

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA**

ANDRÉ LUIZ RIBEIRO BARBIERI

**ALGORITMO GENÉTICO PARA SINTONIA DE CONTROLADORES
DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA CONSIDERANDO O
CRITÉRIO N-1**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2014

ANDRÉ LUIZ RIBEIRO BARBIERI

**ALGORITMO GENÉTICO PARA SINTONIA DE CONTROLADORES
DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA CONSIDERANDO O
CRITÉRIO N-1**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista no Programa de Graduação em Engenharia Industrial Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Favoretto Castoldi

CORNÉLIO PROCÓPIO

2014

ANDRÉ LUIZ RIBEIRO BARBIERI

**ALGORITMO GENÉTICO PARA SINTONIA DE CONTROLADORES
DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA CONSIDERANDO O
CRITÉRIO N-1**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado às 15h do dia 06 de Fevereiro de 2014 como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista no Programa de Graduação em Engenharia Industrial Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Marcelo Favoretto Castoldi, Prof.Dr.
Professor Orientador
UTFPR/ Campus Cornélio Procópio

Carolina Ribeiro Rodrigues, Prof^a. Dr^a.
Professora Convidada
UTFPR/ Campus Cornélio Procópio

Danilo Sipoli Sanches, Prof.Dr.
Professor Convidado
UTFPR/ Campus Cornélio Procópio

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso

Dedico a Deus, à minha família, e aos meus amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus pelas grandes maravilhas que tem realizado em minha vida, por iluminar sempre os meus passos e abençoar os caminhos traçados.

Agradeço aos meus pais, Flávio e Osmarina, pela força e incentivo dado a mim em todos os momentos difíceis ao longo do período acadêmico, e por caminharem sempre ao meu lado.

Agradeço ao meu professor orientador Marcelo Favoretto Castoldi pela orientação em meu trabalho acadêmico, pela paciência e pela amizade construída ao longo dos anos.

Agradeço ao Sérgio Mazucato, amigo do curso de Engenharia Elétrica pela contribuição e incentivo dado para que esse trabalho pudesse ser realizado.

Agradeço a todos os meus amigos que fizeram parte da minha história, desde o período escolar médio aos amigos do curso de Engenharia Industrial Elétrica, que me propuseram momentos de alegria, amizade, companheirismo e descontração.

"Mas os que confiam no Senhor, renovam as suas forças, voam alto como águias,
correm e não ficam exaustos, andam e não se cansam".
(Isaías, 40:31)

RESUMO

BARBIERI, André Luiz Ribeiro. **Algoritmo Genético para Sintonia de Controladores de Sistemas Elétricos de Potência Considerando o critério N-1**. 2014. 55f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2014.

Sistemas Elétricos de potência muitas vezes estão sujeitos a oscilações eletromecânicas, podendo ser elas causadas por um aumento repentino de carga ou ainda um curto-circuito que podem acarretar em um mau funcionamento de linhas de transmissão e/ou geradores, evitando assim que a energia elétrica seja transmitida com qualidade aos seus pontos de entrega. Para que problemas como os citados sejam minimizados, controladores de potência vêm sendo utilizados para aumentar a margem de estabilidade do sistema e assim garantir que o mesmo não entre em um colapso. Dentre inúmeros controladores de potência utilizados na indústria para o amortecimento de oscilações eletromecânicas, destaca-se o PSS (*Power System Stabilizer*), dispositivo capaz de aumentar a margem de estabilidade de um SEP (Sistema Elétrico de Potência) adicionando um sinal modulado através do sistema de controle da excitação. O PSS vem sendo utilizado por décadas devido ao seu bom desempenho aliado à facilidade no uso de suas técnicas de controle e, por isso, será utilizado neste trabalho. No entanto, somente a adição de estabilizadores de potência não garante a estabilidade desejada a um sistema elétrico, sendo necessária uma sintonia adequada dos mesmos a fim de tornar o sistema robusto o suficiente frente a variações em seus pontos de operação. Esta proposta apresenta uma alternativa de sintonia automática para controladores PSS's de sistemas elétricos de potência utilizando algoritmo genético elaborado através do Matlab[®], tendo em vista o critério N-1 estabelecido pelo ONS (Operador Nacional do Sistema). A fim de aumentar a dificuldade do trabalho e testar a robustez do algoritmo proposto, será utilizado o sistema teste *New England – New York* contendo 68 barras e 16 geradores. Para criar uma situação de controle mais difícil é feita a remoção de cada uma das linhas, uma por vez, do sistema elétrico teste, como previsto no critério N-1, sendo cada caso originado com tal metodologia um ponto de operação distinto a ser considerado no projeto. Assim, o algoritmo genético proposto terá como objetivo encontrar parâmetros adequados para todos os controladores utilizados de forma a sintonizar simultaneamente todos os pontos de operação considerados, ou seja, os parâmetros encontrados pelo algoritmo devem ser robustos o suficiente para amortecer as oscilações eletromecânicas do sistema em todos os pontos de operação, até que o critério de parada estabelecido pelo projetista seja alcançado (geralmente um valor de amortecimento mínimo para o sistema). A principal contribuição do trabalho é utilizar o critério N-1, estabelecido pelo ONS, para verificar o desempenho dos controladores sintonizados automaticamente pelo algoritmo proposto.

Palavras – chave: Sistemas Elétricos de Potência. Controladores PSS. Algoritmo Genético. Critério N-1.

ABSTRACT

BARBIERI, André Luiz Ribeiro. **Genetic Algorithm for Controller Tuning in Electric Power System Considering the N-1 Criterion**. 2014. 55f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Federal Technology University – Paraná. Cornélio Procópio, 2014.

Electrical Power Systems are often subject to electromechanical oscillations, which can be caused by a sudden increase of charge or even a short circuit that may lead to a transmission lines malfunctioning, avoiding a full quality distribution of electrical energy. In order to make such problems become less frequent or even extinct, power controllers have been used to enhance the system's stability margin and, therefore, guarantying that such does not get into a collapse. Among countless power controllers, all used in industry for electromechanical oscillations damping, PSS (Power System Stabilizer) must be highlighted due to its capacity of increasing the stability margin of a SEP (Electrical Power System). The PSS has been used for decades due to the good performance associate its easiness in using their control techniques and that is why it is going to be applied in this assignment. However, only adding Power Systems Stabilizers does not guarantee the required stability of an electrical power system that is why is necessary to have a proper alignment of these two in order to turn the system robust enough against the variations in its operation points. This proposal presents an alternative automatic tuning for the PSS (Power System Stabilizer) type of controllers from electrical power systems, using a Matlab® based genetic algorithm and considering the N-1 criterion established by the ONS (Operador Nacional do Sistema). In order to increase the challenge of this assignment and to test the endurance of the proposed algorithm, the used testing-system Will be "New England-New York", containing 68 bus and 16 generators. Intending to promote a situation in which the controllability would be more difficult, the lines are removed, one by one, from the electrical system, as previewed by the N-1 Criterion, being each case originated with such methodology a distinct operation point to be considered in the project. Therefore, the proposed genetic algorithm will have as main goal to find the adequate standards for all the controllers, used in order to synch simoutaneously all the considered operation points, that is, the parameters found by the algorithm must be robust enough to deaden the electromechanical oscillations of the system in every operation point, until the stopping criterion established by the projector is reached (usually a minimum deaden value for the system). The main contribution of this assignment is to use the N-1 Criterion, established by the ONS, to verify the automatically synched controllers performance by the algorithm proposed.

Keywords: Electric Power System. Controllers PSS. Genetic Algorithms.N-1 Criterion.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Modelo de um sistema de energia elétrica	15
FIGURA 2 – Estrutura típica de um PSS	16
FIGURA 3 – Modelo de projeto para PSS	23
FIGURA 4 – Exemplo de recombinação	31
FIGURA 5 – Exemplo de mutação	32
FIGURA 6 – Exemplo de cromossomo de parâmetros utilizado	33
FIGURA 7 – Modelo de cruzamento utilizado.....	34
FIGURA 8 – Fluxograma do algoritmo genético proposto.....	37
FIGURA 9 – <i>New England/New York</i> - linhas	38
FIGURA 10 – <i>New England/New York</i> - adaptação	39
FIGURA 11 – Fluxo de potência nas linhas entre as barras 18 e 49 e 27 e 53 no ponto de operação S5657/S6465, considerando a inserção dos controladores sintonizados manualmente.....	43
FIGURA 12 – Frequência dos geradores 2 e 3 no ponto de operação S5657/S6465, considerando a inserção dos controladores sintonizados manualmente.	44
FIGURA 13 – Fluxo de potência nas linhas entre as barras 18 e 49 e 27 e 53 no ponto de operação S2829, considerando a inserção dos controladores sintonizados manualmente.....	44
FIGURA 14 – Frequência dos geradores 2 e 3 no ponto de operação S2829, considerando a inserção dos controladores sintonizados manualmente.	45
FIGURA 15 – Fluxo de potência nas linhas entre as barras 18 e 49 e 27 e 53 no ponto de operação S5657/S6465, considerando a inserção dos controladores sintonizados automaticamente.	50
FIGURA 16 – Frequência dos geradores 10 e 11 no ponto de operação S5657/S6465, considerando a inserção dos controladores sintonizados automaticamente.....	50
FIGURA 17 – Fluxo de potência nas linhas entre as barras 18 e 49 e 27 e 53 no ponto de operação S2829, considerando a inserção dos controladores sintonizados automaticamente.....	51
FIGURA 18 – Frequência dos geradores 10 e 11 no ponto de operação S2829, considerando a inserção dos controladores sintonizados automaticamente.....	51

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Pontos críticos do sistema teste	40
TABELA 2 – Parâmetros encontrados pela sintonia manual.....	42
TABELA 3 – Amortecimento após sintonia manual.....	42
TABELA 4 – População inicial.....	47
TABELA 5 – Parâmetros encontrados pela sintonia automática.....	48
TABELA 6 – Amortecimento após sintonia automática.....	49
TABELA 7 – Dados comparativos.....	52

LISTA DE SIGLAS

AE	Algoritmo Evolutivo
AG	Algoritmo Genético
AVR	<i>Automatic Voltage Regulator</i>
FACTS	<i>Flexible Alternating Current Transmission System</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema
PSS	<i>Power System Stabilizer</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência

LISTA DE SÍMBOLOS

T_1 e T_2	Constantes de tempo do bloco avanço – atraso de fase do controlador
T_w	Constante de tempo do bloco <i>Washout</i> do controlador
x	Vetor de estados do sistema
A B C	Matrizes de realização de estados do sistema
u	Vetor de entradas do sistema
y	Vetor de saídas do sistema
A_c B_c C_c	Matrizes de realização de estados do controlador
x_c	Vetor de estados do controlador

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA.....	15
1.2 OBJETIVO	17
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	19
2 MODELAGEM DO PROBLEMA	20
2.1 MODELO LINEAR	20
2.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE SINTONIA	21
2.2.1 Projeto de Controladores de Sistemas Elétricos de Potência	23
3 ALGORITMOS EVOLUTIVOS	27
3.1 ALGORITMO GENÉTICO.....	29
3.1.1 Operadores Genéticos	30
3.2 ALGORITMO PROPOSTO	32
4 RESULTADOS OBTIDOS	38
4.1 SINTONIA MANUAL DOS PSS's.....	40
4.2 SINTONIA AUTOMÁTICA DOS PSS's	46
5 CONCLUSÕES.....	53
REFERÊNCIAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica desempenha na atualidade um papel cada vez mais importante como fonte de bem estar. Por outro lado, o crescimento econômico e industrial da sociedade moderna vem assumindo ao longo dos anos patamares cada vez mais interligados ao aumento da demanda por energia elétrica.

Sendo assim, a manutenção e controle de um sistema elétrico de potência para uma melhor distribuição e utilização desta energia tem se tornado papel fundamental no contexto atual e desafiador para a engenharia.

Um dos aspectos para avaliar as condições de transmissão e funcionamento de um sistema elétrico de potência, diz respeito à sua robustez. Segundo Kundur (1994), a robustez de um Sistema Elétrico de Potência (SEP) é medida pela capacidade do sistema de operar tanto no estado de equilíbrio sob condições normais quanto em condições de perturbação. Um sistema de alimentação é dito ser estável se as unidades geradoras interligadas permanecerem em sincronismo.

