



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

COMPARAÇÃO DE MÉTODOS BASEADOS EM ALGORITMOS GENÉTICOS PARA
AJUSTE COORDENADO DE ESTABILIZADORES DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

CELIVAN FERREIRA VIEIRA

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

COMPARAÇÃO DE MÉTODOS BASEADOS EM ALGORITMOS GENÉTICOS PARA
AJUSTE COORDENADO DE ESTABILIZADORES DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

CELIVAN FERREIRA VIEIRA

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CELIVAN FERREIRA VIEIRA

COMPARAÇÃO DE MÉTODOS BASEADOS EM ALGORITMOS GENÉTICOS PARA
AJUSTE COORDENADO DE ESTABILIZADORES DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos mínimos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

COMPARAÇÃO DE MÉTODOS BASEADOS EM ALGORITMOS GENÉTICOS PARA
AJUSTE COORDENADO DE ESTABILIZADORES DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

AUTOR: CELIVAN FERREIRA VIEIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA
EXAMINADORA E PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ PARA
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA
DE SISTEMAS DE ENERGIA.

AVALIADA EM 27/11/2014

BANCA EXAMINADORA

Prof.: Dr. João Paulo Abreu Vieira
(Orientador - UFPA)

Prof.: Dr. Walter Barra Júnior
(Membro - UFPA)

Prof.: Dr. André Mauricio Damasceno Ferreira
(Membro - IFPA)

Prof.: Dr. Rodrigo Andrade Ramos
(Membro – EESC/USP)

VISTO:

Prof.: Dr. Evaldo Pelaes
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

Este trabalho é dedicado à minha família:
À minha esposa Gleyvia e minha filha Isadora, à
minha mãe Inês Ferreira, à minha mãe do coração
Antônia Maria, e ao meu pai do coração Jorge Leite.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus acima de tudo por me conduzir para o caminho correto.

À minha esposa, Gleyvia, e à minha filha Isadora, pelo apoio e por suportarem os dias de ausência.

Às minhas mães Antônia Maria e Inês Ferreira e meu pai do coração Jorge Leite, por toda dedicação e apoio na conquista dessa vitória.

Às meus irmãos do coração, Breno, Bronson, Bruno e Brainer, pela convivência descontraída no lar durante os anos do curso de mestrado.

Ao professor João Paulo Abreu Vieira por me orientar e confiar que conseguiria desenvolver este trabalho em um curto espaço de tempo.

Ao professor Walter Barra Júnior pelas importantes dicas.

Aos pesquisadores e funcionários do Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia – CEAMAZON, pelo companheirismo e amizade durante a elaboração deste trabalho.

Obrigado a todos.

õNão é o mais forte que sobrevive, nem o mais inteligente, mas o que melhor se adapta às mudanças.ö

Charles R. Darwin

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	VI
AGRADECIMENTOS	VII
EPIGRAFE	IX
LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE TABELAS	XIV
RESUMO	XV
ABSTRACT	XVI
Capítulo 1 ó Introdução	1
1.1 – Motivações	1
1.2 – Objetivos	1
1.3 – Levantamento Bibliográfico	2
1.4 – Organização da Dissertação.....	4
Capítulo 2 ó Estabilidade de Sistemas de Potência	5
2.1 – Introdução.....	5
2.2 – Estabilidade Angular	5
2.3 – Modos de Oscilação Eletromecânica	10
2.4 – Modelagem do Estabilizador de Sistemas de Potência	11
2.5 – Ajuste de Estabilizadores de Sistemas de Potência	14
2.6 – Modelo Linear do Sistema Elétrico de Potência.....	16
Capítulo 3 ó Algoritmos Genéticos (AG)	25
3.1 – Introdução.....	25
3.2 – Definição, Conceitos Básicos e Características	25
3.3 – Terminologias dos Algoritmos Genéticos	28
3.4 – Representação das Variáveis nos Cromossomos	30
3.5 – Operadores Genéticos	35
3.5.1 – Operadores de Cruzamento	35
3.5.2 – Operadores de Mutação.....	36
3.5.3 – Operadores Genéticos de Seleção	37
Capítulo 4 ó Métodos de Ajuste de ESP Via AG	39
4.1 – Introdução.....	39

4.3 – Ferramentas Computacionais Utilizadas	41
4.4 – Metodologias Utilizadas no Ajuste Coordenado de ESP's Via AG	42
4.4.1 – Método 1 – descrito na referência [1].....	42
4.4.2 – Método 2 – descrito na referência [2].....	44
4.4.3 – Método 3 – descrito na referência [3].....	47
Capítulo 5 ó Resultados	49
5.1 – Sistema Teste Utilizado.....	49
5.2 – Parâmetros Utilizados para o AG	51
5.3 – Análise dos Resultados.....	53
Capítulo 6 ó Conclusões	61
6.1 – Considerações Finais.....	61
6.2 – Sugestões de Trabalhos Futuros	61
Referências Bibliográficas	62

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 2

Figura 2.1 – Classificação da estabilidade dos sistemas de potência	6
Figura 2.2 – Instabilidade não oscilatória (tensão de campo constante, $T_S < 0$ e $T_D > 0$).....	8
Figura 2.3 – Instabilidade oscilatória ($T_S > 0$ e $T_D < 0$)	9
Figura 2.4 – Sistema estável ($T_S > 0$ e $T_D > 0$)	9
Figura 2.5 – Resposta angular do rotor para um distúrbio transitório	10
Figura 2.6 – Modelo do ESP de sistemas de potência	13
Figura 2.7 – Estrutura do sistema em malha fechada	19

Capítulo 3

Figura 3.1 – Fluxograma que representa as etapas que compõe a estrutura básica do AG	27
Figura 3.2 – Representação binária do cromossomo	30
Figura 3.3 – População no AG formada por cinco indivíduos	31
Figura 3.4 – Representação de um indivíduo por números reais	33
Figura 3.5 – Possíveis soluções para o operador aritmético: solução afim, linear e convexa	36
Figura 3.6 – Exemplo do operador de cruzamento uniforme.....	37

Capítulo 4

Figura 4.1 – Sistema de potência descentralizado	40
Figura 4.2 – Procedimento para obtenção das matrizes de estados que representam o ponto de operação do sistema em malha aberta	41
Figura 4.3 – Estrutura do cromossomo para o método 1	43
Figura 4.4 – Fluxograma do procedimento do AG para o método 1	45
Figura 4.5 – Fluxograma do procedimento do AG para o método 2.....	47
Figura 4.6 – Região do plano complexo onde $\sigma_i \leq \sigma_0$ e $\zeta_i \geq \zeta_0$	48
Figura 4.7 – Fluxograma do procedimento do AG para o método 3.....	49

Capítulo 5

Figura 5.1 – Diagrama unifilar do sistema New England	50
Figura 5.2 – Modelo do regulador automático das máquinas para o sistema New England	51
Figura 5.3 – Autovalores para os 14 cenários em malha aberta.....	52

Figura 5.4 – Autovalores para os 14 cenários operativos com ESP's ajustados pelo AG para o método 1	54
Figura 5.5 – Autovalores para os 14 cenários operativos com ESP's ajustados pelo AG para o método 2	55
Figura 5.6 – Autovalores para os 14 cenários operativos com ESP's ajustados pelo AG para o método 3	55
Figura 5.7 – Autovalores para os 14 cenários operativos com ESP's ajustados pelo AG para o método 3 considerando modos na faixa de 0,1 a 4 Hz.....	59
Figura 5.8 – Resposta no domínio do tempo do sistema para o 13 ^o ponto de operação com os ESP's ajustados pelo método 2	61
Figura 5.9 – Resposta no domínio do tempo do sistema para o 13 ^o ponto de operação com os ESP's ajustados pelo método 3	62
Figura 5.10 – Ângulo relativo da máquina 1 para o 13 ^o ponto de operação com os ESP's ajustados pelos métodos 1 (vermelho), 2 (azul) e 3 (verde).....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Condições de operação para o sistema New England	51
Tabela 5.2 – Parâmetros dos ESP's encontrados pelo AG para o método 1.....	56
Tabela 5.3 – Parâmetros dos ESP's encontrados pelo AG para o método 2.....	56
Tabela 5.4 – Parâmetros dos ESP's encontrados pelo AG para o método 3.....	56
Tabela 5.5 – Modos eletromecânicos e seus respectivos amortecimentos para o cenário 6 em malha aberta.....	57
Tabela 5.6 – Modos eletromecânicos e seus respectivos amortecimentos para o cenário 6 com ESP's ajustados pelo método 1	58
Tabela 5.7 – Modos eletromecânicos e seus respectivos amortecimentos para o cenário 6 com ESP's ajustados pelo método 2	58
Tabela 5.8 – Modos eletromecânicos e seus respectivos amortecimentos para o cenário 6 com ESP's ajustados pelo método 3	58
Tabela 5.9 – Modo instável fora da faixa eletromecânica e respectivo amortecimento para o cenário 6 com os ESP's ajustados pelo método 3.....	58
Tabela 5.10 – Parâmetros dos ESP's encontrados pelo AG para o método 3 para o cenário 6 considerando modos na faixa de 0,1 a 4 Hz.....	60

RESUMO

Essa dissertação de mestrado apresenta um estudo comparativo entre três metodologias baseadas em algoritmos genéticos para ajuste coordenado de estabilizadores de sistemas de potência (ESP). Os procedimentos de ajuste do ESP são formulados como um problema de otimização, a fim de: 1) maximizar o coeficiente de amortecimento mínimo do sistema em malha fechada; 2) maximizar o somatório de todos os coeficientes de amortecimento do sistema em malha fechada; e 3) deslocar os modos eletromecânicos poucos amortecidos ou mal amortecidos para uma zona pré-escrita no plano s . As três metodologias consideram um conjunto de condições de operacionais pré-especificadas. O sistema elétrico foi representado por equações no espaço de estado e as matrizes associadas com a modelagem foram obtidas por meio da versão acadêmica do programa PacDyn. As simulações foram realizadas usando o MATLAB. As metodologias foram aplicadas no conhecido sistema teste New England.

Palavras-chaves: estabilidade de sistemas de potência, algoritmos genéticos e ajuste de estabilizadores de sistemas de potência.

ABSTRACT

This work presents a comparison study among three methodologies based on genetic algorithms applied to solve the power system stabilizers (PSS) tuning problem. The PSS tuning procedures are formulated as an optimization problem in order to: 1) maximize the closed-loop minimum damping ratio; 2) maximize the sum of the spectrum damping ratios; and 3) shift the lightly damped and undamped electromechanical modes of all plants to a prescribed zone in the s-plane. The three methodologies taking into account a pre-specified operating conditions. For this purpose, the system is represented by the state-space equations and the matrices associated with this modeling are obtained by using the academic version of the commercial software PacDyn. The simulations are carried out using the MATLAB platform. The methodologies are applied to the well-known New England test system.

Keywords: power system stability, genetic algorithm and power system stabilizer tuning

Capítulo 1: Introdução

1.1 ó Motivações

Nos últimos anos muitos esforços têm sido demandados para o desenvolvimento de metodologias de ajuste simultâneo e coordenado de estabilizadores de sistemas de potência (ESPs) por meio do uso de metaheurísticas ou algoritmos bioinspirados. Esses métodos utilizam diferentes cenários de operação no procedimento de ajuste, a fim de avaliar a eficácia dos ESP's sintonizados no amortecimento dos modos de oscilação em todas as condições operacionais admissíveis.

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 [1]. Além disso, independentemente do cenário operativo, o sistema deve manter sua estabilidade. Portanto, de modo a amortecer as oscilações eletromecânicas originadas da mudança de cenário operativo ou estabilizar o sistema para uma configuração operacional na qual o sistema é instável, o ajuste preciso dos estabilizadores é primordial para assegurar a estabilidade do sistema.

Encontrar simultaneamente parâmetros ótimos para os estabilizadores que satisfaça um conjunto de cenários operativos de um sistema de potência requer uma técnica de busca que não leve em consideração as características da modelagem complexa dos sistemas de potência. Além disso, o procedimento algorítmico de busca empregado deve ser implementado, de maneira tal que não incorra na deficiência inerente de muitos processos de busca, o chamado “aprisionamento no mínimo local”, fazendo com que a solução encontrada não satisfaça os requisitos de desempenho necessários para ser considerada uma solução ótima.

No início dos anos 1970 Holland propôs os Algoritmos Genéticos (AG's), como um conjunto de programas computacionais que imitam o processo evolucionário na natureza [4]. Uma vez que os sistemas de potência são ambientes em que algumas de suas medidas de desempenho, tal como os fatores de amortecimentos, podem ser representados por funções multimodais, os Algoritmos Genéticos apresentam-se como ferramenta capaz de maximizar ou minimizar tais funções. Os AG's manipulam um conjunto de possíveis soluções (população) para o processo de busca (ou otimização)

em questão. Eles operam sobre uma representação codificada das soluções e não diretamente sobre as soluções em si. Essas representações das soluções são um conjunto de *strings*¹, chamados cromossomos, que podem ser do tipo real, binário ou literal. Como na natureza, o processo de seleção fornece o mecanismo necessário para que as melhores soluções (indivíduos) sobrevivam. A cada iteração (geração) uma solução é gerada, e está associada com o valor de desempenho que reflete quão boa ela é, comparada à outras soluções possíveis. Quanto maior o valor do desempenho de uma solução, maior é a chance dessa solução permanecer e se propagar para iterações futuras. Um mecanismo de cruzamento recombina as soluções e outro mecanismo as modifica, num processo iterativo que se repete um número finito de vezes, até que a solução ótima seja alcançada.

Várias metodologias de sintonia de estabilizadores que utilizam técnicas de otimização baseadas em algoritmos genéticos têm sido desenvolvidas em muitos trabalhos na literatura. Algumas delas foram motivos de discussão e questionamentos [5].

1.2 ó Objetivos

O objetivo deste trabalho é comparar três métodos baseados em algoritmos genéticos, já existentes na literatura, para ajuste coordenado de estabilizadores de sistemas de potência. Estes métodos são, neste trabalho, denominados como segue:

- Método 1, implementado na referência [1] .
- Método 2, desenvolvido na referência [2].
- Método 3, utilizado na referência [3].

Na comparação, são analisados os resultados obtidos por cada método, tais como mapas de polos e zeros, fatores de amortecimento e a resposta no domínio do tempo. Para alcançar este objetivo utilizou-se a biblioteca de rotinas de otimização por algoritmos genéticos do Matlab, GAOT, além dos softwares Anarede, Anatem e PacDyn, do CEPEL. As metodologias são avaliadas utilizando o conhecido sistema teste New England, de 39 barras e 10 máquinas.

¹ String é uma sequência ordenada de caracteres ou símbolos escolhidos a partir de um conjunto pré-determinado.

1.3 ó Levantamento Bibliográfico

A revisão bibliográfica do presente trabalho é focada nos trabalhos que abordam o tema ajuste de estabilizadores de sistemas de potência utilizando técnicas bio-inspiradas, principalmente as que utilizam o AG.

Em [6] foi apresentada a comparação entre dois algoritmos de otimização bio-inspirados: um baseado em enxame de partículas (PSO) e o algoritmo da bactéria de forragem (BFA). Neste trabalho, os algoritmos PSO e BFA foram utilizados para sintonizar um conjunto de ESP's em um sistema de potência multimáquinas, levando em consideração as respostas transitórias no domínio do tempo na formulação da função objetivo. Entretanto, não foram considerados múltiplos pontos de operação.

Um técnica de otimização baseada em colônia artificial de abelhas (ABC) foi apresentada em [7] para sintonizar os parâmetros dos ESP's de um sistema de potência multimáquinas. Neste trabalho, os ESP's foram sintonizados para deslocar simultaneamente os modos eletromecânicos mal amortecidos para uma região específica do plano s . Uma função multiobjetivo, baseada na margem de estabilidade e no coeficiente de amortecimento, é utilizada para otimizar os parâmetros dos ESP's. O desempenho e robustez dos ESP's otimizado são testados no sistema New England em diferentes cenários de operação. Porém, os cenários não foram considerados simultaneamente no processo de otimização e geraram diversos conjuntos de parâmetros otimizados, um para cada cenário.

No trabalho de [8] é apresentado um estudo comparativo de três algoritmos de otimização bio-inspirados utilizados para resolver o problema da sintonia de ESP's em sistemas de potência. São eles: o algoritmo do morcego, o algoritmo genético e a otimização por colônia de formigas. O procedimento de sintonia é formulado como um problema de otimização onde o objetivo é minimizar os coeficientes de amortecimento mal amortecidos, levando em consideração vários cenários operativos. Neste trabalho a sintonia foi realizada simultaneamente para todos os pontos de operação considerados, e a robustez dos parâmetros para os três algoritmos também é testada no sistema New England.

Um trabalho que utiliza algoritmo genético encontra-se em [9], no qual é apresentado um método robusto para sintonia de controladores de amortecimento. Neste método, o critério de sintonia é baseado no somatório dos coeficientes de amortecimento para um conjunto de condições de operação e restrições, que levam em

consideração o coeficiente de amortecimento mínimo. O método é aplicado no projeto de um compensador estático VAR (SVC) e de um compensador série controlado à tiristor (TCSC), para melhorar o amortecimento de modos interárea de um modelo linearizado composto por 3 áreas e 6 máquinas.

É descrito no trabalho de [10], um procedimento para posicionar e sintonizar simultaneamente um ESP para uma ampla faixa de condições de operações utilizando um AG. Neste trabalho, o problema do ajuste de parâmetros dos ESP's é formulado como um problema de otimização que é resolvido pelo AG sob a forma de uma função objetivo baseada nos autovalores. A técnica é testada com o sistema máquina-barras infinita e com um sistema multimáquinas, onde o posicionamento ótimo e sintonia dos ESP's são realizados simultaneamente.

