mostrado na Figura 5. 19, onde a melhor solução é obtida e menor tempo é despendido na busca.

#### 5.4.1.2 – Aplicação ao Sistema Sul/Sudeste Brasileiro

Nesta aplicação foi utilizado ajuste para 33 estabilizadores, por ser o problema mais complexo a ser resolvido. Além das máquinas relacionadas na Tabela 5. 10 considerou-se estabilizadores nas máquinas de Jurumirim (512), Xavantes (514), H.Borden (400), Angra I (10), Nilo Peçanha (250-rotor 1), Pereira Passos (255), Fontes (253-rotor 1), Funil (14), Passo Real (1162) e C. Dourada (754). Foi considerado que os limites seriam baseados nos ajustes obtidos pelo método analítico 1. Os limites da região de busca foram calculados com base na solução analítica, por fornecer o melhor desempenho para o AG, como mostrado nas simulações do sistema New England. O limite mínimo foi calculado por 0,50 do valor do ajuste e o limite máximo 1,50 desse mesmo valor de ajuste. Como o AG obtém infinitas soluções para este problema, algumas destas soluções com melhor desempenho, obtidas em uma única simulação, são listadas na Tabela 5. 20 e na Tabela 5. 21. Na Figura 5. 20 são mostrados os autovalores correspondentes a estes ajustes.

Tabela 5. 20 – Ajustes utilizando solução analítica como referência para região de busca.

| Barra de Geração | Ajuste A |      |      | Ajuste B |      |      |
|------------------|----------|------|------|----------|------|------|
|                  | K        | Tn   | Td   | K        | Tn   | Td   |
| 10               | 2,74     | 0,45 | 0,10 | 2,74     | 0,34 | 0,05 |
| 14               | 2,72     | 0,59 | 0,04 | 4,81     | 0,55 | 0,02 |
| 18               | 6,11     | 0,34 | 0,07 | 10,80    | 0,42 | 0,10 |
| 20               | 2,53     | 0,45 | 0,08 | 2,53     | 0,30 | 0,06 |
| 250              | 3,98     | 0,48 | 0,12 | 3,98     | 0,30 | 0,11 |
| 253              | 10,77    | 0,22 | 0,17 | 19,03    | 0,39 | 0,25 |
| 255              | 1,41     | 0,51 | 0,02 | 1,31     | 0,50 | 0,02 |
| 300              | 0,63     | 0,33 | 0,03 | 0,91     | 0,76 | 0,07 |
| 302              | 0,74     | 0,36 | 0,03 | 2,32     | 0,80 | 0,05 |
| 303              | 1,20     | 0,65 | 0,07 | 2,46     | 0,41 | 0,05 |
| 305              | 2,11     | 0,50 | 0,18 | 2,11     | 0,39 | 0,05 |
| 400              | 14,24    | 0,17 | 0,06 | 9,27     | 0,17 | 0,07 |
| 500              | 2,87     | 0,57 | 0,10 | 5,07     | 0,17 | 0,04 |
| 501              | 2,49     | 0,19 | 0,04 | 2,49     | 0,13 | 0,05 |
| 507              | 5,44     | 0,31 | 0,08 | 5,44     | 0,46 | 0,10 |
| 511              | 1,78     | 0,19 | 0,06 | 3,15     | 0,22 | 0,09 |
| 512              | 2,32     | 0,25 | 0,06 | 4,10     | 0,15 | 0,06 |
| 513              | 0,63     | 0,23 | 0,04 | 1,98     | 0,19 | 0,04 |
| 514              | 8,50     | 0,28 | 0,14 | 15,02    | 0,29 | 0,09 |
| 518              | 4,79     | 0,20 | 0,04 | 8,46     | 0,20 | 0,06 |
| 519              | 14,13    | 0,27 | 0,10 | 24,98    | 0,30 | 0,13 |
| 520              | 2,10     | 0,25 | 0,05 | 1,52     | 0,16 | 0,06 |
| 754              | 2,76     | 0,41 | 0,11 | 4,87     | 0,51 | 0,09 |
| 800              | 2,56     | 0,26 | 0,08 | 4,52     | 0,49 | 0,11 |
| 810              | 2,28     | 0,42 | 0,08 | 4,03     | 0,22 | 0,04 |
| 913              | 1,04     | 0,46 | 0,07 | 1,83     | 0,62 | 0,05 |
| 917              | 2,25     | 0,33 | 0,03 | 5,52     | 0,24 | 0,04 |
| 919              | 2,27     | 0,34 | 0,05 | 2,27     | 0,30 | 0,05 |
| 920              | 2,88     | 0,20 | 0,06 | 4,59     | 0,24 | 0,06 |
| 925              | 2,70     | 0,21 | 0,04 | 3,08     | 0,18 | 0,04 |
| 1107             | 19,30    | 0,20 | 0,10 | 34,13    | 0,26 | 0,17 |
| 1158             | 1,27     | 0,40 | 0,05 | 1,45     | 0,28 | 0,05 |
| 1162             | 7,04     | 0,48 | 0,14 | 12,45    | 0,41 | 0,10 |

Tabela 5. 21 – Ajustes utilizando a solução analítica como referência para região de busca.

| Barra de Geração | Ajuste C |      |      | Ajuste D |      |      |
|------------------|----------|------|------|----------|------|------|
|                  | K        | Tn   | Td   | K        | Tn   | Td   |
| 10               | 2,74     | 0,36 | 0,04 | 8,55     | 0,32 | 0,03 |
| 14               | 4,81     | 0,59 | 0,02 | 4,81     | 0,73 | 0,02 |
| 18               | 10,80    | 0,29 | 0,13 | 19,09    | 0,16 | 0,05 |
| 20               | 7,90     | 0,36 | 0,08 | 4,47     | 0,32 | 0,05 |
| 250              | 4,37     | 0,25 | 0,13 | 7,03     | 0,29 | 0,15 |
| 253              | 11,34    | 0,51 | 0,32 | 11,34    | 0,43 | 0,28 |
| 255              | 2,50     | 1,19 | 0,05 | 4,41     | 0,51 | 0,02 |
| 300              | 1,60     | 0,63 | 0,06 | 1,60     | 0,60 | 0,07 |
| 302              | 1,31     | 0,67 | 0,06 | 2,32     | 0,32 | 0,04 |
| 303              | 2,46     | 0,33 | 0,04 | 4,36     | 0,26 | 0,07 |
| 305              | 3,73     | 0,21 | 0,06 | 3,73     | 0,25 | 0,05 |
| 400              | 9,27     | 0,24 | 0,05 | 9,27     | 0,25 | 0,07 |
| 500              | 5,07     | 0,17 | 0,04 | 8,96     | 0,22 | 0,08 |
| 501              | 4,40     | 0,36 | 0,15 | 4,40     | 0,17 | 0,04 |
| 507              | 9,62     | 0,14 | 0,08 | 17,01    | 0,28 | 0,06 |
| 511              | 3,15     | 0,23 | 0,08 | 3,15     | 0,17 | 0,04 |
| 512              | 7,26     | 0,18 | 0,07 | 7,26     | 0,21 | 0,05 |
| 513              | 1,12     | 0,31 | 0,08 | 3,51     | 0,22 | 0,04 |
| 514              | 8,50     | 0,18 | 0,07 | 15,02    | 0,18 | 0,06 |
| 518              | 8,46     | 0,36 | 0,11 | 8,46     | 0,28 | 0,06 |
| 519              | 24,98    | 0,17 | 0,08 | 44,16    | 0,27 | 0,09 |
| 520              | 3,71     | 0,23 | 0,09 | 2,69     | 0,16 | 0,06 |
| 754              | 8,62     | 0,32 | 0,06 | 4,87     | 0,19 | 0,05 |
| 800              | 2,56     | 0,21 | 0,09 | 2,56     | 0,35 | 0,08 |
| 810              | 4,03     | 0,32 | 0,06 | 4,03     | 0,48 | 0,08 |
| 913              | 1,83     | 0,37 | 0,06 | 1,83     | 0,68 | 0,04 |
| 917              | 3,97     | 0,35 | 0,04 | 5,52     | 0,50 | 0,09 |
| 919              | 2,27     | 0,16 | 0,05 | 2,27     | 0,21 | 0,04 |
| 920              | 4,59     | 0,23 | 0,09 | 8,11     | 0,33 | 0,11 |
| 925              | 3,08     | 0,16 | 0,05 | 5,45     | 0,15 | 0,05 |
| 1107             | 34,13    | 0,24 | 0,24 | 34,13    | 0,10 | 0,09 |
| 1158             | 1,45     | 0,19 | 0,04 | 4,53     | 0,26 | 0,04 |
| 1162             | 12,45    | 0,37 | 0,08 | 22,00    | 0,32 | 0,08 |

Pode ser observado na Tabela 5. 20 e na Tabela 5. 21 que os ajustes obtidos são todos em avanço de fase e não existe uma proporção definida entre a constante de tempo do numerador e a do denominador.

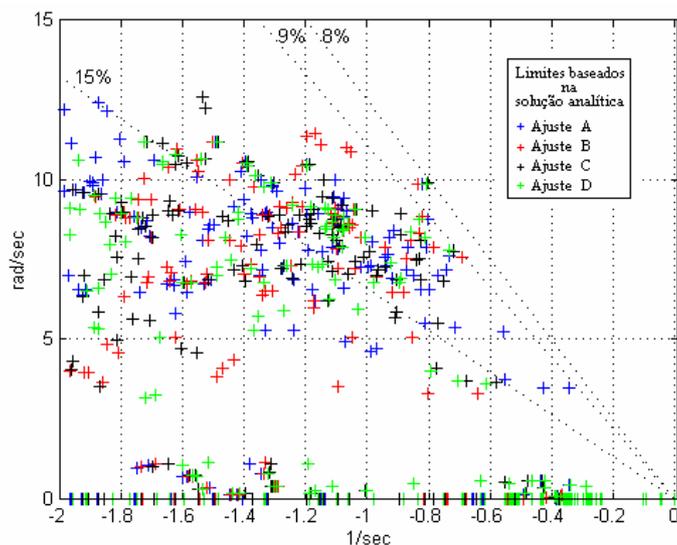


Figura 5. 20 – Autovalores para os quatro melhores ajustes (Tabela 5. 20 e Tabela 5. 21) obtidos em uma única simulação para as condições de carga pesada, média e leve.

Não foi necessário fazer o gráfico de evolução do melhor indivíduo pelo fato de ser obtida na primeira população a melhor solução que correspondeu a adequabilidade 90, cujo intervalo de amortecimento é [8% , 9%]. O que ocorreu foi um aprimoramento da solução durante a execução do AG.

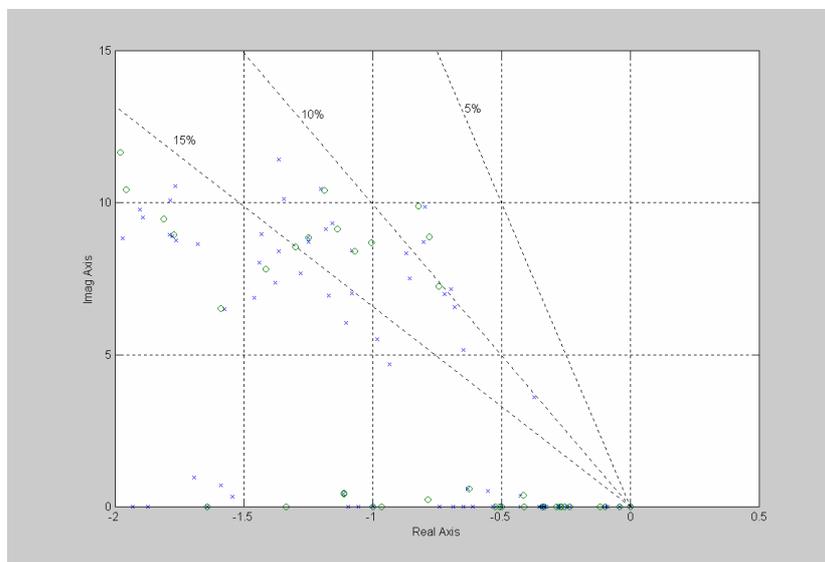


Figura 5. 21 – Mapeamento de pólos e zeros do sistema Sul/Sudeste carga pesada.

Pode ser observado que um autovalor com frequência da ordem de 10 rd/s é a condição limitante para explorar ainda mais o aumento do amortecimento mínimo. Este fato é devido a localização de um zero próximo a esse ponto como mostrado na Figura 5. 21. O que aconteceu ao longo do processamento foi uma melhoria do amortecimento dos outros autovalores. Destacando, principalmente, o modo inter-área Sul/Sudeste que

teve seu amortecimento aumentado e os modos das excitatrizes com frequências menores (ajuste D) comparado aos ajustes A, B e C, caracterizando-o como o melhor ajuste dentre os quatro selecionados.

Outro ponto que deve ser evidenciado é o tempo de processamento. Uma redução drástica do tempo de processamento ocorreu por ser obtido na primeira população um indivíduo com a melhor adequabilidade. A partir dessa população o AG executou apenas a função de melhorar a boa solução encontrada.

De maneira geral os resultados obtidos em ambos os sistemas indicaram que o uso de soluções analíticas para criar a região de busca inicial melhora o desempenho do AG. Além disso, ocorre um aumento significativo de soluções estáveis na primeira população. O uso de solução analítica para calcular os limites da região de busca definem uma região mais provável de se obter soluções com melhores desempenho, onde a maioria das soluções são estáveis.

## 5.6 – NÚMERO DE BLOCOS COMO UM PARÂMETRO CALCULADO PELO ALGORITMO GENÉTICO

A complexidade do ajuste de estabilizadores é ainda maior se for considerado que cada estrutura possa ter uma quantidade diferente de blocos avanço-atraso. Esta necessidade está relacionada à compensação de fase desejada para um modo de oscilação associado a uma ou mais máquina. Pode ser que uma maior compensação de fase seja necessário para um grupo de máquinas, enquanto que para outros não.

Nesta proposta um acréscimo no tamanho do cromossomo foi necessário. A nova estrutura do cromossomo fica com o seguinte aspecto:

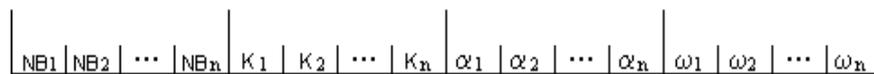


Figura 5.22 – Estrutura de um cromossomo incluindo o número de blocos dos controladores.

Os parâmetros correspondentes ao número de blocos em cada controlador ( $NB_i$ ) da Figura 5.22 está localizado no início da estrutura do cromossomo. Foi especificado que o número máximo de blocos na estrutura do estabilizador seria igual a três. Este método foi denominado de método direto, que significa que o AG manipulará

diretamente o parâmetro  $NB_i$  número de blocos. Este método só pode ser aplicado quando os blocos avanço-atraso forem iguais. Blocos diferentes criam um problema relacionado aos operadores genéticos, devido ao número de blocos fazer parte da estrutura do cromossomo. Não se pode definir onde um cruzamento ou uma mutação seriam executados. Não poderá ser executado um cruzamento entre duas estruturas com a variável  $NB_i$  diferente. No caso da mutação não poderá ser trocado o número blocos correspondente à posição sorteada por um diferente sem que seja trocado também os parâmetros de compensação de fase.

Como uma forma de generalizar este problema, foi implementada uma estratégia para contemplar a opção de blocos diferentes. Neste caso foi considerado que a estrutura do cromossomo comportaria essa opção. O número de blocos não fez parte dessa estrutura. O fundamento dessa idéia foi deixar o AG obter blocos ao longo do processamento, que tenham as constantes de tempo do numerador e do denominador iguais ou muito próximas. De modo que simplificadas, as estruturas dos estabilizadores se apresentarão com um determinado número de blocos. Neste caso foi considerado que as estruturas de controle teriam no máximo três blocos de avanço e atraso. A estrutura do cromossomo com esta característica tem o aspecto mostrado na Figura 5. 23.

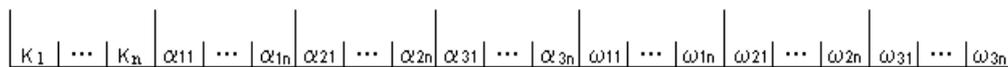


Figura 5. 23 – Estrutura de um cromossomo considerando três blocos diferentes nos controladores.

A aplicação dessas estratégias foi feita no sistema New England por ser menor e rápida a obtenção da solução, mas é possível aplicar em um sistema de grande porte. Na Tabela 5. 22 são mostrados os ajustes obtidos nos dois métodos. Na Figura 5. 24 são mostrados os autovalores, relativos aos ajustes obtidos pelos métodos direto e indireto. Na Tabela 5.22 pode ser observado que no método indireto algumas estruturas tem constante de tempo próximas, que sugerem uma simplificação, conseqüentemente, a redução do número de blocos (barras 32 e 33). O número de blocos dos estabilizadores destas duas barras seriam idênticos ao do método direto.

Tabela 5. 22 – Melhores ajustes obtidos com os métodos direto e indireto.

| Barra | Método Direto |      |      | Método Indireto |      |      |
|-------|---------------|------|------|-----------------|------|------|
|       | K             | Tn   | Td   | K               | Tn   | Td   |
| 30    | 64,88         | 0,17 | 0,05 | 8,20            | 0,27 | 0,03 |
|       |               | 0,17 | 0,05 |                 | 0,34 | 0,06 |
|       |               |      |      |                 | 0,21 | 0,12 |
| 31    | 31,50         | 0,23 | 0,03 | 37,60           | 0,14 | 0,08 |
|       |               |      |      |                 | 0,25 | 0,04 |
|       |               |      |      |                 | 0,39 | 0,10 |
| 32    | 13,46         | 0,20 | 0,04 | 38,12           | 0,15 | 0,05 |
|       |               |      |      |                 | 0,08 | 0,12 |
|       |               |      |      |                 | 0,37 | 0,06 |
| 33    | 9,05          | 0,24 | 0,03 | 11,88           | 0,24 | 0,12 |
|       |               | 0,24 | 0,03 |                 | 0,35 | 0,04 |
|       |               |      |      |                 | 0,09 | 0,22 |
| 34    | 46,78         | 0,21 | 0,03 | 22,23           | 0,37 | 0,05 |
|       |               |      |      |                 | 0,22 | 0,19 |
|       |               |      |      |                 | 0,66 | 0,16 |
| 35    | 12,27         | 0,17 | 0,05 | 7,25            | 0,14 | 0,05 |
|       |               | 0,17 | 0,05 |                 | 0,29 | 0,03 |
|       |               | 0,17 | 0,05 |                 | 0,21 | 0,04 |
| 37    | 14,87         | 0,26 | 0,04 | 15,12           | 0,31 | 0,05 |
|       |               |      |      |                 | 0,34 | 0,05 |
|       |               |      |      |                 | 0,23 | 0,05 |
| 38    | 32,12         | 0,23 | 0,04 | 31,23           | 0,15 | 0,06 |
|       |               |      |      |                 | 0,21 | 0,03 |
|       |               |      |      |                 | 0,28 | 0,05 |
| 39    | 57,58         | 0,14 | 0,08 | 23,10           | 0,55 | 0,07 |
|       |               | 0,14 | 0,08 |                 | 0,42 | 0,05 |
|       |               |      |      |                 | 0,58 | 0,07 |

As constantes de tempo do numerador  $T_n$  e do denominador  $T_d$  foram calculadas a partir das expressões:

$$T_n = \frac{\sqrt{\alpha}}{\omega} \quad e \quad T_d = \frac{1}{\omega\sqrt{\alpha}} \quad (5.15)$$

e a estrutura do estabilizador usado foi:

$$V_{pss} = K \left( \frac{1 + sT_n}{1 + sT_d} \right)^{NBi} \cdot \omega \quad (5.16)$$

onde:

$K$  → ganho do estabilizador

$^{NBi}$  → número de blocos do estabilizador

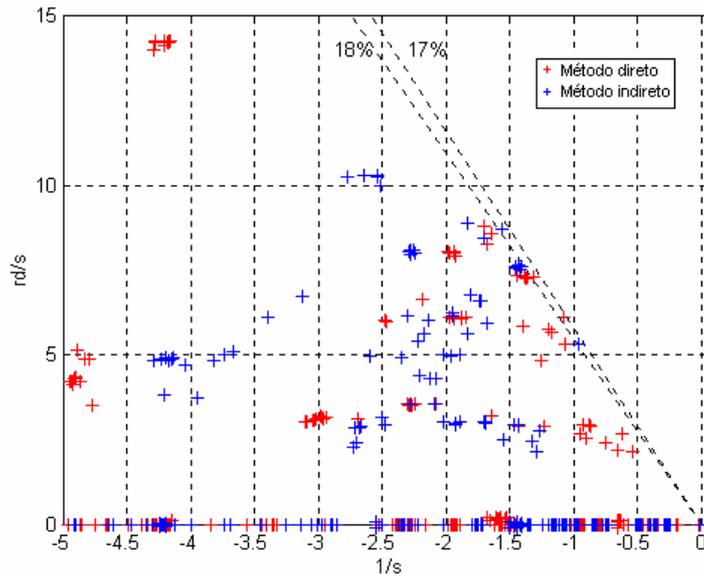


Figura 5. 24 – Mapeamento dos autovalores dos ajustes obtidos pelos métodos direto e indireto para as 10 condições de operação.

Pode ser observado na Figura 5. 24 que o amortecimento mínimo obtido foi de 18% utilizando as soluções de ambos os métodos. As frequências do espectro de autovalores de interesse não sofreram grandes variações, indicando melhor desempenho do sistema.