A estabilidade de um SEP é outro aspecto a ser avaliado. Sua capacidade de manter a estabilidade depende em grande parte dos controles disponíveis para o amortecimento das oscilações eletromecânicas. Dentre inúmeros controladores de potência existentes atualmente, destaca-se o PSS (*Power System Stabilizer*), dispositivo muito utilizado na indústria para o amortecimento de oscilações eletromecânicas em sistemas de potência e, por isso, será utilizado neste trabalho.

No entanto, somente a adição de estabilizadores de potência não garante a estabilidade desejada a um SEP, sendo necessária uma sintonia adequada dos mesmos a fim de tornar o sistema robusto o suficiente frente a variações em seus pontos de operação. Tal sintonia, na maioria das vezes, é feita de forma manual, utilizando métodos empíricos, o que torna o processo lento e requer uma grande experiência do projetista encarregado do projeto.

Ao longo dos anos, muitos métodos de otimização vem sendo analisados e utilizados com a finalidade de aumentar a velocidade e precisão de processos de automatização na sintonia de controladores em sistemas elétricos de potência (CASTOLDI, 2011).

Dentre os principais métodos de otimização destaca-se o Algoritmo Genético, método robusto e simples bastante utilizado capaz de obter soluções computacionais eficientes (REZENDE, 2003). Segundo Goldberg (1989, 2002) o conceito de robustez relaciona-se ao fato de os algoritmos genéticos, independentemente das escolhas dos parâmetros iniciais, em geral, produzirem soluções de qualidade, fato este que justifica a escolha de tal método a ser utilizado no trabalho.

Assim, este trabalho propõe um método computacional baseado em algoritmo genético para sintonizar automaticamente parâmetros de controladores PSS em sistemas elétricos de potência considerando o critério N-1 estabelecido pelo ONS (Operador Nacional do Sistema).

Segundo Pataca (2012) o critério N-1 trata de perdas individuais de componentes de um sistema, no caso do trabalho, perdas de linhas de transmissão. Assim, cada linha do sistema estudado será retirada de operação, uma por vez, e a sintonia dos controladores deverá ser feita de forma simultânea, considerando todos os pontos de operação de interesse. Desta forma, os controladores sintonizados devem fornecer um amortecimento satisfatório para todas as condições de operação utilizadas no projeto de tal forma a evitar que o sistema entre em colapso.

A tarefa de estabelecer uma sintonia para os controladores em um SEP pode ter seu tempo de execução maior quanto mais pontos de operação forem utilizados no projeto, uma vez que o projetista deve testar a configuração dos controladores em cada ponto de operação considerado. Se a configuração encontrada não fornecer amortecimento suficiente em alguma condição de operação considerada, o projeto deve ser refeito. Além disso, é importante ressaltar que quanto maior o grau de complexidade do sistema analisado, mais complicada será a tarefa de sintonia dos controladores.

De todos os fenômenos complexos em sistemas de energia, a estabilidade é o que possui uma maior complexidade de entendimento e análise. Sistemas de energia elétrica do século 21 apresentam o grande desafio de operar mais perto de seus limites de estabilidade (KUNDUR, 1994).

Com o avanço da tecnologia empregada na eletrônica de potência, outros dispositivos de controle de sistemas elétricos foram desenvolvidos. Tais dispositivos são conhecidos como FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*) e são empregados em situações em que os PSS's sozinhos não são efetivos para

amortecer as oscilações eletromecânicas. Porém, estes dispositivos não serão tratados neste trabalho, sendo uma sugestão para trabalhos futuros.

Ainda, é importante ressaltar que este trabalho é um ponto de partida para sintonia automática de controladores de sistemas elétricos considerando o critério N-1 apresentado neste tópico.

1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Um sistema elétrico de potência com uma qualidade de energia elétrica razoavelmente aceitável é caracterizado pelo fornecimento de energia em tensão com forma de onda senoidal pura, sem qualquer tipo de distúrbio sendo ele em amplitude, frequência ou fase, como se emanasse de uma fonte de potência infinita (DASILVA, 2006).

A Figura 1 apresentada a seguir ilustra de maneira básica como é composto um sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica e faz ênfase ao processo de transmissão de energia:

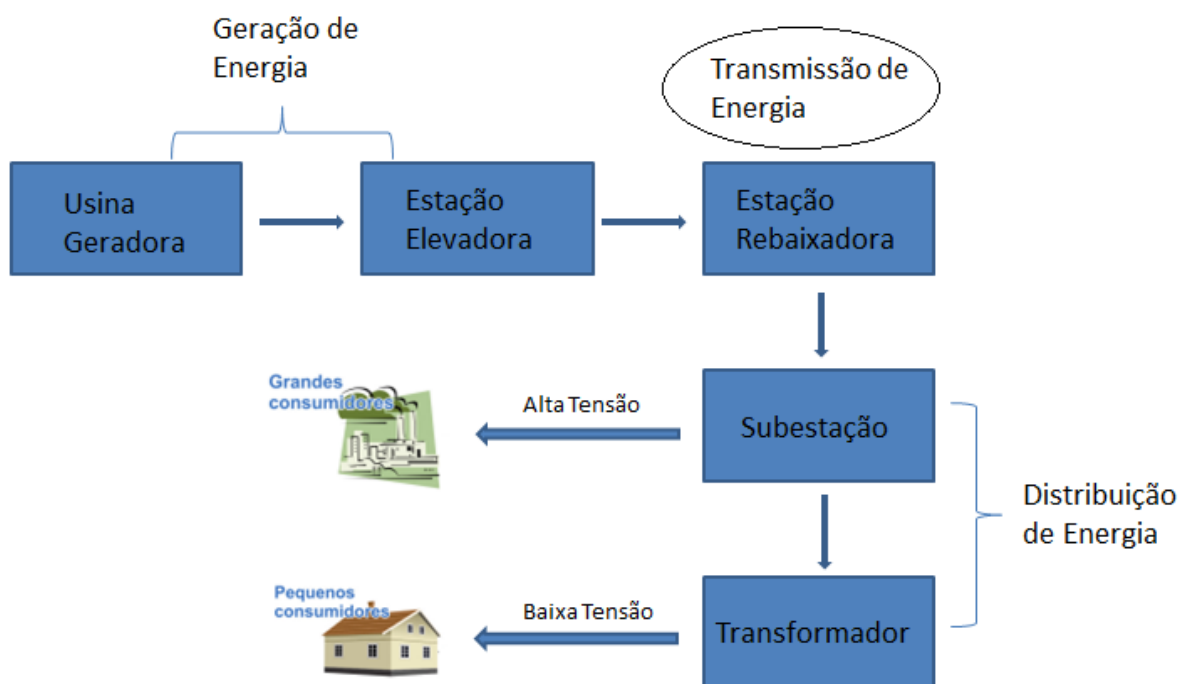


Figura 1 – Modelo de um sistema de energia elétrica
Fonte: Autoria Própria.

Para que o sistema esteja em perfeitas condições de funcionamento, garantindo a transmissão e o atendimento adequado a qualquer tipo de carga, o mesmo deve conter dentre diversas características: tensões trifásicas equilibradas, amplitudes constantes e perdas quase nulas na transmissão e distribuição de energia.

Dentre os principais e mais comuns distúrbios ou fenômenos que comprometem o SEP e acarretam uma necessidade instantânea de solução para os mesmos, se destacam os harmônicos, inter harmônicos, transitórios, instabilidades de ângulo e tensão entre outros. Este trabalho visa o melhoramento da estabilidade de ângulo do sistema, através de uma sintonia factível de seus controladores.

A inserção de um dispositivo PSS pode aumentar a margem de estabilidade do SEP, adicionando um sinal modulado através do sistema de controle da excitação. Este dispositivo vem sendo utilizado por décadas para aumentar o amortecimento de oscilações eletromecânicas. Um bom exemplo da utilização de dispositivos PSS's é o caso de usinas hidrelétricas de médio e grande porte, como por exemplo, a Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional, construída em meados de 1975 e pertencentes a Brasil e Paraguai (ITAIPU, 2003). Em ambientes operacionais da usina, os dispositivos citados são empregados no setor eletroeletrônico para o controle e regulação de tensão das unidades geradoras, que na maioria das vezes é feita de forma manual através de ajustes nos cartões ou módulos de controle.

Tipicamente, o PSS atua através do sistema de excitação do gerador de maneira que o torque elétrico (fornecido pelo PSS) no rotor esteja em fase, ou próximo da fase, das variações de velocidade. Isso irá fornecer amortecimento ao sistema de potência, aumentando a estabilidade do mesmo. A Figura 2 ilustra uma estrutura típica de um PSS:

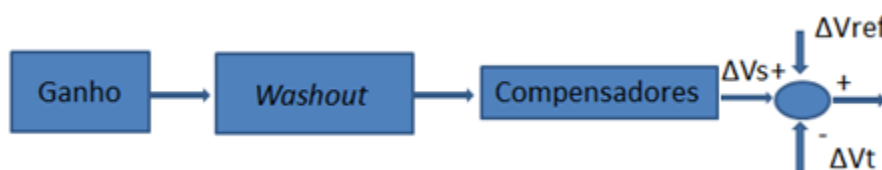


Figura 2 - Estrutura típica de um PSS
Fonte: Autoria Própria.

A sintonia automática de controladores com a estrutura representada pela figura acima atrelada a utilização de métodos heurísticos computacionais reduz o tempo de projeto quando comparada a métodos empíricos, muito utilizados ainda hoje. Além disso, o método de sintonia automática que será proposto aumenta o grau de precisão na sintonia dos controladores, uma vez que tal método leva em consideração vários pontos de operação do sistema simultaneamente (CASTOLDI, 2011).

Desta forma espera-se que a inserção de controladores do tipo PSS, com seus parâmetros previamente estimados de forma computacional, possa fornecer um amortecimento satisfatório para o sistema, continuando o sistema estável quando este é submetido a uma pequena perturbação.

1.2 OBJETIVO

Devido a perturbações e variações normais diárias de carga, ou até mesmo perdas de linhas de transmissão durante seu processo operativo, os sistemas elétricos de potência em geral estão sujeitos a variações em seus pontos de operação. Segundo Castoldi (2011) na ocorrência de tais perturbações, o sistema passará por um período transitório e tentará buscar um novo ponto de equilíbrio.

Portanto, há uma grande necessidade em se estabelecer uma sintonia factível para controladores do tipo PSS utilizados em diversos sistemas elétricos de potência para o amortecimento de oscilações eletromecânicas, a fim de que tal sintonia seja robusta o suficiente para atender a todos os possíveis pontos distintos de operação, evitando que o sistema entre em um colapso.

Sendo assim, o objetivo do trabalho é propor um algoritmo genético capaz de sintonizar parâmetros de controladores do tipo PSS de sistemas elétricos de potência. Os pontos de operação utilizados na etapa de projeto da sintonia obedecem ao critério N-1 já apresentado no trabalho, ou seja, os controladores devem ser robustos o suficiente para amortecer oscilações no sistema, mesmo quando este opera sem uma de suas linhas de transmissão.

A fim de aumentar a dificuldade do trabalho e testar a robustez do algoritmo proposto, será utilizado o sistema teste *New England – New York* contendo 68

barras e 16 geradores. Com a utilização do sistema *New England – New York* como base, e tendo em vista a remoção das barras uma por vez do sistema como previsto no critério N-1 do ONS, ao final do processo teremos setenta e um pontos de operação distintos considerados para a sintonia dos controladores do sistema de forma automática e simultânea.

A importância do trabalho se dá pelo grau de complexidade de se sintonizar controladores que sejam robustos o suficiente para fornecerem um amortecimento satisfatório para diversos pontos de operação considerados, aumentando a complexidade, ainda, pela análise utilizar o critério N-1. Sendo assim o algoritmo genético terá finalidade de fornecer um bom grau de sintonia para os controladores do sistema, tornando-o robusto frente às variações nos pontos de operação. Outro fator relevante a ser considerado, é que muitas vezes são realizadas sintonias considerando mudanças de carga do sistema, no entanto o trabalho exposto propõe uma mudança topológica no sistema em questão, aumentando assim a dificuldade de se obter uma boa sintonia.

Deste modo, para a obtenção do objetivo principal é possível estruturar os objetivos específicos que a abordagem requer, conforme apresentado:

- Estudar a teoria a respeito de algoritmos genéticos;
- Estudar o modelo matemático e modelagem de sistemas elétricos de potência para a elaboração do projeto para a sintonia de controladores;
- Desenvolver um método de sintonia automática de parâmetros para controladores do tipo PSS baseado em algoritmos genéticos;
- Aplicar o método de otimização proposto para sintonizar parâmetros de controladores PSS em um sistema elétrico de potência teste, realizando possíveis mudanças topológicas no mesmo a fim de se testar a efetividade do algoritmo frente aos diversos pontos de operação obtidos a partir de tais mudanças topológicas;
- Realizar a partir dos parâmetros encontrados com a sintonia automática uma simulação não linear com dois pontos de operação distintos, sendo um considerado no projeto e outro não a fim de verificar a robustez da sintonia.