1.4 Organização da Dissertação

O trabalho aqui desenvolvido está organizado como segue:

O capítulo 2 apresenta a definição de estabilidade angular e a modelagem do estabilizador de sistemas de potência no espaço de estados.

O capítulo 3 fornece um escopo geral sobre os fundamentos básicos a respeito da técnica de busca e otimização denominada algoritmos genéticos.

O capítulo 4 descreve detalhadamente as técnicas consagradas na literatura de ajustes de estabilizadores de potência via algoritmos genéticos. Assim como também descreve a metodologia comparativa que esse trabalho intenciona.

O capítulo 5 apresenta os resultados comparativos baseados em critérios de convergência e simulações no domínio do tempo.

O capítulo 6 apresenta as conclusões da dissertação e as recomendações para trabalhos futuros.

Capítulo 2: Estabilidade de Sistemas de Potência

2.1 Introdução

O sistema de potência é um sistema altamente complexo e não linear que opera em um ambiente que se modifica a todo instante; topologia da rede, cargas, saídas dos geradores, fluxos nas linhas mudam continuamente. Assim, os parâmetros dos controles também mudam de modo a ajustarem o sistema a estas mudanças.

Os distúrbios na rede elétrica podem ser pequenos ou grandes. Quando sujeito a grandes distúrbios, a estabilidade do sistema depende da natureza do distúrbio e da condição inicial de operação. Por outro lado, pequenos distúrbios, tal como mudança de carga, ocorrem continuamente, e o sistema ajusta-se para essa nova condição de operação. O sistema deve ser capaz de operar satisfatoriamente sob estas condições e atender a demanda das cargas. Ele também deve ser capaz de manter-se estável sob distúrbios de natureza severa, tal como um curto-circuito ou a retirada de uma linha.

O uso de excitatrizes de resposta rápida com ganho elevado levou os pesquisadores a focar na estabilidade angular a pequenos sinais. Este tipo de estabilidade angular é conhecido amplamente como um problema de insuficiência de amortecimento de oscilações de um grupo de máquinas de uma usina contra o resto do sistema (modo local), ou de um grupo de geradores em uma área contra outro grupo de geradores em outra área do sistema (oscilação interárea).

2.2 Estabilidade Angular

Em termos gerais a estabilidade de um sistema de potência pode ser vista como um único problema, entretanto, não é prático analisá-la desta maneira. Análises de problemas de estabilidade, identificação de fatores que contribuem para a instabilidade, e a formação de métodos para melhorar a operação estável são muito facilitadas pela classificação da estabilidade em categorias [11]. A Figura 2.1 mostra a classificação da estabilidade de sistemas de potência em categorias e subcategorias. Particularmente, neste trabalho será dada ênfase à estabilidade angular, mais detalhes sobre estabilidade de frequência e de tensão podem ser encontrados nas referências [11] e [12].

Estabilidade angular é a capacidade das máquinas síncronas interconectadas permanecerem em sincronismo sob condições normais ou após sofrer uma perturbação [11]. A estabilidade angular envolve a análise das oscilações eletromecânicas inerentes aos sistemas de potência. As questões fundamentais que devem ser respondidas é como a potência elétrica de saída varia quando o rotor da máquina oscila e o que leva à instabilidade.

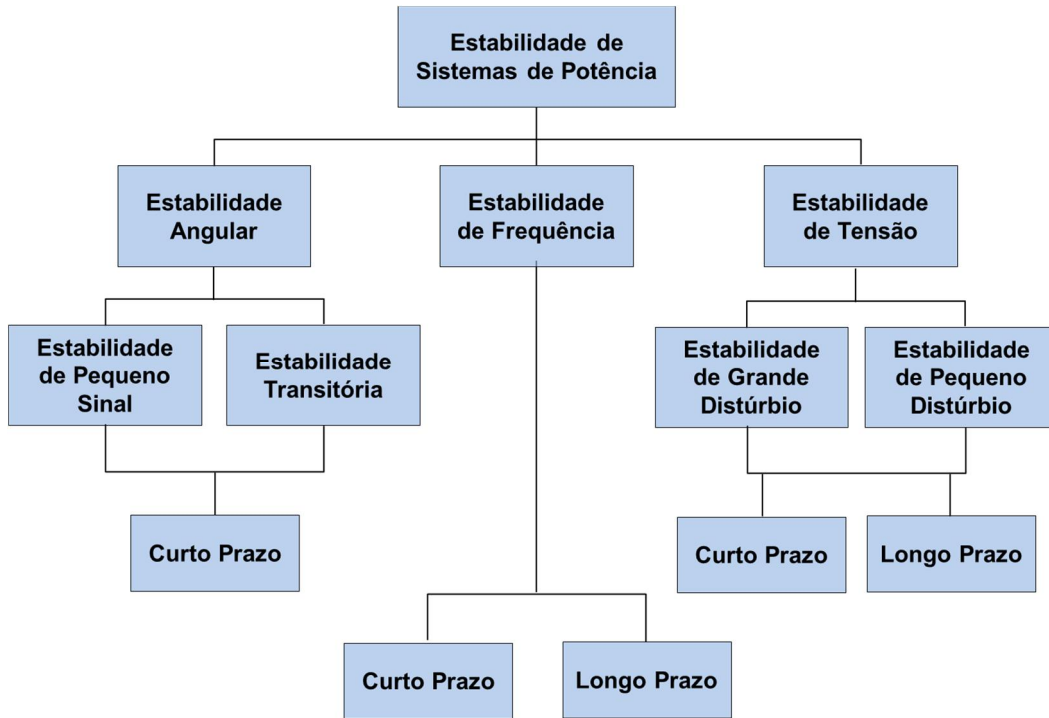


Figura 2.1: Classificação da estabilidade de sistemas de potência

A estabilidade de um sistema de potência é a capacidade do sistema de potência, para uma dada condição inicial de operação, de recuperar seu estado de equilíbrio após ser submetido a um distúrbio [11]. Estabilidade pode ser vista como uma condição de equilíbrio entre forças opostas, ou seja, em regime permanente existe um equilíbrio entre o torque mecânico motriz e o torque de carga elétrico em cada máquina, fazendo com que a velocidade do rotor permaneça constante, a variação de velocidade é nula, portanto. Se o sistema é perturbado, esse equilíbrio é desfeito, resultando em aceleração ou desaceleração dos rotores das máquinas. Por conseguinte, tradicionalmente, o

problema da estabilidade tem sido o de manter as máquinas em sincronismo, como dito anteriormente.

Por outro lado se, por exemplo, o rotor de uma máquina girar, temporariamente, mais rápido que o de uma outra, a posição angular do seu rotor avançará em relação à máquina mais lenta. Essa diferença angular faz com que a máquina mais lenta transfira parte de sua carga para a máquina mais rápida, dependendo da relação potência-ângulo. Isso tende a reduzir a diferença de velocidade e, por conseguinte a diferença angular. Além de um certo limite, um aumento na separação angular é acompanhada de uma redução na potência transferida, pois a relação potência-ângulo das máquinas é não-linear; isso aumenta a diferença angular mais ainda levando o sistema à instabilidade.

A mudança no torque elétrico de uma máquina síncrona, após uma perturbação, pode ser decomposta em duas componentes [13]:

- Componente de torque de sincronização, em fase com a variação do ângulo do rotor.
- Componente de torque de amortecimento, em fase com a variação de velocidade do rotor.

Pode-se formalizar estas componentes, em termos matemáticos, na seguinte equação,

$$\Delta T_e = T_s \Delta \delta + T_D \Delta \omega \quad (2.1)$$

Onde

$T_s \Delta \delta$ – é a variação da componente de torque de sincronização em fase com a variação do ângulo do rotor, $\Delta \delta$, e refere-se à componente de torque de sincronização; T_s é o coeficiente de torque de sincronização.

$T_D \Delta \omega$ – é a componente de torque em fase com a variação de velocidade do rotor, $\Delta \omega$, e refere-se à componente de torque de amortecimento; T_D é o coeficiente de torque de amortecimento.

A estabilidade do sistema depende da existência tanto do torque de amortecimento quanto do torque de sincronização em cada máquina síncrona. A falta de torque de sincronização resulta em instabilidade aperiódica ou não oscilatória, ao passo que a falta de torque de amortecimento resulta em instabilidade oscilatória.

Para melhor analisar a estabilidade angular, é útil subdividi-la em termos das seguintes subcategorias [13]:

- **Estabilidade a pequenos sinais** é a capacidade do sistema de potência de se manter em sincronismo quando sujeito a pequenas perturbações. Estas perturbações ocorrem com frequência no sistema, ocasionadas por pequenas variações na carga e geração. Estas perturbações são suficientemente pequenas de maneira tal que se possa linearizar as equações do sistema. A estabilidade do sistema, sujeito a uma pequena perturbação, depende do ponto de operação inicial do sistema, do sistema de transmissão e do tipo de sistema de excitação utilizado. A instabilidade resultante pode ser de duas formas:
 - Aumento no ângulo do rotor, por meio de um modo não oscilatório ou aperiódico, devido à falta de torque de sincronização, ou
 - Oscilações de amplitude crescentes no rotor devido à falta de torque de amortecimento.

Para um gerador conectado a um grande sistema, a ausência do regulador automático de tensão, ou seja, com tensão de campo constante, a instabilidade que surge é devido à falta de torque de sincronização ocasionado por um modo instável não oscilatório, como mostrado na Figura 2.2. Já a Figura 2.3 mostra o caso do mesmo gerador operando com o regulador automático de tensão onde há variação da corrente de campo. Neste caso, o coeficiente de torque de sincronização passa a ser positivo. Por outro lado, o coeficiente de torque de amortecimento passa a ser negativo.

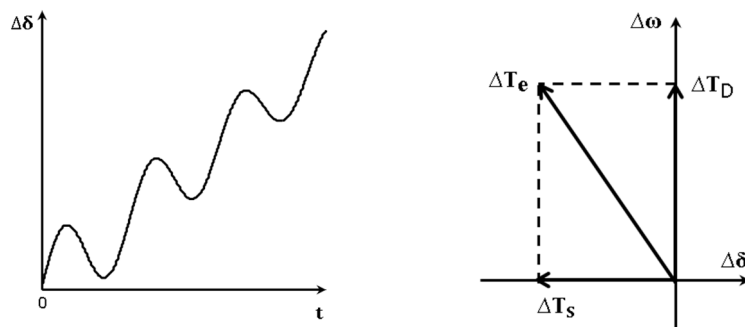


Figura 2.2: Instabilidade não oscilatória (tensão de campo constante, $T_S < 0$ e $T_D > 0$)

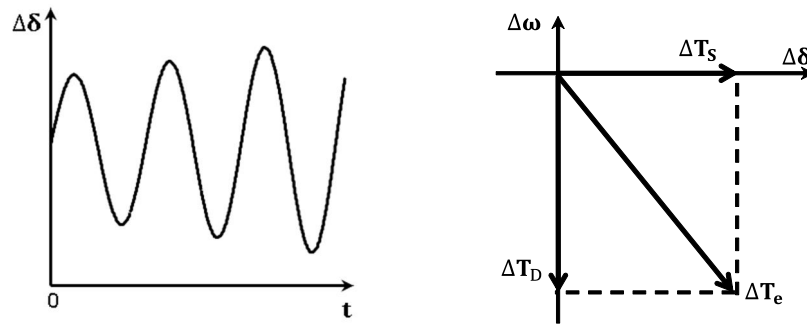


Figura 2.3: Instabilidade oscilatória ($T_S > 0$ e $T_D < 0$)

Para o caso estável onde o regulador automático de tensão possui uma excitatriz de alto ganho, tanto o coeficiente de torque de amortecimento quanto o coeficiente de torque de sincronização são positivos, mas ainda assim bastante oscilatório, o que significa baixo torque de amortecimento, (Figura 2.4).

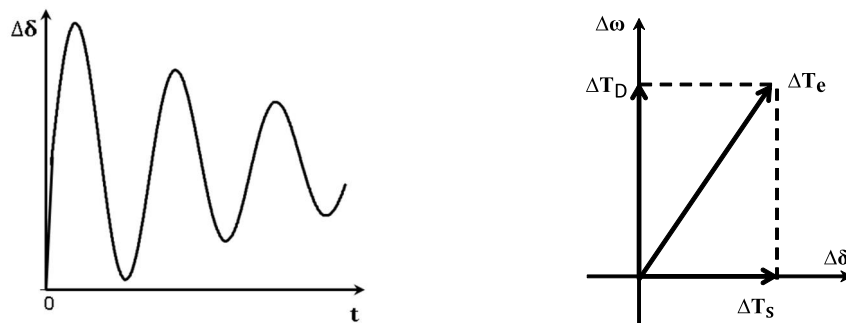


Figura 2.4: Sistema estável ($T_S > 0$ e $T_D > 0$)

Os sistemas de excitação modernos podem adicionar-se aos fatores que conduzem a baixos torques de amortecimento do sistema. Assim, se por um lado eles são benéficos do ponto de vista da estabilidade transitória, estes sistemas de excitação podem ser prejudiciais quanto ao amortecimento das oscilações eletromecânicas.

- **Estabilidade transitória** é a capacidade do sistema de potência de se manter em sincronismo quando sujeito a um distúrbio severo. A resposta resultante do sistema envolve grandes excursões do ângulo do rotor do gerador e é influenciado pela relação não linear entre a potência elétrica e o ângulo da máquina. Neste caso, a estabilidade depende tanto do ponto de operação inicial do sistema, quanto da severidade do distúrbio. A Figura 2.5 mostra o comportamento da máquina síncrona para três situações distintas. No caso 1 a máquina síncrona é estável, já nos casos 2 e 3 ela é instável.

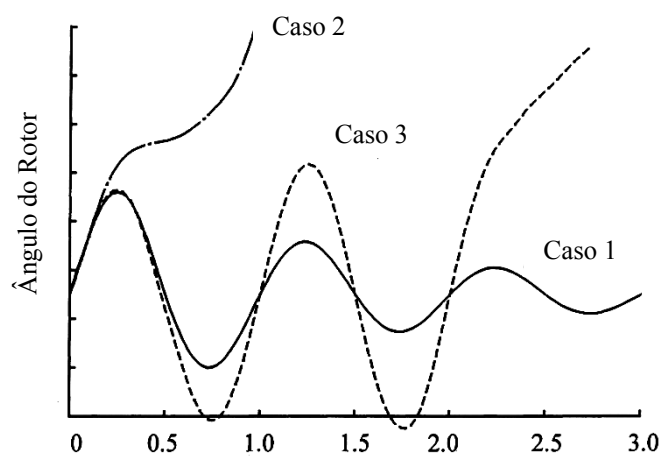


Figura 2.5: Resposta angular do rotor para um distúrbio transitório
 Fonte: Kundur, 1994

2.3 Modos de Oscilação Eletromecânica

As oscilações eletromecânicas, também conhecidas como oscilações eletromecânicas de baixa frequência, são uma consequência direta das interações dinâmicas entre as máquinas síncronas quando o sistema está sujeito a perturbações. Essas oscilações podem ser uma consequência das interações dinâmicas entre grupos de máquinas (um grupo oscila contra outro), ou entre uma máquina (ou grupo de máquinas) e o resto do sistema [13]. Pode-se classificar as oscilações eletromecânicas de interesse com implicações em estudos de estabilidade pelos seguintes tipos:

- **Modo local** – está associado às oscilações que ocorrem entre as máquinas de uma mesma usina e o resto do sistema, sendo este muito

maior que a usina. As frequências dos modos locais ficam em geral na faixa de 1 a 2 Hz, mas a faixa de 1 a 3 Hz também é aceita como modo local;

- **Modo intra-planta** – está associado às oscilações que ocorrem entre um grupo de máquinas, de uma mesma usina, por exemplo; e um outro grupo de máquinas eletricamente próximas;
- **Modos de controle** – estão associados às oscilações causadas por ajustes nos controles. Ajustes inadequados nos sistemas de excitação, reguladores de velocidade, conversores HVDC e SVC são geralmente as causas das instabilidades destes modos;
- **Modos torcionais** – estão associados com os componentes rotacionais do eixo do sistema turbina-gerador. As instabilidades dos modos torcionais podem ser causadas por [11]:
 - Interação torcional com os controles do sistema acima citado;
 - Ressonância sub-síncrona com o sistema de transmissão contendo compensação série;
 - Fadiga torcional causada por chaveamentos na rede elétrica.
- **Modos interárea** – são caracterizados pelas oscilações entre grupos de usinas situadas em partes (áreas) diferentes do sistema relativamente afastadas entre si (conectadas através de uma grande impedância). O modo interárea usualmente ocorre de duas formas:
 - Abrangendo todas as usinas do sistema, as quais se dividem em dois grandes grupos oscilando entre si. Neste caso, a frequência de oscilação fica em geral na faixa de 0,1 a 0,3 Hz;
 - Abrangendo 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.

Estes modos caracterizam-se por possuir um baixo amortecimento natural, até mesmo negativo, devido à ação dos reguladores automáticos de tensão com ganho

elevado. Além disso, determinados pontos de operação levam o sistema a possuir baixa margem de estabilidade devido ao carregamento elevado de linhas de transmissão.

A ação de controle efetiva e mais comumente utilizada para contornar o problema da falta de amortecimento dos modos eletromecânicos de baixa frequência é a aplicação de Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESP).