## 5.7 – PROJETO DE ESTABILIZADORES BASEADO EM AVANÇO MÁXIMO DE FASE

Na compensação de fase em avanço para uma determinada frequência de interesse, em um projeto de estabilizadores, para um bloco avanço-atraso do tipo  $(1 + s\alpha T_d)/(1 + sT_d)$  onde  $\alpha > 1$ , o efeito é de avanço de fase. Nas frequências mais elevadas, o parâmetro  $\alpha$  representará o ganho dinâmico deste bloco. Se este ganho tiver um valor elevado, o sistema de controle apresentará problemas de amplificação de ruídos. Um valor típico para superar este problema, quando o controlador é composto de dois blocos, seria  $\alpha^2 = 100$ . Neste caso o valor de  $\alpha$  será igual a 10. O máximo avanço de fase  $\phi_{\text{máx}}$  e a frequência  $\omega_{\text{máx}}$  onde este avanço ocorre são calculados pelas expressões:

$$\phi_{\text{máx}} = \text{sen}^{-1}\left(\frac{\alpha - 1}{\alpha + 1}\right) \quad \text{e} \quad \omega_{\text{máx}} = \frac{1}{T\sqrt{\alpha}} \quad (5.17)$$

Fazendo  $\phi_{\text{máx}} = \alpha_0$  e  $\omega_{\text{máx}} = \omega_i$  os parâmetros  $\alpha$  e  $T$  do bloco avanço-atraso serão calculados por:

$$\alpha = \frac{1 + \text{sen}\alpha_0}{1 - \text{sen}\alpha_1} \quad \text{e} \quad T = \frac{1}{\omega_i \sqrt{a}} \quad (5.18)$$

Um ajuste adequado pode ser obtido através dos pólos dominantes do sistema, considerando a malha de estabilização fechada e um conjunto de condições de operação do sistema, que espelhem o seu comportamento ao longo de um período. O ganho do estabilizador deve ser ajustado para obtenção do máximo amortecimento, para todos estas condições de operação e modos de oscilação dominantes, sem deteriorar os outros modos.

A obtenção de um avanço máximo seria possível em altas frequências, o que resultaria em blocos de avanço e atraso com  $\alpha \rightarrow \infty$  e  $Td \rightarrow 0$ , que significa um controlador proporcional/derivativo (PD) [39]. Como a parcela derivativa provoca variações bruscas no sistema, sua aplicação se traduziria em um controlador muito sensível às variações do sistema. Seu elevado ganho dinâmico, ampliaria os ruídos. A forma de superar este problema é a obtenção de um avanço máximo em frequências no intervalo de 20 a 30 rd/s ( 3 a 5 Hz). Este ajuste minimizará os problemas com os modos intraplanta e aqueles relacionados às excitatrizes [40, 41]. Os valores das constantes de tempo passam a se situar no intervalo entre 10 e 15 ms e o valor de  $\alpha$  fica próximo de 10. Uma aplicação desta estratégia pode ser vista na referência [40].

Aplicando esta heurística às simulações feitas com o AG obtém-se um melhor desempenho do sistema como mostrado na Figura 5. 25. Nesta simulação os limites da frequência  $\omega$  e de  $\alpha$  foram, respectivamente, [1,25 30,0] rd/s e [7,0 10,0]. Nota-se que foi dado um maior grau de liberdade para o cálculo do ganho dinâmico pelo fato da especificação de um intervalo e não um valor fixo para este ganho.

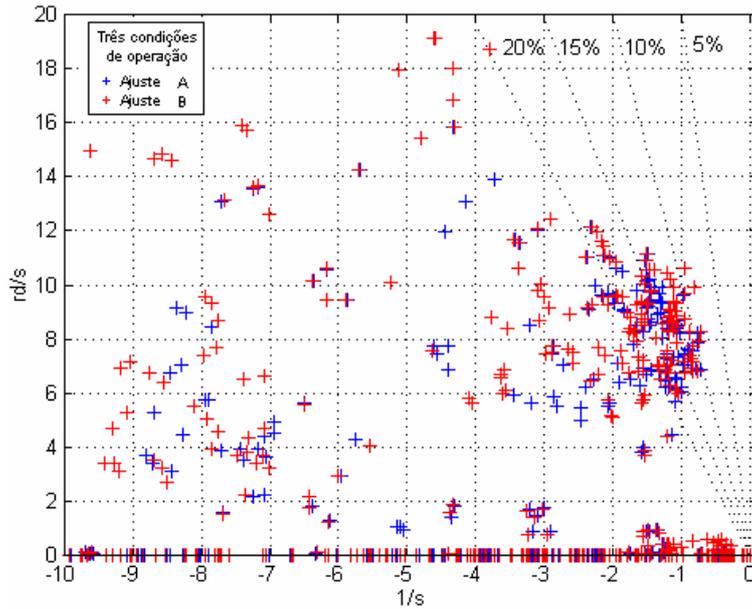


Figura 5. 25 – Autovalores considerando o limite máximo da frequência igual a 30 rd/s. Ajustes **A** e **B** tem adequabilidade **1069** e **1070** respectivamente.

### 5.8 – CONTORNO DAS RAÍZES (“ROOT CONTOUR”)

Nesta simulação utilizou-se um ajuste obtido pelo AG e variou-se o ganho de todos os estabilizadores simultaneamente. A trajetória que os autovalores descrevem em direção ao seu zero atrator é denominada de contorno das raízes (“root contour”). Obteve-se um contorno das raízes para o sistema New England Figura 5. 26 e Figura 5. 27 e Sul/Sudeste brasileiro Figura 5. 28 e Figura 5. 29.

Nas figuras 5.26, 5.27, 5.28 e 5.29 as soluções caracterizadas pela cor azul foram as soluções obtidas pelo AG. Pode ser observado que o AG obteve uma solução de compromisso entre o maior amortecimento dos modos eletromecânicos e o menor amortecimento dos modos das excitatrizes. Isto pode ser identificado no gráfico, onde na solução obtida pelo AG, alguns autovalores estão num ponto próximo da mudança da direção da trajetória ou próximos da linha de amortecimento desejado.

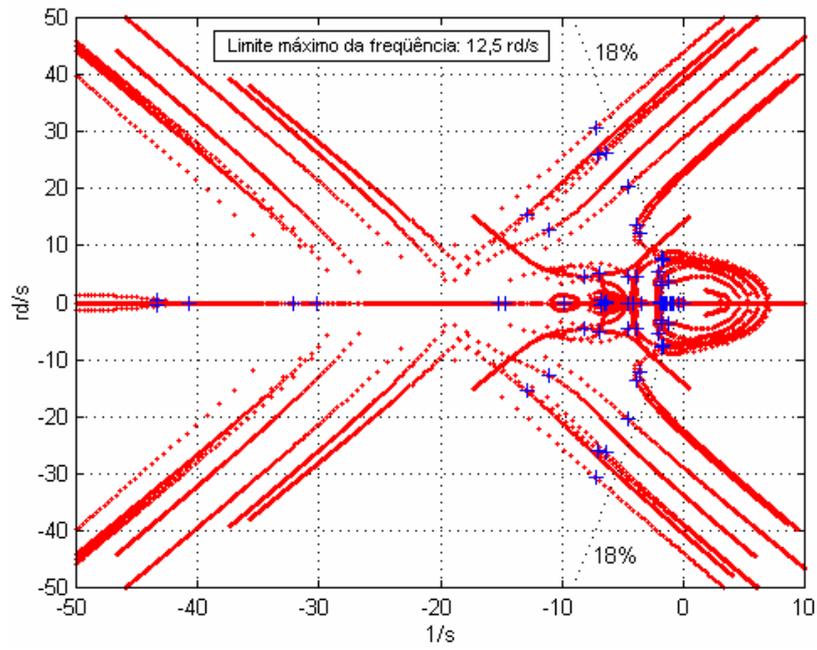


Figura 5. 26 – Contorno das raízes para o sistema New England com o intervalo da frequência [1,25 12,5] rd/s e de  $\alpha$  [0,1 10,0].

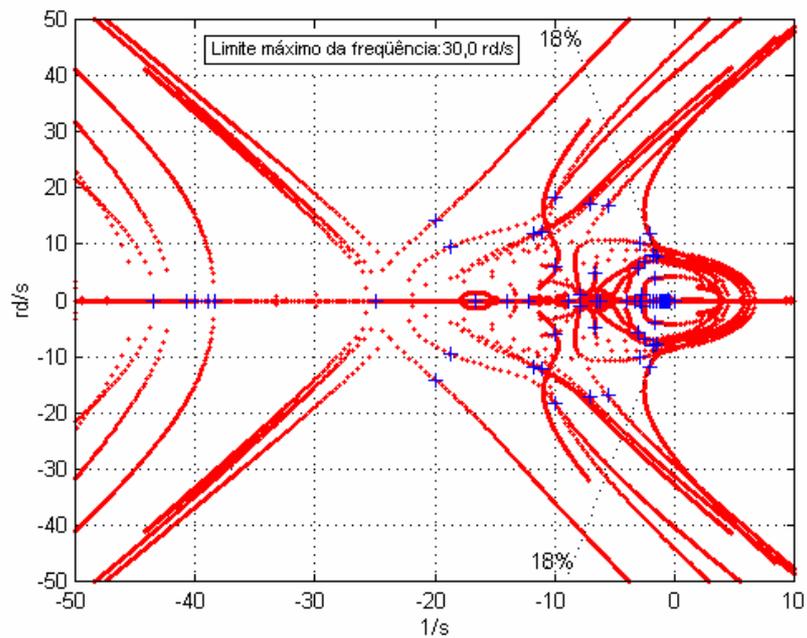


Figura 5. 27 – Contorno das raízes para o sistema New England com o intervalo da frequência [1,25 30,0] rd/s e de  $\alpha$  [0,1 10,0].

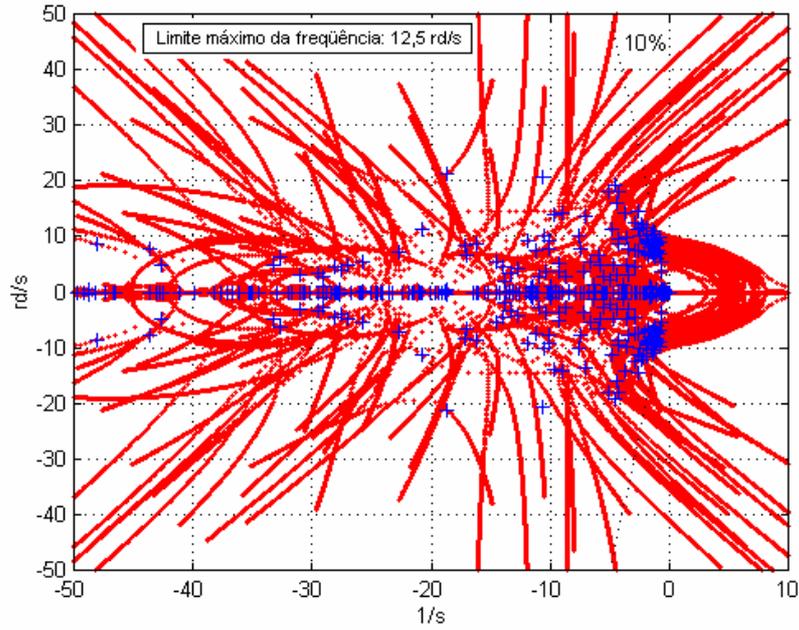


Figura 5. 28 – Contorno das raízes para o sistema Sul/Sudeste brasileiro com o intervalo da frequência  $[1,25\ 12,5]$   $rd/s$  e de  $\alpha [0,1\ 10,0]$ .

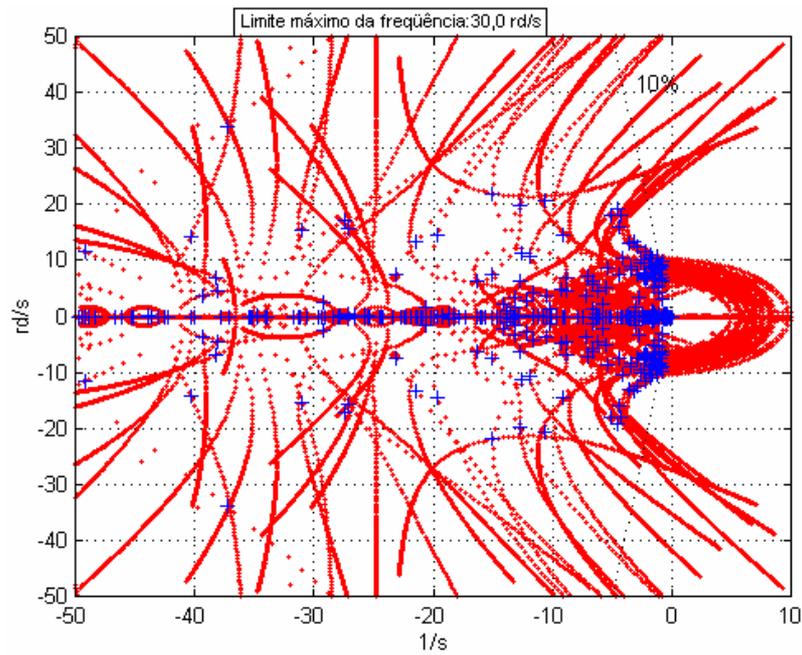


Figura 5. 29 – Contorno das raízes para o sistema Sul/Sudeste brasileiro com o intervalo da frequência  $[1,25\ 30,0]$   $rd/s$  e de  $\alpha [7,0\ 10,0]$ .

## CAPÍTULO 6

### ALGORITMOS GENÉTICOS PARALELOS

O princípio básico de implementação de programas paralelos é dividir as tarefas a serem executadas em partes e resolvê-las separadamente, utilizando os processadores ou computadores disponíveis. Diversos tipos de computadores com diferentes arquiteturas paralelas podem ser utilizados para aplicar os diversos métodos de paralelização de um algoritmo. Estes computadores se dividem em duas classes básicas. A primeira são computadores com memória compartilhada e a segunda são computadores com memória distribuída. Estes computadores podem conter um grande número de processadores. A princípio era esperado que, com esta quantidade grande de processadores o tempo de processamento seria proporcionalmente reduzido. Entretanto, devido à comunicação entre os processadores durante o processamento, existirá um limite para o uso de grande número de processadores. Uma quantidade de tempo significativa será despendida na comunicação. Um parâmetro que mede o tempo despendido relativamente à quantidade de processadores envolvida é a eficiência, a qual é definida como a relação entre o “speedup” (relação entre o tempo de processamento seqüencial e o paralelo) e o número de processadores.

A idéia de paralelização do AG originou-se na década de 50 com Holland. Ele propôs uma máquina paralela capaz de executar, concorrentemente, um número indeterminado de programas. Estas máquinas nunca foram construídas, mas Holland reconheceu a natureza paralela do processo evolucionário e o mapeou para a máquina que projetou [33].

A aplicação da técnica de paralelização ao AG, tem a finalidade básica de reduzir o tempo de processamento para obter a melhor solução e melhorar a qualidade da solução. Quando o AG é aplicado a problemas difíceis, é necessário muitas vezes utilizar populações com grande quantidade de indivíduos. Implicando, portanto, em maior dispêndio de tempo de processamento. Além da redução do custo computacional, com a aplicação dos métodos de paralelização, verifica-se também que não ocorre perda de desempenho do AG, quando comparado ao algoritmo serial, quanto a qualidade da solução obtida. Muito pelo contrário, como será comentado em seções seguintes,

dependendo da técnica de paralelização utilizada, é possível melhorar a qualidade da solução.

Os AGs são fáceis de serem paralelizados. A paralelização do AG pode ser feita através de vários métodos divulgados na literatura. Alguns métodos usam uma única população, enquanto que outros dividem essa população em um conjunto de sub-populações, que são executadas separadamente. Nestes últimos, as sub-populações se comunicam através da topologia computacional que está sendo usada, em instantes pré-definidos. Com relação à topologia, alguns métodos exploram massivamente a arquitetura computacional (computadores com múltiplos processadores), outros exploram múltiplos computadores (rede de computadores), que podem conter um ou mais processadores. A comunicação se faz através de um “software” desenvolvido para esta finalidade. Devido ao fato de se trabalhar com diversas formas topológicas e de comunicação, procurou-se classificar estes métodos para melhor caracterizar a aplicação da paralelização ao AG.

## **6.1 – ALGORITMOS GENÉTICOS PARALELOS**

Os AGs Paralelos são classificados de acordo com a quantidade de processadores envolvidos, níveis de comunicação, quantidade de populações envolvidas e combinação de dois métodos diferentes ou utilização de um mesmo método em dois níveis de processamento. Alguns estão voltados para a redução do tempo de processamento, enquanto que outros, além de reduzir este tempo, melhoram a qualidade da solução. Com relação à comunicação, alguns usam o operador de migração para melhorar a qualidade da solução. Existem quatro classes de AGs paralelos:

- Tipo 1: AGs com paralelização global que usam uma única população e processadores mestre/escravo.
- Tipo 2: AGs paralelo que usam granularidade alta e uma única população.
- Tipo 3: AGs paralelo que usam granularidade baixa e múltiplas populações.
- Tipo 4: AGs paralelo hierárquico que usam uma combinação do método mestre/escravo com os de granularidade alta ou apenas o método de granularidade baixa, onde a migração é diferente nos diversos níveis.

Os AGs do tipo 3 são adequados para computadores paralelos com número pequeno de processadores, onde em cada processador é alocada uma sub-população. Existe um intercâmbio de indivíduos entre estas sub-populações que é denominado de migração. Este tipo é o mais sofisticado dentre os existentes, pelo fato da migração ser influenciada por diversos parâmetros e introduzir mudanças fundamentais na operação dos AGs. Apesar de serem sofisticados, são os mais populares e mais difíceis de serem entendidos, porque o efeito da migração ainda não está completamente esclarecido. Neste tipo, desde que o tamanho das sub-populações seja menor que o da população única, é esperado uma convergência mais rápida do algoritmo para a melhor solução comparado ao AG serial.

Comparando os três primeiros tipos pode-se dizer que, o do tipo 1 mestre/escravo não afeta o comportamento do AG tradicional. Neste algoritmo toda população estará sempre armazenada no processador mestre. Os operadores de recombinação estão também localizados neste processador, onde qualquer indivíduo pode recombinar-se com os outros. A avaliação é executada nos processadores escravos. Entretanto, nos dos tipos 2 e 3, a forma de como o AG tradicional trabalha é alterada. Neste caso a recombinação fica restrita a um determinado conjunto de indivíduos. Em cada processador são executadas as recombinações e a avaliação. Apenas na comunicação ocorre uma interação entre as populações.

No AG do tipo 4 a combinação do método mestre/escravo com o método de granularidade alta, no nível mais elevado funciona como algoritmos que usam múltiplas populações e no nível mais baixo como algoritmos do tipo mestre/escravo. Eles combinam os benefícios de seus componentes e prometem melhor desempenho do que qualquer um desses tipos associados trabalhando isoladamente. Dependerá de uma grande quantidade de processadores.

Um outro tipo de algoritmo hierárquico utiliza nos dois níveis de processamento o método de granularidade baixa, que está relacionado à migração. No nível mais baixo a migração é executada de forma densa enquanto que no nível mais alto menos densa.

### **6.1.1 – Paralelização Mestre/Escravo**

Os AGs deste tipo, também chamado de paralelização global, trabalham com uma única população. A avaliação da adequabilidade de cada indivíduo é feita de forma distribuída (paralelo). O cruzamento e a mutação são executados num único processador

que seria o mestre. Este distribui os indivíduos entre os demais processadores para serem avaliados. O processador mestre também executa a avaliação e nele fica armazenada toda população. Tanto no AG Serial como no Paralelo Mestre/Escravo, cada indivíduo pode competir e recombinar-se com outro qualquer. Apenas a avaliação é executada em paralelo, que é uma forma mais freqüente de implementação. Uma ilustração de como este método trabalha é mostrado na Figura 6.1.

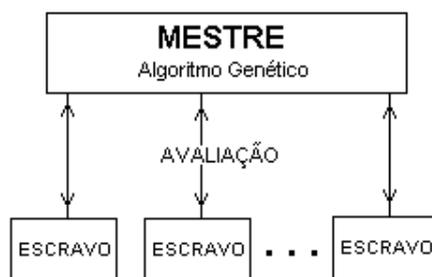


Figura 6.1 – Topologia usada no método de paralelização mestre/escravo.

A avaliação é a operação mais comumente paralelizada e que despense mais tempo. O cálculo da adequabilidade de um indivíduos independe do restante da população. Não é necessário comunicação entre os indivíduos para executá-la. Esta paralelização é feita, dividindo a população pelo número de processadores e alocando uma fração em cada nó. A comunicação ocorre, somente, quando cada escravo recebe o indivíduo a ser avaliado ou retorna a avaliação deste indivíduo.

Este algoritmo pode ser implementado de forma síncrona ou assíncrona. No algoritmo síncrono, o mestre aguarda todos escravos executarem suas tarefas para dar continuidade ao processamento. Esta espera contribui para o aumento do tempo de processamento. Este método de paralelização tem as mesmas propriedades de um AG Simples. Entretanto, no método assíncrono, essa espera não acontece, porém, ele não trabalha como um AG Simples. Em geral, a implementação da paralelização global considera que o algoritmo seja síncrono e a busca seja feita exatamente da mesma forma que no AG Simples.

Este modelo de paralelização não sofre influência da arquitetura computacional usada e pode ser aplicado, eficientemente, tanto em computadores com memória compartilhada como naqueles com memória distribuída.

Na arquitetura com múltiplos processadores que usam memória compartilhada, a população é armazenada nesta memória e cada processador lê os indivíduos alocados e escreve, posteriormente, o resultado da avaliação nela, sem qualquer conflito.