Dessa forma, pode-se dizer, de maneira geral, que a dificuldade e o tempo relativamente grande para encontrar uma solução aceitável em problemas de sintonia de controladores de sistemas elétricos têm gerado a necessidade de

otimização do processo a fim de se estabelecer parâmetros de sintonia que possam trazer robustez ao sistema, tendo em vista que o mesmo está sujeito a condições adversas durante seu processo de operação.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Neste capítulo, apresentou-se uma breve introdução a respeito de sistemas elétricos de potência, os problemas encontrados em ramos da Engenharia Elétrica relacionados à geração e transmissão de energia, além de relatar a respeito da utilização de algoritmos evolutivos em problemas de sintonia de controladores. Além disso, especificou o problema, o objetivo principal e os objetivos específicos do tema proposto. Desta maneira o trabalho tem sua estrutura elaborada da seguinte forma:

- No Capítulo 2 é realizada uma abordagem a respeito da modelagem do problema de sintonia e formulação do projeto de controladores em sistemas elétricos de potência. O item abordado se inicia na contextualização do tema, bem como a apresentação de conceitos matemáticos. Tal processo de formulação de projeto de controladores citado acima é baseado em equações matemáticas formuladas a partir de sistemas linearizados referentes à estrutura de realimentação de blocos de compensação de controladores de potência.
- No Capítulo 3 são apresentados rapidamente conceitos básicos a respeito de algoritmos evolutivos, e em seguida é dado ênfase a contextualização de algoritmos genéticos, apresentando seu contexto histórico, sua aplicação em problemas de otimização e por fim seus operadores. Em seguida são expostos todos os procedimentos adotados na utilização do algoritmo genético proposto no problema de sintonia de controladores em um sistema elétrico teste com suas diversas mudanças topológicas considerando o critério N-1.
- No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos com a abordagem realizada anteriormente.

Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões do trabalho abordado.

2 MODELAGEM DO PROBLEMA

Estudos de estabilidade a pequenas perturbações e projeto de controladores de amortecimento para sistemas elétricos de potência são realizados a partir de modelos matemáticos que representam o sistema em estudo (CASTOLDI, 2011).

A fim de descrever tais modelos matemáticos que muitas vezes possuem alto grau de complexidade, fazem-se necessárias considerações físicas que aproximem a uma simplificação do sistema.

Para se expressar em termos matemáticos uma completa modelagem de um sistema elétrico de potência, se torna evidente a apresentação de componentes que na maioria dos casos compõe o SEP em questão, tais como geradores síncronos, AVR's, linhas de transmissão, dispositivos FACTS, entre outros.

No entanto, este trabalho apresenta como tema principal o problema de sintonia de controladores envolvendo o critério N-1 em um sistema teste e, portanto, não tratará em específico do processo de modelagem dos componentes citados acima, processo que pode ser visto com detalhes em (RAMOS, 2000).

Este capítulo apresenta uma breve descrição a respeito de representações lineares na modelagem de sistemas elétricos, e em seguida expõe o processo de formulação do problema de sintonia de controladores, apresentando suas equações matemáticas e matrizes obtidas através da linearização do modelo multimáquinas.

2.1 MODELO LINEAR

Uma análise envolvendo sistemas que são submetidos a perturbações assim como o projeto de controladores pode ser realizada utilizando modelos lineares ao invés de modelos não lineares, pois de maneira geral tais perturbações não afastariam as variáveis de estado de seu ponto de operação original (OLIVEIRA, 2006).

Rowell (2002) afirma que a descrição pelo espaço de estados é muito mais rica que as demais representações, uma vez que a mesma permite a representação de equações diferenciais em um conjunto de variáveis conhecidas como variáveis de

estado que, aliado a um conjunto de equações algébricas, representam as variáveis físicas de saída.

Tendo como ponto de partida equações matriciais provenientes do modelo linearizado se torna possível ter uma noção a respeito do grau de estabilidade do sistema não linear ao redor do ponto de operação utilizado. Uma das grandes vantagens de se utilizar modelos lineares é a possibilidade de utilização de uma gama de técnicas lineares para a análise e projeto de sistemas de controle. Segundo Oliveira (2006) tais técnicas, são na maioria dos casos, consideradas mais simples de serem implementadas comparadas a técnicas não lineares.

Segundo Castoldi (2011) o uso de técnicas de controle clássico é predominante em projetos de controladores nos sistemas de potência. No caso deste trabalho, que tem como finalidade a estabilidade angular, o ponto de partida para a sintonia de controladores está baseado em vários pontos de operação distintos, variáveis a partir de mudanças topológicas realizadas no sistema *New England – New York* proposto. Assim pode-se dizer que tais variações topológicas dificultam o processo de sintonia uma vez que a mesma será realizada de forma simultânea.

2.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE SINTONIA

O Projeto de controladores na maioria das vezes torna-se uma tarefa complicada devido a vários aspectos relacionados às características construtivas e operativas dos sistemas de potência, sendo:

- Presença de dinâmicas de natureza não linear na operação dos sistemas;
- Variações sucessivas nas condições de operação do sistema que ocorrem durante o dia;
- Vários geradores de um sistema de potência possuem os seus próprios controladores.

Em sistemas lineares, os mesmos são analisados em termos de seus autovalores e seus autovetores associados a cada autovalor, sendo que para um sistema elétrico de potência a metodologia segue o mesmo raciocínio (CASTOLDI, 2011). Tendo em vista que tais sistemas elétricos de potência possuem seus

autovalores ou modos de oscilação pouco amortecidos, se torna necessário o emprego de controladores de potência com a finalidade de tornar os devidos modos de oscilação amortecidos.

A modelagem de sistemas de potência é usualmente baseada em um conjunto de equações não lineares na forma:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), \mu, u(t)), u(0) = u_0 \quad (2.1)$$

Onde $x(t) \in \mathbb{R}^n$ é o vetor de estados do sistema, $u(0)$ é a condição inicial e μ são alguns parâmetros do sistema.

Como o intuito do projeto é o projeto de controladores de amortecimento para um sistema de potência, as respectivas entradas e saídas referentes aos controladores que serão projetados podem ser incluídos no modelo multimáquinas.

Desta forma, o modelo multimáquinas passa a ser descrito na forma de espaços de estado:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), \mu, u(t)) \quad (2.2)$$

$$y(t) = g(x(t), \mu, u(t)) \quad (2.3)$$

$$x(0) = x_0, u(0) = u_0 \quad (2.4)$$

Onde $u \in \mathbb{R}^p$ é o vetor de entradas do sistema (onde são adicionados os sinais de controle) e $y \in \mathbb{R}^q$ é o vetor de saídas do sistema (utilizado de entrada para os controladores).

Assim, uma linearização do sistema (2.2) e (2.3) ao redor de um ponto de equilíbrio é obtida a partir de expansões de $f(x(t), \mu, u(t))$ e $g(x(t), \mu, u(t))$ em série de Taylor. Sendo assim, tem-se a seguinte forma matricial:

$$\dot{x}(t) = A(\mu)x(t) + Bu(t) \quad (2.5)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (2.6)$$

As matrizes $A(\mu)$, B e C possuem dimensões $n \times n$, $n \times p$ e $q \times n$ respectivamente. É importante salientar que em (2.5) e (2.6) os vetores x , u e y

representam desvios com relação aos valores de equilíbrio em (2.2) e (2,3) sendo dispensada a utilização de Δ , sendo assim a matriz $A(\mu)$ também será simplificada apenas como A .

2.2.1 Projeto de Controladores de Sistemas Elétricos de Potência

Basicamente, controladores de amortecimento do tipo PSS (*Power System Stabilizer*) atuam de forma a fornecer amortecimento às oscilações eletromecânicas, como já mencionado anteriormente, através de um sinal estabilizante adicionado ao regulador automático de tensão (*Automatic Voltage Regulator – AVR*) do gerador (CASTOLDI, 2011).

Neste trabalho, o controlador proposto tem a função de produzir uma componente de torque elétrico em fase com o desvio da velocidade angular de modo que seja fornecido torque de amortecimento ao sistema. O sinal estabilizante gerado é adicionado a uma entrada do regulador automático de tensão do gerador. A estrutura é ilustrada na Figura 3:

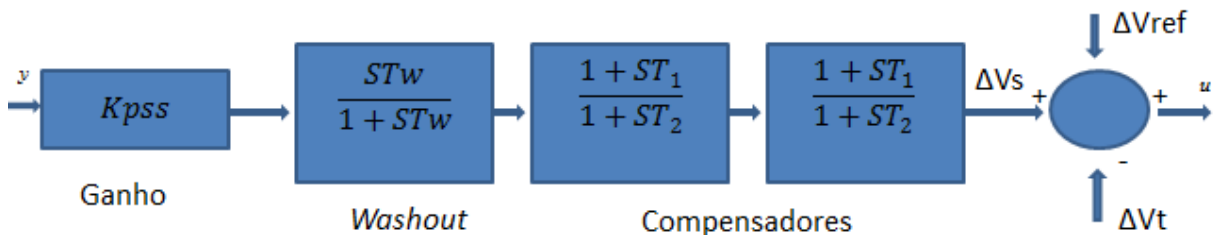


Figura 3 - Modelo de projeto para PSS
Fonte: Autoria Própria.

A estrutura do controlador apresentado acima e utilizado no trabalho é composta por um ganho de realimentação, expresso pelo bloco com a variável K_{pss} que baseada em valores práticos de indústria, varia em uma faixa de valores entre $0 < K_{pss} < 20$, um bloco de *Washout*, variável em um intervalo de $0 < T_w < 10$ e responsável pela eliminação da ação de controle durante o regime permanente, e por fim os blocos compensadores com as variáveis T_1 e T_2 utilizados para compensar o atraso de fase que ocorre entre a aplicação da entrada u e o efeito produzido pela mesma no balanço de potência.

Tais parâmetros presentes na estrutura do controlador podem ser substituídos através de uma manipulação matemática sendo que $\beta = \frac{T_1}{T_2}$, $\gamma = \frac{1}{T_2}$ e $\alpha = \frac{1}{T_w}$. Nas equações de substituição apresentadas, T_1 e T_2 são constantes de tempo, assim como T_w que por questões de projeto possui valor fixo de $T_w = 10$.

Uma vez que a máxima compensação de fase factível para cada bloco do controlador é definida pela indústria como sendo inferior a 70° , a variação de valores factíveis para o parâmetro β foi definida entre $0 < \beta < 30$. Já o parâmetro γ foi definido como sendo $9 < \gamma < 50$.

É importante ressaltar neste ponto do trabalho, que tais parâmetros β , γ , α além do ganho K_{pss} são cruciais para a realização do trabalho, ou seja, o algoritmo proposto no capítulo 3 terá como objetivo encontrar valores efetivos desses parâmetros para uma sintonia robusta dos controladores. Os parâmetros encontrados servirão para a definição das constantes de tempo T_1 e T_2 que serão utilizadas nos blocos compensadores de fase.

Tendo em vista o diagrama de blocos apresentado, pode-se dizer que o grande problema na sintonia de controladores PSS é encontrar parâmetros em uma faixa de valores coerentes para os blocos dos compensadores de fase, *Washout* e ganho de realimentação a fim de fornecer uma compensação adequada. Tal problema é tratado ao longo do trabalho e agravado pelo fato de a sintonia ocorrer de forma simultânea em pontos diferentes de operação do sistema.