2.4 6 Modelagem do Estabilizador de Sistemas de Potência

A função primordial de um ESP é estender os limites de estabilidade do sistema adicionando amortecimento às oscilações eletromecânicas através da modulação do sinal de excitação da máquina síncrona. Para fornecer tal amortecimento, o ESP deve produzir uma componente de torque elétrico em fase com as variações de velocidade do rotor [11]. A maioria dos ESP's atualmente em uso ainda são baseados em estruturas lineares a parâmetros fixos, e geralmente são projetados para um determinado ponto de operação. A Figura 2.6 mostra o modelo típico do ESP, e é o utilizado neste trabalho, em que,

- O bloco de ganho determina o valor do amortecimento introduzido pelo ESP;
- O filtro washout passa alta de característica derivativa permite que o ESP só atue para variações do sinal de entrada (variação de velocidade particularmente para este trabalho). Do ponto de vista do filtro washout, o valor de T_w não é um parâmetro crítico e pode ficar na faixa de 0,5 a 20 s. A principal consideração é que ele tenha um valor elevado de modo a permitir passar os sinais do estabilizador nas frequências de interesse, mas também não tão elevado de modo a levar a tensão da máquina a excursões indesejáveis;
- Os blocos avanço-atraso de primeira ordem fornecem a compensação de fase do estabilizador, necessária para produzir a componente de torque elétrico em fase com a variação de velocidade do rotor, onde

- $T_1 = \frac{\sqrt{\alpha}}{\omega}$, $T_2 = \frac{1}{\omega\sqrt{\alpha}}$ - são as constantes de tempo do bloco

avanço-atraso definidas em termos da frequência (ω), onde ocorre o máximo avanço de fase; e da compensação de fase (α)

- NB é o número de blocos avanço-atraso

Na prática, dois ou mais blocos podem ser usados para alcançar a compensação de fase desejada. Como normalmente o interesse é a faixa de frequência eletromecânica (0,2 à 2 Hz), a rede avanço-atraso deve fornecer compensação sobre essa faixa. Deve-se ressaltar que a compensação de fase muda com o ponto de operação do sistema, portanto este é um parâmetro que é alterado quando a condição operacional do sistema de potência muda.

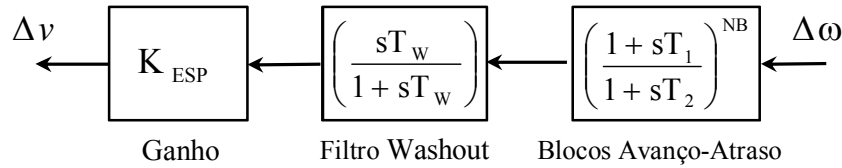


Figura 2.6: Modelo do ESP de sistemas de potência

Para os propósitos deste trabalho, a representação em espaço de estados, particularmente a forma canônica de controlador (FCC) do ESP será de grande utilidade na síntese do estabilizador.

Seja a função de transferência do ESP da Figura 2.6 representada por

$$C(s) = \frac{V(s)}{\Delta\omega(s)} = K_{\text{ESP}} \left(\frac{sT_w}{1 + sT_w} \right) \left(\frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \right)^{\text{NB}} \quad (2.2)$$

Colocando a Equação (2.2) na forma própria e considerando $\text{NB} = 3$, tem-se

$$C(s) = \frac{K_{\text{ESP}} T_w T_1^3 s^4 + 3K_{\text{ESP}} T_w T_1^2 s^3 + 3K_{\text{ESP}} T_w T_1 s^2 + K_{\text{ESP}} T_w s}{T_w T_2^3 s^4 + (T_2^3 + 3T_w T_2^2) s^3 + (3T_2^2 + 3T_2 T_w) s^2 + (3T_2 + T_w) s + 1} \quad (2.3)$$

Dividindo o numerador e o denominador por $T_w T_2^3$, encontra-se,

$$C(s) = \frac{K_{\text{ESP}} \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^3 s^4 + \frac{3K_{\text{ESP}}}{T_2} \left(\frac{T_1}{T_2} \right) s^3 + 3K_{\text{ESP}} \frac{T_1}{T_2^3} s^2 + \frac{K_{\text{ESP}}}{T_2^3} s}{s^4 + \left(\frac{T + 3T_w}{T_w T_2} \right) s^3 + \left(\frac{3T_2 + 3T_w}{T_w T_2^2} \right) s^2 + \left(\frac{3T_2 + T_w}{T_w T_2^3} \right) s + \frac{1}{T_w T_2^3}} \quad (2.4)$$

Definindo,

$$\alpha_1 = \frac{T_2 + 3T_W}{T_W T_2} \quad \alpha_2 = \frac{3T_2 + 3T_W}{T_W T_2^2} \quad \alpha_3 = \frac{3T_2 + T_W}{T_W T_2^3} \quad \alpha_4 = \frac{1}{T_W T_2^3}$$

$$\beta_0 = K_{ESP} \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^3 \quad \beta_1 = \left(\frac{K_{ESP}}{T_2} \right) \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^2 \quad \beta_2 = 3K_{ESP} \frac{T_1}{T_2^3} \quad \beta_3 = \frac{K_{ESP}}{T_2^3} \quad \beta_4 = 0$$

Logo, a Equação (2.4) pode ser reescrita como

$$C(s) = \frac{\beta_0 s^4 + \beta_1 s^3 + \beta_2 s^2 + \beta_3 s + \beta_4}{s^4 + \alpha_1 s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_3 s + \alpha_4} \quad (2.5)$$

Representando a Equação (2.5) no espaço de estados sob a forma canônica de controlador, como descrito em [14], obtém-se,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\alpha_4 & -\alpha_3 & -\alpha_2 & -\alpha_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (2.6)$$

$$y = [\beta_4 - \alpha_4 \beta_0 \quad \beta_3 - \alpha_3 \beta_0 \quad \beta_2 - \alpha_2 \beta_0 \quad \beta_1 - \alpha_1 \beta_0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \beta_0 u \quad (2.7)$$

Fazendo,

$$A_C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\alpha_4 & -\alpha_3 & -\alpha_2 & -\alpha_1 \end{bmatrix} \quad B_C = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$C_C = [\beta_4 - \alpha_4 \beta_0 \quad \beta_3 - \alpha_3 \beta_0 \quad \beta_2 - \alpha_2 \beta_0 \quad \beta_1 - \alpha_1 \beta_0] \quad D_C = \beta_0$$

Chega-se finalmente ao modelo do ESP no espaço de estados, com uma rede avanço-atraso composta por três blocos,

$$\begin{aligned}\dot{x}_C &= A_C x_C + B_C u_C \\ y_C &= C_C x_C + D_C u_C\end{aligned}\tag{2.8}$$

2.5 Ajuste do Estabilizador de Sistemas de Potência

Tradicionalmente, as metodologias utilizadas para ajuste e projeto dos estabilizadores de sistemas de potência são por compensação de fase, já bem estabelecida, descrita com detalhes em [15] e [16]; e o método por posicionamento de polos, detalhado em [17].

Na primeira metodologia, o ajuste é feito com aplicação recorrente do sistema máquina-barras infinita, desprezando as interações dinâmicas com o barramento infinito. É um método prático e sistemático e, devido à facilidade de implementação, ainda hoje é utilizado nas indústrias para amortecer as oscilações dos modos locais.

Embora a primeira metodologia forneça resultados satisfatórios, o problema de ajuste de ESPs tem sido objeto de várias pesquisas para melhorá-la, como também para sistematizar a técnica e garantir o amortecimento de outros modos de oscilação, os modos interárea, por exemplo. Além disso, esta técnica não enxerga o sistema como um todo, ignorando as interações entre as diversas áreas que compõem as modernas redes elétricas interligadas.

Por outro lado, no método baseado em posicionamento de polos, os polos associados às oscilações eletromecânicas do sistema de potência em malha aberta são deslocados, através do posicionamento adequado dos polos e zeros do ESP no plano complexo [17]. A partir disso, os parâmetros da rede avanço-atraso do ESP é calculada através do ângulo de partida do lugar das raízes do polinômio característico da função de transferência do sistema em malha fechada. O ângulo de partida determina a compensação de fase adequada que o ESP deve fornecer ao sistema em malha fechada.

Uma desvantagem considerável na metodologia por posicionamento de polos são os resultados insatisfatórios, descrito em [18], quando o número de modos críticos difere do número de ESPs instalados e estes são considerados coordenadamente, pois impõe restrições severas ao problema, possivelmente levando a ganhos elevados indesejáveis dos ESPs.

Outra metodologia de ajuste de ESPs é a que utiliza o critério de Nyquist. Nela é avaliada a estabilidade do sistema em malha fechada através do gráfico da curva construída no plano complexo com a função de transferência do sistema em malha

aberta. De acordo com este critério, aplicado ao ajuste de ESPs, pode-se seguir o seguinte algoritmo:

- 1) Calcular os parâmetros do bloco avanço atraso, na frequência do modo de interesse utilizando a seguinte equação:

$$\phi_{\text{Max}} = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta\omega(s)}{\Delta V_{\text{Ref}}(s)} \right)_{s=j\omega} \quad (2.9)$$

Para essa frequência angular do modo de interesse, é calculada a fase (em graus) da função de transferência em malha aberta do sistema, ou seja, sistema de excitação em série com o modelo linearizado do sistema elétrico em estudo, sem ESP.

- 2) Verificar se o valor de ϕ_{Max} em 1), calculado pela Equação (2.9), excede o valor de 60° , caso afirmativo, mais blocos avanço-atraso devem ser inseridos, tais que a soma das contribuições de fase de cada um deles seja igual a ϕ_{Max} .
- 3) Ajustar os parâmetros de cada bloco de compensação em função da contribuição de fase de cada bloco, pelas seguintes equações:

$$\phi_i = \text{sen}^{-1} \left(\frac{\alpha_i - 1}{\alpha_i + 1} \right) \quad (2.10)$$

$$\omega_i = \frac{1}{T_i \sqrt{\alpha_i}} \quad (2.11)$$

onde α_i corresponde à relação entre a constante de tempo do numerador e a constante de tempo do denominador do bloco de compensação de fase i ($i = 1, \dots, \text{NB}$; onde NB - número de blocos avanço-atraso), e a Equação (2.11) calcula a constante de tempo do denominador, do bloco correspondente, para a frequência angular, ω , do modo eletromecânico de interesse.

- 4) Ajustar o ganho do ESP, K_{ESP} , de modo a determinar a quantidade de amortecimento introduzida pelo estabilizador.

O último passo do procedimento descrito anteriormente, que corresponde à escolha do ganho do ESP, é o mais crítico. Idealmente, o valor do ganho deve ser escolhido num valor correspondente ao máximo amortecimento. Um procedimento

possível seria traçar o lugar geométrico das raízes do polinômio característico da função de transferência em malha fechada, isto é, com o estabilizador incorporado.

Entretanto, uma limitação de se ter altos ganhos no estabilizador, é que valores elevados de K_{ESP} , na intenção de amortecer os modos eletromecânicos de interesse, podem reduzir o amortecimento de outros modos de oscilação fora da faixa eletromecânica, como detalhado em [19] e [20].

Diante deste fato, pode inferir que técnicas de ajustes de ESPs que levam em consideração apenas os modos eletromecânicos podem não obter resultados satisfatórios, e dependendo do ponto de operação, até torná-lo instável.

Outro fato é que a escolha do ponto de operação, a partir do qual será ajustado o estabilizador, deve-se basear em pontos de operação críticos do sistema de potência, pois estes exigirão mais esforço do estabilizador.

2.6 ó Modelo Linearizado do Sistema Elétrico de Potência

Para o ajuste dos parâmetros de cada ESP associado a cada máquina para um sistema multimáquinas, é necessário uma representação matemática linear do sistema completo, considerando os reguladores de tensão e ESP's. A finalidade dessa representação é a sintonia eficiente dos estabilizadores considerando uma ampla gama de possíveis cenários de operação do sistema [21]. Ou seja, é criado um modelo linear do sistema elétrico de potência para cada ponto de operação.

O comportamento de um sistema dinâmico, tal como um sistema de potência, pode ser representado por um conjunto de n equações diferenciais não-lineares de primeira ordem juntamente com um conjunto de equações algébricas, da seguinte forma [21]:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{r}) \quad (2.12)$$

$$\underline{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{r}) \quad (2.13)$$

Onde

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \text{ é o vetor de estados, e } \mathbf{u} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_n \end{bmatrix} \text{ é o vetor de variáveis algébricas}$$

Os componentes dinâmicos do sistema, tais como máquinas síncronas, reguladores de tensão, reguladores de velocidade, ESP's, e outros com características semelhantes, são representados pelas equações diferenciais. Já o sistema de transmissão e suas conexões com os componentes dinâmicos são representados pelas equações algébricas.

O estudo de estabilidade à pequenas perturbações envolve a linearização das Equações (2.12) e (2.13) em torno de um ponto de operação $(\mathbf{x}_0, \mathbf{r}_0)$ obtido de fluxo de potência convergido, então

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 \\ \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{r} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Onde

$$\mathbf{J}_1 = \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{r})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}_0, \mathbf{r}_0} \quad (2.16)$$

$$\mathbf{J}_2 = \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{r})}{\partial \mathbf{r}} \right|_{\mathbf{x}_0, \mathbf{r}_0} \quad (2.17)$$

$$\mathbf{J}_3 = \left. \frac{\partial \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{r})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}_0, \mathbf{r}_0} \quad (2.18)$$

$$\mathbf{J}_4 = \left. \frac{\partial \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{r})}{\partial \mathbf{r}} \right|_{\mathbf{x}_0, \mathbf{r}_0} \quad (2.19)$$

A matriz de estados do sistema de potência pode ser obtida eliminando o vetor de variáveis algébricas $\Delta \mathbf{r}$, como

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{J}_1 - \mathbf{J}_2 \mathbf{J}_4^{-1} \mathbf{J}_3) \Delta \mathbf{x} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} \quad (2.15)$$

As Equações (2.16) a (2.19) formam a matriz jacobiana do sistema e a Equação (2.15) representa o sistema linearizado em torno do ponto de operação $(\mathbf{x}_0, \mathbf{r}_0)$. O símbolo Δ denota uma variação incremental em torno do ponto de operação $(\mathbf{x}_0, \mathbf{r}_0)$ e será omitido no restante do trabalho.

Neste trabalho, a Equação (2.15) representa o sistema elétrico de potência em malha aberta; ou seja, as máquinas possuem regulador automático de tensão (RAT) sem ESP, linearizado em torno de um ponto de operação.

Para ajustar os parâmetros dos ESP's é necessário obter a representação do sistema elétrico de potência completo no espaço de estados, de modo que se possa fechar a malha do sistema com o modelo do ESP, também representado no espaço de estados pela Equação (2.8), desenvolvida de forma genérica na seção 2.4. Considerando-se o sistema elétrico de potência linearizado e em malha aberta, expresso no espaço de estados por

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{Cx}\end{aligned}\tag{2.16}$$

Onde

A – matriz de estados do sistema em malha aberta

B – matriz de entradas do sistema

u – vetor de variáveis de entrada do sistema

y – vetor de variáveis de saída

C – matriz de saída do sistema

A Figura 2.7 mostra a estrutura do sistema de controle do sistema de potência completo linearizado, considerando m pontos de operação ($k = 1, 2, \dots, m$), em que $\Delta\omega$ é o vetor de saída (variação de velocidade do rotor de cada máquina síncrona), V_{ref} é a tensão de referência e V_{ESP} é o sinal de saída do i -ésimo bloco ESP(s).

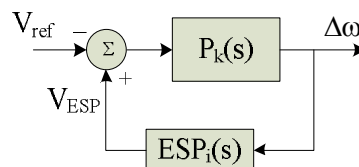


Figura 2.7: Estrutura do sistema em malha fechada

Considera-se que $P_k(s)$ corresponde ao sistema no ponto de operação k , e o bloco de realimentação $ESP_i(s)$ refere-se a uma matriz bloco diagonal com p estabilizadores ($i = 1, 2, \dots, p$). Logo, tem-se

$$\text{ESP}_i(s) = \begin{bmatrix} \text{ESP}_1(s) & & & \\ & \text{ESP}_2(s) & & \\ & & \ddots & \\ & & & \text{ESP}_p(s) \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

O sistema em malha aberta, representado pela equação (2.16), deve ser estabilizado dinamicamente através do seguinte bloco de estabilizadores de ordem p.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_c &= \mathbf{A}_c \mathbf{x}_c + \mathbf{B}_c \mathbf{u}_c \\ \mathbf{y}_c &= \mathbf{C}_c \mathbf{x}_c + \mathbf{D}_c \mathbf{u}_c \end{aligned} \quad (2.18)$$

Onde \mathbf{B}_c constitui a matriz de entradas do estabilizador, \mathbf{y}_c corresponde ao vetor de variáveis de saída do controlador, \mathbf{C}_c constitui a matriz de saídas dos ESP's, \mathbf{D}_c é a matriz de alimentação direta ($\mathbf{D}_c \neq \emptyset$), e \mathbf{u}_c corresponde ao vetor de variáveis de entrada no estabilizador.

Analisando a Figura 2.7 pode se perceber que a saída \mathbf{y} ($\Delta\omega$) do sistema é a entrada \mathbf{u}_c do estabilizador. Da mesma forma, a saída \mathbf{y}_c (V_{ESP}) do estabilizador é a entrada \mathbf{u} do sistema. O problema então é de estabilização por realimentação dinâmica da saída. Substituindo \mathbf{y}_c na Equação (2.16), obtém-se:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{y}_c \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x} \end{aligned} \quad (2.19)$$

Após substituir \mathbf{u}_c e \mathbf{y}_c na Equação (2.18), chega-se em:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_c &= \mathbf{A}_c \mathbf{x}_c + \mathbf{B}_c \mathbf{y} \\ \mathbf{u} &= \mathbf{C}_c \mathbf{x}_c + \mathbf{D}_c \mathbf{u}_c \end{aligned} \quad (2.20)$$

Substituindo \mathbf{y}_c em $\dot{\mathbf{x}}$ na Equação (2.19), e \mathbf{y} em $\dot{\mathbf{x}}_c$ na Equação (2.20), obtém-se:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{C}_c \mathbf{x}_c + \mathbf{B}\mathbf{D}_c \mathbf{u}_c \\ \dot{\mathbf{x}}_c &= \mathbf{A}_c \mathbf{x}_c + \mathbf{B}_c \mathbf{C}\mathbf{x} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Como $\mathbf{u}_c = \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x}$, substituindo na Equação (2.21), rearranjando e colocando na forma matricial, chega-se por fim em:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{x}}_c \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} (\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{D}_c\mathbf{C}) & \mathbf{B}\mathbf{C}_c \\ \mathbf{B}_c\mathbf{C} & \mathbf{A}_c \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_{MF}} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{x}_c \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

A matriz \mathbf{A}_{MF} corresponde a matriz de estados do sistema elétrico de potência em malha fechada com os p ESP's para um determinado cenário operativo.