Na arquitetura que tem múltiplos processadores que usam memória distribuída, a população é armazenada em um processador, designado para ser o mestre. Este seria o responsável pela distribuição dos indivíduos pelos outros processadores designados para serem os escravos. Nestes últimos seria executada somente a avaliação, que seria retransmitida ao mestre. O número de indivíduos alocados em cada processador pode ser constante e em alguns casos é necessário fazer um balanço de carga entre os processadores, usando compartilhamento dinâmico.

A paralelização dos operadores de cruzamento, de mutação e seleção é bastante simples, porém o ganho computacional não é significativo. As diversas estratégias de seleção existentes, dependem de informação de toda população, dessa forma exigindo mais comunicação. Este fato obstrui a paralelização da seleção

Esse método pode ser bastante eficiente, quando a avaliação necessita de considerável quantidade de cálculos. Além disso, o comportamento da busca não é alterado, podendo ser aplicada toda teoria conhecida do AG Simples.

Avanços recentes mostraram que um ponto importante deve ser ressaltado que é a quantidade de processadores que estão envolvidos. Quanto mais processadores são usados o tempo de avaliação decresce, mas ao mesmo tempo o custo para transferir indivíduos para os escravos aumenta. Existirá, então, uma solução de compromisso entre a redução do tempo computacional e o aumento do tempo de comunicação. Estabelecendo que, existe um número ótimo de escravos que minimiza o tempo total de execução, pesquisa recente [34] concluiu que o número ótimo de processadores escravos ( $S^*$ ) seria:

$$S^* = \sqrt{\frac{n \cdot T_f}{T_c}} \quad (6.1)$$

onde :

$n$  → tamanho da população

$T_f$  → tempo para executar uma única avaliação

$T_c$  → tempo de comunicação

e o ótimo “speedup” seria  $0,5 \cdot S^*$ .

### 6.1.2 – Paralelização Usando Múltiplas Populações

As características principais dos AGs Paralelos que usam múltiplas populações são: sub-populações alocadas em cada processador e a migração.

Nas referências [18, 33] são citados diversos trabalhos onde pesquisou-se a qualidade da solução obtida por este método. Num dos trabalhos concluiu-se que a qualidade da solução encontrada após a convergência foi pior no caso de populações isoladas do que usando uma única população. Com relação à taxa de migração, a conclusão foi que, quando pequena, as sub-populações comportam-se independentemente e exploram diferentes regiões de busca. Além disso, os indivíduos migrantes não tiveram efeito significativo ao participarem das sub-populações e nem na qualidade das soluções. O efeito foi semelhante ao caso onde as sub-populações estavam isoladas. Entretanto, com taxa de migração maior encontrou-se soluções semelhantes àsquelas encontradas com uma única população. Isto foi um indicativo da existência de uma taxa de migração crítica. Abaixo dela, o desempenho do algoritmo é obstruído pelo isolamento das populações. Acima dela, são encontradas soluções com a mesma qualidade daquela obtida por um algoritmo serial.

Em outra linha de pesquisa foi proposto que, uma cópia do melhor indivíduo de cada população fosse transmitida aos vizinhos após cada geração. Esta comunicação foi constante, para que assegurasse uma mistura boa de indivíduos em cada sub-população. Foi observado, também, que este algoritmo encontrou solução com a mesma qualidade daquela obtida por um algoritmo serial.

Questões importantes surgiram após estas pesquisas e até hoje estão sem resposta, que são:

- Qual o nível de comunicação necessário para fazer um AG Paralelo comportar-se como um AG Serial?
- Qual o custo dessa transmissão?
- O custo da comunicação é suficiente para tornar essa alternativa viável para projetos de um AG Paralelo?

As respostas a estas questões surgirão, quando o efeito da migração na qualidade da busca for entendido. Com relação ao algoritmo com múltiplas populações Cantú-Paz [33] expõe três razões para seu uso:

- Parecem uma simples extensão do AG Serial. Seria o caso de pegar um pouco do AG Serial, executá-lo em cada nó do computador paralelo e migrar um número de indivíduos em um instante pré-determinado.
- Existe um esforço extra, relativamente, menor para converter um AG Serial em um com múltiplas sub-populações. A maior parte do algoritmo permanece o mesmo, somente poucas rotinas são necessárias a serem adicionadas para implementar a migração.
- Computadores paralelos que usam granularidade baixa estão mais facilmente disponíveis. Mesmo quando não estão disponíveis é fácil fazer as simulações com uma rede de estações ou com um único processador usando um software como o MPI (*Message Passing Interface*) ou PVM (*Parallel Virtual Machine*).

Pesquisas recentes indicaram que, nestes algoritmos o parâmetro que mais influencia na qualidade da solução é o tamanho da sub-população. O tamanho da população é também o principal fator para determinar o tempo que o AG precisa para encontrar a melhor solução. Existe uma associação entre uma quantidade ótima e um tamanho para as sub-populações, que maximizam o “speedup”.

#### 6.1.2.1- Algoritmos Genéticos Paralelos com Granularidade Baixa

Estes tipos de AGs Paralelos são bastante promissores com relação ao ganho de desempenho. Eles também são mais complexos do que o AG Simples. Esta complexidade está relacionada, principalmente, à migração, cujo efeito na busca ainda não está muito bem explicado na literatura. Ela é controlada pelos seguintes parâmetros:

- A topologia, que define as conexões entre sub-populações.
- A taxa de migração, que controla quantos indivíduos irão migrar.
- Um intervalo onde ocorre a migração, que influencia na frequência de migração.

A maioria dos trabalhos desenvolvidos para este tipo de AG, que tiveram sucesso nos resultados, foram experimentais. Poucos trabalhos teóricos foram publicados.

## **- Migração**

A migração pode ser executada de forma síncrona ou assíncrona. A migração síncrona é executada em intervalos constantes e pré-determinados. A migração assíncrona é executada após a ocorrência de um evento, por exemplo, só é executada, quando a população estiver próxima da convergência ou quando ocorrer a estagnação da população. A intenção desta última é restaurar a diversidade dentro das sub-populações para se prevenir da convergência prematura a uma solução de baixa qualidade. Uma questão importante surgiu com essas aplicações, que está relacionada ao instante certo para executar a migração. Um indicativo, à primeira análise, parece dizer que se a migração ocorrer cedo, o número de “*buiding blocks*” nos indivíduos migrantes pode ser menor para influenciar na direção certa da busca. Recursos de comunicação de alto custo computacional seriam desperdiçados. O que tudo indica é que, existe um instante no qual é vantajoso executar a migração onde a quantidade de “*buiding blocks*” é suficiente para melhor direcionar a busca.

## **- Topologia da Comunicação**

Um componente tradicional e algumas vezes não considerado em um de um AG Paralelo é a topologia que interliga as sub-populações e está associada ao custo da migração. Ela determina quão rápido ou quão lento uma boa solução é disseminada entre as sub-populações, se a topologia tem uma conectividade densa ou de diâmetro curto ou ambas. Soluções boas se disseminarão mais rapidamente para todas sub-população e podem facilmente assumir o controle da população. Por outro lado, se a topologia for esparsamente conectada ou tem diâmetro grande, soluções boas se disseminarão lentamente e as sub-populações estarão mais isoladas umas das outras, permitindo o surgimento de soluções diferentes. Essas soluções podem vir juntas num instante inicial e se recombinar para formar melhores indivíduos.

Como um exemplo, uma topologia densamente conectada pode promover uma mistura melhor de indivíduos, mas também envolve alto custo de comunicação. Uma ilustração deste tipo de algoritmo é mostrado na Figura 6. 2.

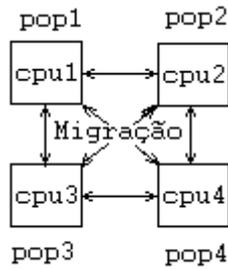


Figura 6. 2– Ilustração do método de paralelização do AG que usa granularidade baixa.

### 6.1.2.2- Algoritmos Genéticos Paralelos com Granularidade Alta

O AG deste tipo é adequado para computadores paralelos com grande número de processadores. Consiste de uma população espacialmente estruturada, que limita as interações entre os indivíduos. Um indivíduo somente compete ou se recombina com seus vizinhos. Assim a seleção, o cruzamento e a mutação estão restritos apenas a uma pequena vizinhança. Como as vizinhanças se superpõem, as soluções boas podem se disseminar através de toda população. Na Figura 6.3 é mostrada a topologia que é usada neste tipo de algoritmo.

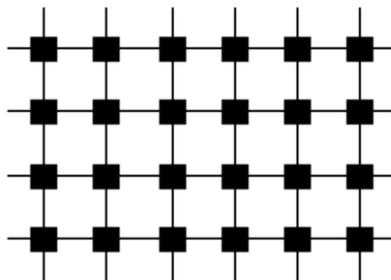


Figura 6.3 - Topologia usada no método com granularidade alta. Cada quadrado corresponde a um processador.

### 6.1.2.3- Algoritmos Genéticos Paralelos Hierárquicos

Utilizam a combinação de dois dos métodos de paralelização do AG. Esses algoritmos híbridos adicionam um novo grau de complexidade a técnica de paralelização do AG. A combinação de dois métodos de paralelização de AGs exige uma hierarquia para comunicação e execução do algoritmo. Num nível superior a maioria deles são algoritmos com populações múltiplas. Num nível inferior usam AG

paralelo com granularidade baixa ou o AG paralelo mestre/escravo em cada uma das sub-populações. A migração ocorre entre as sub-populações e a avaliação dos indivíduos é executada em paralelo. Essa técnica pode ser útil para aplicações complexas, que necessitem de considerável quantidade de cálculos para obter a avaliação.

A Figura 6.4 e a Figura 6.5 mostram as topologias de dois tipos de algoritmos genético paralelo hierárquico, que podem ser usados de acordo com a disponibilidade computacional.

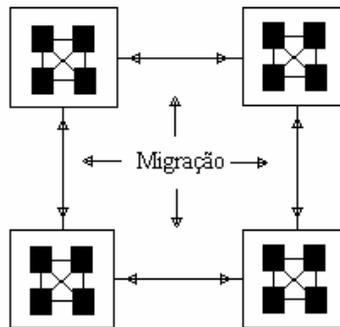


Figura 6.4 – Topologia usada em um AG Paralelo Hierárquico onde tanto no nível superior como no inferior são usadas múltiplas sub-populações (demes).

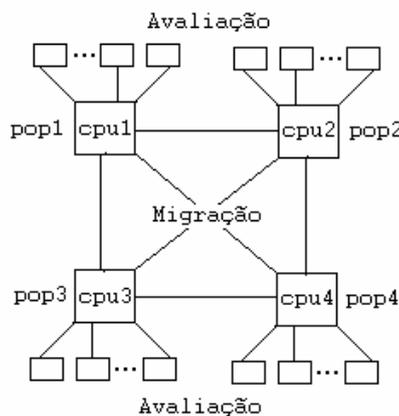


Figura 6.5 - AG Hierárquico onde no nível inferior são executadas as avaliações com o método mestre/escravo e no nível superior o método de múltiplas populações.

As implementações, que usam o método do AG hierárquico, podem reduzir ainda mais o tempo computacional do que o uso de um de seus componentes sozinho.

## 6.2 – AVALIAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO PARALELO NO PROBLEMA DE AJUSTES DE CONTROLADORES

A aplicação dessa técnica ao problema do ajuste de estabilizadores de um sistema de potência tem como primeira meta reduzir o tempo de processamento e uma segunda meta verificar a efetividade do paralelismo na melhoria da qualidade da solução. O tempo elevado de processamento é devido principalmente à utilização do método QR para cálculo dos autovalores (avaliação). Este método despende muito tempo, porque todos autovalores do sistema são calculados. Este tempo cresce com o cubo, das dimensões das matrizes envolvidas [16]. Na comparação da qualidade da solução do AG serial com o paralelo, foi utilizado o sistema New England por ser menor e mais rápida a obtenção da solução.

A disponibilidade de processadores, na máquina paralela utilizada foi o fator limitante para explorar todos os métodos citados neste capítulo. Entretanto, dois métodos poderiam ser utilizados dentre os citados anteriormente. Um seria a paralelização usando a estratégia mestre/escravo e o outro usando múltiplas sub-populações (*demes*).

O primeiro apenas reduziria o tempo de processamento, utilizando uma única população, que estaria alocada no processador mestre e a avaliação seria executada nos processadores escravos. A avaliação consistiria do cálculo dos autovalores e da identificação do menor amortecimento, para cada ajuste representado pelos cromossomos, sendo que a função objetivo é função do menor amortecimento dentre todos autovalores. Este método tem praticamente a mesma funcionalidade do AG Simplex. Não existe um fato novo que poderia reduzir o tempo de obtenção da melhor solução e ao mesmo tempo melhorar a qualidade desta solução.

O segundo método utiliza sub-populações (granularidade baixa), cada uma alocada em um processador, onde são executadas todas operações pertinentes ao AG. Num instante pré-determinado um conjunto composto do melhor indivíduo de cada processador migra para todos processadores. Esta aplicação usa um único programa que é executado simultaneamente pelos processadores envolvidos independentemente. Devido às características deste método de paralelização e a utilização do deslocamento e da variação do tamanho da região de busca, ele foi selecionado para a aplicação a que se propõe esta tese.

A topologia usada, função da disponibilidade de processadores, tem apenas quatro processadores, é mostrada na Figura 6.6. Para comunicação entre os processadores o software MPI (*Message Passing Interface*) foi usado.

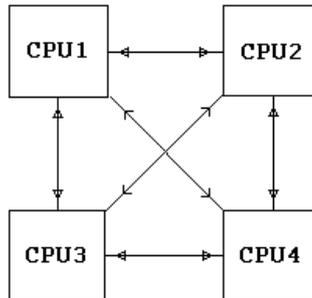


Figura 6.6 – Topologia densa usada no computador da IBM R/6000 SP com quatro processadores.

As características do AG que foi usado em todas simulações são as seguintes:

- A representação do cromossomo utilizada foi a real.
- Utiliza a técnica do capítulo 4 de variação dinâmica do tamanho e da posição da região de busca, após executado um determinado número de gerações.
- A taxa de mutação varia exponencialmente, é truncada a partir de um determinado valor e reiniciada quando é executada a variação da região de busca.
- A taxa de cruzamento é constante e o tipo usado foi o uniforme.
- Utiliza o pré-aquecimento para obter um conjunto inicial de indivíduos acima de um valor de adequabilidade pré-especificado.
- Número de indivíduos na população o menor possível.
- Migração do melhor indivíduo de cada sub-população para todos processadores no instante da variação da região de busca.

Para transformar o programa serial em paralelo foi necessário acrescentar algumas linhas de comando do software MPI [45] para que durante a execução cada processador visualize o mesmo programa compilado e o execute independentemente. O AG executado em um processador, tem uma semente diferente dos demais, no gerador

de números pseudo-aleatórios. Inicialmente, todos algoritmos começam a busca na mesma região. Como as sementes dos geradores de números são diferentes, serão obtidos indivíduos diferentes nas sub-populações. Em cada processador estará contido um conjunto diferente de indivíduos. Iniciada a busca, após um número especificado de gerações, a variação do tamanho ou da posição da região de busca é executada. Antes de variar a região de busca, a migração é executada sincronizadamente. Um conjunto de indivíduos migrantes, composto pelos melhores indivíduos de cada processador selecionados pelo elitismo, migrará para as sub-populações. Estes indivíduos substituirão aqueles com menor adequabilidade em cada processador. Após a migração, o elitismo é novamente executado para identificar o melhor indivíduo em cada sub-população. Este indivíduo será a referência para o cálculo dos limites da nova região de busca em cada processador. A nova região de busca é função do melhor indivíduo migrante que direcionará a busca. Dessa forma, procurou-se introduzir a influência dos indivíduos migrantes nas sub-populações e no direcionamento da busca. Isso contraria as aplicações descritas em [18] e [33] onde não se conseguiu obter melhor qualidade na solução com poucos indivíduos migrantes (baixa taxa de migração). Somente com uma taxa acima do valor crítico se consegue melhores resultados. Existirá um compromisso entre menor taxa de migração (menor quantidade de migrantes) e melhor qualidade na solução (solução de mesma qualidade do algoritmo serial).

Esse procedimento cria dois níveis de elitismo. Um relativo ao conjunto dos indivíduos migrantes, durante a criação da nova região de busca e o outro intrínseco às sub-populações ao longo de cada nova geração.

A taxa de mutação varia exponencialmente. Inicia com um valor previamente determinado e é truncada a partir de um valor especificado. A cada variação da região de busca ela é reinicializada.

As variáveis sujeitas ao cruzamento, do tipo uniforme, simplesmente trocam de cromossomo. O cruzamento aritmético não foi aplicado e sua função seria de alterar estes valores tal como na representação binária.

A função do cruzamento seria a de recombinar o conjunto de valores contidos nos cromossomos de uma população. A da mutação seria a de recombinar o conjunto de valores contidos na nova região de busca, definida pelo melhor indivíduo após a migração.

O pré-aquecimento foi usado para melhorar o condicionamento do AG paralelo no início da busca. É executado em cada processador e estes conjuntos de indivíduos serão

diferentes, devido ao uso de sementes diferentes no gerador de números pseudo-aleatórios. Portanto, num dos processadores o AG estará mais bem condicionado do que nos outros, onde poderá ocorrer o melhor indivíduo migrante.

Inicialmente, foram feitas simulações usando o sistema de New England por ser menor e, portanto, mais rápida a obtenção dos resultados. Posteriormente, foram feitos testes com o sistema Sul/Sudeste brasileiro.

As primeiras aplicações do AG paralelo foram realizadas com a finalidade de ajustar seus parâmetros, com a intenção de melhorar o seu desempenho. Após estes testes foram feitas simulações para comparar o desempenho do AG paralelo com o serial. Estas comparações foram relativas à velocidade de obtenção da melhor solução, a qualidade da solução e o efeito de parâmetros. Nestes testes procurou-se obter soluções no algoritmo paralelo que fossem melhores ou iguais às do algoritmo serial. Um algoritmo que descreve a aplicação do AG paralelo é mostrado a seguir.

*Ler dados de entrada*

*Iniciar o gerador de números pseudo-aleatório*

*Uma semente para cada processador*

*Criar a primeira população em cada processador*

*Executar o pré-aquecimento*

*Criar os demais indivíduos pseudo-aleatoriamente*

*Executar este ciclo  $n_1$  vezes (número de gerações inicial)*

*Calcular a geração em cada processador*

*Aplicar o elitismo*

*Continuar*

*Executar este ciclo  $n_2$  vezes*

*Aplicar o fator de redução  $0.0 < f_r < 1.0$*

*aos valores obtidos na melhor solução*

*(melhor indivíduo migrante).*

*Modificar a quantidade de gerações (opcional).*

*Reiniciar a taxa de mutação  $p_m = p_{m\max}$ .*

*Executar  $n_3$  gerações (redução)*

*Calcular a geração em cada processador*

*Aplicar o elitismo em cada processador*

*Continuar*

*Selecionar o melhor indivíduo em cada processador*

*Executar a migração (sincronizada)*

*Aplicar o elitismo em cada processador*

*Aplicar um fator de deslocamento  $f_d > 1.0$  aos valores obtidos na melhor solução (melhor indivíduo migrante).*

*Calcular os novos intervalos, aplicando-se um fator de expansão que pode ser  $f_e \geq 1.0$  ou  $f_e < 1.0$  ao ponto deslocado.*

*Modificar a quantidade de gerações (opcional).*

*Reiniciar a taxa de mutação  $p_m = p_{m\acute{a}x}$ .*

*Executar este ciclo  $n_4$  vezes (deslocamento e expansão)*

*Calcular as gerações em cada processador*

*Aplicar o elitismo em cada processador*

*Continuar*

*Selecionar o melhor indivíduo em cada processador*

*Executar a migração (síncronizada)*

*Aplicar o elitismo em cada processador*

*Continuar*

*Fim*

### **6.2.1 – Melhoria do Desempenho do Algoritmo Genético Paralelo**

Inicialmente foi feito um ajuste no AG Paralelo para melhorar seu desempenho como mostrado na Figura 6.7. Foram feitas simulações onde variou-se os parâmetros da região de busca, número de gerações inicial e taxa de mutação.

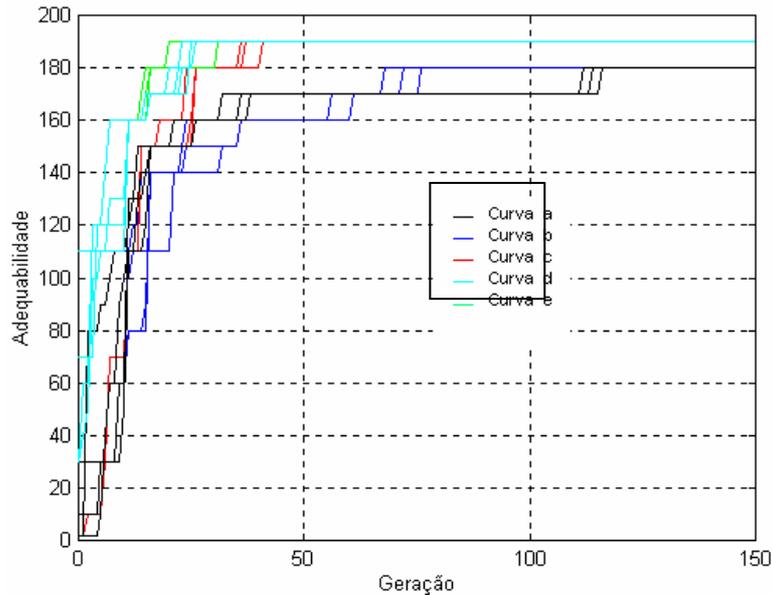


Figura 6.7 – Evolução do melhor indivíduo ao longo das simulações. Ajuste dos parâmetros do AG considerando 50 indivíduos em cada processador.