Na maioria dos casos, para fins de projeto, a análise e controle de estabilidade são realizados por meio de modelos lineares, como já dito anteriormente. Neste caso, os controladores de amortecimento utilizados neste trabalho possuem estrutura de realimentação de saída descrita por:

$$\dot{x}_c(t) = A_c x_c(t) + B_c \dot{y}(t) \quad (2.7)$$

$$u(t) = C_c x_c(t) \quad (2.8)$$

Onde $x_c \in \mathbb{R}^m$ é o vetor que reflete o comportamento das variáveis de estado A_c , B_c e C_c dos controladores. Tais matrizes possuem a configuração representada a seguir:

$$A_c = \begin{bmatrix} -\alpha & 0 & 0 \\ \gamma - \beta\alpha & -\gamma & 0 \\ \beta\gamma - \beta^2\alpha & \gamma - \beta\gamma & -\gamma \end{bmatrix}, B_c = \begin{bmatrix} K_{pss} \\ \beta K_{pss} \\ \beta^2 K_{pss} \end{bmatrix} \text{ e } C_c = [0 \ 0 \ 1]$$

Para um número n que representa o número de controladores utilizados no projeto de sintonia automática, as matrizes A_c , B_c , C_c apresentadas anteriormente assumirão um novo formato, de forma a conter informações de um conjunto total de todos os controladores utilizados, como mostrado a seguir:

$$A_c = \begin{pmatrix} A_{c1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & A_{cn} \end{pmatrix}; B_c = \begin{pmatrix} B_{c1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & B_{cn} \end{pmatrix}; C_c = \begin{pmatrix} C_{c1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & C_{cn} \end{pmatrix}$$

Além disso, realizando um rearranjo entre as equações (2.5) e (2.7), tem-se o sistema em malha fechada descrito em espaços de estado por:

$$\tilde{x} = \begin{bmatrix} x \\ x_c \end{bmatrix} \rightarrow \dot{\tilde{x}} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_c \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} A_j & B_j C_c \\ B_c C_j A_j & A_c + B_c C_j B_j C_c \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Onde as matrizes A , B e C , com $j=1, \dots, L$ e L representando a quantidade de pontos de operação utilizados no projeto, são obtidas pela linearização do modelo multimáquinas para uma condição de operação específica, $\tilde{x}(t) \in \mathbb{R}^{n+m}$ é um vetor que contém os estados do sistema do controlador e A_c , B_c e C_c são variáveis matriciais a serem determinadas pela técnica de controle adotada.

Por fim, o modelo matemático matricial do projeto de sintonia dos controladores para j pontos de operação terá o formato expresso em (2.10):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_j \\ x_{cj} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} A_j & B_j C_c \\ B_c C_j A_j & A_c + B_c C_j B_j C_c \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x_j \\ x_{cj} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Sendo assim, a partir das matrizes variáveis (A_c , B_c e C_c), a proposta do trabalho é utilizar a teoria de algoritmos evolutivos como técnica de otimização para encontrar um conjunto de parâmetros destas matrizes que satisfaça uma condição pré-definida pelo projetista, que será imposta como condição de parada.

Tendo em vista o processo de formulação do problema de sintonia de controladores apresentado neste capítulo, e levando em conta as equações descritas no mesmo no projeto de controladores, pode-se ter uma clara noção a respeito da obtenção das matrizes dos controladores inseridos no sistema, com seus respectivos parâmetros que serão encontrados posteriormente.

3 ALGORITMOS EVOLUTIVOS

Ramos distintos de pesquisa desenvolveram técnicas computacionais que construíram os chamados Algoritmos Evolutivos (AE's).

Neste tópico, será apresentado fundamentos básicos a respeito do mesmo, tais fundamentos servirão de ponto de partida para o entendimento de processos de otimização envolvendo AG's.

Segundo Castoldi (2011) os Algoritmos Evolutivos são métodos de otimização e busca inspirados nos princípios da teoria de Darwin, ou seja, são baseados em princípios que são encontrados na evolução de sistemas biológicos.

Assim, podem-se listar como principais componentes desse sistema biológico evolutivo (ARCISZEWSKI, 2001):

- População de Indivíduos: uma ou mais populações concorrem por recursos limitados;
- Aptidão ou *fitness*: Reflete a capacidade, isto é, a habilidade de um indivíduo para sobreviver ou se reproduzir no meio onde vive;
- A noção de mudanças dinâmicas nas populações devido à geração e destruição dos indivíduos;
- Conceitos de variabilidade e hereditariedade, isto é, os novos indivíduos possuem muitas das características de seus pais.

Em problemas de otimização, onde as técnicas de algoritmos evolutivos são bastante difundidas, a dimensão do problema em questão é representada através de um cromossomo composto por uma quantidade específica de genes, sendo cada gene um parâmetro a ser determinado pela técnica utilizada.

Os AE's trabalham sobre um ou mais cromossomos, a fim de gerar novas soluções chamadas descendentes. Os operadores que trabalham sobre cromossomos, chamados operadores de reprodução, são a recombinação e a mutação (CASTOLDI, 2011).

Os conceitos de recombinação e mutação, assim como a seleção natural, derivam-se da teoria neodarwinista, e são fatores evolutivos a serem considerados durante todo o processo. Tais fatores citados serão formalizados a seguir (AMABIS, 1985):

- Recombinação: para o fenômeno que possibilita a recombinação, dá-se o nome de reprodução assexuada. Neste processo, genes de diferentes cromossomos são trocados entre si, gerando assim uma geração posterior com maior variabilidade genética. A recombinação, geralmente é aplicada a um par de cromossomos, e os indivíduos selecionados para o processo são os chamados pais.
- Mutação: a origem da variabilidade genética é a mutação, processo pelo qual o gene sofre alterações em sua estrutura. Tais alterações são modificadas na sequência de base de seu DNA, o que altera a sequência de genes do cromossomo. A mutação é aplicada a um simples cromossomo, modificando-o aleatoriamente.
- Seleção: trata-se da característica que um indivíduo possui de sobreviver e se adaptar ao meio em que vive. Os indivíduos mais aptos a sobreviverem são aqueles que, graças à variabilidade genética herdaram a combinação gênica mais adaptada para determinadas condições naturais.

Ao processo de iteração de um algoritmo evolutivo dá-se o nome de geração. Durante esse processo, os indivíduos da população são selecionados e recombinados e/ou mutados gerando descendentes. Devido à criação de novos descendentes o tamanho da população cresce, fato este pelo qual pode ser controlada através de um mecanismo de seleção.

Tendo em vista as informações apresentadas ao longo deste tópico, pode-se listar de maneira resumida o funcionamento básico de um algoritmo evolutivo:

- Como ponto de partida é criada uma população inicial com soluções aleatórias pré-definidas em um intervalo de valores estipulados pelo projetista;
- A partir da população atual, é gerada uma nova população. Para que essa nova população seja gerada, criando assim novos indivíduos, é necessária a atuação dos operadores genéticos. Esta tarefa é realizada aplicando-se o operador de cruzamento e/ou mutação nos indivíduos com melhor *fitness*, que são escolhidos através de um processo chamado seleção;
- É retornado ao segundo tópico até que a condição de parada seja atendida.

Na sequência será apresentada uma descrição mais detalhada sobre algoritmos evolutivos, dando uma ênfase específica aos algoritmos genéticos (AG's).

3.1 ALGORITMO GENÉTICO

O tópico que será descrito a seguir, tem por finalidade expor os principais aspectos relacionados ao algoritmo utilizado na proposta, apresentando fundamentos teóricos que servirão de base para uma melhor compreensão da aplicação do mesmo no problema de sintonia de controladores.

A computação evolutiva é uma área de pesquisa que ao longo dos anos tem se expandido de forma rápida e crescente (REZENDE, 2003). Tal área de pesquisa originou-se de várias frentes de estudo, cuja interação produziu os algoritmos evolutivos atuais. Dentre esses, os algoritmos genéticos são os mais conhecidos por se tratar de uma técnica evolutiva universal muito utilizada no âmbito da inteligência artificial (REZENDE, 2003).

Os algoritmos genéticos (AG's) foram propostos por John Henry Holland, cientista e professor da Universidade de Michigan, e seus alunos na década de 1970 (HOLLAND, 1992). Holland estudou a evolução natural considerando esta um processo robusto, simples e poderoso, que poderia ser adaptado para obtenção de soluções computacionais eficientes para problemas de otimização (REZENDE, 2003).

O conceito de robustez, como já dito anteriormente, relaciona-se ao fato de os AG's, independentemente das escolhas dos parâmetros iniciais, em geral, produzirem soluções de qualidade (GOLDBERG, 1989, 2002). Tal algoritmo trabalha com uma população de indivíduos que durante o processo de evolução são submetidos aos procedimentos de seleção e reprodução. Deste modo o algoritmo consegue aproveitar as melhores soluções e ao mesmo tempo explorar o espaço de busca (CASTOLDI, 2011).

O princípio básico do AG é baseado na teoria evolutiva como já mencionado anteriormente e trata-se de uma população de indivíduos que sofre pressões do ambiente de forma a desencadear um processo de seleção natural. Dado o processo de seleção natural, um conjunto de soluções chamados indivíduos ou candidatos, são formados e testados diante do ambiente, a fim de se medir sua qualidade de adaptação através dos chamados *fitness*. O *fitness*, representa a aptidão do indivíduo para resolução do problema em questão ou, em outras palavras, o quão bom é este indivíduo (EIBEN e SMITH, 2003).

Caso um dos indivíduos da população inicial possua um *fitness* satisfatório, o processo é concluído. Caso contrário, a partir da população inicial, algumas das supostas melhores soluções são selecionadas (operador de seleção) para originarem uma nova população, chamada população intermediária (EIBEN e SMITH, 2003). A população intermediária deverá sofrer intervenção de dois outros operadores genéticos: o cruzamento e a mutação.

3.1.1 Operadores Genéticos

Nesta seção serão abordados com ênfase os principais aspectos relacionados aos operadores genéticos utilizados tanto em algoritmos evolutivos de maneira geral, quanto no algoritmo proposto no trabalho.

Seleção

A seleção pode ser considerada como um operador de partida do processo, cujo objetivo é escolher, podendo ser de maneira aleatória, um ou mais indivíduos para a próxima população do processo evolutivo. Nesta etapa os indivíduos com o melhor grau de *fitness* tem uma maior probabilidade de serem escolhidos. Segundo Gabriel (2008) existe, na literatura, uma grande variedade de estratégias de seleção cujas mais utilizadas são a seleção por torneio, roleta e *ranking*.

Durante a seleção por torneio, são realizadas várias competições entre duas ou mais soluções, e a melhor é escolhida. De maneira diferente, no método da roleta os pais são selecionados com probabilidade proporcional ao seu *fitness*. Já no método por *ranking*, são ordenadas as soluções de acordo com o seu valor de *fitness*, sendo que sua ordenação é realizada de maneira decrescente em função do grau de eficiência da solução.

Cruzamento

O operador de cruzamento gera novas soluções descendentes a partir das soluções anteriores, ou progenitoras. De maneira básica, dois indivíduos são sorteados de forma aleatória e alguns de seus genes ou somente um deles são trocados entre si. Os dois indivíduos originais são conhecidos como pais e os dois

novos como filhos. Este processo se repete dentro da população intermediária por diversas vezes, de acordo com a taxa de cruzamento informada pelo projetista (EIBEN e SMITH, 2003). Existem diversas variações desse operador, podendo as mesmas serem adaptadas de acordo com o problema.

A Figura 4 a seguir representa um processo de recombinação genérico expresso através de números binários, no qual um dos genes de duas soluções quaisquer são trocados entre si, originando assim dois novos indivíduos com características herdadas dos cromossomos progenitores:



Figura 4 – Exemplo de recombinação
Fonte: Autoria Própria.

Mutação

Segundo Castoldi (2011) o operador de mutação gera uma determinada “perturbação” em um determinado número de soluções, isto é, gera pequenas alterações genéticas em um determinado número de soluções, com o objetivo de explorar o espaço de busca e manter a diversidade.

Por este motivo, o algoritmo genético vem sendo bastante utilizado em problemas de otimização no qual se faz necessário uma boa busca global de soluções candidatas. Desta forma, o algoritmo tende, em alguns casos, a não ter uma convergência rápida, evitando sua estabilização em regiões chamadas de mínimos locais. No entanto, tal “perturbação” mencionada acima não deve ser elevada, pois se assim fosse, configuraria uma busca aleatória.

A quantidade de indivíduos mutados depende da taxa de mutação adotada pelo projetista (EIBEN e SMITH, 2003). A Figura 5 a seguir representa um processo de mutação genérico expresso através de números binários no qual um dos genes de uma solução descendente qualquer originado a partir do cruzamento sofre o processo de mutação:

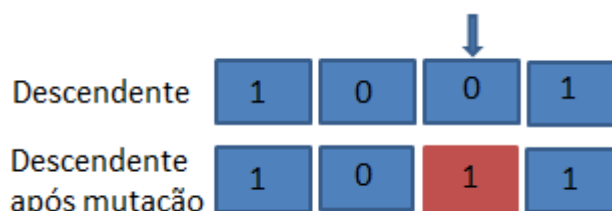


Figura 5 – Exemplo de mutação
Fonte: Autoria Própria.