A maioria das técnicas de ajuste desenvolvidas recentemente são baseadas na avaliação dos autovalores da matriz de estado de malha fechada \mathbf{A}_{MF} , considerando diferentes condições de operação de modo a tornar robusta a metodologia do projeto dos estabilizadores [22]. Em outras palavras, para cada ponto de operação previamente estabelecido é montada uma matriz \mathbf{A}_{MF} correspondente, que normalmente está associada à situação mais crítica do sistema, calcula-se os autovalores dessa matriz e os coeficientes de amortecimento associados a eles. Um bom ajuste dos ESP's deve fornecer boas margens de estabilidade e altos valores de coeficientes de amortecimento dos modos eletromecânicos, ao mesmo tempo não deve permitir que modos fora da faixa eletromecânica tornem-se instáveis.

Autovalores

Para melhor entendimento deste trabalho, é necessária uma breve revisão sobre autovalores e autovetores, mais detalhes podem se encontrados nas referências [11] e [14].

Os autovalores são largamente utilizados para análise da estabilidade de sistemas de potência a pequenos sinais, principalmente em estudos de amortecimento e controle de oscilações eletromecânicas [22].

A decomposição da matriz de estados do sistema em autovalores, autovetores à direita e à esquerda permitem um estudo mais detalhado do comportamento do sistema, tornando melhor a identificação dos problemas e suas causas, através dos chamados “modos”.

Os autovalores de uma matriz são dados pelos valores do escalar λ para o qual não existem soluções não-triviais para a Equação [11]:

$$\mathbf{A}\phi = \lambda\phi \quad (2.23)$$

Onde:

\mathbf{A} – é uma matriz $n \times n$

ϕ – é um vetor $n \times 1$

Para encontrar os autovalores, a equação (2.23) pode ser escrita na forma

$$(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I})\phi = \mathbf{0} \quad (2.24)$$

Para uma solução não-trivial deve-se ter

$$\det(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I}) = 0 \quad (2.25)$$

Calculando o determinante em (2.25) encontra-se o polinômio característico, onde as n soluções desse polinômio $\lambda = \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ são os autovalores da matriz \mathbf{A} .

Os autovalores são os modos do sistema, portanto, em sistemas de potência quando se refere a modos de oscilação, está se referindo aos autovalores com características oscilatórias. Estes autovalores podem ser reais ou complexos. Se \mathbf{A} é real, então os autovalores complexos sempre ocorrerão em pares conjugados. Ainda neste capítulo será feita uma análise sucinta das características destes autovalores.

Autovetores

Para qualquer autovalor λ_i , o vetor coluna ϕ que satisfaz a Equação (2.23), é chamado autovetor a direita da matriz \mathbf{A} associado ao autovalor λ_i . Portanto, tem-se que

$$\mathbf{A}\phi_i = \lambda_i\phi_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.26)$$

O autovetor ϕ_i de dimensão $n \times 1$ tem a forma

$$\phi_i = \begin{bmatrix} \phi_{1i} \\ \phi_{2i} \\ \vdots \\ \phi_{ni} \end{bmatrix}$$

Genericamente, define-se a matriz ϕ como o conjunto formado pelos autovetores à direita da matriz \mathbf{A} , então

$$\phi = [\phi_1 \ \phi_2 \ \dots \ \phi_n] \quad (2.27)$$

Semelhantemente, o vetor coluna ψ que satisfaz a Equação a (2.28), mostrada a seguir, é chamado de autovetor à esquerda associado ao autovalor λ_i .

$$\psi_i \mathbf{A} = \lambda_i \psi_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.28)$$

O autovetor ψ_i de dimensão $1 \times n$ tem a forma

$$\psi_i = [\psi_{i1} \ \psi_{i2} \ \dots \ \psi_{in}]$$

De forma similar à matriz ϕ , define-se a matriz ψ a partir dos autovetores à esquerda associados a matriz \mathbf{A} , como segue

$$\psi = \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \vdots \\ \psi_n \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Os autovetores à direita e à esquerda associados a diferentes autovalores são ortogonais. Em outras palavras, se λ_i for diferente de λ_j ,

$$\psi_j \phi_i = 0 \quad (2.31)$$

Entretanto, para o caso de autovetores associados ao mesmo autovalor,

$$\psi_i \phi_i = C_i \quad (2.32)$$

Onde C_i é uma constante diferente de zero.

É conveniente normalizar os autovetores à esquerda e à direita de modo que se tenha,

$$\psi_i \phi_i = 1 \quad (2.33)$$

Autovalores e Estabilidade

As características dos autovalores dão um diagnóstico da estabilidade do sistema. Pode-se determinar a estabilidade do sistema pela análise dos autovalores como segue:

- Um autovalor real corresponde a um modo não-oscilatório. Um autovalor real negativo representa um modo com decaimento. Quanto maior sua magnitude, mais rápido é o decaimento. Um autovalor real positivo representa uma instabilidade aperiódica.
- Autovalores complexos ocorrem em pares conjugados, e cada par corresponde a um modo de oscilação.

A parte real do autovalor fornece o amortecimento, e a parte imaginária fornece a frequência de oscilação. Um autovalor com parte real negativa representa uma oscilação amortecida, ao passo que um autovalor com parte real positiva representa uma oscilação de amplitude crescente. Logo, para o seguinte par complexo conjugado de autovalores:

$$\lambda = \sigma \pm j\omega \quad (2.34)$$

A frequência de oscilação, em Hz, é dada por

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.35)$$

Isso representa a frequência natural ou amortecida. O coeficiente de amortecimento é calculado por:

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (2.36)$$

O coeficiente de amortecimento determina a taxa de decaimento do modo de oscilação. Portanto, tomando um sistema de potência como exemplo, quanto maior forem os coeficientes de amortecimento desse sistema, mais amortecidos são os seus modos de oscilação.

Conclusões

Neste capítulo foram apresentados os conceitos básicos sobre estabilidade e as técnicas convencionais para projeto e ajustes de parâmetros de ESP's dos sistemas elétricos de potência. Também foi deduzida a matriz do sistema em malha fechada com a inclusão do ESP. No próximo capítulo serão apresentados os conceitos básicos e características dos Algoritmos Genéticos.

Capítulo 3: Algoritmos Genéticos (AG)

3.1 ó Introdução

Neste capítulo são apresentadas as definições, conceitos básicos e características sobre os Algoritmos Genéticos (AGs). Estes conceitos são de vital importância para o entendimento do capítulo 4.

Dentre as várias técnicas de buscas bioinspiradas aplicadas à otimização, o AG talvez seja o que possui maior horizonte de aplicações na atualidade. Ele faz uso dos operadores de seleção, cruzamento e mutação. Como ocorre na natureza, os indivíduos são substituídos a cada geração por novos indivíduos.

Intuitivamente, o procedimento do AG cria sucessivas gerações de indivíduos cada vez melhores aplicando operações simples. O processo de busca é guiado pelo valor da função de avaliação ou função objetivo de cada indivíduo da população. Esse valor é usado para classificar os indivíduos em função da aptidão relativa de cada um com relação ao problema a ser resolvido. O problema é a função objetivo, que atribui um valor para cada indivíduo da população.

3.2 ó Definição, Conceitos Básicos e Características

Os algoritmos genéticos foram apresentados por John Holland na década de 1960, e desenvolvidos por ele juntamente com seus alunos e colegas nas décadas de 1960 e 1970 [23]. Holland propôs o AG como um método computacional heurístico, que imita o processo evolucionário na natureza, baseado na sobrevivência do mais adaptado ao ambiente. Simula de forma simples os efeitos naturais do ambiente no ser vivo, e computacionalmente é utilizado como uma poderosa ferramenta para resolver problemas de busca e otimização [24].

Os AGs são técnicas estocásticas de busca baseadas no mecanismo de seleção natural e genética. Diferentemente das técnicas convencionais, os AGs utilizam um conjunto de soluções codificadas de tamanho definido, denominado população, a qual, geralmente é criada de forma pseudo-aleatória [25]. Cada indivíduo na população é denominado cromossomo e representa uma solução em potencial para o problema em questão. Cada cromossomo pode ser representado por números reais ou binários. Os indivíduos (cromossomos) da população são avaliados e um valor de avaliação,

calculado através da função objetivo, é atribuído a cada um deles. Em um processo iterativo, denominado de geração, alguns indivíduos da população são selecionados e sofrem transformações estocásticas, através de operações genéticas, para formar novos indivíduos, formando então uma nova população. Há dois tipos de transformações: mutação, que cria novos indivíduos modificando um único indivíduo; e cruzamento, que cria novos indivíduos combinando partes de dois indivíduos. Os novos indivíduos são então avaliados, dando origem a uma nova população, formada pela seleção dos indivíduos mais adaptados da população atual e dos novos indivíduos. Após um número finito de gerações, o algoritmo converge para o melhor indivíduo, que esperançosamente, pode representar a solução ótima ou quase ótima para o problema. Uma estrutura geral do AG é mostrada na Figura 3.1.

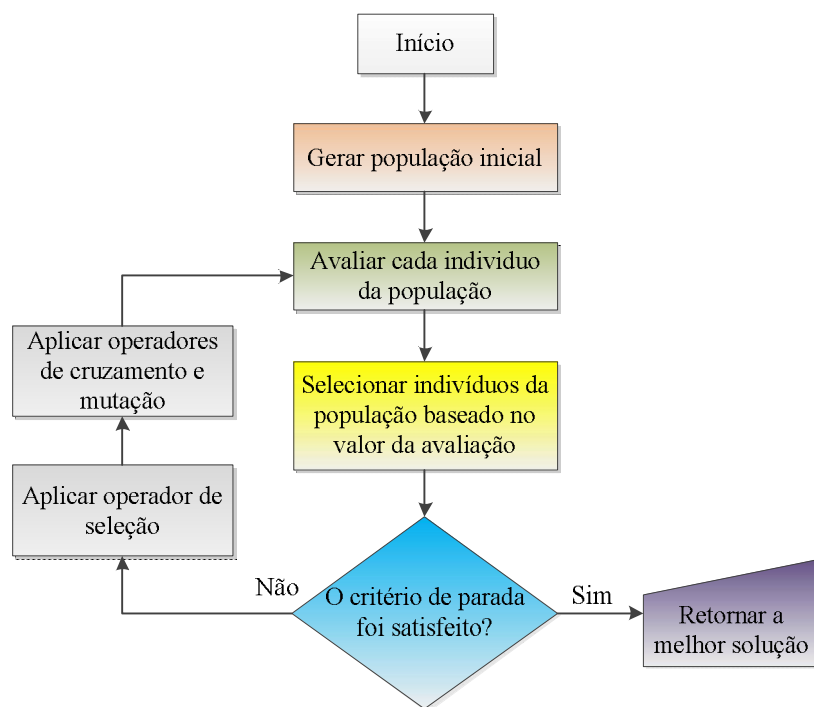


Figura 3.1: Fluxograma que representa as etapas que compõem a estrutura básica do AG

Pode-se aplicar o AG para resolver problemas que não se adaptam bem aos algoritmos de otimização convencionais, incluindo problemas em que a função objetivo é descontínua, não diferenciável, estocástica, ou altamente não-linear. Também se aplicam em problemas de maximização ou minimização de funções multimodais, isto é,

funções que possuem várias inflexões em sua superfície, caracterizadas por múltiplos pontos de máximo ou mínimo.

O AG difere dos algoritmos de otimização convencionais de diversas formas, como descrito a seguir [24]:

- AG's operam com versões codificadas dos parâmetros do problema, em vez dos parâmetros em si; isto é, ele opera com a codificação do conjunto de soluções e não com a solução em si;
- AG utiliza a população de soluções no procedimento de busca, e não apenas uma única solução. Este fato desempenha um papel importante para a robustez dos AG's, pois melhora a chance de alcançar o ótimo global e também ajuda a evitar ponto estacionário local;
- Usam apenas os valores da função objetivo em vez de derivadas. Consequentemente, podem ser aplicados a qualquer problema de otimização, tanto contínuo quanto discreto;
- AG's utilizam operadores probabilísticos enquanto técnicas convencionais de otimização utilizam operadores determinísticos.

Dentre as principais limitações e desvantagens dos AG's, pode-se destacar [24]:

- O problema em definir a função objetivo. Funções de avaliação mal projetadas levam a resultados incoerentes;
- Dificuldade em definir a melhor representação dos cromossomos para o problema;
- O problema de escolher os parâmetros do AG, tais como tamanho da população, taxa de mutação, taxa de cruzamento e método de seleção;
- Dependendo do problema a ser resolvido, o tempo de execução computacional pode se arrastar por horas;
- Convergência prematura e aprisionamentos em ótimos locais.

Deve-se ressaltar ainda nesta seção, que o AG é uma técnica de busca utilizada para encontrar a solução de um determinado problema; logo, não se pode determinar a priori uma sequência de passos que leva à solução. Esse fato é descrito com detalhes na referência [26].

Portanto, duas questões surgem com relação às estratégias de busca: o aproveitamento da melhor solução e a exploração do espaço de busca [26]. Os AG's executam uma busca direcionada e estocástica em um ambiente complexo, onde os

operadores genéticos realizam essencialmente uma busca cega, isto é, sem informação alguma a cerca do problema. Os operadores de seleção direcionam a busca genética em direção à área desejável do espaço de solução.

Um princípio geral que deve ser levado em consideração ao se desenvolver uma implementação com AG, é fazer um compromisso entre exploração e aproveitamento do espaço de busca. Para alcançar isso, todos os parâmetros do AG devem ser selecionados cuidadosamente. Além disso, heurísticas e técnicas de convergências podem ser incorporadas ao algoritmo para melhorar seu desempenho.

3.3 - Terminologias dos Algoritmos Genéticos

Nos AG's um problema de otimização substitui o ambiente e soluções viáveis são consideradas como indivíduos que vivem nesse ambiente. Cada indivíduo na população pode ser visto como uma representação de uma solução particular para o problema. Esta seção descreverá as terminologias básicas dos AG's, algumas delas baseadas na teoria da evolução de Darwin, necessárias para melhor compreensão da técnica.

Indivíduos

Os indivíduos são a unidade fundamental de um AG: eles codificam possíveis soluções para o problema a ser tratado, e é através de sua manipulação (pelo processo de evolução) que respostas são encontradas. O indivíduo é, portanto, o cromossomo; ou seja, um conjunto de informação genética que o AG manipula [24]. Tal definição sugere que um indivíduo se resume ao conjunto de genes que possui (seu genótipo). Os genes podem descrever uma possível solução para o problema, sem representar de fato a própria solução. Apesar de toda representação por parte do algoritmo ser baseada única e exclusivamente em seu genótipo, toda avaliação é baseada em seu fenótipo, ou seja, no conjunto de características observáveis no objeto resultante do processo de decodificação dos genes. A Figura 3.2 ilustra essa ideia mostrando a representação binária de um cromossomo, onde a sequência binária representa o genótipo e o número em decimal representa o fenótipo.

110000000001101	24589
Genótipo	Fenótipo

Figura 3.2: Representação binária do cromossomo

Avaliação

A avaliação de um indivíduo no AG é o valor da função objetivo para o seu fenótipo. Para o cálculo da avaliação, o cromossomo deve primeiro ser decodificado. A avaliação não somente indica quão boa a solução é, mas também dá uma medida de quão próximo o cromossomo está do valor ótimo [24]. Como será visto na seção 3.4, os cromossomos representados na forma binária precisam primeiramente ser decodificados, para em seguida serem avaliados pela função objetivo. Já no caso da representação em real, a avaliação utiliza apenas a precisão dos valores contidos no próprio cromossomo e não do tamanho do cromossomo.

População

Uma população é uma coleção de indivíduos (possíveis soluções para o problema), que a cada geração estão sendo avaliados. Os parâmetros do fenótipo definem os indivíduos dentro da população e dão informação sobre o espaço de busca. Neste ponto, surgem dois aspectos importantes sobre a população usados no AG:

- A geração da população inicial, e
- O tamanho da população

Para cada problema, o tamanho da população dependerá da complexidade do mesmo. Geralmente os indivíduos que compõem a população são escolhidos aleatoriamente dentro do espaço de busca. Mas pode haver casos onde a população inicial é gerada com algum conhecimento acerca da solução. Como será visto no capítulo 4, todas as metodologias que serão comparadas neste trabalho escolhem aleatoriamente dentro do espaço de busca os indivíduos da população.

Computacionalmente, torna-se mais fácil para o AG explorar o espaço de busca quanto maior for o tamanho da população. Em contrapartida, verificou-se que o tempo de convergência do AG é uma função exponencial que cresce com o tamanho da população. Uma prática comum é criar uma população inicial em torno de 100

indivíduos. Todavia, esse tamanho da população pode ser alterado de acordo com o tempo e memória computacional disponíveis para simulação do AG. As metodologias apresentadas neste trabalho possuem populações de tamanhos bem distintos, como será evidenciado no capítulo 4. A Figura 3.3 mostra uma população composta por cinco cromossomos. Logo, esta população possui cinco indivíduos.