As curvas **a** e **b** tem os seguintes parâmetros de variação da região de busca:  $f_r=0,3$ ,  $f_d=1,8$  e  $f_e=1,3$ . Modificando estes parâmetros além da variação da taxa de mutação e do número inicial de indivíduos na população obtém-se o desempenho mostrado nas curvas **c**, **d**, **e**.

De acordo com estes resultados, o ajuste adotado, que forneceu melhor desempenho, foi: taxa de mutação igual a 0,1, número de gerações inicial igual a 10 e os parâmetros para variação da região de busca:  $f_r=0,3$ ,  $f_d=1,3$  e  $f_e=1,2$ . Onde levou-se em consideração o baricentro da região de busca (curva **e**).

O número de indivíduos migrantes foi igual a 4. Neste caso o melhor indivíduo da cada processador migrará para os demais. O migrante de cada processador não migrará para o próprio processador. Portanto, cada processador receberá 3 indivíduos, generalizando, será  $N_{pr} - 1$ , sendo  $N_{pr}$  o número total de processadores usados. Este número mostrou ser mais adequado, para que a pressão seletiva exercida na população, pelos indivíduos migrantes seja a menor possível. Evitou-se maior número destes indivíduos para não serem, também, dominantes na população. A migração ocorre, quando a região de busca é modificada. O melhor indivíduo migrante será o baricentro da nova região de busca. Dessa forma o melhor indivíduo migrante, além de influenciar a população ao se recombinar, também direcionará a busca.

As características paramétricas do algoritmo paralelo utilizado foram as seguintes:

- Tamanho da população: fixa
- Número de gerações:
  - Inicial: 10
  - Região reduzida: 5
  - Região expandida: 10
- Representação da variável no cromossomo: real.
- Tamanho do cromossomo: igual ao número de parâmetros das estruturas dos controladores.
- Tipo de cruzamento: uniforme
- Tipo de mutação: uniforme
- Taxa de ocorrer ou não o cruzamento: 0,8
- Taxa de cruzamento uniforme: 0,4
- Taxa de mutação: 0,1
- Utiliza elitismo.
- Utiliza o pré-aquecimento com 7 indivíduos.
- Tipo de seleção: torneio.
- Número de indivíduos no torneio: 4
- Número total de indivíduos migrantes: 4 (os de maior adequabilidade).

Utilizando estes ajustes, procedeu-se às simulações, para avaliação da qualidade e do tempo gasto na obtenção destas soluções, comparando-as às soluções obtidas com o algoritmo serial. Ressalta-se que a semente do gerador de números pseudo-aleatório, usada no algoritmo serial, foi igual àquela que deu a melhor solução dentre aquelas usadas no algoritmo paralelo. Isto foi importante, para que a comparação fosse mais justa.

## 6.2.2 – População do Algoritmo Paralelo em cada Processador Igual a um Quarto do Serial

Nesta simulação foi verificado o desempenho do AG paralelo com uma população de 50 indivíduos em cada processador relativamente a um algoritmo serial com 200 indivíduos na população.

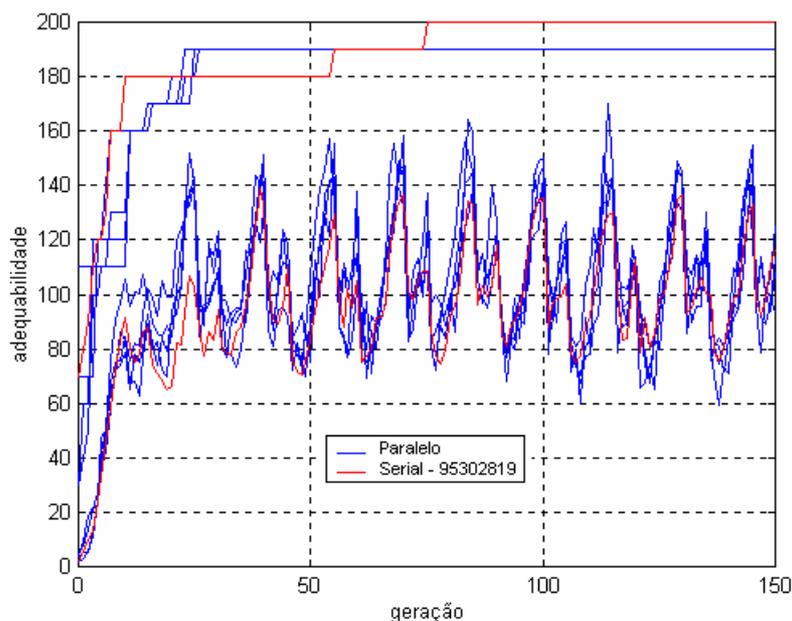


Figura 6.8 – Resultado do algoritmo paralelo (adequabilidade máxima e média) com 50 indivíduos em cada processador e do serial com 200 indivíduos.

Os resultados mostrados na Figura 6.8 indicam um melhor desempenho do algoritmo serial na obtenção de uma solução de melhor qualidade. Este algoritmo obteve soluções com desempenho igual a 200 amortecimento entre 19 e 20%. Entretanto, no paralelo estas soluções tiveram desempenho igual a 190 amortecimento entre (18 e 19%). Analisando os resultados relativos aos autovalores, verificou-se uma diferença marginal no autovalor com menor amortecimento, indicativo de que ambos os resultados seriam considerados qualitativamente idênticos. Além disso, as soluções de ajuste de melhor adequabilidade obtida em cada processador foram semelhantes.

Pode ser observado, também, na Figura 6.8 que a adequabilidade média da população em ambos os algoritmos não atinge o valor máximo ou valores bem próximos a ele. Isto é explicado pelo fato de ser executada a variação da região de busca e de reinicializar a taxa de mutação no instante em que é feita a variação da região.

Além dos efeitos dessas estratégias, os indivíduos migrantes irão também influenciar no valor médio. A diversidade da população permanece alta por causa destes efeitos, o que, de certa forma, é benéfico para a busca, evitando a estagnação da população, porque o maior interesse está na obtenção da melhor solução.

O tempo de processamento no algoritmo paralelo é menor, para obter sua melhor solução do que no serial. Isto está relacionado ao número de indivíduos em cada população, ser menor do que no algoritmo serial. Observando a Figura 6.8, apesar do algoritmo paralelo não obter a melhor solução antes do algoritmo serial, a quantidade de cálculos no serial é maior. Até o instante em que o algoritmo serial obtém a melhor solução (adequabilidade 190) igual a do paralelo foram executados 112000 algoritmos QR (56x200x10) em 6,47 h, por outro lado, no paralelo foram executados 48000 algoritmos QR (24x50x10) em 0,43 h. O speedup é igual a 15,04 super linear e a eficiência igual a 3,76. Estes valores expressam o potencial do algoritmo paralelo frente ao serial. Os tempos obtidos nesta etapa foram influenciados pelo compartilhamento com outros programas.

### 6.2.3 – População do Algoritmo Paralelo em cada Processador Igual a do Serial

Nesta primeira situação, com poucos indivíduos na população (50 indivíduos), o algoritmo serial obtém soluções de mesmo desempenho.

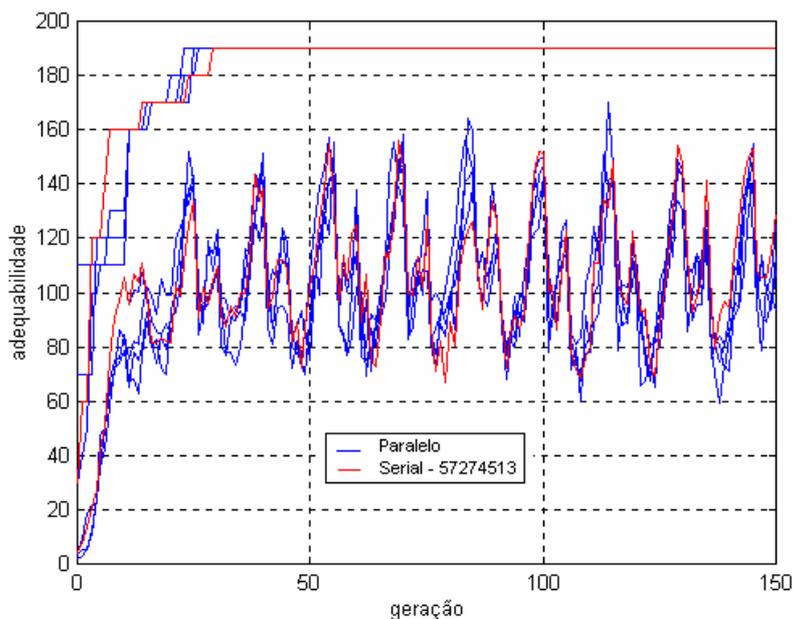


Figura 6.9 – Resultados do algoritmo paralelo (adequabilidade máxima e média) com 50 indivíduos em cada processador e do serial também com 50 indivíduos.

O tempo de processamento do algoritmo paralelo mostrou ser menor, para obter a melhor solução, com a mesma adequabilidade que o serial. Observando a Figura 6.9, a quantidade de cálculos envolvida no algoritmo serial foi maior. Até o instante em que o algoritmo serial obtém sua melhor solução foram executados 15000 algoritmos QR (30x50x10) em 0,87 h. Por outro lado, no paralelo foram executados 48000 algoritmos QR (24x50x10) em 0,43 h. O speedup é igual a 2,02 e a eficiência igual a 0,51. Estes valores expressam o potencial do algoritmo paralelo frente ao serial. Os tempos obtidos nesta etapa foram influenciados pelo compartilhamento com outros programas.

Nesta segunda simulação, cujos resultados gráficos são mostrados na Figura 6.10, o tamanho da população em cada processador do algoritmo paralelo e no serial é igual a 200 indivíduos. O algoritmo paralelo e o serial obtém indivíduos com adequabilidade 200 (19 a 20%). Portanto, indicando melhoria do desempenho de ambos algoritmos com relação ao teste anterior. Se comparado com o mesmo valor de melhor adequabilidade, o paralelo apresentou um desempenho ainda melhor atingindo o valor de adequabilidade 200 em menos tempo do que o serial. Além da influência da migração, existe também a dos "building blocks". Neste caso a contribuição maior destes últimos está relacionado ao tamanho da população. Por serem em maior quantidade na população contribuirão para que os migrantes os contenha também em maior número.

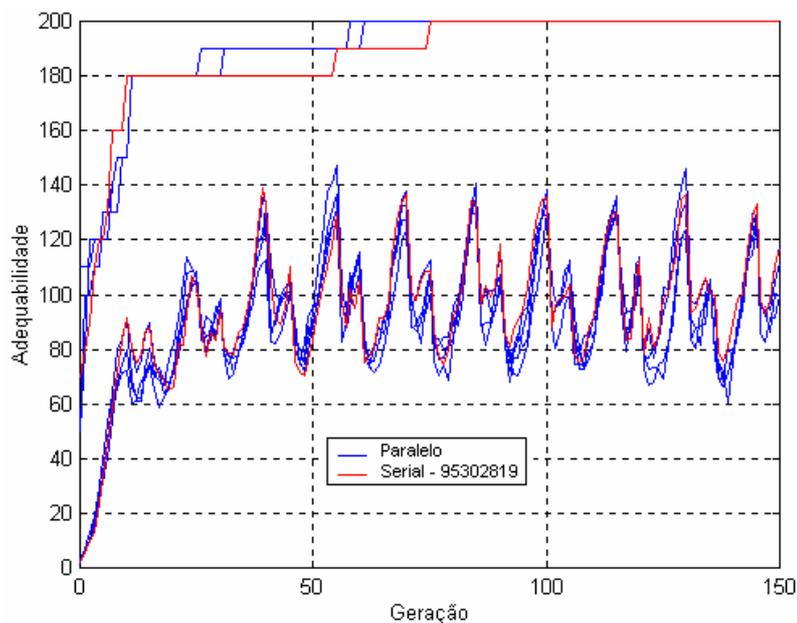


Figura 6.10 – Resultados do algoritmo paralelo (adequabilidade máxima e média) com 200 indivíduos em cada processador e do serial com também com 200 indivíduos.

O tempo de processamento do algoritmo paralelo é menor, para obter a mesma solução do serial. Observando a Figura 6.9, o algoritmo paralelo obteve a melhor solução antes do algoritmo serial, apesar de terem apresentado o mesmo desempenho a quantidade de cálculos envolvida no serial é maior. Até o instante em que o algoritmo serial obteve a melhor solução (adequabilidade 190) foram executados 112000 algoritmos QR (56x200x10) em 6,47 h, por outro lado, no paralelo foram executados 52000 (26x200x10) algoritmos QR em 1,88 h. O speedup é igual a 3,44 e a eficiência igual a 0,86. Estes valores expressam o potencial do algoritmo paralelo frente ao serial. Os tempos obtidos nesta etapa foram influenciados pelo compartilhamento com outros programas.

Como pode ser observado nos gráficos da Figura 6.9 o tempo de processamento no AG paralelo é menor do que no serial em ambos os testes. Esta vantagem está relacionada principalmente à migração, que introduziu os melhores indivíduos em todos processadores, os quais recombinações nas populações resultou em indivíduos com melhor adequabilidade.

#### **6.2.4 – Variando o Tamanho da População do Algoritmo Serial e Mantendo Fixa a do Paralelo**

Este teste mostra qual seria o melhor tamanho da população no algoritmo serial de modo que alcançasse a mesma solução do algoritmo paralelo, com 50 indivíduos em cada processador, com o menor tempo possível. Foram utilizadas duas sementes do algoritmo paralelo. Uma que iniciou a execução do algoritmo serial com uma solução de alto desempenho e outra com uma solução com baixo desempenho. Esta última forneceu o melhor desempenho do algoritmo.

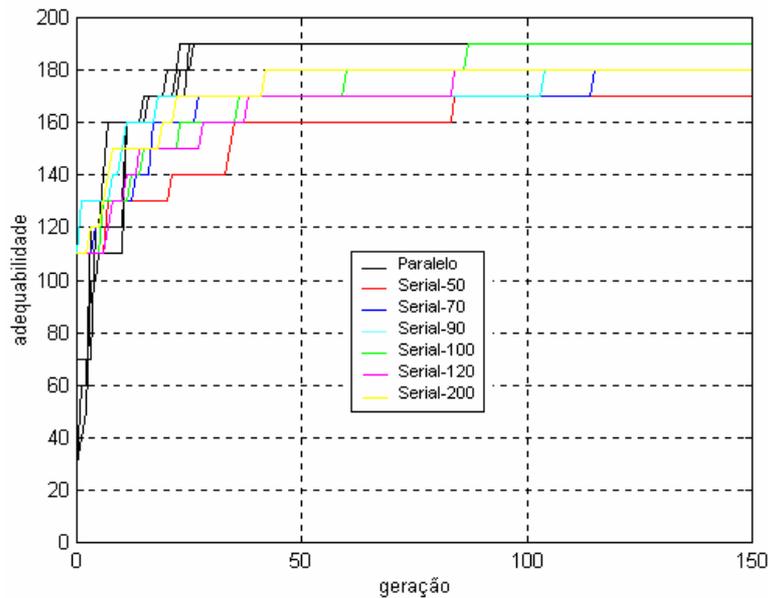


Figura 6.11 – Evolução do melhor indivíduo no algoritmo serial para população com vários tamanhos e no algoritmo paralelo com 50 indivíduos em cada processador. Semente do gerador de números no serial foi -25710837.

Os resultados com a semente -25710837 mostrados na Figura 6.11, indicaram que, apesar da adequabilidade do melhor indivíduo ser 110 na primeira população de todos os algoritmos seriais, apenas o algoritmo com tamanho da população igual a 100 obteve soluções com mesma qualidade do paralelo. Pode ser observado que este é um fato interessante, porque quanto mais indivíduos na população, melhor o condicionamento do AG. Este efeito é explicado pelas recombinações feitas ao longo do processamento. A mesma taxa de cruzamento e mutação foram aplicadas em cada simulação do serial. Quando foi executado o cruzamento, originou-se um indivíduo mais adequado ou um valor bom foi introduzido pela mutação em um indivíduo. Uma destas duas ações ou ambas deve ter resultado um indivíduo melhor, que direcionou para a solução com adequabilidade 190. Os demais testes alcançaram um desempenho 180 (17 a 18%) e o paralelo 190 (18 a 19%) esta diferença de desempenho não é crítica, quando se analisa o autovalor de amortecimento mínimo em ambos algoritmos. O algoritmo com um tamanho da população igual a 50 foi o único que não atingiu o desempenho 180.

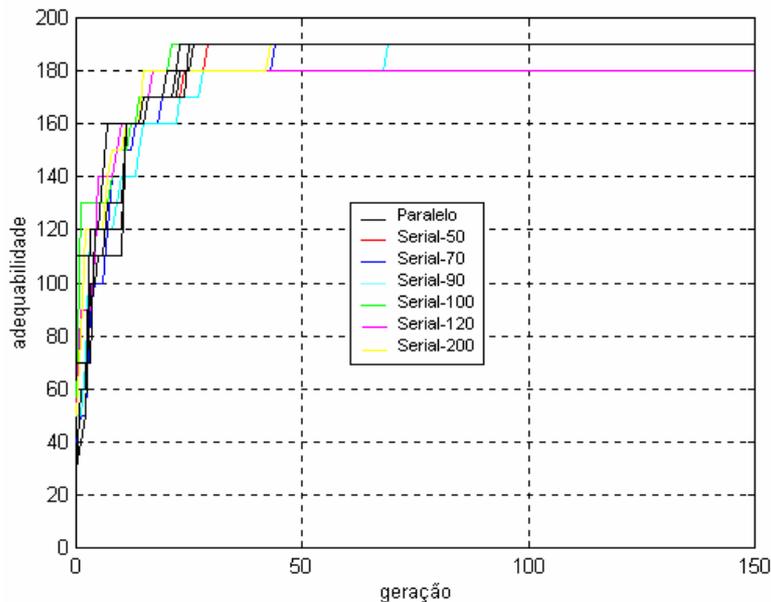


Figura 6.12 - Evolução do melhor indivíduo no algoritmo serial para vários tamanho da população comparado ao paralelo com 50 indivíduos em cada processador..

Os resultados com a semente -57274513 mostrados na Figura 6.12, indicam que apesar da adequabilidade do melhor indivíduo ser 50 (4 a 5%) na primeira população, todas as simulações alcançaram o valor de adequabilidade 190 (18 a 19%) em instantes diferentes. Este fato merece destaque, por ser esta a melhor semente dentre aquelas utilizadas no algoritmo paralelo. Apenas o algoritmo com tamanho da população igual a 120 não alcançou uma solução com adequabilidade 180. A qualidade da solução entre os dois métodos pode ser considerada idêntica, exceto quanto ao tempo total de processamento.

Um aprendizado maior obtido destas comparações merece ser evidenciado. O desempenho do algoritmo paralelo mostrou ser idêntico ao serial, quanto aos resultados de ajustes obtidos, exceto no tempo de processamento. A maior vantagem do algoritmo paralelo está na migração, onde os melhores indivíduos migram para cada processador no instante de variação da região de busca, condicionando melhor o algoritmo em todos processadores. A migração favorece o uso de uma população menor, resultando em menor tempo de processamento. Com a ajuda da migração o algoritmo paralelo independe do valor da semente do gerador de números pseudo-aleatórios, de ajuste freqüente das taxas de mutação e de cruzamento e do tamanho da população. Além

disso, a variação da região de busca também tem uma parcela de contribuição no direcionamento da busca, por ser função do melhor indivíduo migrante.

### 6.2.5 – Algoritmo Genético Paralelo Com e Sem o Pré-aquecimento

A função do pré-aquecimento é criar um conjunto de indivíduos na população inicial com um valor de adequabilidade acima de um valor especificado. Este conjunto irá condicionar melhor a busca e reduzirá o tempo gasto com o processamento. A aplicação desta estratégia ao AG paralelo contribui significativamente para melhorar o seu desempenho. Na Figura 6.13 são mostrados os gráficos onde pode ser comparado os efeitos do uso ou não desta estratégia.

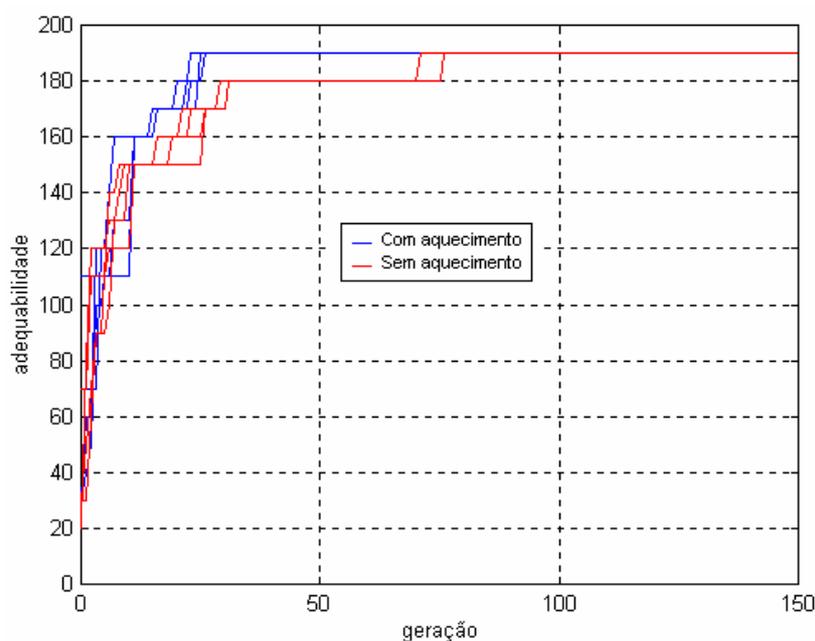


Figura 6.13 – Evolução do melhor indivíduo com e sem a estratégia do pré-aquecimento com 50 indivíduos em cada processador.