Elitismo

Durante o processo de transição entre os operadores de cruzamento e mutação, existe um grande risco de se perder os melhores indivíduos até então encontrados pelo algoritmo. Desta forma, o objetivo do operador de elitismo é preservar os melhores indivíduos para futuras gerações que possam ocorrer sem que eles se percam durante o processo.

Sendo assim, caso um dos indivíduos ou candidatos gerados durante o processo de formação das populações intermediárias atenda ao critério de parada pré-estabelecido pelo projetista, o programa é finalizado. No entanto, se nenhuma solução satisfizer ao critério de parada ao final do processo, esta população intermediária passará pelos operadores genéticos, ou seja, se tornará a geração posterior (EIBEN e SMITH, 2003).

3.2 ALGORITMO PROPOSTO

Nesta etapa do trabalho, utilizou-se de uma estrutura fixa de compensação de fase, composta por um ganho de entrada K_{pss} ou simplesmente K , e dois blocos compensadores ambos com parâmetros idênticos, como representado anteriormente pela Figura 3.

Tendo em vista a descrição do sistema controlado em malha fechada representado na forma matricial descrita na equação (2.9), nota-se que as matrizes A_c , B_c e C_c são as variáveis a serem controladas. A proposta do trabalho é utilizar a teoria de algoritmo genético para encontrar um conjunto de parâmetros dessas matrizes que satisfaça uma condição pré-estabelecida pelo projetista, representado pela condição de parada.

A metodologia para a sintonia de parâmetros dos controladores considera várias condições do sistema de potência de uma só vez. Neste trabalho é proposta uma forma de modelagem em que cada cromossomo represente o número de controladores com as variáveis de decisão β , γ e K , de cada controlador (exibidos posteriormente). Portanto é necessária a codificação para os cromossomos de modo que cada gene represente um destes parâmetros (JUNIOR, 2012). A Figura 6 apresenta a representação do cromossomo utilizada neste trabalho:

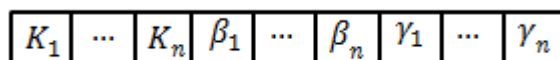


Figura 6 - Exemplo de cromossomo de parâmetros utilizado
Fonte: Autoria Própria.

O parâmetro α não é considerado na busca realizada pelo algoritmo genético, uma vez que seu valor é fixo e determinado pelo projetista. Tal parâmetro é relativo à constante de tempo do bloco de *Washout* do controlador e foi definido anteriormente no tópico 2.2.1 deste trabalho. Assim o algoritmo evolutivo deverá encontrar valores adequados para os parâmetros estabelecidos em cada um dos genes do cromossomo, tendo em vista que o número de controladores necessários para a sintonia dos sistemas de potência é representado pela letra n .

Outro fator a ser mencionado neste ponto do trabalho, é o fato de que para a metodologia de construção do algoritmo proposto, optou-se pela utilização do modelo clássico de algoritmo genético, presente em muitas das literaturas utilizadas como fonte de pesquisa.

A seguir será apresentada a didática aplicada a partir dos operadores genéticos já citados neste capítulo na busca por parâmetros factíveis na solução do problema de sintonia de controladores PSS.

Seleção

O trabalho proposto utiliza como método de seleção o torneio de 3. Como ponto de partida é gerado, de maneira aleatória, uma população inicial e em seguida, os indivíduos passam por um processo de torneio para serem copiados para uma população intermediária. O torneio de 3, seleciona três candidatos aleatoriamente na população atual e o melhor indivíduo, baseado em sua função de *fitness*, é copiado para uma população intermediária. Assim a população intermediária é gerada a partir de repetidos processos do torneio até que o número de indivíduos da população intermediária atinja o mesmo valor da população inicial. Deve-se salientar que as novas populações serão geradas a partir dos operadores genéticos, e não por meio de um processo aleatório.

Cruzamento

Segundo Goldberg (1989, 2002) o processo de cruzamento procura combinar características entre os indivíduos, isto é, combina características entre os cromossomos presentes na população. Para isso são selecionados dois cromossomos, chamados cromossomos pais.

Basicamente, para cada duas das soluções progenitoras selecionadas corta-se o seu vetor de símbolos em uma posição aleatória, produzindo duas cabeças e duas caudas. Em seguida as caudas são trocadas, gerando dois novos indivíduos, como mostrado pela Figura 7 em uma representação através de números binários:

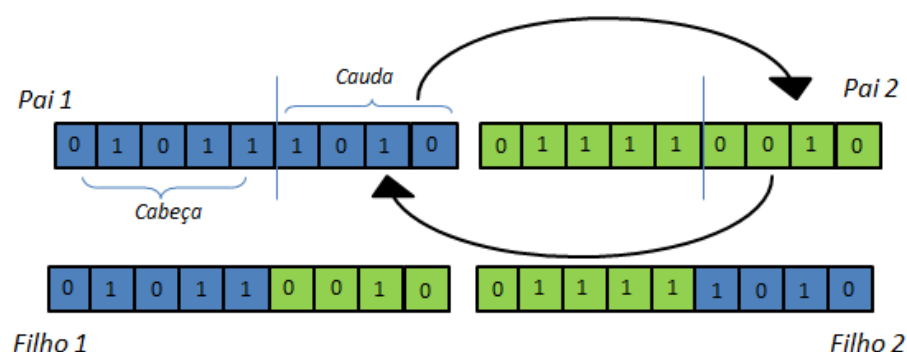


Figura 7 – Modelo de cruzamento utilizado
Fonte: Autoria Própria.

Mutação

O processo de mutação é realizado em genes que representem um dos controladores selecionados aleatoriamente pelo algoritmo. Sendo assim, após a seleção do controlador a sofrer mutação o cromossomo selecionado tem um de seus genes alterados dentro de uma faixa pré-estabelecida pelo projetista. Tal gene selecionado para a mutação deverá ser um dos parâmetros β , γ e K dos controladores.

É importante ressaltar, que durante este processo, somente um dos controladores sofrerá mutação, sendo que os demais seguirão inalterados. Além disso, o projetista define ainda a taxa de mutação, isto é, a quantidade de indivíduos dentro da população que sofrem o processo de mutação.

Valor de *fitness*

O valor de *fitness*, representa a aptidão do indivíduo selecionado para a solução do problema de sintonia atendendo ao critério de parada estipulado pelo projetista. Conforme dito anteriormente, neste trabalho, todos os pontos de operação considerados no projeto serão analisados simultaneamente. Tais pontos de operação representam mudanças topológicas geradas a partir de perdas simuladas de linhas de transmissão em um sistema elétrico teste, conforme segue o critério N-1 do ONS.

Assim, cada cromossomo será analisado em todos os pontos de operação e o seu valor de *fitness* será obtido de acordo com o menor amortecimento fornecido pelo cromossomo entre todos os pontos de operação analisados.

Torna-se claro que o problema de sintonia dos parâmetros dos controladores consiste em encontrar um conjunto de matrizes A_c , B_c e C_c que garanta que as matrizes A_j , sendo j o número de pontos de operação considerados, cumpra algum critério de desempenho desejado. O critério que é mais utilizado na indústria, e também utilizado neste trabalho, afirma que o desempenho do sistema não linear em malha fechada pode ser considerado satisfatório se todos os autovalores de todas as matrizes A_j com $j=1\dots,71$. apresentarem uma taxa de amortecimento maior que um valor mínimo estipulado, no caso do trabalho, um amortecimento mínimo de 5%.

O objetivo da sintonia proposta prevê que os controladores devem fornecer um amortecimento satisfatório para todos os autovalores das matrizes A_j . Portanto para calcular o valor de *fitness* desejado a seguinte função objetivo foi utilizada:

$$f(K_n, \beta_n, \gamma_n) = -\min(\min(\text{amortecimento}(A_j))) \quad (2.11)$$

Onde β , γ e K são os parâmetros a serem encontrados pelo algoritmo genético, $n=1\dots,16$. e representa o número de controladores utilizados na sintonia e $j=1\dots,71$. e representa o número de pontos de operação utilizados no projeto.

A função (2.11) apresentada encontrará o menor amortecimento entre todas as j matrizes que representam os pontos de operação considerados no projeto. Assim, a cada iteração do algoritmo genético, os menores valores desta função objetivo serão usados como referência.

Segundo Junior (2012) o deslocamento ao longo da minimização da equação (2.11) corresponde à maximização do amortecimento do modo menos amortecido (o sinal negativo na função objetivo é devido a esta minimização).

É importante ressaltar que o primeiro \min na função objetivo encontra o amortecimento mínimo de cada autovalor da matriz de malha fechada A_j e o segundo determina o menor amortecimento entre todos os encontrados pelo primeiro \min .

Enquanto a condição de parada estabelecida pelo projetista não for atingido, neste caso um amortecimento mínimo de 5% para o modo menos amortecido dentre todos os pontos considerados, o algoritmo proposto segue aplicando-se novamente o processo de seleção e posteriormente cruzamento e mutação. Tal processo evolutivo pode ser ilustrado de maneira resumida através do fluxograma representado pela Figura 8 a seguir:

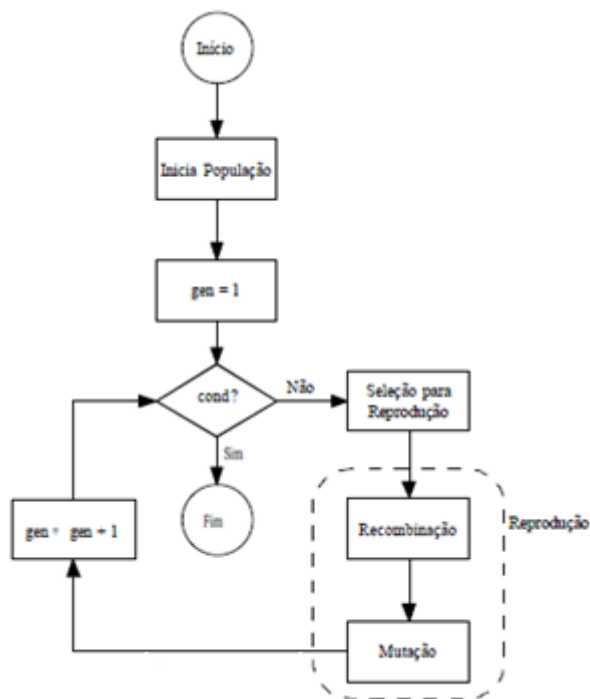


Figura 8 - Fluxograma do algoritmo genético proposto
Fonte: (GABRIEL; DELBEM, 2008 p.10).

Por fim, pode-se dizer que o algoritmo genético proposto é iniciado e executado até que o mesmo encontre um conjunto de parâmetros factível para os controladores PSS's que atenda a condição de parada estipulada, como tratado anteriormente.

No capítulo seguinte o algoritmo é mais explorado e os resultados da aplicação deste no sistema *New England-New York* são exibidos.

4 RESULTADOS OBTIDOS

Este capítulo tem por objetivo, apresentar os resultados obtidos com as simulações realizadas tendo como base a metodologia apresentada no capítulo anterior. Como mencionado anteriormente, este trabalho apresenta uma alternativa eficaz e confiável para a solução de problemas de sintonia de controladores em sistemas de potência. Para isso, optou-se pela construção de um algoritmo evolutivo capaz de fornecer parâmetros dos controladores robustos o suficiente para atender as diversas mudanças topológicas de um sistema teste.