População	Cromossomo 1	1 1 1 0 0 0 1 0
	Cromossomo 2	1 1 0 0 1 1 0 0
	Cromossomo 3	0 1 1 1 1 0 1 1
	Cromossomo 4	1 0 1 0 1 0 1 0
	Cromossomo 5	1 0 1 0 0 1 1 0

Figura 3.3: População no AG formada por cinco indivíduos

Estratégias de Busca

O processo de busca no AG consiste basicamente em iniciar a população, e a partir daí gerar novos indivíduos até o critério de parada do AG ser satisfeito [24]. Pode-se resumir em três as estratégias de busca no AG, a primeira delas é encontrar o ótimo global. Nunca se pode garantir que o ótimo global seja encontrado com os tipos de modelos que o AG trabalha. Há sempre a possibilidade de que na próxima geração a busca encontre uma solução melhor do que a solução atual. Em outros casos, o processo de busca pode executar por longos períodos sem produzir uma solução melhor do que a atual.

Outra estratégia é ter uma rápida convergência. Quando a função objetivo é complexa e requer muitos cálculos para ser executada, uma rápida convergência é desejável; entretanto, a possibilidade do AG convergir para um ótimo local aumenta consideravelmente.

A terceira estratégia de busca a ser seguida pelo AG é inicialmente produzir uma população diversificada que represente boas soluções. Quando o espaço de busca contém várias soluções boas, com avaliações semelhantes, é vantajoso selecioná-las, pois a combinação de soluções boas pode gerar uma solução ainda melhor. Em termos de raciocínio evolutivo, isso equivale ao cruzamento de dois bons indivíduos na população, o que pode gerar um indivíduo melhor. Uma das metodologias analisadas neste trabalho utiliza esta estratégia para diminuir o tempo de convergência do AG.

3.4 ó Representação das Variáveis nos Cromossomos

A representação das variáveis nos cromossomos, ou codificação, faz parte da estrutura do AG, sendo o primeiro passo para aplicá-lo num problema real [27]. A codificação torna o AG independente dos parâmetros diretos do problema e, portanto, livre de eventuais restrições do espaço de busca das soluções. É importante ressaltar que a representação das variáveis nos cromossomos é arbitrária, apenas algumas regras gerais devem ser seguidas [28]:

- A representação deve ser a mais simples possível;
- Se houver soluções proibidas ao problema, então elas não devem ser representadas nos cromossomos;
- Se condições específicas forem impostas ao problema, estas devem estar implícitas dentro da representação.

Existem vários tipos de representação, porém, são descritas apenas a representação binária e a real neste trabalho, e somente a real é implementada.

Representação Binária

A representação em binário transforma o intervalo contínuo em que está contida a variável real em um intervalo discreto. 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 [27].

Seja $[x_{\min}, x_{\max}]$ os limites máximo e mínimo da variável contínua x , então pode-se definir a precisão desejada pela expressão.

$$P_d = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2^N - 1} \quad (3.1)$$

Onde

P_d – é a precisão desejada

N – é o tamanho da sequência binária que representa a variável x

O uso da representação ou codificação binária possui algumas desvantagens, como sequências binárias muito extensas para representar indivíduos com alta precisão,

e o fenômeno conhecido por distância de Hamming² [27]. Esse fenômeno evidencia-se pela ocorrência de grandes diferenças nas sequências binárias (biótipo) que codificam dois números adjacentes (fenótipo). Por exemplo, o par de indivíduos 011111111111 e 100000000000 pertencem a pontos adjacentes no fenótipo (2047 e 2048), mas os biótipos são totalmente diferentes, pois todos os bits diferem. Portanto, a distância de Hamming destes indivíduos é máxima. Para superar a distância de Hamming, todos os bits devem ser alterados simultaneamente, entretanto, a probabilidade disso ocorrer é muito baixa. Logo, percebe-se que a codificação binária não preserva a localidade dos pontos nos fenótipos, prejudicando o processo de otimização.

Para muitos problemas na Engenharia é quase impossível representar as possíveis soluções por codificação binária. Dado o exposto, todas as representações cromossômicas apresentadas neste trabalho são na forma real.

Representação Real

Na representação em real o intervalo ao qual pertence a variável permanece contínuo. O tamanho do cromossomo é igual ao número de variáveis utilizadas no problema. A Figura 3.4 mostra a estrutura de um indivíduo x representado por duas variáveis, K_1 e K_2 , codificadas por números reais.

$$\mathbf{x} = \begin{matrix} \mathbf{K}_1 & \mathbf{K}_2 \\ [35,42 & 86,23] \end{matrix}$$

Figura 3.4: Representação de um indivíduo por números reais

Quando comparada à binária, a codificação real pode reduzir o esforço computacional, aumentar a precisão sem restringir a codificação e facilitar a hibridização, pois não há transformações decimal-binário-decimal para formar os cromossomos e calcular a avaliação. Além disso, a precisão não depende do número de bits dos parâmetros, depende apenas da arquitetura computacional que está sendo utilizada; e é mais compatível com outros algoritmos de otimização. A codificação real

² A distância de Hamming entre duas [strings](#) (cadeias de caracteres) de mesmo comprimento é o número de posições nas quais elas diferem entre si. Vista de outra forma, ela corresponde ao menor número de substituições necessárias para transformar uma string na outra, ou o número de erros que transformaram uma na outra.

também minimiza o fenômeno das distâncias de Hamming e, segundo descrito em [27], é mais rápida, mais precisa e tem resultados mais consistentes ao longo de repetições da execução do AG.

Uma desvantagem da codificação real é que ela possui um espaço de busca infinito. Essa característica exige que se tenha noção, a priori, dos limites máximos e mínimos das variáveis no espaço de busca.

3.5 ó Operadores Genéticos

Como comentado na seção 3.2, os AG's são uma classe de métodos de busca de propósito geral, que combinam elementos de busca direcionada e estocástica, balanceando exploração e aproveitamento do espaço de busca. Nos AG's, a informação acumulada é explorada pelo mecanismo de seleção, enquanto novas regiões do espaço de busca são exploradas pelos operadores genéticos [26]. 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 avaliação sobrevivem para participar de uma nova população a cada geração [25].

3.5.1 ó Operadores de Cruzamento

Cruzamento é o processo de produzir uma nova solução (prole) a partir de um par de indivíduos (pais) previamente selecionados [24]. Nos AG's convencionais, o operador de cruzamento é o principal operador e o desempenho do sistema genético é fortemente dependente dele [26].

Há duas explicações a respeito de como os AG's aproveitam a informação distribuída para gerar boas soluções: a hipótese dos blocos construtores e a hipótese de variação da convergência controlada. De acordo com a hipótese de blocos construtores, o cruzamento recombina as características ótimas de duas soluções para produzir uma solução com característica superior, e esta se propagará para as gerações futuras.

A hipótese da variação da convergência controlada sugere utilizar a convergência da população para restringir a busca. Novas amostras de indivíduos são tomadas a partir da distribuição da população atual. À medida que a população converge, a variação torna-se mais restrita. Enquanto a hipótese dos blocos construtores recombina e propaga as características que devem perdurar da população anterior, a hipótese da variação da convergência controlada cria uma amostragem aleatória que é função da distribuição da população atual.

Como neste trabalho a representação cromossômica usada é do tipo real, são listados a seguir os operadores de cruzamento mais utilizados para esse tipo de representação:

- Cruzamento Aritmético;
- Cruzamento Heurístico;
- Cruzamento Simples;
- Cruzamento Uniforme.

Dos operadores listados anteriormente, apenas o aritmético e o uniforme serão descritos, mais detalhes sobre os outros operadores podem ser encontrados em [27] e [26].

Operador de Cruzamento Aritmético

O conceito básico desse tipo de operador origina-se da teoria de conjunto convexo [29]. Segundo essa teoria a média ponderada de dois vetores, x_1 e x_2 , pode ser calculada por:

$$\lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2 \quad (3.2)$$

Se os multiplicadores λ_1 e λ_2 ficarem restritos às seguintes condições:

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 1, \lambda_1 > 0 \text{ e } \lambda_2 > 0 \quad (3.3)$$

A forma ponderada da Equação (3.2) é conhecida como combinação convexa. Se as condições de não negatividade dos multiplicadores não forem satisfeitas, a combinação é conhecida como combinação afim. Se os multiplicadores estiverem localizados no espaço real, a combinação é conhecida como combinação linear.

Similarmente, o operador de cruzamento aritmético é definido como a combinação de dois vetores (cromossomos) como segue:

$$x'_1 = \lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2 \quad (3.4)$$

$$x'_2 = \lambda_1 x_2 + \lambda_2 x_1 \quad (3.5)$$

De acordo com as restrições impostas aos multiplicadores, pode-se obter três tipos de cruzamento: cruzamento convexo, cruzamento afim, e cruzamento linear. A Figura 3.5 ilustra as possíveis soluções do operador aritmético para o caso simples no espaço bidimensional. As soluções geradas pelo cruzamento convexo situam-se na linha sólida, as soluções geradas pelo cruzamento afim situam-se na linha pontilhada, e as soluções geradas pelo cruzamento linear situam-se em qualquer ponto do espaço real.

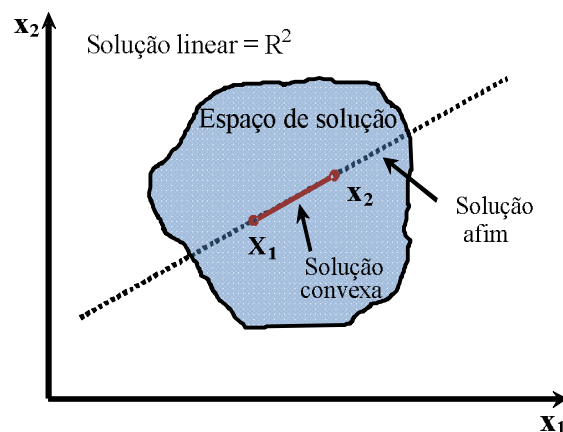


Figura 3.5: Possíveis soluções para o operador aritmético: solução afim, linear e convexa

Soluções inviáveis podem resultar quando é aplicado o cruzamento linear ou afim como pode ser observado na Figura 3.5. 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 [25].

Operador de Cruzamento Uniforme

No cruzamento uniforme, o gene do primeiro pai é atribuído ao primeiro filho, e o valor do gene do segundo pai ao segundo filho com probabilidade p_c .

Inversamente, com o valor de probabilidade p_c o gene do primeiro pai é atribuído ao segundo filho e o gene do segundo pai ao primeiro filho. A Figura 3.6 ilustra um exemplo da ideia.

Pai 1	0,32	0,22	0,34	0,89	0,23	0,76	0,78	0,45
Pai 2	0,12	0,65	0,38	0,47	0,31	0,56	0,88	0,95
Número Aleatório	0,32	0,22	0,34	0,89	0,23	0,76	0,78	0,45
$p_c = 0,7$	<0,7	<0,7	<0,7	>0,7	>0,7	>0,7	>0,7	<0,7
Filho 1	0,32	0,22	0,34	0,89	0,23	0,76	0,78	0,45
Filho 2	0,12	0,65	0,38	0,47	0,31	0,56	0,88	0,95

Figura 3.6: Exemplo do operador de cruzamento uniforme

3.5.2 ó Operadores de Mutação

Após o cruzamento os indivíduos são submetidos ao operador de mutação. A mutação impede que o AG fique estagnado, introduz novas estruturas genéticas na população, modificando aleatoriamente alguns dos blocos construtores [25]. Um dos objetivos do operador de mutação é recuperar o material genético perdido. Ele também é responsável pela introdução e manutenção da diversidade genética da população. Se o operador de cruzamento aproveita a solução atual para encontrar soluções melhores, o operador de mutação explora todo o espaço de busca.

Os operadores genéticos de mutação mais utilizados na representação real são:

- Mutação uniforme;
- Mutação não uniforme;
- Mutação não uniforme múltipla.

Neste trabalho, foi utilizada a mutação não uniforme, pois esta é a que melhor se adapta à codificação real. Além disso, nas três metodologias comparadas foi utilizado o operador de mutação uniforme, que será descrito a seguir.

Operador de Mutação Não Uniforme

Se $x_k = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ é um cromossomo selecionado para a mutação, resultando num vetor $x' = (x_1, \dots, x'_k, \dots, x_q)$, tal que [30]:

$$x'_k = \begin{cases} x_k + \Delta(t, \max \lim(k) - x_k), & \text{se } z = 0, \\ x_k + \Delta(t, x_k - \min \lim(k)), & \text{se } z = 1 \end{cases} \quad (3.6)$$

Onde z é um dígito binário aleatório (0 ou 1), $\min \lim(k)$ e $\max \lim(k)$ são os valores mínimo e máximo dos limites do parâmetro x'_k , respectivamente. A função $\Delta(t,y)$ retorna um valor no intervalo $[0,y]$ tal que a probabilidade de $\Delta(t,y)$ inicia em zero e é incrementada de acordo com o número de gerações t , tal que :

$$\Delta(t,y) = y \cdot ra \cdot \left[1 - \frac{t}{NG} \right] \quad (3.7)$$

Onde ra é um número gerado aleatoriamente no intervalo $[0;1]$, NG é o número máximo de gerações e b é um parâmetro que determina o grau de dependência com o número de gerações. Esta propriedade leva o operador a efetuar uma busca uniforme no espaço inicial, quando t é pequeno e, mais localmente nas gerações posteriores.

3.5.3 ó Operadores de Seleção

Seleção é o processo de escolher dois indivíduos (cromossomos) na população para cruzamento [27]. Após a codificação, o próximo passo é decidir como realizar a seleção, ou seja, como escolher os indivíduos da população que irão gerar os novos indivíduos para próxima geração e quantos eles serão. O propósito da seleção é enfatizar os indivíduos mais aptos da população na esperança que seus descendentes tenham maior valor de avaliação (fitness).

A seleção é um método que escolhe aleatoriamente os cromossomos da população, de acordo com a função de avaliação. Quanto maior o valor da avaliação do indivíduo, maior será a chance dele ser selecionado. A pressão seletiva é definida como o grau em que os melhores indivíduos são favorecidos. Quanto maior a pressão seletiva, mais os melhores indivíduos são favorecidos na escolha. Ela também impulsiona o AG no sentido de melhorar a avaliação da população ao longo das sucessivas gerações.

Outro detalhe, é que a taxa de convergência do AG é em grande parte determinada pela magnitude da pressão seletiva. Pressões seletivas mais elevadas resultam em taxa mais elevadas de convergência. A seguir são listados os principais métodos de seleção:

- Método da Roleta;
- Torneio Estocástico;
- Seleção Baseada em “*Ranking* Geométrico Normalizado;
- Seleção de Boltzmann;
- Seleção de Corte;
- Seleção por Ordenação não Linear.

Neste trabalho é utilizado apenas o método de seleção torneio estocástico, pois todas as metodologias que são analisadas utilizam este método de seleção.

Conclusões

Neste capítulo foram apresentados os conceitos básicos e as características sobre os AG's, necessários para o entendimento da metodologia proposta neste trabalho. No próximo capítulo serão apresentadas as três metodologias para ajustes de ESP's via AG, além das ferramentas computacionais utilizadas para implementá-las.

Capítulo 4: Métodos de Ajuste de ESP Via AG

4.1 Introdução

O propósito deste capítulo é descrever as metodologias de ajuste coordenado de ESPs via AG bem como a formulação matemática do problema. Além disso, também é fornecida uma descrição de todas as ferramentas computacionais utilizadas e a aplicação de cada uma delas no problema abordado.

Três métodos desenvolvidos na literatura para ajuste de ESP's via AG são descritos. Estes métodos deram origem a diversas publicações de artigos nos últimos 15 anos, e até discussões por parte de seus autores [5]. Estes métodos são o objeto da análise comparativa proposta por este trabalho. Portanto, o entendimento das características destas metodologias é de vital importância para o entendimento do capítulo 5, onde os resultados comparativos são apresentados.

4.2 Formulação Matemática do Problema

Os estabilizadores de sistemas de potência são frequentemente projetados para operar de forma descentralizada. A robustez dos controladores é assegurada considerando o desempenho do sistema de controle para diferentes condições de operação [3]. Uma desvantagem do controle descentralizado é a necessidade de reconfigurar ou ajustar os parâmetros dos ESPs de diversas máquinas com o objetivo de melhorar o desempenho global do sistema, o que nem sempre pode ser realizado facilmente. Na Figura 4.1 é representada a estrutura de um sistema de potência descentralizado, onde os ESP's estão localizados em seus respectivos geradores.

O ajuste de ESP's tipicamente utiliza um modelo linearizado num ponto de operação. A análise é feita aplicando-se pequenas variações em torno desse ponto, representado pelas equações de estado. A representação do controlador na forma de espaço de estados foi desenvolvida de forma genérica no Capítulo 2, reescrevendo aquela equação em relação ao i -ésimo ponto de operação do sistema, tem-se,

$$\begin{aligned}\dot{x}_C^i &= A_C^i x_C^i + B_C^i u_C^i \\ y_C^i &= C_C^i x_C^i + D_C^i u_C^i\end{aligned}\tag{4.1}$$

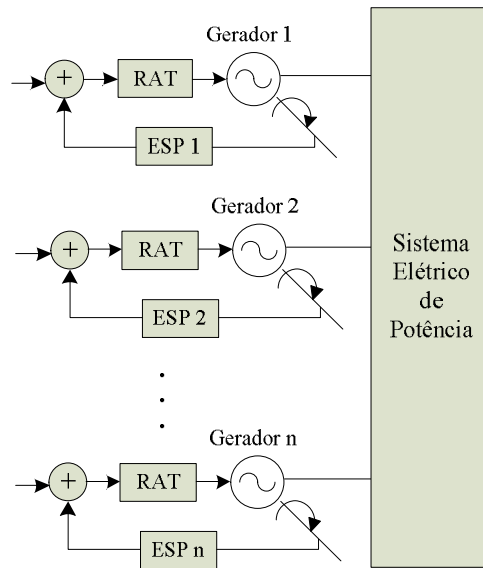


Figura 4.1: Sistema de potência descentralizado

No domínio da frequência, a função de transferência associada à equação (4.1), é dada por

$$C(s) = K_{\text{ESP}}^i \left(\frac{sT_w}{1 + sT_w} \right) \left(\frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \right)^{\text{NB}} \quad (4.2)$$

Em que,

$$T_1 = \frac{\sqrt{\alpha_i}}{\omega_i} \quad (4.3)$$

$$T_2 = \frac{1}{\omega_i \sqrt{\alpha_i}} \quad (4.4)$$

são as constantes de tempo da rede de blocos avanço-atraso, agora definidas em termos da máxima frequência (ω_i), onde ocorre o máximo avanço de fase; e da compensação de fase (α_i). K_{ESP}^i é o ganho do estabilizador e NB é o número de blocos avanço-atraso.