Pode ser observado nos gráficos que ambas simulações alcançaram o mesmo valor máximo de adequabilidade em instantes diferentes. Fica evidente que o algoritmo com o pré-aquecimento obteve mais rapidamente a melhor solução. Este fato é devido a existência de maior densidade de “*building blocks*” na população inicial originários do conjunto de indivíduos obtidos no pré-aquecimento. O tempo gasto para obter a melhor solução com pré-aquecimento foi de 0,43 h e sem pré-aquecimento foi de 1,3 h a diferença de tempo entre os dois algoritmos foi de 0,87 h.

### 6.2.6 – Efeito da Migração no Algoritmo Genético Paralelo

A função da migração é combinar indivíduos entre os processadores propagando os “*building blocks*”. Neste trabalho a estratégia de migração usada foi migrar o melhor indivíduo de cada processador para os demais. Para mostrar que não foi o resultado obtido com a melhor semente do gerador de números pseudo-aleatórios que dominou toda a busca, uma análise é feita a seguir.

#### - Efeito do instante onde é executada a migração

Este teste mostra quão importante é a migração para o algoritmo genético paralelo. Na Figura 6.14 pode ser observado que a migração executada, após a variação da região de busca, ajuda de maneira fundamental a obtenção da melhor solução em todos processadores. Os melhores indivíduos transferidos para os processadores contribuem para o aumento da densidade dos “*building blocks*” tanto na população como nos melhores indivíduos. Todos processadores alcançam resultados com a mesma adequabilidade. Sem a migração em cada processador é obtida uma solução diferente, inclusive algumas não alcançando o valor máximo obtido quando houve migração. Estas simulações são iguais às do algoritmo serial executado com cada uma das sementes do gerador de números pseudo-aleatórios do algoritmo paralelo. Considerando que a migração seja executada a cada geração, o algoritmo não alcança a melhor solução. Isto é explicado pela migração de indivíduos de baixa adequabilidade, principalmente nas primeiras gerações, que pode resultar em soluções potencialmente pobres. Encontrados indivíduos de alta adequabilidade, estes passam a dominar as populações pelo fato de migrarem várias vezes a cada geração, levando à estagnação das populações.

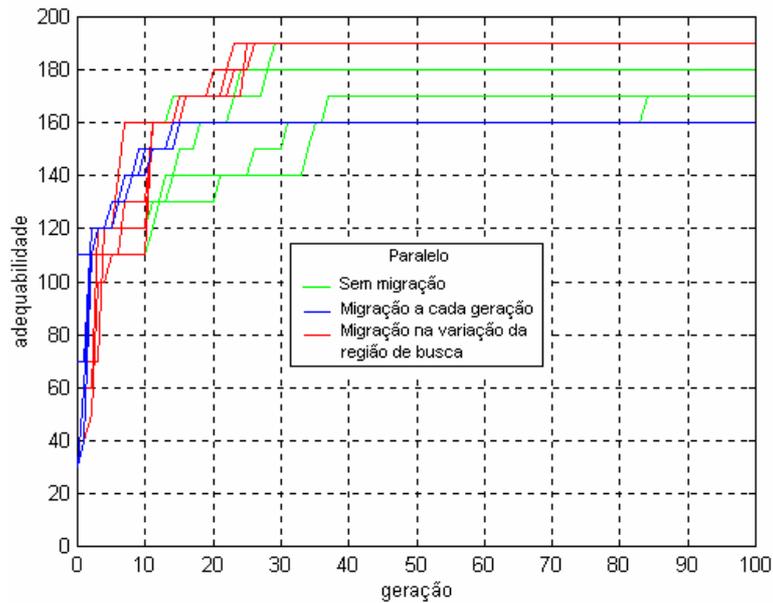


Figura 6.14 – Evolução do melhor indivíduo no algoritmo paralelo considerando ou não a migração

### - Efeito da migração nas populações de cada processador

Este teste mostra como o melhor indivíduo evolui em cada processador, após executada a migração. Na Figura 6.15 o tamanho da população em cada processador é igual a 50 e na Figura 6.16 igual a 200 indivíduos.

Pode ser observado em ambas as figuras que o melhor indivíduo migrante contribui para aumentar a densidade de “*buildings blocks*” em cada população. Isto é verificado pelo comportamento das melhores soluções a cada geração estarem caminhando na direção da melhor solução global. Um fato importante é a ocorrência do melhor indivíduo migrante em processadores diferentes ao longo do processamento. Dessa forma fica comprovado que este operador melhora o desempenho do AG paralelo no direcionamento da busca. Além disso, a execução da migração no instante da variação da região de busca faz com que seus limites sejam em função do melhor indivíduo migrante

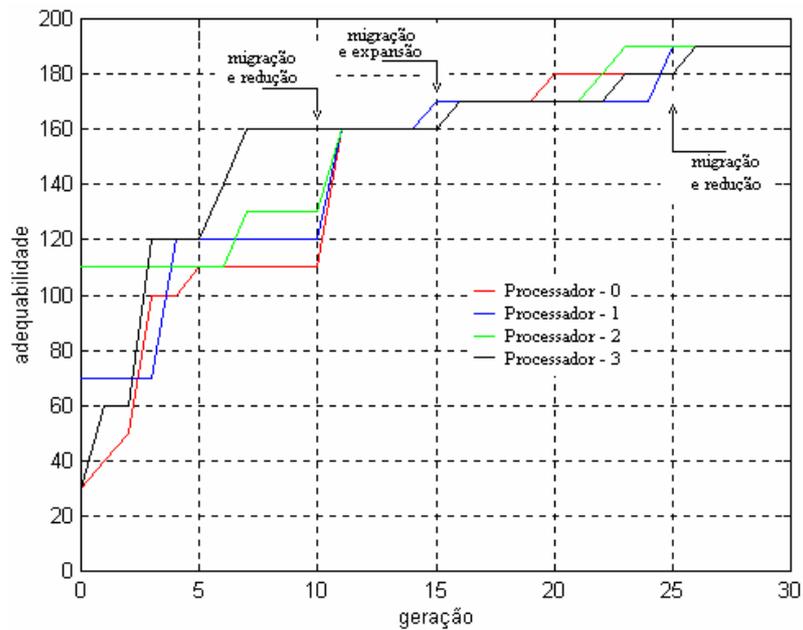


Figura 6.15 – Comportamento evolutivo do melhor indivíduo em cada população ao ser executada a migração. População com 50 indivíduos em cada processador.

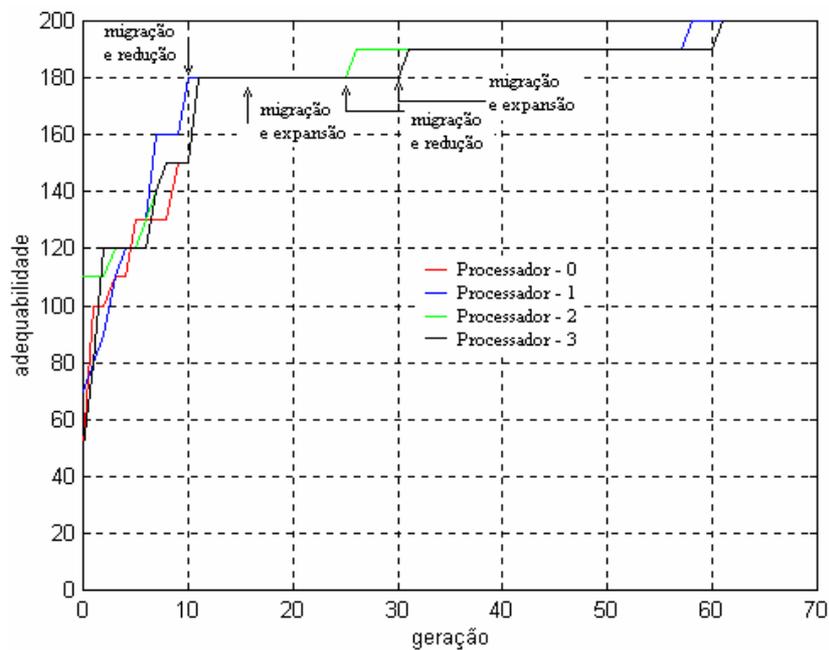


Figura 6.16 – Comportamento evolutivo do melhor indivíduo em cada população ao ser executada a migração. População com 200 indivíduos em cada processador.

Nas simulações onde o tamanho da população é de 50 indivíduos (Figura 6.15), é observado que o melhor indivíduo migrante ocorre mais freqüentemente em processadores diferentes. Por outro lado, quando o tamanho da população é de 200

indivíduos uma variação com a mesma intensidade não é verificada (Figura 6.16). Este comportamento está relacionado ao tamanho da população, onde maior a população maior a densidade de "*buildings blocks*", por consequência, melhores soluções são obtidas no início.

### **6.3 – APLICAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO PARALELO AO PROBLEMA DE AJUSTE DE ESTABILIZADORES DE SISTEMA DE POTÊNCIA**

O primeiro sistema onde foi feita esta aplicação foi o sistema New England e o segundo foi o sistema Sul/Sudeste brasileiro descritos no capítulo 5. Neste último foi calculado ajuste para 22 estabilizadores e posteriormente expandido para 33 estabilizadores, aumentando a complexidade do problema.

#### **6.3.1 – Aplicação ao Sistema New England**

Foram usadas as 10 condições de operação descritas na Tabela 5.11. Os parâmetros utilizados no AG foram:

- Tamanho da população: 50 indivíduos
- Número de indivíduos no pré-aquecimento: 7
- Sementes do gerador de números: quatro sementes diferentes
- Tipo de cruzamento: uniforme
- Tipo de mutação: uniforme
- Taxa de cruzamento (probabilidade de ser realizado o cruzamento): 0,80
- Taxa de cruzamento uniforme (probabilidade de ser realizada a troca de valores das posições): 0,4
- Taxa de mutação (exponencial): 0.1 (inicial) e 0.03 (final)
- Tipo de seleção: torneio
- Número de indivíduos no torneio: 4
- Número de blocos avanço-atraso dos estabilizadores: 2
- Sinal estabilizador: velocidade do rotor
- Tamanho do cromossomo: 27

- Número de indivíduos migrantes de cada processador: 1 (o de melhor adequabilidade).
- Instante que é realizada a migração: instante da variação da região de busca.

Foi observado ao longo de toda pesquisa que são obtidas múltiplas soluções com mesmo desempenho nos quatro processadores. Como exemplo, foram escolhidas cinco soluções de cada processador com mesmo desempenho, que podem ser soluções migrantes ou não. Estas soluções são listadas nas Tabelas 6.1 e 6.2.

Tabela 6. 1 – Melhor Ajuste obtido nos processadores 0 e 1.

| Máquinas | Processador 0 |       |       |       |       | Processador 1 |       |       |       |       |
|----------|---------------|-------|-------|-------|-------|---------------|-------|-------|-------|-------|
|          | K             |       |       |       |       | K             |       |       |       |       |
| 30       | 17,93         | 17,92 | 16,95 | 15,29 | 18,13 | 17,92         | 17,92 | 16,95 | 16,95 | 17,92 |
| 31       | 35,17         | 35,17 | 35,17 | 30,61 | 35,71 | 35,17         | 32,30 | 31,83 | 35,17 | 30,61 |
| 32       | 26,05         | 26,04 | 18,27 | 32,31 | 32,31 | 26,04         | 26,04 | 22,25 | 26,33 | 46,56 |
| 33       | 4,60          | 13,03 | 7,37  | 8,86  | 8,86  | 13,03         | 13,03 | 8,13  | 13,03 | 8,86  |
| 34       | 40,82         | 21,11 | 37,32 | 32,21 | 32,21 | 21,11         | 36,53 | 21,34 | 37,32 | 37,32 |
| 35       | 10,77         | 10,76 | 10,99 | 10,76 | 10,76 | 10,76         | 10,76 | 10,76 | 10,76 | 10,76 |
| 37       | 35,14         | 35,13 | 35,13 | 35,13 | 35,13 | 35,13         | 35,13 | 35,13 | 35,13 | 40,78 |
| 38       | 18,97         | 21,86 | 33,54 | 33,54 | 33,54 | 21,86         | 21,86 | 33,54 | 30,44 | 33,54 |
| 39       | 27,70         | 15,66 | 27,70 | 15,66 | 16,03 | 15,66         | 15,66 | 48,97 | 15,66 | 37,08 |
| Máquinas | Tn            |       |       |       |       | Tn            |       |       |       |       |
| 30       | 0,28          | 0,28  | 0,28  | 0,28  | 0,28  | 0,28          | 0,28  | 0,28  | 0,28  | 0,28  |
| 31       | 0,19          | 0,19  | 0,16  | 0,17  | 0,22  | 0,19          | 0,28  | 0,16  | 0,19  | 0,22  |
| 32       | 0,21          | 0,16  | 0,28  | 0,23  | 0,17  | 0,16          | 0,14  | 0,21  | 0,22  | 0,20  |
| 33       | 0,28          | 0,19  | 0,24  | 0,23  | 0,23  | 0,19          | 0,22  | 0,22  | 0,19  | 0,22  |
| 34       | 0,23          | 0,23  | 0,23  | 0,22  | 0,22  | 0,23          | 0,23  | 0,23  | 0,22  | 0,22  |
| 35       | 0,19          | 0,20  | 0,19  | 0,20  | 0,20  | 0,20          | 0,20  | 0,20  | 0,20  | 0,20  |
| 37       | 0,17          | 0,18  | 0,18  | 0,15  | 0,15  | 0,18          | 0,18  | 0,18  | 0,18  | 0,15  |
| 38       | 0,28          | 0,21  | 0,22  | 0,16  | 0,16  | 0,23          | 0,17  | 0,20  | 0,22  | 0,17  |
| 39       | 0,56          | 0,19  | 0,40  | 0,26  | 0,24  | 0,19          | 0,19  | 0,12  | 0,25  | 0,38  |
| Máquinas | Td            |       |       |       |       | Td            |       |       |       |       |
| 30       | 0,03          | 0,02  | 0,03  | 0,03  | 0,02  | 0,02          | 0,03  | 0,03  | 0,02  | 0,03  |
| 31       | 0,05          | 0,04  | 0,03  | 0,04  | 0,03  | 0,04          | 0,03  | 0,03  | 0,04  | 0,05  |
| 32       | 0,03          | 0,05  | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,05          | 0,04  | 0,03  | 0,04  | 0,03  |
| 33       | 0,05          | 0,06  | 0,05  | 0,06  | 0,06  | 0,06          | 0,05  | 0,05  | 0,06  | 0,05  |
| 34       | 0,03          | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,03          | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,03  |
| 35       | 0,04          | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,03          | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,03  |
| 37       | 0,04          | 0,03  | 0,03  | 0,04  | 0,04  | 0,03          | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,04  |
| 38       | 0,04          | 0,05  | 0,02  | 0,03  | 0,03  | 0,05          | 0,04  | 0,03  | 0,03  | 0,04  |
| 39       | 0,28          | 0,04  | 0,08  | 0,06  | 0,03  | 0,04          | 0,04  | 0,06  | 0,05  | 0,08  |

Tabela 6. 2 – Melhor Ajuste obtido nos processadores 2 e 3.

| Máquinas | Processador 2 |       |       |       |       | Processador 3 |       |       |       |       |
|----------|---------------|-------|-------|-------|-------|---------------|-------|-------|-------|-------|
|          | K             |       |       |       |       | K             |       |       |       |       |
| 30       | 17,93         | 17,92 | 16,95 | 15,29 | 18,13 | 17,92         | 17,92 | 16,95 | 16,95 | 17,92 |
| 31       | 35,17         | 35,17 | 35,17 | 30,61 | 35,71 | 35,17         | 32,30 | 31,83 | 35,17 | 30,61 |
| 32       | 26,05         | 26,04 | 18,27 | 32,31 | 32,31 | 26,04         | 26,04 | 22,25 | 26,33 | 46,56 |
| 33       | 4,60          | 13,03 | 7,37  | 8,86  | 8,86  | 13,03         | 13,03 | 8,13  | 13,03 | 8,86  |
| 34       | 40,82         | 21,11 | 37,32 | 32,21 | 32,21 | 21,11         | 36,53 | 21,34 | 37,32 | 37,32 |
| 35       | 10,77         | 10,76 | 10,99 | 10,76 | 10,76 | 10,76         | 10,76 | 10,76 | 10,76 | 10,76 |
| 37       | 35,14         | 35,13 | 35,13 | 35,13 | 35,13 | 35,13         | 35,13 | 35,13 | 35,13 | 40,78 |
| 38       | 18,97         | 21,86 | 33,54 | 33,54 | 33,54 | 21,86         | 21,86 | 33,54 | 30,44 | 33,54 |
| 39       | 27,70         | 15,66 | 27,70 | 15,66 | 16,03 | 15,66         | 15,66 | 48,97 | 15,66 | 37,08 |
| Máquinas | Tn            |       |       |       |       | Tn            |       |       |       |       |
| 30       | 0,28          | 0,28  | 0,28  | 0,28  | 0,28  | 0,28          | 0,28  | 0,28  | 0,28  | 0,28  |
| 31       | 0,19          | 0,19  | 0,16  | 0,17  | 0,22  | 0,19          | 0,28  | 0,16  | 0,19  | 0,22  |
| 32       | 0,21          | 0,16  | 0,28  | 0,23  | 0,17  | 0,16          | 0,14  | 0,21  | 0,22  | 0,20  |
| 33       | 0,28          | 0,19  | 0,24  | 0,23  | 0,23  | 0,19          | 0,22  | 0,22  | 0,19  | 0,22  |
| 34       | 0,23          | 0,23  | 0,23  | 0,22  | 0,22  | 0,23          | 0,23  | 0,23  | 0,22  | 0,22  |
| 35       | 0,19          | 0,20  | 0,19  | 0,20  | 0,20  | 0,20          | 0,20  | 0,20  | 0,20  | 0,20  |
| 37       | 0,17          | 0,18  | 0,18  | 0,15  | 0,15  | 0,18          | 0,18  | 0,18  | 0,18  | 0,15  |
| 38       | 0,28          | 0,21  | 0,22  | 0,16  | 0,16  | 0,23          | 0,17  | 0,20  | 0,22  | 0,17  |
| 39       | 0,56          | 0,19  | 0,40  | 0,26  | 0,24  | 0,19          | 0,19  | 0,12  | 0,25  | 0,38  |
| Máquinas | Td            |       |       |       |       | Td            |       |       |       |       |
| 30       | 0,03          | 0,02  | 0,03  | 0,03  | 0,02  | 0,02          | 0,03  | 0,03  | 0,02  | 0,03  |
| 31       | 0,05          | 0,04  | 0,03  | 0,04  | 0,03  | 0,04          | 0,03  | 0,03  | 0,04  | 0,05  |
| 32       | 0,03          | 0,05  | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,05          | 0,04  | 0,03  | 0,04  | 0,03  |
| 33       | 0,05          | 0,06  | 0,05  | 0,06  | 0,06  | 0,06          | 0,05  | 0,05  | 0,06  | 0,05  |
| 34       | 0,03          | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,03          | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,03  |
| 35       | 0,04          | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,03          | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,03  |
| 37       | 0,04          | 0,03  | 0,03  | 0,04  | 0,04  | 0,03          | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,04  |
| 38       | 0,04          | 0,05  | 0,02  | 0,03  | 0,03  | 0,05          | 0,04  | 0,03  | 0,03  | 0,04  |
| 39       | 0,28          | 0,04  | 0,08  | 0,06  | 0,03  | 0,04          | 0,04  | 0,06  | 0,05  | 0,08  |

Dentre estas soluções existirá um conjunto de melhor desempenho, que poderão ser implementadas no sistema, que seriam aquelas, por exemplo, cujos modos eletromecânicos variaram pouco suas frequências. A escolha destas soluções poderia ser através de uma outra função objetivo, que levaria em consideração um espectro de frequência de interesse.

Os resultados da Figura 6.17 mostram os autovalores para quatro soluções com mesmo desempenho, cuja adequabilidade é 190, amortecimento entre 18% e 19%, que são as melhores em cada processador. Pode ser observado que a solução A seria a melhor, considerando também o critério da menor frequência de oscilação dos modos eletromecânicos.

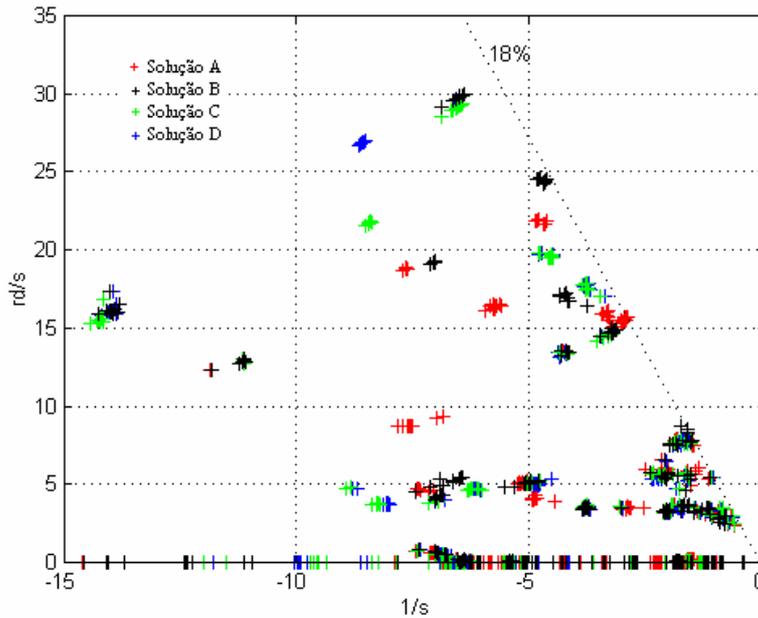


Figura 6.17 – Autovalores do sistema New England para quatro melhores soluções.  
Tamanho da população em cada processador 50 indivíduos.