O sistema teste, como já foi mencionado no capítulo 1, trata-se do sistema interligado *New England-New York, benchmark* do *IEEE*, e constitui-se de 68 barras e 16 geradores. A Figura 9 ilustra o sistema teste utilizado, sinalizando o que ocorre no mesmo com a retirada de operação de cada linha de transmissão:

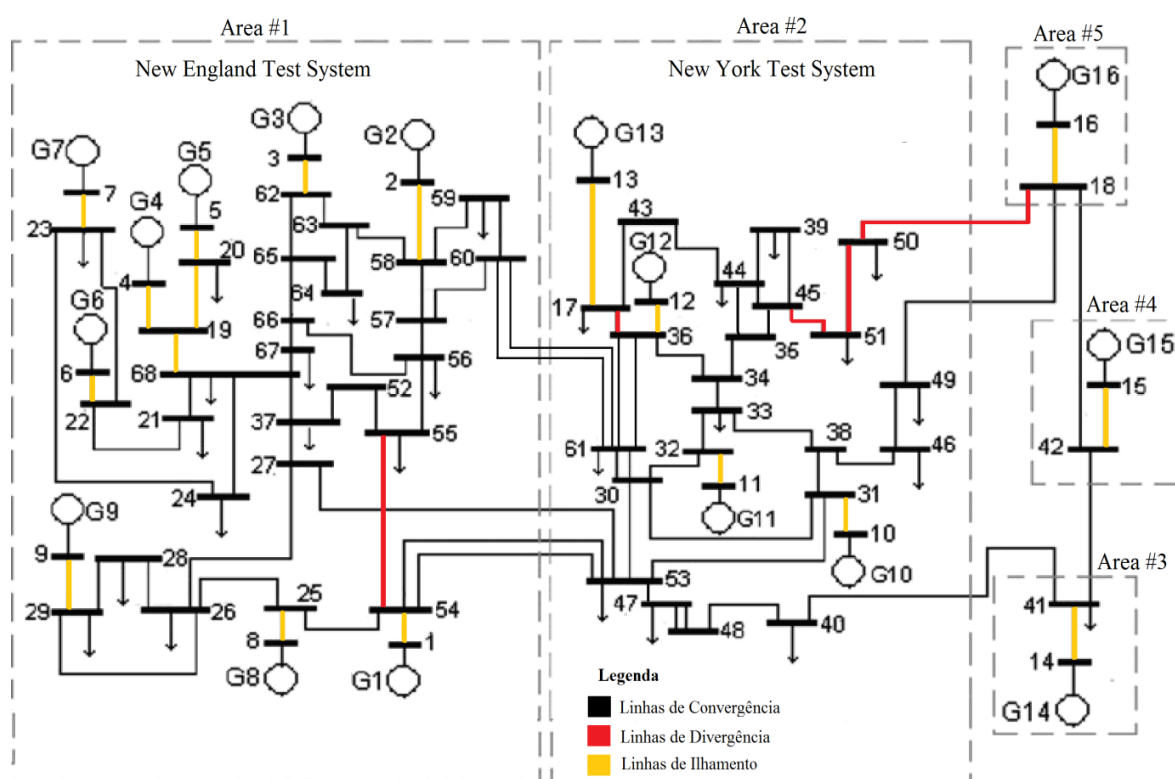


Figura 9 - New England/New York – linhas
Fonte: IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers).

As linhas representadas em preto são linhas de transmissão que mesmo se forem retiradas, fazem com que o sistema encontre um novo ponto de operação (fluxo de carga convergente). As linhas representadas em vermelho são linhas de transmissão que quando removidas do sistema, fazem com que o sistema não encontre um novo ponto de operação (fluxo de carga divergente). Já as linhas representadas em amarelo, são linhas de ilhamento, ou seja, não podem ser removidas do sistema, pois sendo assim os geradores ficariam isolados do sistema sem a possibilidade de fornecer potência ao mesmo. Para criar uma situação de controle mais difícil, as linhas que quando retiradas resultavam em divergência no fluxo de carga foram substituídas por duas linhas paralelas, sendo o equivalente entre estas de mesmo valor da linha única (valores de impedância e resistência foram duplicados e o valor de susceptância dividido pela metade). Desta forma, apenas uma das linhas é retirada de operação e, neste caso, o sistema encontra um novo ponto de operação (o fluxo de carga fica convergente). A Figura 10 ilustra a hipótese acima:

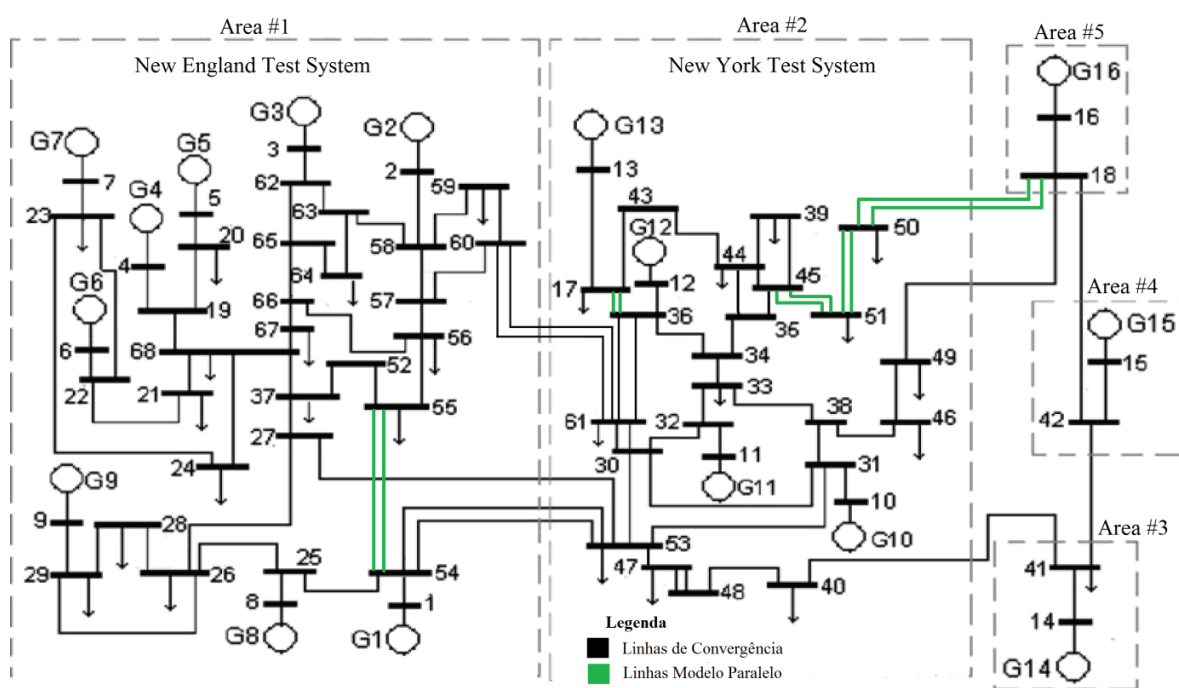


Figura 10 - New England/New York – adaptação
Fonte: IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers).

Sendo assim, setenta e um pontos de operação são considerados na sintonia, sendo os mesmos obtidos a partir da remoção das linhas de transmissão entre todas as barras, até mesmo as que foram substituídas pelo modelo paralelo,

exceto para as linhas deilhamento que não poderão ser removidas em hipótese alguma. Pode-se dizer que os pontos selecionados no projeto são pontos distribuídos ao longo de uma faixa de variação, portanto encontrar uma sintonia para os controladores utilizados torna-se uma tarefa complicada. É importante salientar que as condições de operação utilizadas no projeto foram implementadas e geradas pelo *software* ANAREDE do CEPEL, assim como para as análises e implementações lineares utilizou-se o *software* PACDYN do CEPEL.

4.1 SINTONIA MANUAL DOS PSS's

Neste tópico será apresentado o resultado de uma sintonia realizada de forma manual para que sirva como base de comparação com o processo de sintonia automática realizada pelo algoritmo proposto no trabalho.

A fim de se executar a sintonia nos pontos de operação, são listados na Tabela 1 cinco pontos mais críticos identificados dentre os setenta e um apresentados pelas mudanças topológicas do sistema teste. Tal escolha está baseada na porcentagem de amortecimento ou do inglês *damping* apresentado pelo modo menos amortecido dos mesmos. A nomenclatura utilizada para representar o ponto de operação na Tabela 1 está baseada na remoção da linha entre as barras, por exemplo: S2526, significa que o sistema está sem a linha de transmissão que liga o barramento 25 ao 26. A Tabela 1 abaixo lista os pontos mencionados acima e a porcentagem de amortecimento do modo menos amortecido de cada ponto:

Tabela 1 - Pontos críticos do sistema teste

PONTO DE OPERAÇÃO	AMORTECIMENTO (%)
S2829	- 8,9980
S2629	- 7,9998
S2627	- 7,9517
S2628	- 7,7389
S2526	- 7,2033

Fonte: Autoria Própria.

Uma grande vantagem em se utilizar como referência alguns dos pontos considerados mais críticos do sistema é que os mesmos fornecem um bom panorama de amortecimento para os outros modos utilizados no projeto.

Por outro lado, uma grande desvantagem de se utilizar o método de sintonia manual é o fato de que após o projeto de sintonia dos controladores, a mesma, deve ser testada para cada ponto de operação de maneira a validar a efetividade da sintonia. Já a sintonia automática se comparada a sintonia manual, considera todos os pontos de uma só vez na etapa do projeto, reduzindo assim o tempo gasto pelo projetista envolvido.

Em todos os casos, a sintonia dos controladores do tipo PSS clássicos é feita baseada na análise de resíduos da função de transferência, sendo efetiva no amortecimento de todos os modos locais presentes no sistema em todos os pontos de operação. Sendo assim foram adicionados controladores em locais estratégicos e a sintonia foi feita de forma manual, levando em consideração o ângulo de fase e a parte imaginária do pólo para o cálculo das constantes de tempo T_1 e T_2 que derivam os parâmetros β , γ e K que serão valores de busca também na sintonia automática.

Ao longo da sintonia manual, pode-se observar que se atingiu o valor estipulado de amortecimento mínimo de 5% com a adição de oito controladores PSS. Porém o tempo de sintonia, levando em conta o cálculo das constantes de tempo e as análises realizadas no *software* PACDYN do CEPEL foi consideravelmente elevado e aproximado aos 14400s, o que se remete a ideia de utilização de uma alternativa de sintonia automática, como proposto no trabalho.

Levando em consideração a inexperiência do projetista para a realização da sintonia, pode-se dizer que tal tempo de sintonia apresentado pode ser reduzido quando realizado por um projetista de maior experiência na área. Além disso, deve-se ressaltar que a representação do controlador que será apresentada na Tabela 2, por exemplo: PSS1(9), representa o controlador um adicionado ao gerador nove do sistema. Para a sintonia realizada, foram utilizados dois blocos de compensação iguais no qual seus parâmetros são indicados na Tabela 2 a seguir:

Tabela 2 - Parâmetros encontrados pela sintonia manual

CONTROLADOR	GANHO (K)	T_1	T_2
PSS1(9)	6,00	0,2918	0,0965
PSS2(2)	8,00	0,3047	0,0665
PSS3(16)	8,00	0,4144	0,2094
PSS4(12)	10,00	0,3329	0,0579
PSS5(3)	11,00	0,2414	0,0763
PSS6(11)	6,00	0,2033	0,0354
PSS7(10)	10,00	0,3014	0,0439
PSS8(5)	12,00	0,3032	0,0541

Fonte: Aatoria Própria.

Na Tabela 2 nota-se que os valores de ganho K apresentam valores reais inteiros entre $0 < K < 20$. Portanto, bastando apenas um ajuste fino de ganho dos controladores é possível se obter um aumento significativo no amortecimento do sistema. A Tabela 3 mostra o amortecimento nos pontos de operação analisados após a sintonia manual dos PSS, s:

Tabela 3 - Amortecimento após sintonia manual

PONTO DE OPERAÇÃO	AMORTECIMENTO (%)
S2829	5,7590
S2629	5,7219
S2627	5,2621
S2628	5,6798
S2526	5,4328

Fonte: Aatoria Própria.

Como visto na Tabela 3 com a sintonia dada pela Tabela 2, os pontos antes mal amortecidos possuem agora um amortecimento satisfatório em relação ao requerido pelo projetista (5%).