A constante de tempo do filtro washout, T_w , para valores menores que 5 s, resulta em um significativo avanço de fase nas baixas frequências. Para os propósitos

deste trabalho, esta constante é considerada um parâmetro conhecido. Logo, K_{ESP}^i , α_i e ω_i são os parâmetros a serem determinados.

Portanto, o problema de ajuste simultâneo e coordenado de ESP's, considerando diversos pontos de operação calculados a partir do sistema elétrico de potência linearizado, pode ser colocado na forma de um problema de otimização para o qual o objetivo a ser otimizado deve corresponder às medidas de desempenho especificadas para o problema. A seção 4.4 descreve a formulação como um problema de otimização para as metodologias consideradas neste trabalho.

Três metodologias distintas para o ajuste coordenado de ESP's considerando vários cenários operativos são abordadas neste trabalho. Estas três metodologias foram reproduzidas computacionalmente e simuladas. Elas são analisadas de maneira comparativa no capítulo 5. Indistintamente, as ferramentas computacionais utilizadas para implementá-las foram as mesmas, e são descritas na próxima seção.

4.3 Ferramentas Computacionais Utilizadas

Para reproduzir as três metodologias de ajuste de ESP's via AG, foram utilizadas diversas ferramentas computacionais. O primeiro passo foi obter os pontos de operação, representados pelas matrizes do sistema de potência em malha aberta. Para tanto, fez-se uso dos programas do CEPEL, Anarede e PacDyn, além do Matlab. O Anarede fornece os casos do fluxo de carga, o PacDyn lineariza e exporta as matrizes de estado em malha aberta para o Matlab. A Figura 4.2 ilustra esse procedimento.

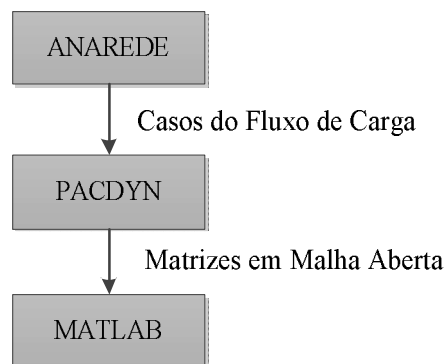


Figura 4.2: Procedimento para obtenção das matrizes de estados que representam o ponto de operação do sistema em malha aberta

Neste trabalho, as três metodologias abordadas utilizam o ESP com três blocos avanço-atraso. Este modelo, cujo procedimento de modelagem foi descrito na seção 2.4, é implementado no espaço de estados em ambiente Matlab. Então, utilizando o procedimento descrito na seção 2.6, a malha do sistema é fechada com os ESP's; ficando os parâmetros destes últimos a serem ajustados pelo AG.

De posse do sistema em malha fechada, a próxima etapa é calcular os parâmetros dos ESP's utilizando o conjunto de rotinas de Algoritmos Genéticos para Toolbox de Otimização do Matlab, denominado GAOT.

Por fim, uma série de simulações no domínio do tempo foi executada para testar a robustez dos parâmetros calculados pelo AG. Para este propósito, utilizou-se o programa do CEPEL para Análise de Transitórios Eletromecânicos - ANATEM.

4.4 ó Metodologias Utilizadas no Ajuste Coordenado de ESPs Via AG

O trabalho se propõe a realizar uma análise comparativa de três métodos baseados em algoritmos genéticos para ajuste coordenado de estabilizadores de sistemas de potência. Os três métodos foram implementados e uma análise comparativa foi realizada com relação à função objetivo utilizada por cada uma, critérios de convergência e robustez de cada método. Estas três metodologias são descritas a seguir:

4.4.1 ó Método 1

O primeiro método de ajuste, implementado na referência [1], adaptado para este trabalho, utiliza uma função objetivo que relaciona os parâmetros do ESP (K , α e ω), com o mínimo coeficiente de amortecimento, ζ_{\min} , calculado a partir da matriz de malha fechada, que representa o sistema elétrico de potência em cada ponto de operação considerado. A seguinte expressão sintetiza matematicamente o problema:

$$F = \max[\min[\min(\zeta_i)]_j] \quad (4.5)$$

Onde ζ é o coeficiente de amortecimento de um autovalor; $i = 1, 2, \dots, n$ (n é número de autovalores para um determinado ponto de operação); e $j = 1, 2, \dots, m$ (m é o número de pontos de operação).

Para este método a estrutura do cromossomo associado ao indivíduo da população, com o qual o AG trabalha na busca dos melhores parâmetros para os ESP's, é mostrada na Figura 4.3. Através desta Figura, também percebe-se que há três grupos de parâmetros (K 's, α 's e ω 's) a serem ajustados para p estabilizadores, logo, tem-se um total de 3 parâmetros.

K_{ESP1}	K_{ESP2}	...	K_{ESPp}	α_{ESP1}	α_{ESP2}	...	α_{ESPp}	ω_{ESP1}	ω_{ESP2}	...	ω_{ESPp}
------------	------------	-----	------------	-----------------	-----------------	-----	-----------------	-----------------	-----------------	-----	-----------------

Figura 4.3: Estrutura do cromossomo para o método 1

Na representação deste cromossomo, é utilizada codificação real para representar os parâmetros dos ESP's. A população inicial é gerada aleatoriamente sob restrições estabelecidas para o problema, como mostrados a seguir:

$$\begin{aligned}
 K_{ESPmin} &\leq K_{ESP} \leq K_{ESPmax} \\
 \alpha_{ESPmin} &\leq \alpha_{ESP} \leq \alpha_{ESPmax} \\
 \omega_{ESPmin} &\leq \omega_{ESP} \leq \omega_{ESPmax}
 \end{aligned}
 \tag{4.6}$$

Em seguida esta população é avaliada, isto é, um valor numérico é atribuído a cada membro da população pela função objetivo.

A evolução do AG é realizada através da seleção do tipo torneio estocástico, com cinco indivíduos no torneio; isto é, primeiramente são selecionados aleatoriamente cinco indivíduos da população, depois, aquele indivíduo com maior valor numérico de avaliação, é selecionado. Na sequência, a técnica de cruzamento uniforme, descrita na seção 3.5.1; é aplicada. Nela, o par de indivíduos escolhidos para cruzamento, segundo uma taxa de cruzamento de $p_c = 0,7$; gera dois novos indivíduos.

Após o cruzamento, o operador de mutação do tipo não-uniforme, percorre todos os parâmetros do cromossomo escolhido para sofrer mutação, então é feita uma alteração do valor do parâmetro numa determinada posição escolhida para mutar. A Figura 4.4 mostra o fluxograma que descreve o procedimento do método 1 para o ajuste coordenado de ESP's.

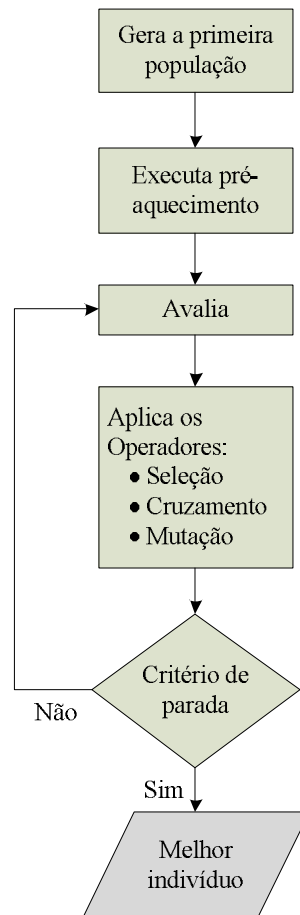


Figura 4.4: Fluxograma do procedimento do AG para o método 1

4.4.2 ó Método 2

O segundo método de ajuste, implementado na referência [2], utiliza uma função objetivo baseada no somatório dos coeficientes de amortecimento, ζ , de todos os autovalores das matrizes de todas as condições de operação do sistema, cuja expressão matemática é dada por:

$$F = \max \sum_{i=1}^m \left[\sum_{j=1}^n \zeta_j \right]_i \quad (4.7)$$

Onde ζ é o coeficiente de amortecimento de um autovalor; $i = 1, 2, \dots, n$ (n é número de autovalores para um determinado ponto de operação); e $j = 1, 2, \dots, m$ (m é o número de pontos de operação).

Semelhantemente ao método 1, o conjunto de restrições do problema é formado pelos limites dos parâmetros K_{ESP} , α_{ESP} e ω_{ESP} . Mas, diferentemente do método 1, é imposto o critério de desempenho baseado no mínimo coeficiente de amortecimento do autovalor dentre todos os pontos de operação considerados.

$$\begin{aligned}
 K_{i\min} &\leq K_i \leq K_{i\max} \\
 \alpha_{i\min} &\leq \alpha_i \leq \alpha_{i\max} \\
 \omega_{i\min} &\leq \omega_i \leq \omega_{i\max} \\
 (\zeta_j)_i &\geq \zeta_{i\min}
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

O método 2 implementa o conceito de função de adequabilidade, onde cada valor de adequabilidade representa a classificação de uma solução de ajuste com relação ao autovalor de menor amortecimento no conjunto de pontos de operação [2]. Este critério serve para avaliar a solução de ajuste, para os pontos de operação considerados. O critério é descrito a seguir:

Avaliação	Faixa de Amortecimento
0	Se qualquer $(\zeta_j)_i \leq \zeta_0$
β_0	Se todos $(\zeta_j)_i > \zeta_0$ e se qualquer $(\zeta_j)_i \leq \zeta_1$
β_1	Se todos $(\zeta_j)_i > \zeta_1$ e se qualquer $(\zeta_j)_i \leq \zeta_2$
\vdots	
β_k	Se todos $(\zeta_j)_i > \zeta_{k-1}$ e se qualquer $(\zeta_j)_i \leq \zeta_{\min}$
F	Se todos $(\zeta_j)_i > \zeta_{\min}$

Onde:

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

$$\zeta_0 < \zeta_1 < \zeta_2 < \dots < \zeta_{k-1} < \zeta_{\min}$$

Além da função adequabilidade, o método 2 utiliza o pré-aquecimento, ou seja, seleciona previamente indivíduos na população com valor de avaliação maior que um mínimo especificado. Além disso, foi implementado também um artifício para melhorar a convergência do AG, baseado no deslocamento da região de busca durante a execução do algoritmo [9]. A Figura 4.5 mostra o fluxograma que descreve o procedimento do AG do método 2 para o ajuste coordenado de ESP's.

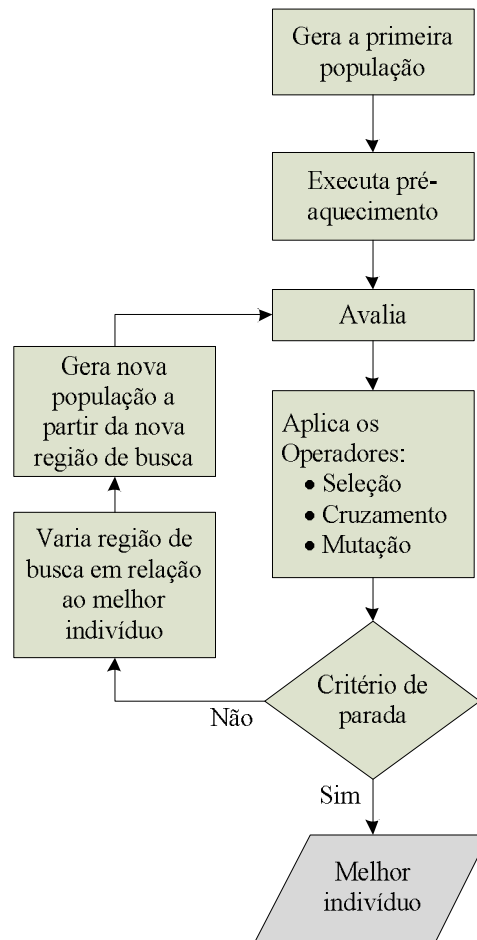


Figura 4.5: Fluxograma do procedimento do AG para o método 2

Neste método de ajuste via AG, a codificação empregada é do tipo real, a estrutura do cromossomo é a mesma utilizada no método 1, a seleção dos indivíduos é por torneio estocástico com 4 indivíduos no torneio, o cruzamento é uniforme, e a mutação é do tipo não uniforme.

4.4.3 6 Método 3

O terceiro e último método de ajuste, implementado na referência [3], utiliza uma estratégia em que a função objetivo consiste na soma de outras duas funções objetivos. A primeira delas corresponde ao somatório da diferença quadrática da parte real dos autovalores, correspondentes aos modos eletromecânicos com baixa margem de estabilidade em relação a um valor de estabilidade relativa, σ_0 . A segunda função

objetivo corresponde ao somatório da diferença quadrática dos coeficientes de amortecimento dos autovalores dos modos eletromecânicos mal amortecidos, em relação a um valor de amortecimento relativo, ζ_0 . Condensando as duas em uma mesma expressão matemática, tem-se:

$$F = \min \left[\sum_j^m \sum_{\sigma_i \geq \sigma_0} [\sigma_0 - \sigma_i]^2 + a \sum_j^m \sum_{\zeta_i \leq \zeta_0} [\zeta_0 - \zeta_i]^2 \right] \quad (4.7)$$

Onde $j = 1, 2, \dots, m$ (m é o número de pontos de operação), σ_i é a parte real do i -ésimo autovalor, e ζ_i é o coeficiente de amortecimento do i -ésimo autovalor.

O objetivo deste método é realocar todos os autovalores do sistema de potência em malha fechada em uma região específica do plano complexo, caracterizada pelas condições $\sigma_i \leq \sigma_0$ e $\zeta_i \geq \zeta_0$. A Figura 4.6 ilustra essa ideia.

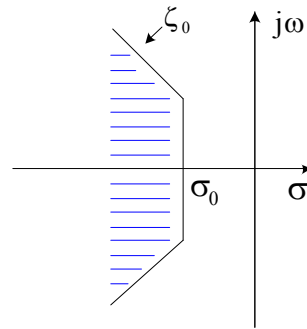


Figura 4.6: Região do plano complexo onde $\sigma_i \leq \sigma_0$ e $\zeta_i \geq \zeta_0$

As restrições impostas aos parâmetros dos ESP's para este método são mostradas a seguir:

$$\begin{aligned} K_{i \min} &\leq K_i \leq K_{i \max} \\ T_{1i \min} &\leq T_{1i} \leq T_{1i \max} \\ T_{2i \min} &\leq T_{2i} \leq T_{2i \max} \end{aligned} \quad (4.8)$$

A Figura 4.7 mostra o fluxograma que descreve o procedimento do AG do método 3 para o ajuste coordenado de ESP's.

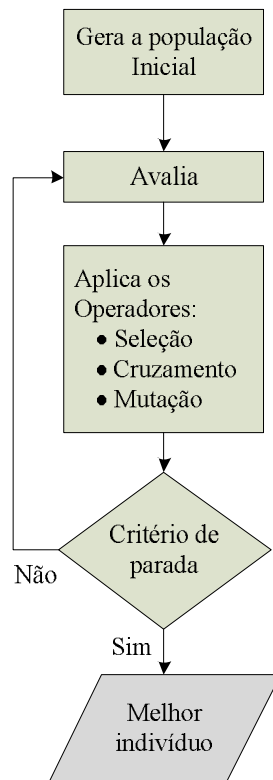


Figura 4.7: Fluxograma do procedimento do AG para o método 3

Conclusões

Neste capítulo foram apresentadas três metodologias de ajuste de ESP's via AG, que serão analisadas comparativamente neste trabalho. Além disso, foi descrito o procedimento computacional utilizado para reproduzir as três metodologias. No próximo capítulo serão apresentados os resultados, de forma comparativa, para as três metodologias.

Capítulo 5: Resultados

5.1 ó Sistema Teste Utilizado

O sistema teste utilizado neste trabalho para comparar as três metodologias de ajuste de ESP's via AG, é o famoso sistema New England, muito empregado na literatura, composto por 10 máquinas síncronas e 39 barramentos, sendo um considerado como barramento infinito. Para todas as metodologias comparadas, a variação de velocidade do rotor foi utilizada como sinal de entrada para os ESP's. Todas as máquinas utilizam o mesmo modelo (sexto modelo do PacDyn), cujos dados podem ser encontrados na referência [31]. Todas as cargas são modeladas como impedâncias constantes. A Figura 5.1 mostra o diagrama unifilar do sistema New England. O modelo do sistema de excitação é mostrado na Figura 5.2, e seus dados também podem ser encontrados na referência [31].