Os modos dentro do espectro de 15 a 30 rd/s são modos de excitatrizes que foram deslocados para estes pontos através dos ajustes. O aglomerado de autovalores no espectro entre 0 e 10 rd/s são aqueles de maior interesse, porque neste espectro estão localizados os modos eletromecânicos.

A adequabilidade máxima obtida foi 190, o que significa provável existência de zeros, localizados nestes pontos. Apesar de ter sido obtido solução com adequabilidade 200 (19 a 20%), quando o tamanho da população foi aumentado para 200 indivíduos em cada processador, a diferença entre os amortecimentos mínimos dos autovalores, comparando aos resultados obtidos com 50 indivíduos em cada população foi marginal. Na Tabela 6. 3 é mostrado um dos melhores ajustes obtidos com o tamanho da população igual a 200 e 50 indivíduos e na Figura 6.18 são mostrados os autovalores de malha fechada para ambos ajustes.

Tabela 6. 3 – Ajustes obtidos para a população com 50 e 200 indivíduos.

| Ajustes                      |      |      |                             |      |      |
|------------------------------|------|------|-----------------------------|------|------|
| População com 200 indivíduos |      |      | População com 50 indivíduos |      |      |
| K                            | Tn   | Td   | K                           | Tn   | Td   |
| 10,26                        | 0,42 | 0,05 | 18,13                       | 0,30 | 0,03 |
| 31,03                        | 0,15 | 0,04 | 33,86                       | 0,17 | 0,04 |
| 53,31                        | 0,15 | 0,05 | 32,70                       | 0,15 | 0,05 |
| 25,38                        | 0,17 | 0,04 | 12,15                       | 0,24 | 0,06 |
| 32,89                        | 0,23 | 0,05 | 36,41                       | 0,18 | 0,05 |
| 8,04                         | 0,25 | 0,05 | 10,77                       | 0,20 | 0,04 |
| 25,40                        | 0,19 | 0,05 | 32,42                       | 0,15 | 0,05 |
| 25,03                        | 0,19 | 0,06 | 27,66                       | 0,17 | 0,04 |
| 38,17                        | 0,24 | 0,04 | 58,49                       | 0,10 | 0,07 |

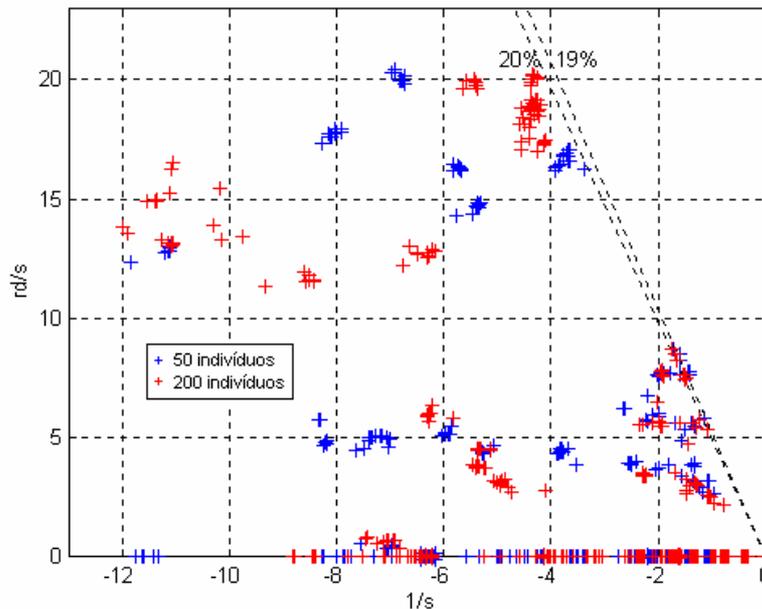


Figura 6.18 – Autovalores do sistema New England para os ajustes obtidos com 50 e 200 indivíduos em cada processador.

### 6.3.2 – Aplicação ao Sistema Sul/Sudeste Brasileiro

Em todos testes foram utilizadas 3 condições de operação, como descrito no capítulo 5. Inicialmente foram ajustados 22 estabilizadores e mais tarde este número foi estendido para 33 estabilizadores, aumentando a complexidade do problema. O tamanho

da população nas simulações onde foram ajustados 33 controladores foi reduzido de 50 para 20 para avaliação de desempenho e de tempo de processamento do AG. Os parâmetros utilizados no AG foram:

- Tamanho da população: 40 (22 controladores) e 50 e 20 (33 controladores) indivíduos;
- Número de indivíduos no pré-aquecimento: 7;
- Sementes do gerador de número: quatro sementes diferentes,
- Tipo de cruzamento: uniforme;
- Tipo de mutação: uniforme;
- Taxa de cruzamento (probabilidade de se realizar ): 0,80;
- Taxa de cruzamento uniforme (troca de valores das posições): 0,4;
- Taxa de mutação: 0.1 (inicial) e 0.03 (final);
- Tipo de seleção: torneio;
- Número de indivíduos no torneio: 4;
- Número de blocos de avanço-atraso dos estabilizadores: 2;
- Sinal estabilizador: velocidade do rotor;
- Tamanho do cromossomo: 66 (22 controladores) e 99 (33 controladores);

#### 6.3.2.1 – Ajuste de 22 Controladores

Foi observado ao longo de toda pesquisa que foram obtidas múltiplas soluções com mesmo desempenho. Dentre estas soluções existirá um conjunto de melhor desempenho que poderá ser implementado no sistema. A escolha destas soluções poderia ser através de uma nova função objetivo que, por exemplo, verificaria aquelas soluções que tem menos autovalores com baixo amortecimento e o espectro de frequência do sistema não tenha sofrido elevação ou redução indesejada. O gráfico da Figura 6.19, da Figura 6.20 e da Figura 6.21 mostram o espectro de autovalores do sistema, correspondente aos melhores ajustes dentre os obtidos em cada processador com adequabilidade igual a 60 (amortecimento no intervalo [5,0 a 6,0]), para os casos de carga pesada, média e leve, respectivamente.

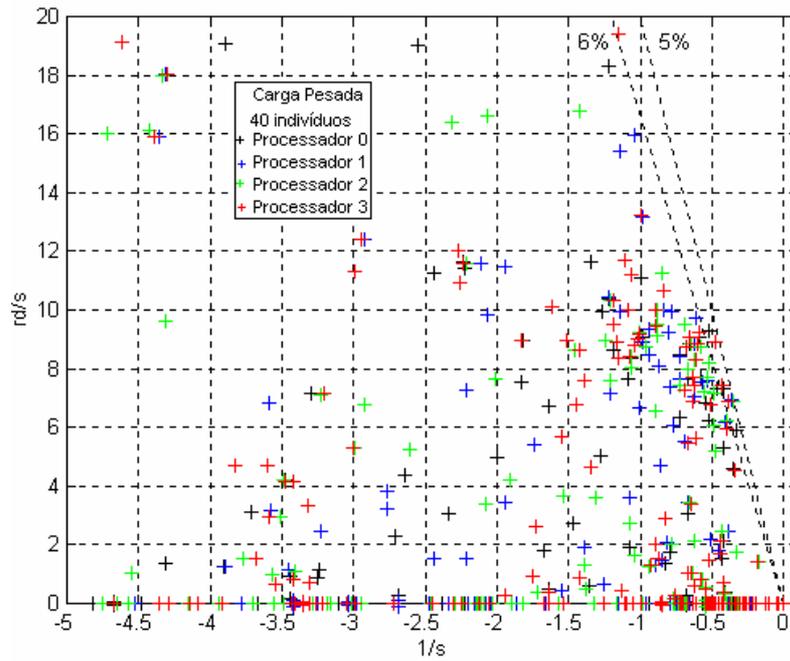


Figura 6.19 – Autovalores do sistema Sul/Sudeste brasileiro ( 22 estabilizadores) carga pesada.

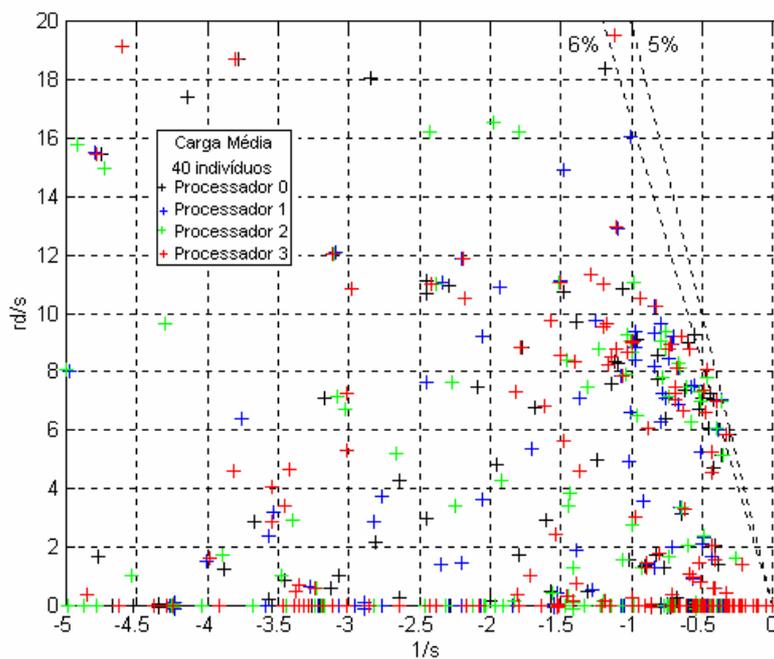


Figura 6.20 – Autovalores do sistema Sul/Sudeste brasileiro ( 22 estabilizadores) carga média.

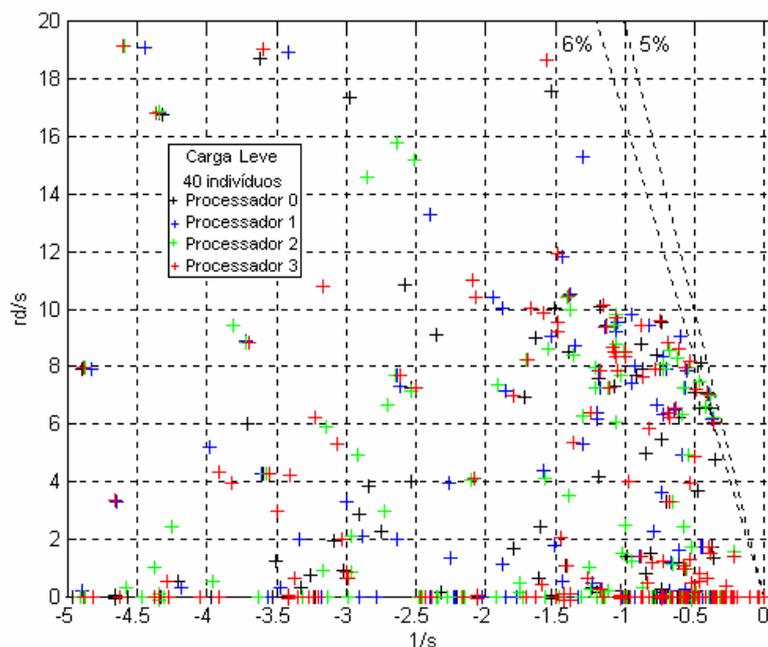


Figura 6.21 – Autovalores do sistema Sul/Sudeste brasileiro ( 22 estabilizadores) carga leve.

O mínimo amortecimento obtido foi de 5% correspondente ao modo de oscilação local das máquinas da Usina de Xavantes contra as máquinas restantes do sistema. Esta é a condição limitante do sistema, devido ao fato da existência de zeros nas malhas de controle consideradas, localizado próximo ou coincidente ao autovalor cujo amortecimento é de 5%. Portanto, estes zeros serão os atratores destes pólos restringindo o aumento do amortecimento. A solução seria implementar estabilizadores nas máquinas de maior influência nestes zeros.

### 6.3.2.2 – Ajuste de 33 Controladores com 50 Indivíduos na População sem Considerar a Solução Analítica

Estimulado pelos resultados obtidos, o número de controladores a serem ajustados foi estendido para 33, portanto, aumentando a complexidade do problema. Nestes testes foram incluídas as seguintes máquinas, cujos estabilizadores deveriam ser projetados, além das máquinas utilizadas no teste com 22 estabilizadores: Angra I (10), Funil (14), Nilo Peçanha(250-1), Fontes (253-1), Pereira Passos (255), H. Borden (400), Jurumirim (512), Xavantes (514), Promissão (511), C. Dourada (754) e Passo Real (1162).

Os gráficos das figuras 6.22, 6.23 e 6.24 mostram o espectro de autovalores do sistema, correspondente aos melhores ajustes dentre os obtidos em cada processador com adequabilidade igual a 90 (amortecimento no intervalo [8,0 a 9,0]), para os casos de carga pesada, média e leve, respectivamente.

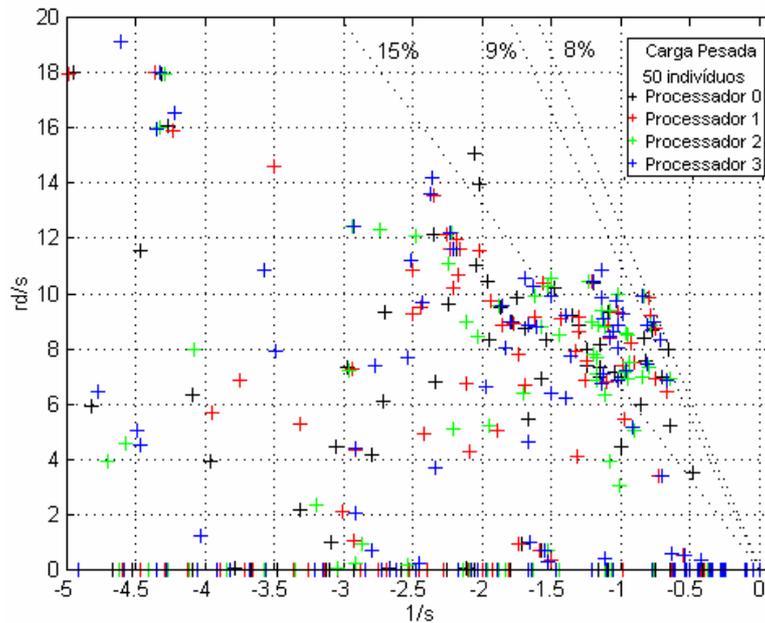


Figura 6.22 – Autovalores do sistema Sul/Sudeste brasileiro (33 estabilizadores) carga pesada. População com 50 indivíduos em cada processador.

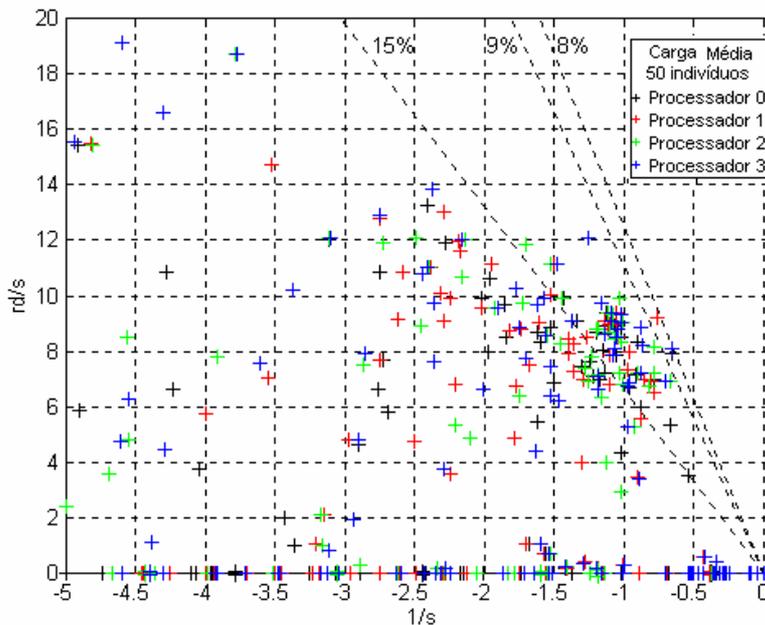


Figura 6.23 – Autovalores do sistema Sul/Sudeste brasileiro (33 estabilizadores) carga média. População com 50 indivíduos em cada processador.

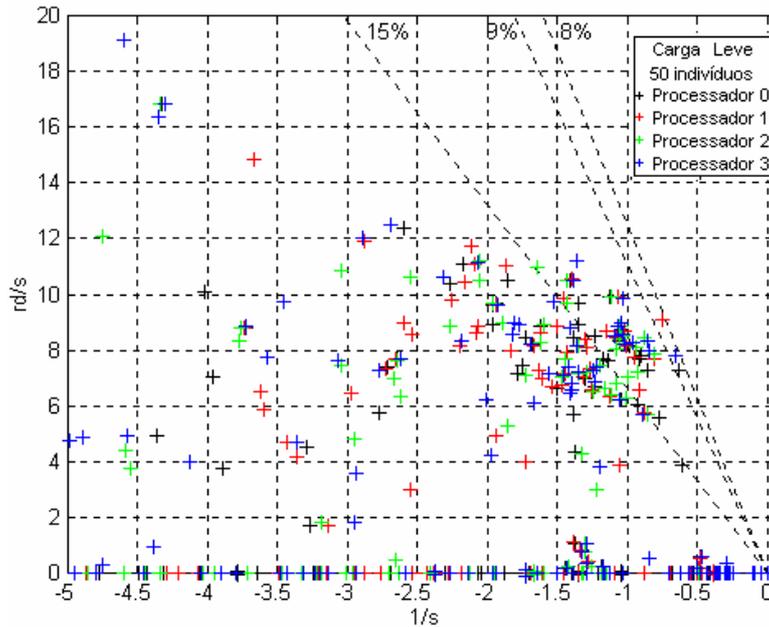


Figura 6.24 – Autovalores do sistema Sul/Sudeste brasileiro (33 estabilizadores) carga leve. População com 50 indivíduos em cada processador.

Observa-se que ocorreu uma melhora sensível comparada às soluções obtidas com o ajuste de 22 estabilizadores (Figura 6.19, Figura 6.20 e Figura 6.21). A menor taxa de amortecimento obtida foi de 8%. Esta melhora no desempenho do sistema deveu-se a alocação de estabilizadores nas máquinas de Jurumirim, Xavantes, H.Borden e na área Rio nas máquinas de Angra I, Nilo Peçanha, Pereira Passos, Fontes e Funil. Da mesma forma descrita anteriormente, os zeros existentes no intervalo delimitado pelas linhas de amortecimento de 8% e 9%, seriam as condições limitantes para o aumento das taxas de amortecimento dos autovalores localizados próximos a eles. Este fato é um indicativo da necessidade de implementação de outros estabilizadores nas máquinas que tem mais influência sobre os zeros. Esta informação foi obtida através do cálculo de resíduos para aquele zero [15].

### 6.3.2.3 – Ajuste de 33 Controladores com 20 Indivíduos na População sem Considerar a Solução Analítica

Uma alternativa, para minimizar o tempo de processamento, foi reduzir o tamanho da população para 20 indivíduos. Outro objetivo deste teste, além da redução

do tempo, foi também de verificar se soluções com qualidade satisfatória seriam alcançadas. Alguns resultados de ajuste são mostrados na Tabela 6. 4.