Por fim, para validar os resultados obtidos com a análise linear são realizadas duas simulações não lineares (utilizando o *software* ANATEM do CEPEL) em dois pontos de operação distintos, sendo um considerado na etapa do projeto e o outro não. O ponto considerado no projeto utilizado na análise não linear será o ponto crítico S2829, caracterizado pela remoção da linha entre os barramentos 28 e 29. Já o ponto não considerado no projeto que será utilizado na análise não linear será o ponto S5657/S6465, caracterizado pela remoção das linhas entre o barramento 56 e 57 e a linha 64 e 65. Para tal análise dos dois pontos citados, é aplicada uma falta no meio da linha entre as barras 47 e 48 no instante 2s e removido após 16ms. A Figura 11 ilustra os fluxos de potência para o ponto S5657/S6465 em um intervalo de simulação de 0 á 20s na linha entre as barras 18 e 49 e 27 e 53 (ponto muito próximo a falta aplicada):

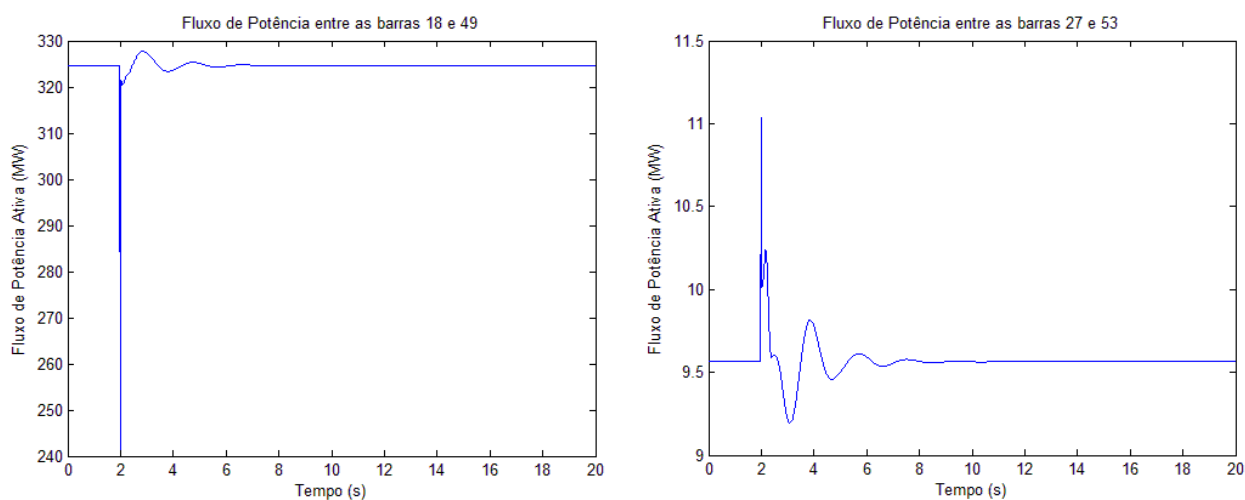


Figura 11 - Fluxo de potência nas linhas entre as barras 18 e 49 e 27 e 53 no ponto de operação S5657/S6465, considerando a inserção dos controladores sintonizados manualmente.

Fonte: Autoria Própria.

Já a Figura 12 ilustra as frequências apresentadas por dois dos dezesseis geradores no ponto S5657/S6465 após a inserção dos controladores PSS's através do processo de sintonia manual:

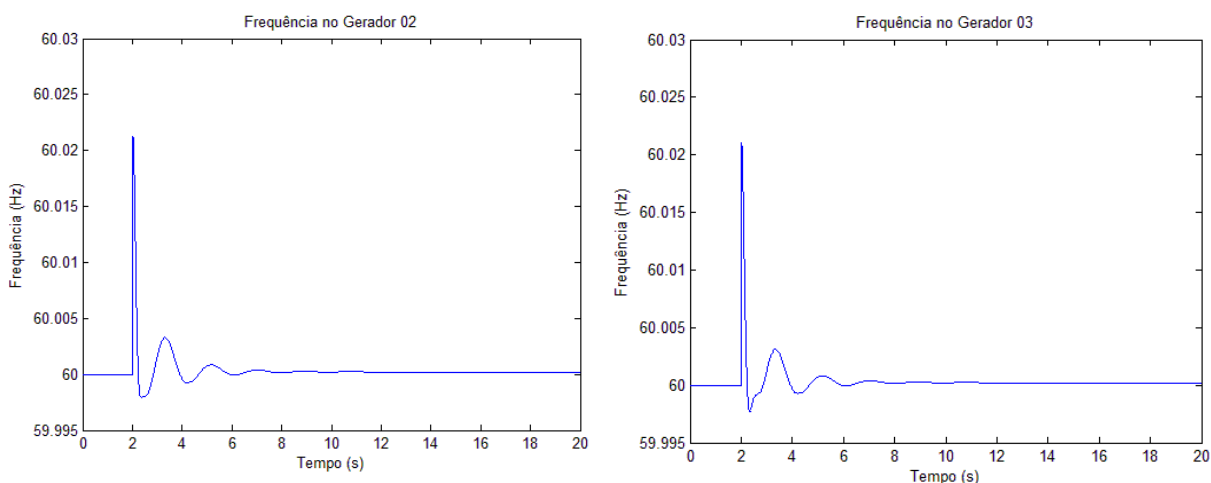


Figura 12 - Frequência dos geradores 2 e 3 no ponto de operação S5657/S6465, considerando a inserção dos controladores sintonizados manualmente.
Fonte: Autoria Própria.

A Figura 13 apresentada a seguir ilustra os fluxos de potência para o ponto S2829 em um intervalo de simulação de 0 á 20s na linha entre as barras 18 e 49 e 27 e 53:

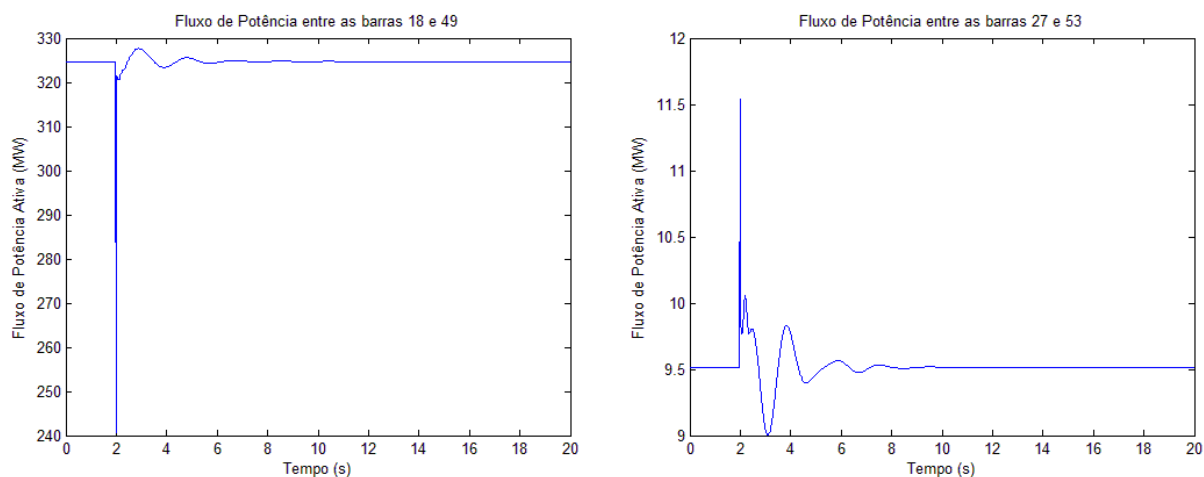
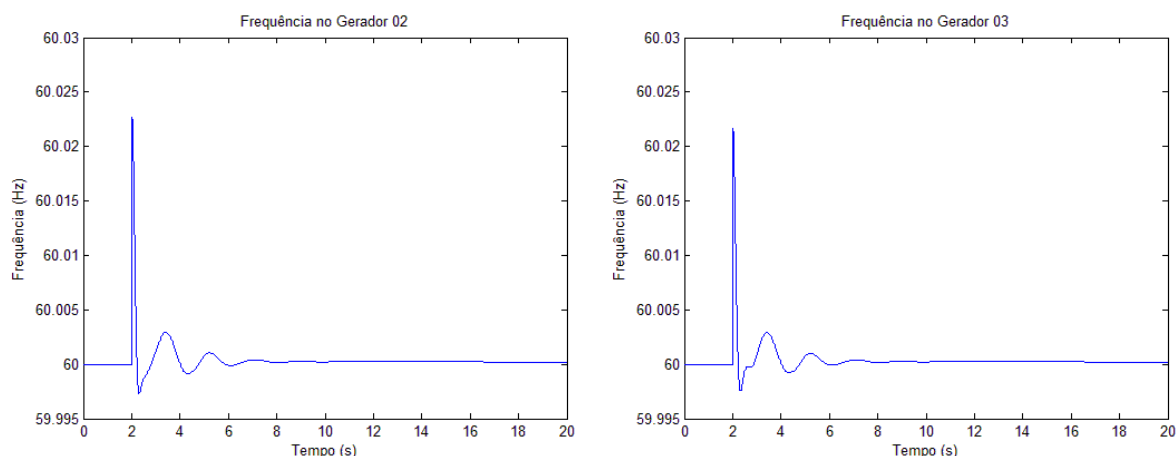


Figura 13 - Fluxo de potência nas linhas entre as barras 18 e 49 e 27 e 53 no ponto de operação S2829, considerando a inserção dos controladores sintonizados manualmente.
Fonte: Autoria Própria.

Já a Figura 14 ilustra as frequências apresentadas por dois dos dezesseis geradores no ponto S2829 após a inserção dos controladores PSS's através do processo de sintonia manual:



**Figura 14 - Frequência dos geradores 2 e 3 no ponto de operação S2829, considerando a inserção dos controladores sintonizados manualmente.
Fonte: Autoria Própria.**

Após a apresentação dos gráficos, e tendo em vista os pontos críticos listados no trabalho pode-se observar que em um primeiro momento as análises lineares confirmaram que as fases dos controladores não sofrem grandes alterações quando bem sintonizadas para diferentes pontos de operação, ou seja, os oito controladores sintonizados manualmente atingiram o objetivo estipulado pelo projetista fornecendo um bom amortecimento ao sistema em todos os pontos utilizados no trabalho.

Além disso, os pontos estipulados para a análise não linear também foram fatores cruciais para a validação da sintonia encontrada manualmente, uma vez que mesmo com a utilização de um ponto não presente no projeto a sintonia se demonstrou robusta tornando o sistema estável para ambos os casos considerados na análise.

Sendo assim, com base em tais informações pode-se dizer que a sintonia realizada manualmente foi eficaz, fornecendo o amortecimento estipulado no projeto em ambas às análises. No entanto, o grande aspecto negativo a ser levado em consideração neste caso é o tempo relativamente grande gasto pelo projetista para tal sintonia, fato este essencial para a ideia de utilização do método de sintonia automática que será tratado no tópico a seguir.

4.2 SINTONIA AUTOMÁTICA DOS PSS,s

Neste tópico, o algoritmo evolutivo baseado em AG, é utilizado para sintonizar os parâmetros (semelhantes ao tópico anterior) de 16 controladores do tipo PSS para que estes forneçam amortecimento de, no mínimo, 5% para o modo menos amortecido, assim como executado anteriormente.

A quantidade de controladores utilizados no projeto foi estipulada de modo a facilitar a sintonia automática através do algoritmo genético na busca por parâmetros factíveis que forneçam um amortecimento para o sistema de no mínimo 5% para o modo menos amortecido. Estudos vêm sendo realizados de forma a identificar o número de controladores exato para certas sintonias, e assim poupar o uso de controladores demasiadamente que muitas vezes inseridos de forma inadequada podem tornar o sistema mal amortecido.

Para tal sintonia foi utilizada uma população inicial de 100 indivíduos, gerados aleatoriamente, porém com valores pré-definidos dentro de uma faixa estipulada pelo projetista para que o processo de convergência se de mais rapidamente e os resultados encontrados sejam efetivamente implementáveis. A quantidade de indivíduos estipulado na população inicial se deve a uma bateria de testes realizada, no qual se aplicou diversos valores de população inicial constatando-se uma melhor efetividade do algoritmo, tendo em vista seu tempo de convergência, com a aplicação de 100 indivíduos. Além disso, é estipulada uma taxa de cruzamento de 0,80 e uma taxa de mutação de 0,20.

Com a utilização de dezesseis controladores PSS com 48 parâmetros a serem encontrados, o algoritmo genético proposto partiu com parâmetros típicos pré estipulados em um range de valores, como citado anteriormente. A Tabela 4 a seguir apresenta o melhor indivíduo presente na população inicial dentre 100 das soluções candidatas geradas pelo algoritmo genético:

Tabela 4 - População inicial

CONTROLADOR	GANHO (K)	β	γ
PSS1	9,6534	29,0634	20,0187
PSS2	5,6965	24,6964	20,7992
PSS3	7,6529	24,8018	35,5595
PSS4	10,8021	14,1783	18,5840
PSS5	8,1546	25,9220	14,1478
PSS6	0,1167	8,2885	10,1560
PSS7	0,6054	17,5474	11,8091
PSS8	15,6971	14,9308	48,4689
PSS9	5,1085	5,9150	30,6864
PSS10	7,5968	9,3867	11,1573
PSS11	10,1560	27,9814	35,7585
PSS12	2,4040	11,4617	47,9792
PSS13	9,3879	14,0443	31,1126
PSS14	19,9959	12,7402	49,5392
PSS15	4,9754	26,1885	42,9826
PSS16	13,1122	17,6826	41,0156

Fonte: Autoria Própria.