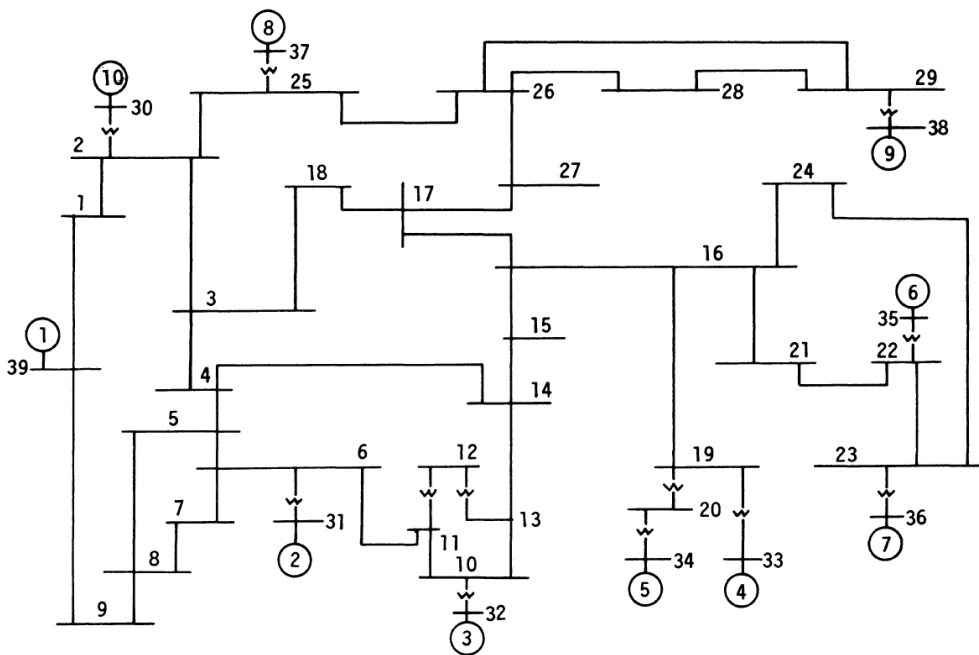


Figura 5.1: Diagrama unifilar do sistema New England

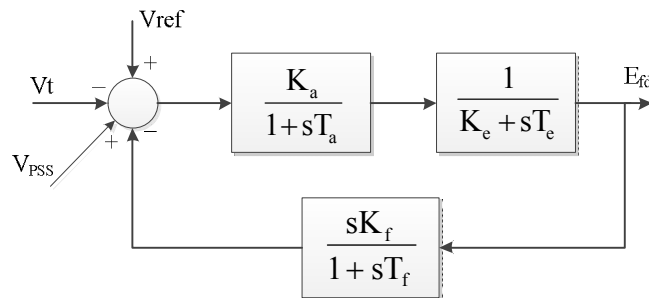


Figura 5.2: Modelo do regulador automático de tensão das máquinas síncronas para o sistema New England

Foram consideradas 14 condições de operação, todas em malha aberta. Estas condições são as mesmas usadas nas referências [2] e [8]. Estas 14 condições de operação são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 5.1: Condições de operação para o sistema New England

Condição	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, distribuída nas barras de carga
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, percentual aplicado em todas as barras de carga.
11	Aumento de 15% de carga, percentual aplicado tanto para potência ativa quanto para reativa em todas as barras de carga.
12	Aumento de 20% de carga, percentual aplicado tanto para potência ativa quanto para reativa em todas as barras de carga.
13	Redução de 20% de carga, percentual aplicado tanto para potência ativa quanto para reativa em todas as barras de carga.
14	Aumento de 50% de carga nas barras 16 e 21 e a linha 21-22 desligada

Todos os 14 cenários possuem modos eletromecânicos mal amortecidos e com baixa margem de estabilidade, e alguns deles com modos instáveis. A Figura 5.3 mostra o mapa de polos em malha aberta para os 14 cenários operativos considerados.

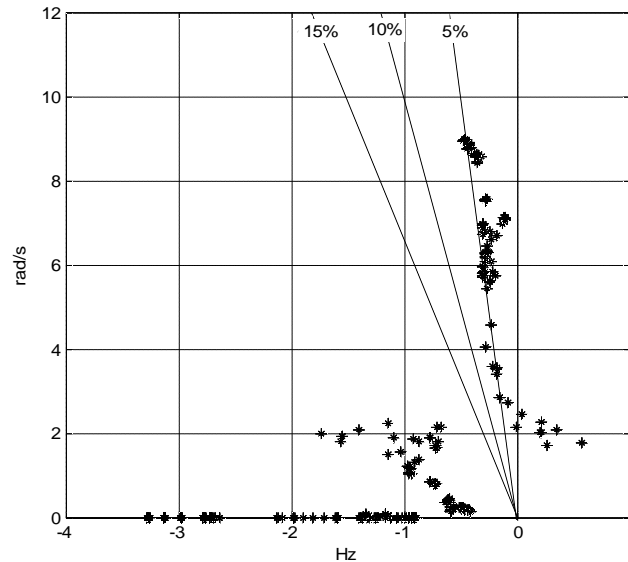


Figura 5.3: Autovalores para os 14 cenários em malha aberta

5.2 ó Parâmetros Utilizados para o AG

Os parâmetros utilizados na simulação do AG são mostrados a seguir, separadamente, para cada método abordado neste trabalho:

Método 1

- Representação cromossômica do tipo real;
- População inicial: 150 indivíduos;
- Tamanho: cromossomo composto por 27 variáveis ($9 - K_{ESP}$, $9 - \alpha$, $9 - \omega$);
- Operador de seleção do tipo torneio, com 4 indivíduos no torneio;
- Operador de cruzamento aritmético;
- Operador de mutação do tipo não uniforme.

Método 2

- Representação cromossômica do tipo real;
- População inicial: 100 indivíduos, sendo 7 criados através do pré-aquecimento;
- Tamanho: cromossomo composto por 27 variáveis ($9 - K_{ESP}$, $9 - \alpha$, $9 - \omega$);
- Operador de seleção do tipo torneio, com 4 indivíduos no torneio;
- Operador de cruzamento uniforme, com taxa de cruzamento de 0,7;
- Operador de mutação do tipo não uniforme.

Para este método é implementada a variação dos limites do espaço de busca.

Método 3

- Representação cromossômica do tipo real;
- População inicial: 100 indivíduos;
- Tamanho: cromossomo composto por 27 variáveis ($9 - K_{ESP}$, $9 - \alpha$, $9 - \omega$);
- Operador de seleção do tipo torneio, com 4 indivíduos no torneio;
- Operador de cruzamento uniforme, com taxa de cruzamento de 0,7;
- Operador de mutação do tipo não uniforme.

Com relação ao critério de parada, para os métodos 1 e 2 considerou-se um valor de amortecimento superior à 15% como critério de parada. Já para o método 3, o critério de parada foi o número máximo de gerações, que neste caso foi de 500 gerações. Considerando os parâmetros de cada método descritos acima, foram executadas cerca de 50 simulações do AG para cada um deles, onde os valores numéricos dos parâmetros encontrados pelo AG apresentados neste trabalho representam os resultados com maiores coeficientes de amortecimento.

5.3 ó Análise dos Resultados e Comparação dos Métodos

Para fins comparativos, o mesmo modelo do ESP com três blocos avanço-atraso, sendo a constante do filtro washout, $T_w = 5s$, foi considerado nos três métodos.

Neste trabalho não foi realizada uma análise comparativa entre os três métodos com relação ao tempo de convergência ou custo computacional, pois os três métodos apresentaram razoável similaridade em seus respectivos tempos de execução para o sistema teste utilizado nas simulações. Para as 50 simulações realizadas para cada método, utilizou-se uma arquitetura computacional de 64 bits com processador Intel Core i7 e 8 Gigabites de memória Ram.

Os resultados obtidos pelos métodos 1 e 2 proporcionaram o deslocamento com sucesso de todos os modos instáveis para o semiplano esquerdo do plano complexo e o aumento dos coeficientes de amortecimento de todos os modos eletromecânicos mal amortecidos para valores acima de 15%. Por outro lado, os resultados obtidos pelo método 3 foram insatisfatórios, pois, embora tenham proporcionado o aumento dos coeficientes de amortecimento dos modos eletromecânicos para valores acima de 15%, alguns modos fora da faixa eletromecânica tornaram-se instáveis. As Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 mostram os autovalores obtidos pelo AG, para os métodos 1, 2 e 3, respectivamente.

Nas Tabelas 5.2, 5.3 e 5.4 são apresentados os valores dos parâmetros encontrados pelo AG para os três métodos, respectivamente.

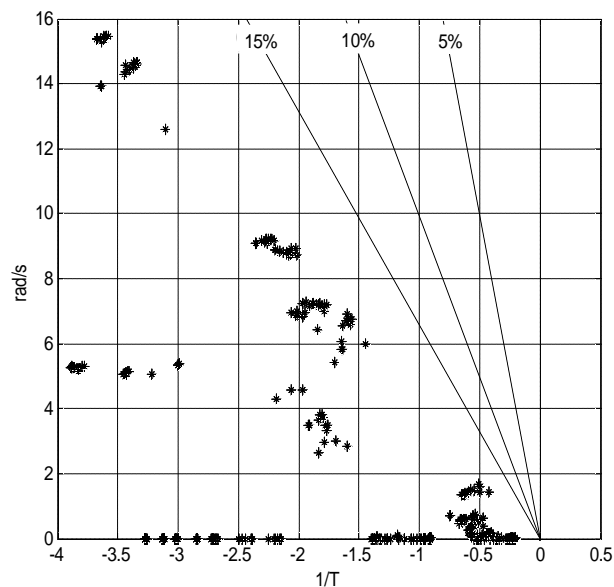


Figura 5.4: Autovalores para os 14 cenários operativos com ESP's ajustados pelo AG para o método 1

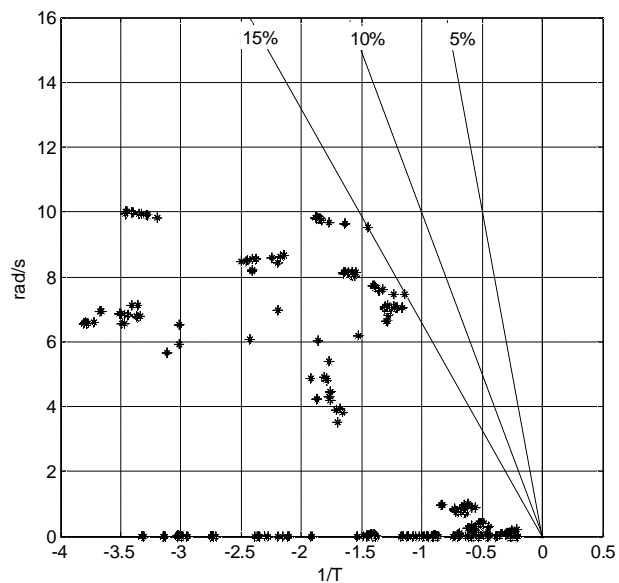


Figura 5.5: Autovalores para os 14 cenários operativos com ESP's ajustados pelo AG para o método 2

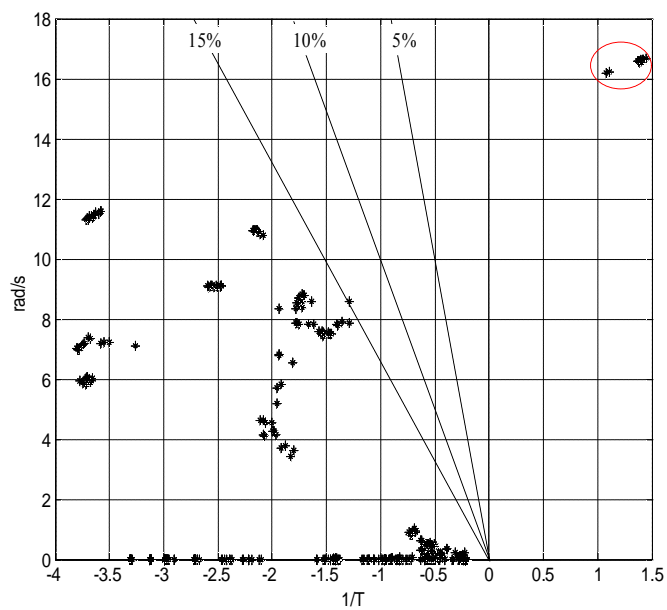


Figura 5.6: Autovalores para os 14 cenários operativos com ESP's ajustados pelo AG para o método 3

Tabela 5.2: Parâmetros dos ESP's encontrados pelo AG para o método 1

Gerador	K_{ESP}	α	ω
30	81,53	8,75	6,74
31	34,51	5,83	6,49
32	31,87	7,12	7,41
33	57,97	7,92	11,11
34	53,09	7,22	10,24
35	48,94	9,82	9,32
36	65,03	4,65	11,07
37	37,91	7,95	5,99
38	17,78	6,93	10,44

Tabela 5.3: Parâmetros dos ESP's encontrados pelo AG para o método 2

Gerador	K_{ESP}	α	ω
30	64,50	9,51	8,22
31	55,28	9,09	12,44
32	92,97	8,52	12,44
33	87,37	7,91	12,28
34	93,09	4,69	11,78
35	87,52	4,65	11,69
36	35,70	9,10	12,18
37	91,79	5,34	10,17
38	74,51	7,63	12,55

Tabela 5.4: Parâmetros dos ESP's encontrados pelo AG para o método 3

Gerador	K_{ESP}	α	ω
30	81,85	7,93	7,86
31	61,20	5,95	9,67
32	63,81	7,77	7,49
33	72,12	8,19	12,27
34	85,21	3,71	9,70
35	34,22	6,57	6,45
36	94,41	3,65	7,26
37	89,99	9,35	9,51
38	67,67	4,09	10,00

Nota-se que os níveis de amortecimento dos modos eletromecânicos mal amortecidos alcançados pelas soluções resultantes dos métodos 1 e 2 atingiram valores superiores a 15%, sendo que a solução obtida pelo método 1, em média, apresentou níveis mais elevados. Já a solução do método 3 proporcionou valores de amortecimento

acima de 15% para os modos eletromecânicos; o que aparentemente é um bom resultado. Mas, em contrapartida, a solução de ajuste dos ESPs fornecida pelo método 3 tornou instáveis modos fora da faixa eletomecânica. Isso se deve ao fato do método 3 considerar no cálculo da função objetivo somente os modos eletromecânicos instáveis ou mal amortecidos de 0,1 a 2 Hz, enquanto que os métodos 1 e 2 consideram todos os modos, incluindo os modos fora da faixa eletromecânica.

O efeito de desconsiderar os modos fora da faixa eletromecânica no cálculo da função objetivo do método 3 pode resultar em soluções com baixos valores de amortecimento, ou até mesmo instáveis, desses modos não eletromecânicos, principalmente para altos ganhos de ESP's. Estes modos mal amortecidos são modos de controle associados às oscilações causadas pelos controles do sistema de excitação, como mostrado na Figura 5.6. Portanto, se apenas os modos eletromecânicos instáveis ou mal amortecidos forem levados em consideração no cálculo da função objetivo, os parâmetros ajustados pelo AG podem ser inaceitáveis. Esse aspecto foi discutido na referência [5]. A Tabela 5.5 apresenta os modos eletromecânicos e seus respectivos amortecimentos para o cenário de operação 6 em malha aberta, e as Tabelas 5.6, 5.7 e 5.8 mostram os modos eletromecânicos e seus respectivos amortecimentos para o mesmo ponto de operação, com os ESP's ajustados pelo AG para os métodos 1, 2 e 3, respectivamente. Particularmente para o método 3, é mostrado na Tabela 5.9 o modo fora da faixa eletromecânica que tornou-se instável após o ajuste dos ESP's.

Tabela 5.5: Modos eletromecânicos e seus respectivos amortecimentos para o cenário 6 em malha aberta

+ 0,221 ± 2,008i	– 10,96%
– 0,228 ± 6,613i	3,44%
– 0,241 ± 6,798i	3,54%
– 0,276 ± 7,519i	3,62%
– 0,224 ± 6,082i	3,67%
– 0,349 ± 8,609i	4,05%
– 0,369 ± 8,576i	4,30%
– 0,468 ± 8,964i	5,21%
– 0,272 ± 4,035i	5,73%

Tabela 5.6: Modos eletromecânicos e seus respectivos amortecimentos para o cenário 6 com os ESP's ajustados pelo método 1

$- 2,069 \pm 8,708i$	23,11%
$- 3,672 \pm 15,382i$	23,21%
$- 1,855 \pm 7,208i$	24,93%
$- 2,354 \pm 9,105i$	25,03%
$- 3,644 \pm 13,94i$	25,28%
$- 1,646 \pm 6,073i$	26,16%
$- 7,235 \pm 19,212i$	35,24%
$- 4,938 \pm 12,051i$	37,92%
$- 1,9672 \pm 4,555i$	39,65%

Tabela 5.7: Modos eletromecânicos e seus respectivos amortecimentos para o cenário 6 com os ESP's ajustados pelo método 2

$- 1,844 \pm 11,344i$	16,04 %
$- 1,233 \pm 7,356i$	16,53 %
$- 1,838 \pm 9,146i$	19,70 %
$- 1,875 \pm 7,792i$	23,39 %
$- 1,722 \pm 6,759i$	24,69 %
$- 2,727 \pm 9,272i$	28,21 %
$- 2,491 \pm 7,719i$	30,71 %
$- 2,040 \pm 5,114i$	37,05 %
$- 1,980 \pm 4,234i$	37,67 %

Tabela 5.8: Modos eletromecânicos e seus respectivos amortecimentos para o cenário 6 com os ESP's ajustados pelo método 3

$- 1,383 \pm 7,854i$	17,35%
$- 2,138 \pm 10,938i$	19,18%
$- 2,473 \pm 9,109i$	26,00%
$- 2,000 \pm 7,353i$	26,24%
$- 3,675 \pm 11,384i$	30,00%
$- 1,923 \pm 5,8018i$	31,45%
$- 3,507 \pm 7,1657i$	43,96%
$- 2,081 \pm 4,1138i$	45,13%
$- 0,684 \pm 1,014 i$	48,93%

Tabela 5.9: Modo instável fora da faixa eletromecânica e respectivo amortecimento para o cenário 6 com os ESP's ajustados pelo método 3

$1,371 \pm 16,5991i$	- 8,23%
----------------------	---------

Deve-se ressaltar, que se uma faixa mais ampla de frequências for levada em consideração no cálculo da função objetivo do método 3, uma faixa de frequência que envolva os modos da excitatriz, por exemplo; os parâmetros encontrados pelo AG tornam-se aceitáveis, deslocando todos os modos do sistema para o semiplano esquerdo com amortecimentos acima de 15%. A Figura 5.7 mostra o melhor resultado de uma série de 50 simulações realizadas para o método 3, em que modos de oscilação na faixa de 0,1 à 4 Hz foram levados em consideração no cálculo da função objetivo do AG para os 14 pontos de operação. A tabela 5.10 apresenta os valores encontrados pelo AG para o método 3 para o cenário de operação 6, considerando modos de oscilação na faixa de 0,1 à 4 Hz.