Tabela 6. 4 – Ajustes obtidos nos 4 processadores (20 indivíduos na população).

| Pss    | Processador 0 |      |      | Processador 1 |      |      | Processador 2 |      |      | Processador 3 |      |      |
|--------|---------------|------|------|---------------|------|------|---------------|------|------|---------------|------|------|
|        |               |      |      |               |      |      |               |      |      |               |      |      |
| 10     | 2,83          | 0,37 | 0,04 | 2,83          | 0,37 | 0,04 | 2,83          | 0,34 | 0,05 | 2,83          | 0,26 | 0,03 |
| 14     | 3,57          | 0,87 | 0,03 | 2,02          | 0,87 | 0,03 | 15,72         | 0,53 | 0,02 | 9,29          | 0,62 | 0,02 |
| 18     | 7,83          | 0,23 | 0,05 | 4,43          | 0,36 | 0,08 | 4,43          | 0,25 | 0,03 | 27,68         | 0,27 | 0,06 |
| 20     | 1,80          | 0,20 | 0,10 | 1,80          | 0,35 | 0,06 | 4,74          | 0,25 | 0,05 | 1,80          | 0,30 | 0,07 |
| 250(1) | 7,89          | 0,18 | 0,38 | 13,95         | 0,18 | 0,38 | 7,89          | 0,25 | 0,05 | 7,89          | 0,07 | 0,15 |
| 253(1) | 11,86         | 0,28 | 0,12 | 6,71          | 0,28 | 0,12 | ,59           | 0,40 | 0,17 | 11,88         | 0,40 | 0,17 |
| 255    | 1,32          | 0,62 | 0,03 | 1,32          | 0,41 | 0,04 | 1,32          | 0,62 | 0,03 | 4,11          | 0,62 | 0,03 |
| 300    | 1,26          | 0,46 | 0,05 | 1,26          | 0,33 | 0,07 | 1,26          | 0,27 | 0,03 | 1,26          | 0,42 | 0,05 |
| 302    | 16,38         | 0,22 | 0,09 | 16,38         | 0,29 | 0,06 | 10,54         | 0,23 | 0,05 | ,77           | 0,38 | 0,03 |
| 303    | 20,52         | 0,30 | 0,04 | 20,52         | 0,16 | 0,08 | 1,24          | 0,39 | 0,06 | 1,24          | 0,42 | 0,04 |
| 305    | 1,72          | 0,38 | 0,07 | 3,04          | 0,44 | 0,06 | 1,72          | 0,38 | 0,07 | 1,72          | 0,22 | 0,04 |
| 400    | 14,82         | 0,16 | 0,04 | 14,82         | 0,23 | 0,03 | 3,80          | 0,25 | 0,07 | 14,82         | 0,29 | 0,06 |
| 500    | 3,55          | 0,25 | 0,06 | 3,55          | 0,18 | 0,08 | ,36           | 0,51 | 0,13 | 3,55          | 0,36 | 0,04 |
| 501    | 4,58          | 0,22 | 0,07 | 2,59          | 0,22 | 0,07 | 40,00         | 0,10 | 0,07 | 30,39         | 0,15 | 0,05 |
| 507    | 3,98          | 0,22 | 0,09 | 7,03          | 0,26 | 0,08 | 3,98          | 0,05 | 0,15 | 22,84         | 0,17 | 0,12 |
| 511    | 1,75          | 0,28 | 0,04 | 1,75          | 0,20 | 0,06 | 6,11          | 0,15 | 0,08 | 1,75          | 0,79 | 0,24 |
| 512    | 3,37          | 0,24 | 0,06 | 3,37          | 0,24 | 0,06 | 3,37          | 0,24 | 0,06 | 3,37          | 0,24 | 0,06 |
| 513    | 1,15          | 0,25 | 0,13 | 1,15          | 0,25 | 0,13 | ,57           | 0,21 | 0,06 | 2,63          | 0,30 | 0,04 |
| 514    | 3,90          | 0,23 | 0,09 | 6,89          | 0,23 | 0,09 | 15,26         | 0,21 | 0,08 | 6,16          | 0,42 | 0,05 |
| 518    | 3,23          | 0,65 | 0,30 | 3,23          | 0,14 | 0,06 | 3,23          | 0,25 | 0,06 | 3,23          | 0,17 | 0,09 |
| 519    | 10,34         | 0,26 | 0,11 | 10,34         | 0,25 | 0,11 | 10,34         | 0,26 | 0,11 | 33,75         | 0,18 | 0,08 |
| 520    | 1,60          | 0,21 | 0,04 | 1,60          | 0,33 | 0,04 | ,23           | 0,16 | 0,06 | 12,89         | 0,07 | 0,16 |
| 754    | 2,31          | 0,24 | 0,06 | 2,31          | 0,25 | 0,06 | 2,31          | 0,25 | 0,06 | 10,49         | 0,25 | 0,06 |
| 800    | 10,45         | 0,18 | 0,04 | 5,91          | 0,31 | 0,06 | 4,23          | 0,22 | 0,06 | 33,79         | 0,20 | 0,09 |
| 810    | 2,79          | 0,22 | 0,05 | 1,58          | 0,22 | 0,05 | 4,06          | 0,31 | 0,59 | 9,25          | 0,22 | 0,05 |
| 913    | 2,51          | 0,41 | 0,04 | 1,42          | 0,41 | 0,04 | 1,42          | 0,11 | 0,23 | 1,42          | 0,41 | 0,04 |
| 917    | 2,32          | 0,37 | 0,04 | 2,32          | 0,35 | 0,05 | 2,32          | 0,25 | 0,03 | 15,72         | 0,23 | 0,07 |
| 919    | 2,51          | 0,20 | 0,07 | 2,51          | 0,34 | 0,04 | 2,51          | 0,56 | 0,12 | 2,51          | 0,25 | 0,05 |
| 920    | 8,15          | 0,22 | 0,07 | 4,61          | 0,22 | 0,07 | 4,61          | 0,20 | 0,04 | 1,07          | 0,22 | 0,07 |
| 925    | 2,54          | 0,25 | 0,06 | 4,48          | 0,24 | 0,06 | 20,77         | 0,26 | 0,06 | 2,54          | 0,21 | 0,05 |
| 1107   | 26,52         | 0,17 | 0,10 | 15,00         | 0,86 | 0,53 | 33,46         | 0,14 | 0,09 | 15,00         | 0,17 | 0,10 |
| 1158   | 1,17          | 0,32 | 0,05 | 1,17          | 0,32 | 0,05 | 3,92          | 0,36 | 0,04 | 1,17          | 0,16 | 0,09 |
| 1162   | 31,67         | 0,22 | 0,08 | 31,67         | 0,17 | 0,06 | 27,40         | 0,14 | 0,05 | 8,98          | 0,14 | 0,05 |

Os gráficos das Figuras 6.25, 6.26 e 6.27 mostram o espectro de autovalores do sistema, correspondente aos melhores ajustes dentre os obtidos em cada processador com adequabilidade igual a 90 (amortecimento no intervalo [8,0 a 9,0]), para os casos de carga pesada, média e leve, respectivamente.

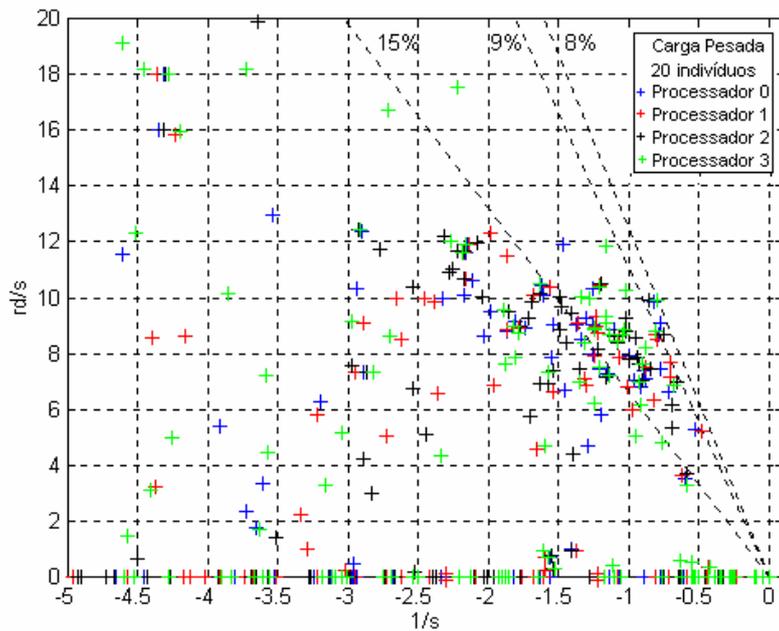


Figura 6.25 – Autovalores do sistema Sul/Sudeste brasileiro (33 estabilizadores) carga pesada. População com 20 indivíduos em cada processador.

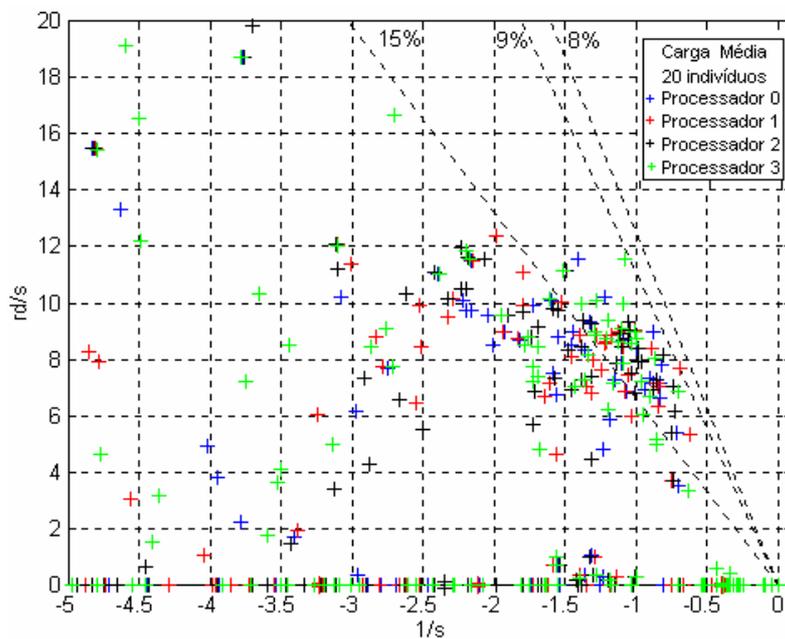


Figura 6.26 – Autovalores do sistema Sul/Sudeste brasileiro (33 estabilizadores) carga média. População com 20 indivíduos em cada processador.

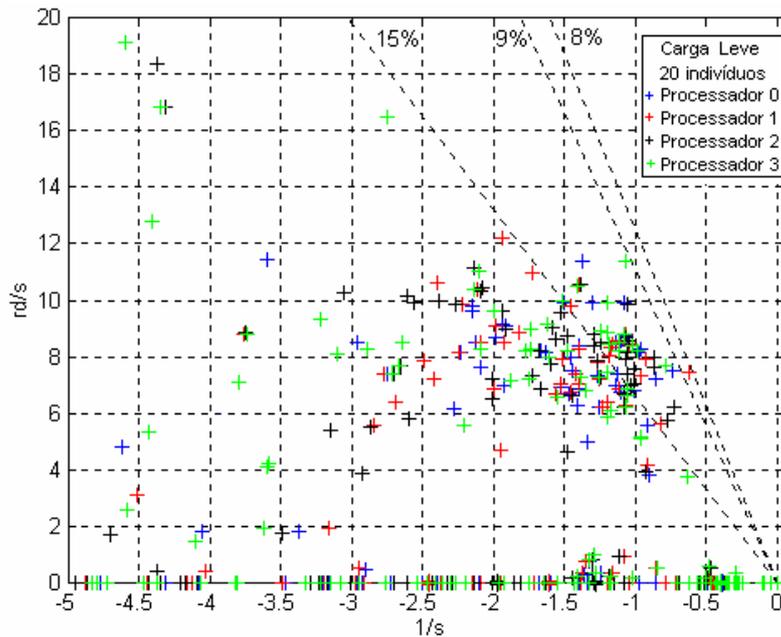


Figura 6.27 – Autovalores do sistema Sul/Sudeste brasileiro (33 estabilizadores) carga leve. População com 20 indivíduos em cada processador.

Observa-se que ocorreu uma melhora sensível se comparada com as soluções obtidas no caso de 22 estabilizadores. A menor taxa de amortecimento obtida foi de 8%. Esta melhora no desempenho do sistema deveu-se à alocação de estabilizadores nas máquinas de Jurumirim e Xavantes e na área Rio nas máquinas de Angra I, Nilo Peçanha, Pereira Passos, Fontes e Funil. Da mesma forma descrita anteriormente, os zeros existentes no intervalo delimitado pelas linhas de amortecimento [8,0 , 9,0], seriam as condições limitantes.

#### 6.3.2.4 – Ajuste de 33 Controladores com 20 Indivíduos na População Considerando Ajuste Obtido pelo Método Analítico

Como a participação de soluções obtidas por métodos analíticos na população inicial e os limites da região de busca calculados a partir destas soluções melhoraram o desempenho do AG, foi então escolhida esta estratégia para aplicação ao AG paralelo.

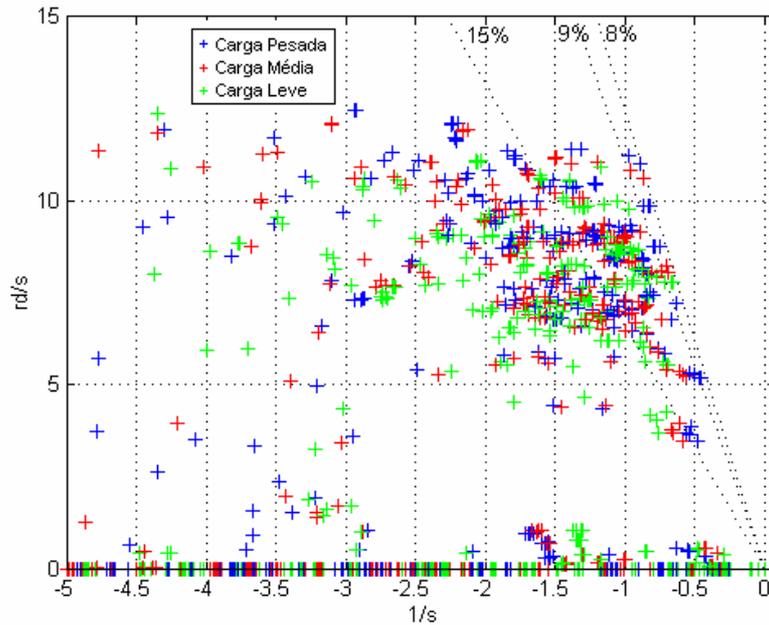


Figura 6.28 – Mapeamento dos autovalores da melhor solução em cada processador nas cargas pesada, média e leve.

A Figura 6.28 mostra os autovalores obtidos com a aplicação desta estratégia. Foi observado que a migração é de fundamental importância para um melhor desempenho do algoritmo paralelo. Dentre os indivíduos migrantes o melhor deles irá direcionar a busca em cada processador. Com a utilização das soluções analíticas, tanto na população inicial como para cálculo da região de busca, a importância da migração fica ainda mais evidenciada, pelo fato de poder reduzir o tamanho da população.

#### 6.3.2.5 - Comparação dos Resultados com o Limite Máximo da Frequência Igual a 12,5 rd/s e 30,0 rd/s Considerando a Solução Analítica

Finalmente, uma comparação foi feita entre os resultados obtidos, quando foi considerado o limite superior da frequência igual a 12,5 rd/s e 30 rd/s e o intervalo de alfa  $[0,1 \ 10,0]$  e  $[7,0 \ 10,0]$  (somente soluções com avanço de fase consideradas), respectivamente. Estas soluções foram obtidas, considerando todas estratégias e técnicas desenvolvidas ou aplicadas até agora nesta tese.

Nestas simulações foram considerados também a variação dos limites da região de busca, a região de busca inicial função da solução obtida pelo método analítico e a participação da solução analítica na população inicial.

Conforme descrito no capítulo 5 e baseado na referência [40], existirá uma melhoria no desempenho do sistema, quando a frequência para a qual está sendo ajustado o controlador for aumentada. Foi considerado também um intervalo para  $\alpha$ , ganho dinâmico do controlador, igual a [7,0 10,0] ao invés do valor fixo 10,0, que fornece máxima compensação de fase, para que pudesse ser observada a tendência da busca executada pelo AG.

Uma análise da Tabela 6. 5, pode ser verificado que, de maneira geral uma maior compensação de fase (em avanço) foi obtida. O ajuste do estabilizador de Itaipu 60 Hz foi uma exceção, sua estrutura mostrou ser equivalente a um ganho para limite máximo da frequência igual a 12,5 rd/s.

Tabela 6. 5 – Ajustes obtidos considerando os limites da frequência [1,25 12,5] e [1,25 30,0] e de  $\alpha$  [0,1 10,0] e [7,0 10,0], respectivamente.

| Ajustes Obtidos do AG Paralelo |   |      |      |  |      |      |
|--------------------------------|---|------|------|--|------|------|
| Número da Máquina              | Intervalo da Frequência [1,25 30,0] rd/s e de alfa [7,0 10,0] |      |      | Intervalo da Frequência da [1,25 12,5] rd/s e de alfa [0,1 10,0] |      |      |
|                                | K   | Tn   | Td   | K  | Tn   | Td   |
| 10                             | 6,85  | 0,18 | 0,02 | 5,96   | 0,19 | 0,04 |
| 14                             | 0,56  | 0,13 | 0,01 | 4,05   | 0,81 | 0,03 |
| 18                             | 34,04   | 0,14 | 0,02 | 10,08  | 0,22 | 0,05 |
| 20                             | 7,73  | 0,20 | 0,02 | 2,77   | 0,29 | 0,04 |
| 250 (1)                        | 59,21   | 0,18 | 0,02 | 11,27  | 0,23 | 0,05 |
| 253 (1)                        | 18,34   | 0,16 | 0,02 | 15,74  | 0,12 | 0,06 |
| 255                            | 3,71  | 0,14 | 0,02 | 9,36   | 0,50 | 0,02 |
| 300                            | 2,17  | 0,37 | 0,04 | 3,24   | 0,29 | 0,04 |
| 302                            | 1,35  | 0,20 | 0,02 | 0,77   | 0,32 | 0,04 |
| 303                            | 2,40  | 0,25 | 0,04 | 4,42   | 0,20 | 0,04 |
| 305                            | 4,40  | 0,30 | 0,04 | 2,92   | 0,23 | 0,04 |
| 400                            | 26,91   | 0,13 | 0,02 | 17,43  | 0,17 | 0,04 |
| 500                            | 15,24   | 0,19 | 0,02 | 29,07  | 0,18 | 0,06 |
| 501                            | 14,33   | 0,12 | 0,01 | 7,97   | 0,16 | 0,05 |
| 507                            | 28,35   | 0,12 | 0,01 | 10,38  | 0,18 | 0,05 |
| 511                            | 6,79  | 0,15 | 0,02 | 10,05  | 0,14 | 0,05 |
| 512                            | 9,82  | 0,14 | 0,02 | 2,88   | 0,15 | 0,04 |
| 513                            | 3,25  | 0,14 | 0,01 | 1,90   | 0,16 | 0,07 |
| 514                            | 3,67  | 0,24 | 0,02 | 24,51  | 0,14 | 0,06 |
| 518                            | 45,70   | 0,11 | 0,01 | 14,15  | 0,12 | 0,06 |
| 519                            | 73,81   | 0,12 | 0,01 | 32,98  | 0,10 | 0,07 |
| 520                            | 5,85  | 0,11 | 0,01 | 2,57   | 0,19 | 0,04 |
| 754                            | 21,64   | 0,12 | 0,01 | 12,82  | 0,17 | 0,06 |
| 800                            | 14,83   | 0,13 | 0,02 | 20,39  | 0,17 | 0,06 |
| 810                            | 6,39  | 0,18 | 0,02 | 7,98   | 0,19 | 0,04 |
| 913                            | 3,99  | 0,20 | 0,03 | 2,51   | 0,23 | 0,04 |
| 917                            | 7,24  | 0,33 | 0,04 | 7,94   | 0,28 | 0,03 |
| 919                            | 10,53   | 0,11 | 0,02 | 3,57   | 0,21 | 0,03 |
| 920                            | 50,49   | 0,10 | 0,01 | 12,78  | 0,19 | 0,05 |
| 925                            | 5,15  | 0,11 | 0,01 | 4,63   | 0,14 | 0,05 |
| 1107                           | 35,14   | 0,11 | 0,01 | 56,99  | 0,09 | 0,08 |
| 1158                           | 6,66  | 0,19 | 0,02 | 5,11   | 0,25 | 0,03 |
| 1162                           | 12,74   | 0,29 | 0,03 | 8,18   | 0,36 | 0,16 |

A Figura 6. 29 mostra o comportamento do AG para o caso do limite máximo da frequência ser 30,0 rd/s e alfa [7,0 10,0]. Pode ser observado que nas 10 primeiras gerações uma solução de máximo desempenho é obtida de acordo com a função de

adequabilidade usada. Esta solução corresponde ao máximo amortecimento obtido para os modos eletromecânicos mais críticos (Figura 6.30). Neste conjunto de gerações não foram executadas a variação da região de busca nem a migração. Após este instante a soma dos amortecimentos dos autovalores dos três pontos de operação passou a vigorar para o amortecimento mínimo no intervalo de 8 a 9% o que resultou em aumento dos amortecimentos dos demais modos de oscilação.

Como a região inicial é definida a partir da solução analítica, o valor da adequabilidade média da população se aproxima do máximo, porém com a estratégia de variação da região de busca e da taxa de mutação e o efeito migração este valor médio não permanece igual ao valor máximo, contribuindo para variar a diversidade entre os indivíduos nas populações, evitando a estagnação da população.

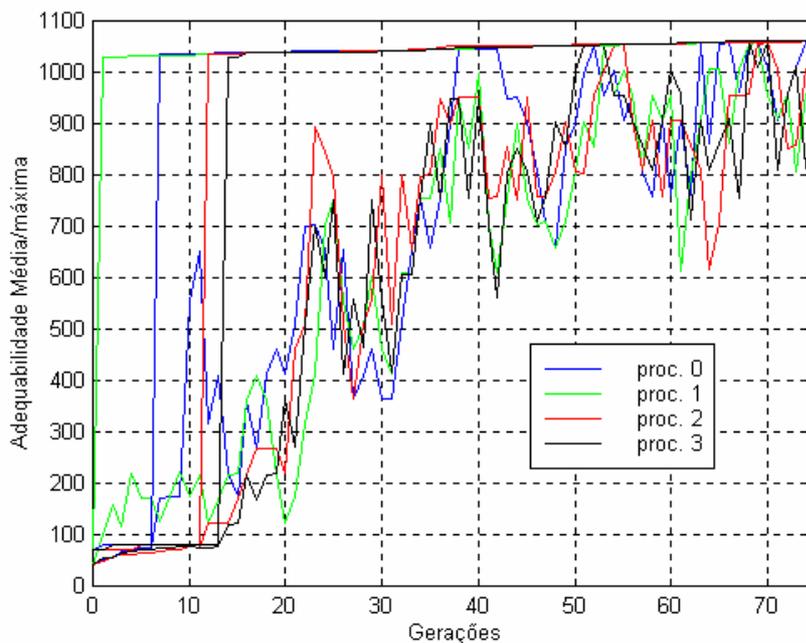


Figura 6. 29 – Comportamento do AG para obtenção dos ajustes no sistema S/SE.

O espectro de autovalores obtido para cada intervalo considerando os limites máximos para a frequência é mostrado na Figura 6.30. As condições de ajustes foram: solução analítica participando da primeira população, limites da região de busca inicial calculados a partir desta solução analítica, migração executada no instante da variação da região de busca e os indivíduos migrantes foram aqueles de melhor adequabilidade em cada processador. Pode ser observado que um melhor desempenho é obtido para o

sistema. Pode ser observado que um melhor desempenho é obtido quando o ajuste contempla frequências mais altas. Destacam-se um aumento do amortecimento do modo de oscilação Sul/Sudeste e a menor quantidade de autovalores com amortecimento inferior a 10% ( apenas dois neste último caso).

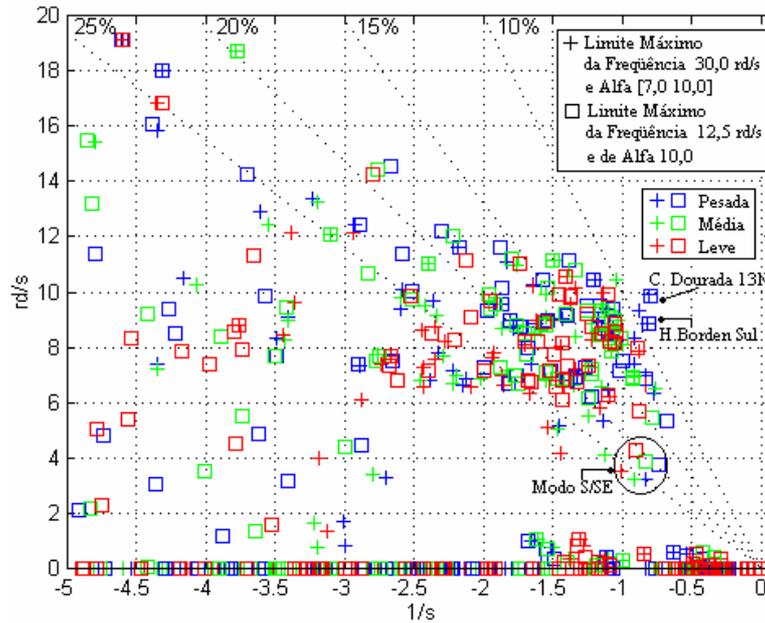


Figura 6.30 – Autovalores do Sistema Sul/Sudeste Brasileiro (33 estabilizadores) para as três modalidades de carga. População com 20 indivíduos.

Foi analisada a resposta em frequência da função de transferência  $\Delta\omega/\Delta V_{ref}$  do gerador de Itaipu 60 Hz. É mostrado na Figura 6.31 o diagrama de Bode desta função de transferência. O diagrama mostra um maior amortecimento para o caso em que a frequência máxima é de 30 rd/s. A mesma figura mostra simulações no tempo nos três cenários um curto circuito monofásico num dos circuitos da linha de transmissão Adrianópolis-C. Paulista 500 kV com perda deste circuito. Nota-se um desempenho um pouco melhor no caso em que a frequência máxima é de 30 rd/s.

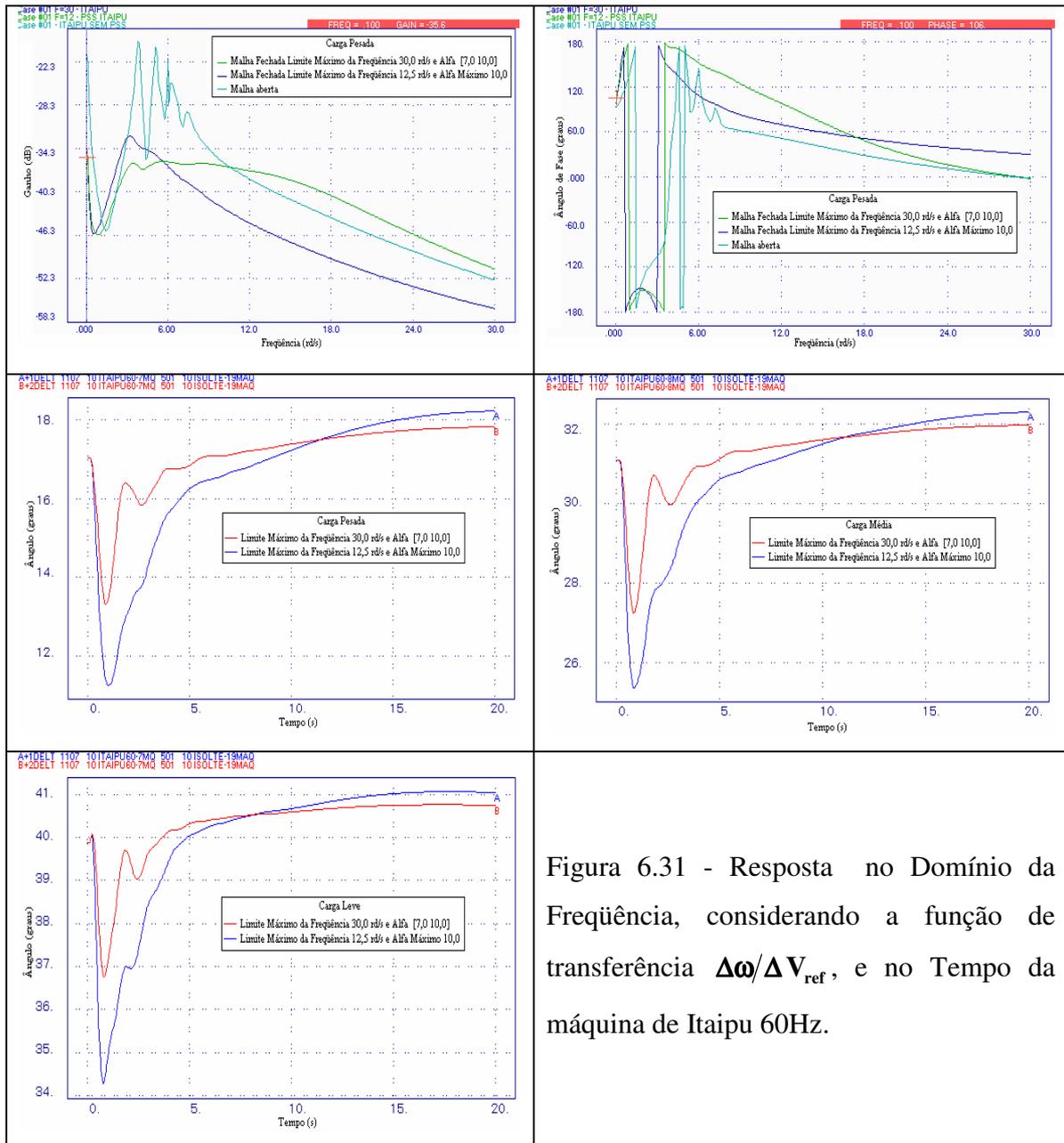


Figura 6.31 - Resposta no Domínio da Frequência, considerando a função de transferência  $\Delta\omega/\Delta V_{ref}$ , e no Tempo da máquina de Itaipu 60Hz.

- Requisitos Computacionais

A execução dos ajustes coordenado dos estabilizadores foi feita usando um computador paralelo IBM RS6000SP, usando o programa codificado em FORTRAN 90. O tempo de CPU despendido para uma geração foi de aproximadamente 28 minutos em média. A maior parte desse tempo é gasta na solução do algoritmo QR (20 x 3 soluções completas de autovalores de uma matriz de ordem 448).

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

#### 7.1 – CONCLUSÕES REFERENTES AO ALGORITMO GENÉTICO SERIAL

- Os resultados apresentados mostraram que num sistema multi-máquina, estabilizadores com estrutura fixa, podem ser ajustados para fornecer um desempenho dinâmico satisfatório, simultaneamente, para um conjunto de condições de operação. Estendendo este raciocínio, se este conjunto retrata os pontos principais de operação do sistema, sob condições de variações de carga e indisponibilidade de equipamentos e de linhas de transmissão por longo período, temos então, um ajuste robusto que satisfaz as condições de operação do sistema.
- O processo de ajuste baseado no AG mostrou robustez ao encontrar controladores que satisfizessem a um critério de projeto num sistema de grande porte real como o sistema Sul/Sudeste brasileiro. Os resultados mostraram que essa abordagem de ajuste coordenado atingiu um ponto em que encoraja as aplicações práticas.
- O tempo de processamento requerido pelo algoritmo pode ser considerado adequado para a fase de projeto. Esse tempo pode ser reduzido consideravelmente se um cuidadoso e adequado processo de otimização de código de programação for realizado. Nos modelos de sistemas de potência de grande porte, o uso de computação de alto desempenho (processamento paralelo) pode ser uma grande ajuda para reduzir o tempo de processamento a níveis aceitáveis, porque a avaliação envolve o cálculo de todos autovalores.
- Uma das grandes vantagens do uso do método de ajuste proposto é que, após cada execução do conjunto de gerações especificadas, muitas soluções diferentes com mesmo desempenho são obtidas. É possível que a melhor solução não satisfaça a todos requisitos práticos do projeto dos controladores. Uma busca mais apurada entre essas soluções pode ser desejada por um especialista. Entretanto, em desenvolvimentos futuro, características do sistema desejadas por um especialista podem ser obtidas e prontamente implementadas em uma função de adequabilidade mais elaborada.

- O uso combinado do AG e de técnicas analíticas para ajudar na busca da melhor solução mostrou ser de grande importância prática. A sua aplicação reduz o tempo de processamento, melhora a qualidade da solução e o desempenho do AG. A solução analítica participando da população inicial e os limites da região de busca calculados em função deste ajuste, definem uma melhor solução e uma região onde é maior a probabilidade de ser encontrada melhores soluções. Esta característica possibilitou a redução do tamanho da população e evitou muitas soluções de baixo desempenho (busca em regiões pouco prováveis), conseqüentemente, contribuindo também para redução do tempo de processamento. Foi observado, também, que maior quantidade de soluções estáveis são obtidas na população inicial, o que condiciona melhor a busca.
- O que ficou evidenciado também, com a aplicação das técnicas analíticas, foi que o AG teve capacidade de melhorar o projeto obtido pelos métodos analíticos, demonstrando assim seu potencial de busca.
- Os resultados mostraram que, alheio aos limites dos parâmetros, as soluções convergiram aproximadamente para o mesmo nível de amortecimento mínimo desejado.
- Os resultados também mostraram que o nível final de amortecimento foi basicamente o mesmo independente do tipo de inicialização adotada.
- Num projeto convencional e coordenado de controladores é necessário um procedimento com múltiplos passos envolvendo várias iterações no projeto. O projeto baseado no AG é um caminho sistemático que realiza o processo completo do projeto de forma automática.
- O uso de uma estratégia que define a quantidade de blocos da estrutura de controle de amortecimento é importante porque aumenta a versatilidade do AG e a flexibilidade dos ajustes. Obteve-se, dessa forma, uma maior generalização do AG, podendo comportar diversas estruturas de controladores.
- A variação da região de busca após executado um determinado número de gerações é vantajosa. Primeiro, porque pode corrigir um erro existente na definição dos limites iniciais das variáveis. Segundo, direcionar melhor a busca, por serem os limites da região seguinte calculados a partir da melhor solução, escolhida pelo elitismo.

## 7.2 – CONCLUSÕES REFERENTES AO ALGORITMO GENÉTICO PARALELO

- A paralelização do AG através do método de granularidade baixa, onde a comunicação é feita de forma massiva com todos processadores se comunicando entre si, mostrou ser uma ferramenta, que aumentou a robustez do AG. Esta técnica possibilitou a redução do tamanho da população, que resultou na redução do tempo de processamento.
- Comparado ao algoritmo serial ambos obtém soluções com mesma qualidade. O tempo de processamento do algoritmo paralelo pode ser consideravelmente menor, desde que se utilize a estratégia de migração e comunicação maciça entre os processadores.
- A migração tem uma importância fundamental no método de paralelização usado. A estratégia de migrar o melhor indivíduo de cada processador a cada instante de variação da região de busca, mostrou ser vantajosa. Foram observados dois níveis de elitismo, um na população ao longo do processamento, quando a migração não é executada, e outro no instante da migração onde o indivíduo migrante passa a ser o de maior adequabilidade em todos processadores, indicando a direção a ser seguida na busca por todos processadores.
- Utilizando os resultados obtidos pelos métodos analíticos e os limites da região de busca calculados em função do ajuste analítico, uma contribuição significativa no que diz respeito a qualidade da solução e ao tempo gasto no processamento é obtida. Pelo fato da região de busca ser a mais provável para obtenção da melhor solução, maior quantidade de soluções estáveis são obtidas na população inicial. Este fato possibilita uma redução do tamanho da população sem as estagnações indesejáveis da população.
- A importância da migração é evidenciada, quando os limites da região de busca forem baseados na solução analítica, porque ela será executada, considerando regiões de busca mais promissoras. Dessa forma, o tempo para obter a melhor solução será reduzido.

### **7.3 – TRABALHOS FUTUROS**

1. Aplicação da computação distribuída numa rede de micro-computadores, explorando o potencial destes equipamentos. Hoje a velocidade de micro-computadores está em níveis elevados que possibilitam essa aplicação.
2. Aplicação de função multiobjetivo no ajuste coordenado excitatriz-estabilizador, que considerará o amortecimento dos modos das excitatrizes e eletromecânicos, para melhorar a qualidade da solução.
3. Novas heurísticas de migração no Algoritmo Genético Paralelo para aumentar o seu desempenho e a qualidade da solução.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] De Mello, F.P. and Concordia, C. – “Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control”-*IEEE/PAS-88/4 – April 1969*
- [2] Larsen, E.V. and Swann, D.A.-“Applying Power System Stabilizers”- *IEEE – PAS 100/6 – June 1981 – pp. 3017-3046.*
- [3] N. G. Hingorani, “Power Electronics in Electric Utilities: Role of Power Electronics in Future Power Systems”, *Proceedings of IEEE, Vol. 76, No. 4, April 1988.*
- [4] E. V. Larsen, J. J. Sanchez-Gasca and J. H. Chow, “Concepts for Design of FACTS Controllers to Damp Power Swings”, *IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No.2, pp. 948-956, May 1995.*
- [5] G. N. Taranto, J. H. Chow and H. A. Othman, “Robust Decentralized Control Design for Damping Power System Oscillations”, *Proceedings of the 33rd IEEE Conference on Decision and Control, pp. 4080-4085, Orlando, FL, December 1994.*
- [6] D. E. Goldberg, “*Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*”, Addison-Wesley, Reading, MA, 1989.
- [7] P. Ju, E. Handschin and F. Reyer, “Genetic Algorithm Aided Controller Design with Application to SVC”, *IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Vol. 143, No. 3, pp. 258-262, 1996.*
- [8] V. Miranda, D. Srinivasan and L. M. Proença, “Evolutionary Computation in Power Systems”, *Proceedings of the 12th Power System Computation Conference, Dresden, Germany, August 1996.*
- [9] P. Pourbeik and M. J. Gibbard, “Simultaneous Coordination of Power System Stabilizers and FACTS Device Stabilizers in a Multimachine Power System for Enhancing Dynamic Performance,” *paper PE-171-PWRS-0-01, presented at the 1997 IEEE PES-Winter Meeting.*
- [10] G. N. Taranto, J. K. Shiau, J. H. Chow and H. A. Othman, “A Robust Decentralized Design for Multiple FACTS Damping Controllers”, *IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Vol. 144, No. 1, pp. 61-67, January 1997.*
- [11] A. Simões Costa, F. D. Freitas and A. S. Silva, “Design of Decentralized Controllers for Large Power Systems Considering Sparsity”, *IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 1, pp. 144-152, February 1997.*

- [12] R. T. Byerly, D. E. Sherman and R. J. Bennon, "Frequency Domain Analysis of Low Frequency Oscillations in Large Electric Power Systems", *Report EPRI EL-726*, 1978.
- [13] A. S. Bazanella, A. Fischman, A. S. Silva, J. M. Dion and L. Dugard, "Coordinated Robust Controllers in Power Systems", *Proceedings of the IEEE Stockholm Power Tech*, pp. 256-261, Sweden, June 1995.
- [14] N. Martins, L. T. G. Lima, H. J. C. P. Pinto and N. J. P. Macedo, "A State-of-the-Art Computer Program Package for the Analysis and Control of Small-Signal Stability of Large Scale AC/DC Power Systems", *Proceedings of IERE Workshop on New Issues in Power System Simulation*, pp. 11-19, France, March 1992.
- [15] N. Martins and L. T. G. Lima, "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*, Vol. 5, No. 4, pp. 1455-1469, November 1990.
- [16] G. H. Golub and C. F. Van Loan, "*Matrix Computations*", The Johns Hopkins University Press, 1989.
- [17] A. L. B. do Bomfim, G. N. Taranto and D. M. Falcão – "Simultaneous Tuning of Power System Damping Controllers Using Genetic Algorithms" – *IEEE Transactions on Power Systems*, PE -233 - PWRS – 0 – 03 – 1999, to appear in 2000.
- [18] E. Cantú-Paz – "A summary of Research on Parallel Genetic Algorithms" – *Illinois genetics Algorithms Laboratory – Illigal report n°95007 – July 1995*.
- [19] Spears, W. M. and De Jong, K. A. – "On Virtues of Parameterized Uniform Crossover" – *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms* (pp. 230-236).
- [20] Goldberg, D.E., Milman K. and Tidd C. – "Genetic Algorithms: A Bibliography" *Report number: 92008 – july 1992 – University of Illinois at Urbana-Champaign – Departament of General Engeneering*.
- [21] Goldberg, D. E. – "Genetic and Evolutionary Algorithms Come of Age" – *Communication of ACM – march 1994 – vol 37 number 3*.
- [22] Zbigniew Michalewics – "*Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*" – Spring-Vergalag.
- [23] Srinivas M., Lalit M. Patnaik – "Genetic Algorithms: A Survey" – *Comput.*, 1994, 24, (6), pp.17-26.

- [24] L.Davis,ed.. “*Handbook of Genetic Algorithms*” – Van Nostrand Reinold – New York 1991.
- [25] Mitsuo Gen and Runwei Cheng – “*Genetic Algorithms and Engineering Design*”- John Wiley & Sons, Inc. – 1997.
- [26] D.M.Falcão, A.L.B.do Bomfim, C.R.R.Dornellas and G.N.Taranto – “Genetic Algorithms in Power System Optimization” – *Eletroevolução, ed.1, num. 9, set 1997*.
- [27] A. L. B. do Bomfim, G. N. Taranto, D. M. Falcão – “Tuning of Power System Damping Controlers Using Genetic Algorithms” – *Proceedings of the ISAP, Seoul, South Korea, May 1997*.
- [28] P. Kundur – “*Power System Stability and Control*” – EPRI, Mc Graw Hill, Inc.– 1994.
- [29] G. N. Taranto and D. M. Falcão – “Robust Decentralised Control Design Using Genetic Algorithms in Power System Damping Control”, *IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Vol. 145, No. 1, pp. 1-6, January 1998*.
- [30] CEPEL, 1997 – *Manual do Programa ANATEM*.
- [31] CEPEL. 1997 – *Manual do Programa PacDyn – versão 4.1*.
- [32] Rasheed K. and Gelsey A. – “Adaption of Genetic Algorithms for Engineering Design Optimization” – *Fourth International Conference on Artificial Inteligence in Design: Evolutionary Systems in design Workshop – 22 June 1996*.
- [33] E. Cantú-Paz – “A Survey of Parallel Genetic Algorithms “ – *Calculateurs Paralleles, Vol. 10, No 2, Paris , Hermes*.
- [34] E. Cantú-Paz and Goldberg D. E. – “Predicting Speedups of Idealized Bounding cases of Parallel genetic Algorithms” - *Proceedings of the Seventh International Conference on Genetic Algorithms, S. Francisco, 1997*
- [35] G. N. Taranto, A. L. B. do Bomfim, D. M. Falcão, N. Martins, S. Gomes Jr., P. E. Quintão – “Combined Use of Analytic and Genetic Algorithms for Robust Coordinated Tuning of Power System Damping Controlers” - *Bulk Power System Dynamics and Control IV – Restructuring, August 1998 , Santorini, Greece*.
- [36] G. N. Taranto, A. L. B. do Bomfim, D. M. Falcão and N. Martins – “Automated Design of Multiple Damping Controlers Using Genetic Algorithms“ – *Proceedings of IEEE PES Winter Meeting, New York, February 1999*.
- [37] S. Enlangovan and C. M. Lim – “Efficient Pole-assignment Method for Designing Stabilizers in Multimachine Power Systems”, *IEE Proceedings, 134(6):383-384, November 1987*.

- [38] N. Martins et al – “Retuning the Oscillation Damping Sources due to the North-South Brazilian Interconnection”, CIGRE - 38-106 – 1998.
- [39] K. Ogata – “*Modern Control Engineering*”, 2 ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. – 1990.
- [40] A. A. Barbosa, 1999 – “*Utilização de Ferramentas Lineares na Análise e Controle do Amortecimento de Oscilações Eletromecânicas em Sistemas de Grande Porte*”- Tese de Mestrado – UFRJ.
- [41] G. J. Rogers – “The Application of Power System Stabilizers to a Multigenerator Plant”, *IEEE PES Winter Meeting, paper PE-437-PWRS-0-10-1998, New York, February*.
- [42] F.D.Freitas, A. S. Silva, A. J. A. Simões Costa – “Coordinated Setting of Stabilizers for Synchronous Machine Generators and FACTS Devices in Power Systems” , *CIGRÉ Symposium on Power Electronics in Electric Power Systems, Tokyo, Japan, May 1995*.
- [43] S. Gomes Jr., N. Martins, H. J. C. P. Pinto – “Utilização do Método de Nyquist para a Estabilização de Sistemas de Potência Envolvendo Alocação de Par de Pólos Complexos”—*Proceedings of XII Brazilian Automatic control Conference – XII CBA Vol I, pp. 137-142 – September 14 – 18, 1998 – Uberlândia, MG, Brazil*
- [44] Martins, N. & Lima, L. T. G- “Eigenvalue and Frequency Domain Analysis of Small Signal Electromechanical Stability Problems”, *IEEE Symposium on Application of Eigenanalysis and Frequency Domain Methods for System Dynamic Performance, publication TH 029203 PWR No. 4- 1989*.
- [45] MPI-2 – *Extensions to the Message-Passing Interface- July 18, 1997*