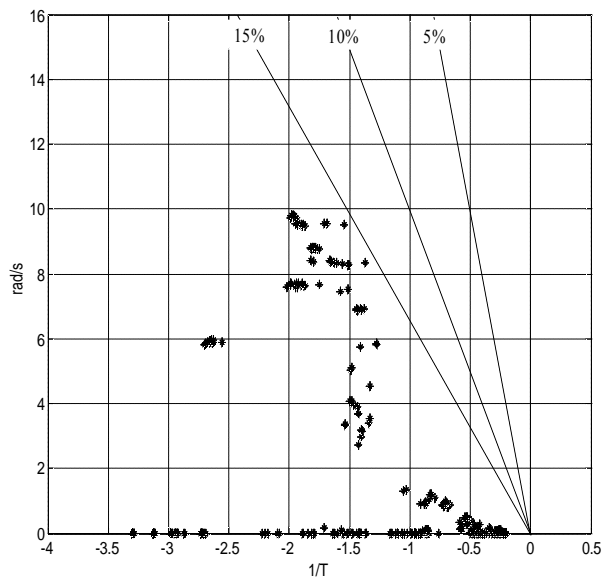


Figura 5.7: Autovalores para os 14 cenários operativos com ESP's ajustados pelo AG para o método 3 considerando modos na faixa de 0,1 a 4 Hz

Tabela 5.10: Parâmetros dos ESP's encontrados pelo AG para o método 3 para o cenário 6 considerando modos na faixa de 0,1 a 4 Hz

Gerador	K_{ESP}	α	ω
30	45,86	9,62	5,93
31	91,14	8,09	9,24
32	29,64	7,53	7,24
33	42,16	9,13	12,20
34	81,31	4,78	11,01
35	42,09	4,68	7,67
36	5,87	7,05	8,20
37	67,01	5,77	9,67
38	68,29	4,67	11,71

Uma última comparação entre os três métodos é com relação à resposta não-linear no domínio do tempo. Para esta simulação foi aplicado um curto-circuito trifásico na barra 29 para o cenário 13. A falta é eliminada depois de 100 ms com a abertura da linha 26–29 e reconexão total após 20 ms. As Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 mostram os ângulos das máquinas 2, 3, 7 e 8, de cima para baixo, em relação à referência (máquina 10, ligada ao barramento 39), para os métodos 1, 2 e 3, respectivamente. Percebe-se que o método 3, considerando a inclusão dos modos não eletromecânicos no cálculo da função objetivo, proporcionou a melhor resposta no tempo, pois o sistema estabilizou em menos de 10s, já a resposta obtida pela solução do método 2, apresentou um tempo de acomodação ligeiramente maior, estabilizando o sistema em cerca de 10s. A solução obtida pelo método 1 resultou no pior desempenho quando comparado aos dos métodos 2 e 3, pois em 10s o sistema ainda estava oscilante. O ponto de operação 13 foi escolhido para esta análise por se tratar de um cenário crítico de operação, o qual apresenta modos eletromecânicos instáveis em malha aberta.

A figura 5.10 mostra o comportamento do ângulo relativo da máquina 1 para o cenário operativo 13. Observa-se que a resposta proporcionada pela solução do método 3 apresentou melhor desempenho quando comparada as respostas obtidas pelas soluções do métodos 1 e 2, respectivamente.

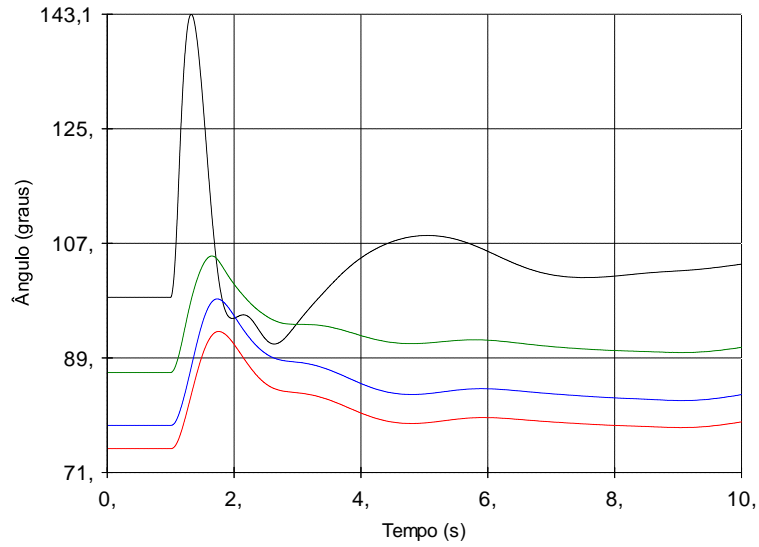


Figura 5.8: Resposta no domínio do tempo do sistema para o 13^o ponto de operação com os ESP's ajustados pelo método 1

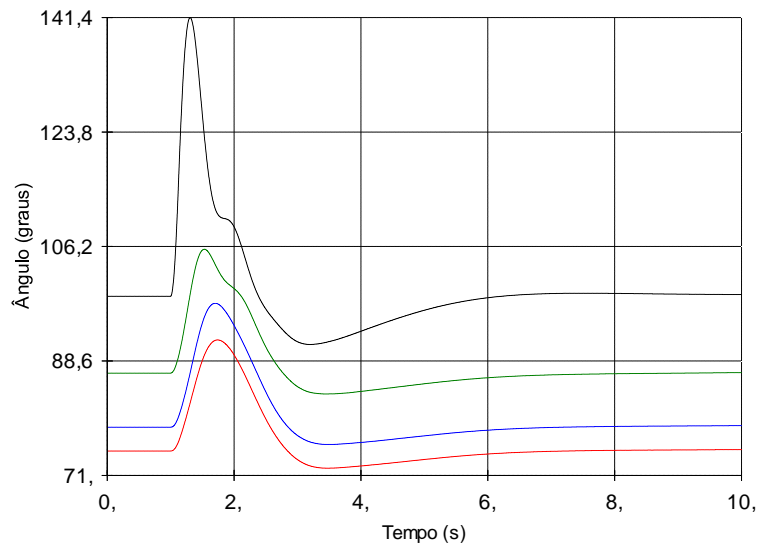


Figura 5.8: Resposta no domínio do tempo do sistema para o 13^o ponto de operação com os ESP's ajustados pelo método 2

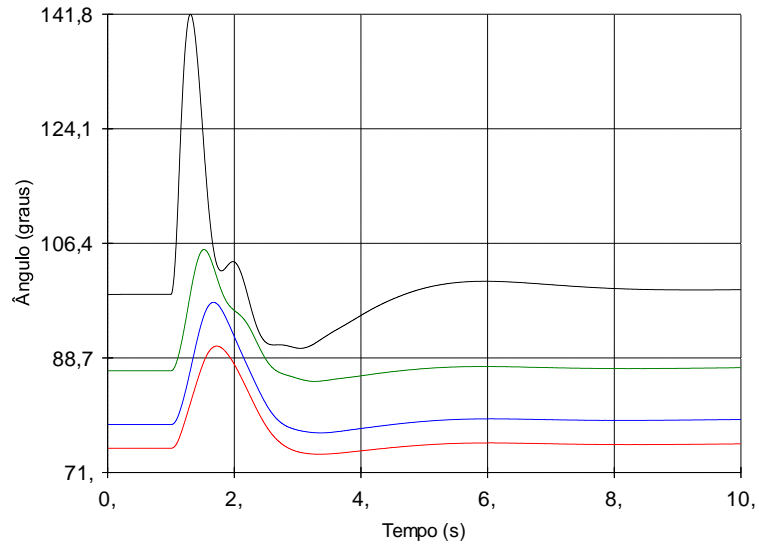


Figura 5.9: Resposta no domínio do tempo do sistema para o 13º ponto de operação com os ESP's ajustados pelo método 3

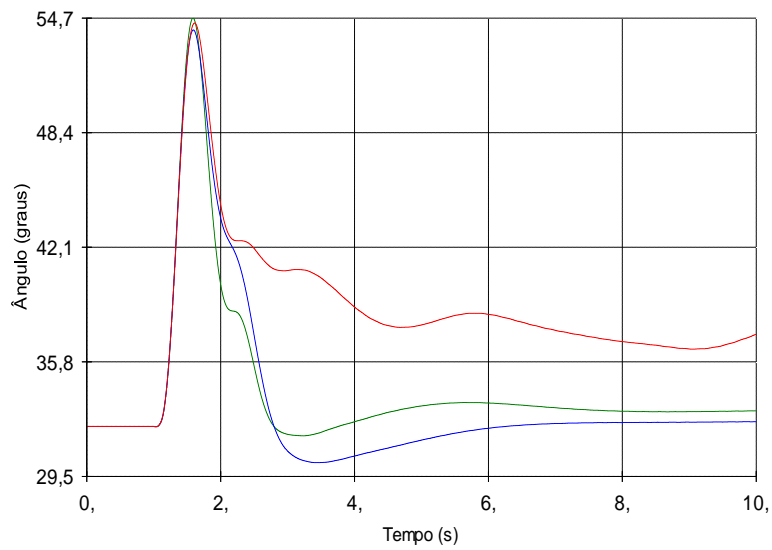


Figura 5.10: Ângulo relativo da máquina 1 para o 13º ponto de operação com os ESP's ajustados pelos métodos 1 (vermelho), 2 (azul) e 3 (verde)

Capítulo 6: Conclusões

1.2 ó Considerações Finais

Na presente dissertação foram comparados três métodos baseados em algoritmos genéticos para ajuste coordenado de estabilizadores de sistemas de potência, descritos nas referências [1], [2] e [3], respectivamente. O método 1 tem por objetivo maximizar o coeficiente de amortecimento mínimo do sistema em malha fechada. O método 2 tem por objetivo maximizar a soma dos amortecimentos de todos os autovalores das matrizes. O método 3 tem por objetivo deslocar os modos eletromecânicos poucos amortecidos ou mal amortecidos para uma zona pré-escrita no plano s . Os três métodos consideram um conjunto de condições de operação pré-selecionadas do sistema no procedimento de ajuste dos ESP.

Os três métodos foram testados no sistema conhecido como New England. Os métodos 1 e 2 obtiveram soluções de ajuste de ESP que alcançaram resultados satisfatórios com relação ao amortecimento dos modos eletromecânicos mal amortecidos, para os 14 cenários considerados neste trabalho. Observou-se também que os métodos 1 e 2 produziram soluções que conseguiram realocar os autovalores para regiões com boa margem de estabilidade no plano s . Já o método 3 gerou soluções insatisfatórias quando são levados em consideração apenas os modos da faixa eletromecânica no cálculo da função objetivo, além disso, modos fora da faixa eletromecânica foram deslocados para o lado direito do plano complexo, ocasionando a instabilidade do sistema. Entretanto, quando considerou-se uma faixa de frequência abrangendo também modos fora da faixa eletromecânica no cálculo da função objetivo, o método 3 obteve soluções que resultaram em bons resultados, até mesmo melhores que os proporcionados pelas soluções obtidas dos métodos 1 e 2.

Por fim, os ajustes dos ESPs obtidos pelos métodos 1, 2 e 3 proporcionaram comportamentos dinâmicos satisfatórios observados nas simulações no domínio do tempo por meio do uso do software ANATEM.

1.2 ó Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, podem ser feitas as seguintes sugestões:

- Implementar técnicas híbridas, tal como fuzzy-AG para melhorar a a qualidade da solução e convergência.
- Aplicar estes métodos em um sistema real, tal como o Sistema Interligado Nacional, SIN.

Referências Bibliográficas

- [1] E. R. C. Viveros, G. N. Taranto e D. M. Falcao, "Tuning of generator excitation systems using meta-heuristics," *Power Engineering Society General Meeting*, p. 6, 2006.
- [2] A. L. B. d. Bomfim, G. N. Taranto and D. M. Falcão, "Simultaneous Tuning of Power System Damping Controllers Using Genetic Algorithms," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 163-169, 2000.
- [3] Y. L. Abdel-magid e M. A. Abido, "Optimal multiobjective design of robust power system stabilizers using genetic algorithms," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, n. 3, pp. 1125-1132, 2003.
- [4] M. Srinivas e L. M. Patnaik, "Genetic algorithms: a survey," *Computer*, vol. 27, n. 6, pp. 17-26, 1994.
- [5] Y. Abdel-Magid, M. Abido, S. Al-Baiyat and A. Mantawy, "Simultaneous stabilization of multimachine power systems via genetic algorithms," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 4, pp. 1428-1439, 1999.
- [6] T. Das, G. Venayagamoorthy e U. Aliyu, "Bio-Inspired Algorithms for the Design of Multiple Optimal Power System Stabilizers: SPPSO and BFA," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, n. 5, pp. 1445 - 1457, 2008.
- [7] G. Naresh, M. Ramalinga Raju e M. Sai Krishna, "Design and parameters optimization of multi-machine power system stabilizers using Artificial Bee Colony Algorithm," *2012 International Conference on Advances in Power Conversion and Energy Technologies (APCET)*, pp. 1-6, 2012.
- [8] W. Peres, E. J. d. Oliveira, J. A. P. Filho e I. C. d. S. Junior, "Coordinated tuning of power system stabilizers using bio-inspired algorithms," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 64, pp. 419-428, 2015.
- [9] A. d. Bomfim, G. N. Taranto e D. Falcão, "Tuning of Power System Damping Controllers Using Genetic Algorithms," *Proceedings of the International Conference on Intelligent System Application to Power Systems ((South Korea)*, vol. 15, pp. 79-83, 1997.
- [10] M. Rashidi, F. Rashidi e H. Monavar, "Tuning of power system stabilizers via genetic algorithm for stabilization of power system," *IEEE International Conference on Man and Cybernetics Systems*, vol. 5, pp. 4649-4654, 2003.

- [11] P. S. Kundur, *Power Systems Stability and Control*, New York: McGraw-Hill, 1994.
- [12] V. Ajarapu, *Computational Techniques for Voltage Stability Assessment and Control*, Ames: Springer US, 2007.
- [13] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. Van Cutsem e V. Vittal, "Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, n. 3, pp. 1387-1401, 2004.
- [14] K. Ogata, *Engenharia de Controle Moderno*, 3a ed., Rio de Janeiro: LTC Editora, 2000, pp. 576-577.
- [15] F. Demello e C. Concordia, "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vols. PAS-88, n. 4, pp. 316-329, April 1969.
- [16] E. Larsen e D. Swann, "Applying Power System Stabilizers Part II: Performance Objectives and Tuning Concepts," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vols. PAS-100, n. 6, pp. 3025-3033, June 1981.
- [17] I. T. Course, "Power System Stabilisation via Excitation Control," *IEEE Power Engineering Education Committee and the Power Generation Committee*, vol. 81 EHO, pp. 175-0 PWR, 1980.
- [18] J. Ferraz, N. Martins e G. Taranto, "Simultaneous partial pole placement for power system oscillation damping control," *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2001*, vol. 3, pp. 1154-1159, 2001.
- [19] E. Larsen e D. Swann, "Applying Power System Stabilizers Part II: Performance Objectives and Tuning Concepts," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vols. PAS-100, n. 6, pp. 3025-3033, June 1981.
- [20] E. Larsen e D. Swann, "Applying Power System Stabilizers Part III: Practical Considerations," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vols. PAS-100, n. 6, pp. 3034-3046, June 1981.
- [21] N. Martins, H. Pinto e L. Lima, "Efficient methods for finding transfer function zeros of power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, n. 3, pp. 1350-1361, Aug 1992.
- [22] R. M. Henrique, *Utilização de Autovalores no problema de fluxo de potência para determinação de áreas de controle de tensão*, RJ/COPPE: Tese, 2009.

- [23] M. Mitchell, An introduction to genetic algorithms, MIT Press, 1998.
- [24] S. Sivanandam e S. Deepa, Introduction to Genetic Algorithms, Springer, 2008.
- [25] A. L. B. do Bomfim, *Ajuste Coordenado de Estabilizadores de Sistemas de Potência Usando Algoritmos Genéticos*, RJ: COPPE, 2000.
- [26] M. Gen e R. Cheng, Genetic Algorithms and Engineering Optimization, John Wiley & Sons, 2000.
- [27] D. E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [28] R. Linden, Algoritmos Genéticos, 2a ed., Rio de Janeiro: Brasport, 2008.
- [29] M. S. Bazaraa, Linear Programming and Network Flows, 1a ed., John Wiley & Sons Inc, 1977.
- [30] Z. Michalewicz, Genetic Algorithms + data structures = evolution programs, 3a ed. rev. and extended, Springer, 1992.
- [31] M. Pai, Energy function analysis for power system stability, Springer, 1989.