De fato deve-se lembrar que os parâmetros apresentados pela Tabela 4 forneceram um amortecimento de -0,062% para o modo menos amortecido do sistema, servindo assim como base para se ter um panorama geral do grau de mudança dos parâmetros encontrados após a aplicação do algoritmo, uma vez que os mesmos estão sujeitos a grandes alterações genéticas até atingirem o *fitness* desejado.

Após 7 gerações e 1020s aproximadamente o algoritmo genético proposto encontrou o conjunto de parâmetros exibido pela Tabela 5:

Tabela 5 - Parâmetros encontrados pela sintonia automática

CONTROLADOR	GANHO (K)	T_1	T_2
PSS1	9,7953	0,2533	0,0324
PSS2	1,5193	1,0558	0,0355
PSS3	14,6066	0,3488	0,0255
PSS4	8,4567	0,5302	0,0251
PSS5	15,6104	0,6498	0,0941
PSS6	15,0987	0,1195	0,0278
PSS7	0,9907	0,2291	0,0268
PSS8	0,2657	0,5885	0,0233
PSS9	8,6497	0,6934	0,0960
PSS10	9,2652	1,5203	0,0984
PSS11	19,7221	0,2474	0,0273
PSS12	17,8890	0,4488	0,0374
PSS13	17,5560	0,4247	0,0276
PSS14	14,4171	0,1216	0,0273
PSS15	13,4233	0,4509	0,0317
PSS16	4,5606	0,4574	0,0244

Fonte: Aatoria Própria.

Deve-se ressaltar que a Tabela 5 apresentada anteriormente foi traçada tendo em vista as equações matemáticas envolvendo β , γ e K em relação às constantes de tempo T_1 e T_2 apresentadas no tópico 2.2.1 do capítulo 2.

Já a Tabela 6 ilustrada a seguir apresenta o amortecimento dos modos críticos inicialmente mal amortecidos nos pontos de operação selecionados no projeto após a sintonia dos PSS,s realizada pelo método proposto. Todos os modos considerados atendem ao requisito mínimo de amortecimento mediante as simulações lineares:

Tabela 6 - Amortecimento após a sintonia automática

PONTO DE OPERAÇÃO	AMORTECIMENTO (%)
S2829	5,4306
S2629	5,4342
S2627	5,4635
S2628	5,4300
S2526	5,4413

Fonte: Aatoria Própria

Para validar os resultados obtidos com a análise linear são realizadas duas simulações não lineares (utilizando o *software* ANATEM do CEPEL) em dois pontos de operação distintos, sendo que um foi considerado na etapa do projeto e o outro não. Os pontos considerados para tal análise não linear serão os mesmos escolhido anteriormente, ou seja, o ponto crítico S2829, caracterizado pela remoção da linha entre os barramentos 28 e 29. Já o ponto não considerado no projeto que será utilizado na análise não linear será o ponto S5657/S6465, caracterizado pela remoção das linhas entre o barramento 56 e 57 e a linha 64 e 65. Para tal análise dos dois pontos citados, é aplicada uma falta no meio da linha entre as barras 47 e 48 no instante 2s e removido após 16ms.

A seguir serão apresentados os fluxos de potência gerados por duas linhas presentes no sistema teste e as frequências apresentadas por dois de seus dezesseis geradores. Além disso, um dos pontos selecionados para a geração do fluxo de potência que será apresentado, no caso o fluxo de potência na linha entre as barras 27 e 53, foi escolhido estrategicamente por se tratar de um ponto muito próximo a falta aplicada.

As Figuras 15 e 16 apresentadas abaixo ilustram os fluxos de potência para o ponto S5657/S6465 em um intervalo de simulação de 0 á 20s na linha entre as barras 18 e 49 e 27 e 53 e as frequências apresentadas por dois dos dezesseis geradores após a inserção dos controladores PSS's através da sintonia automática, respectivamente:

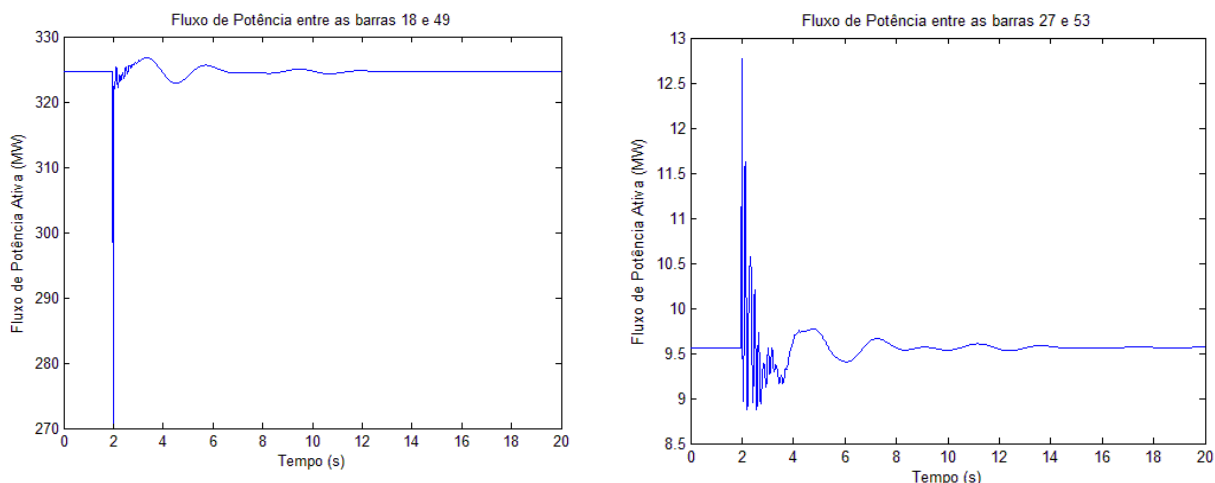


Figura 15 - Fluxo de potência nas linhas entre as barras 18 e 49 e 27 e 53 no ponto de operação S5657/S6465, considerando a inserção dos controladores sintonizados automaticamente.

Fonte: Autoria Própria.

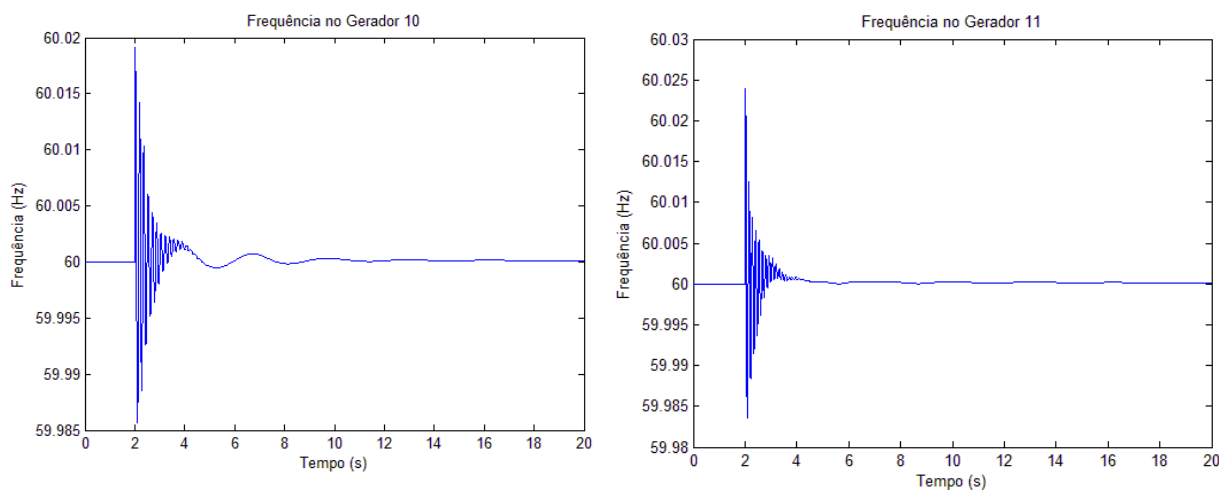


Figura 16 - Frequência dos geradores 10 e 11 no ponto de operação S5657/S6465, considerando a inserção dos controladores sintonizados automaticamente.

Fonte: Autoria Própria.

Já as Figuras 17 e 18 apresentam os fluxos de potência para o ponto S2829 em um intervalo de simulação de 0 á 20s na linha entre as barras 18 e 49 e 27 e 53 e as frequências apresentadas por dois dos dezesseis geradores após a inserção dos controladores PSS's através da sintonia automática no ponto S2829, respectivamente:

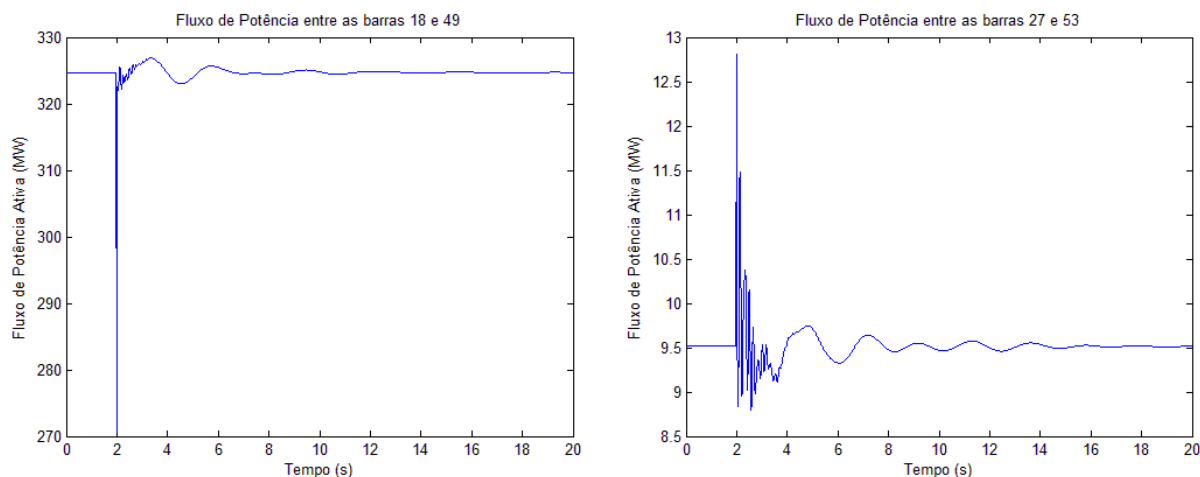


Figura 17 - Fluxo de potência nas linhas entre as barras 18 e 49 e 27 e 53 no ponto de operação S2829, considerando a inserção dos controladores sintonizados automaticamente.

Fonte: Autoria Própria.

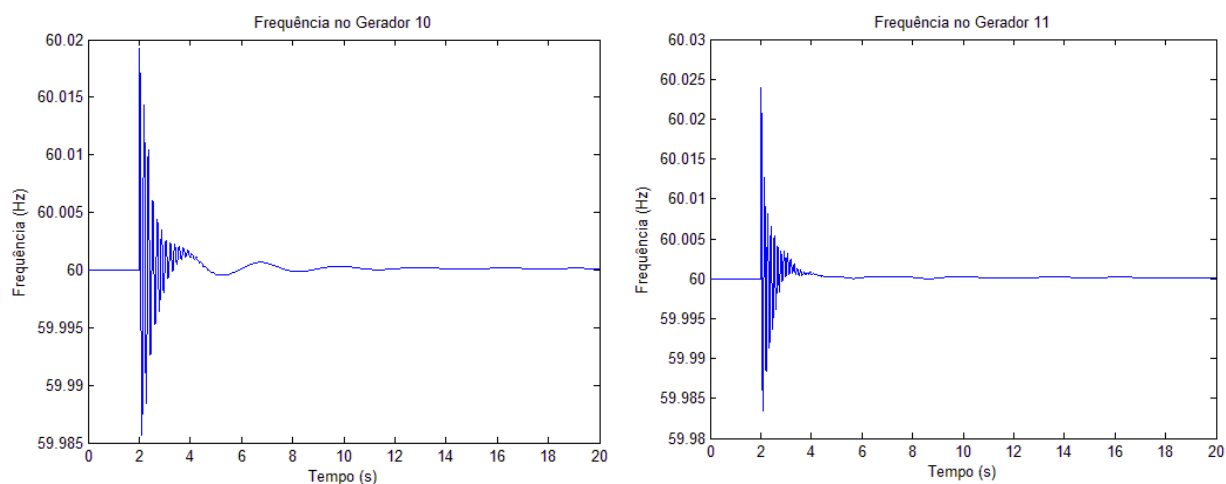


Figura 18 - Frequência dos geradores 10 e 11 no ponto de operação S2829, considerando a inserção dos controladores sintonizados automaticamente.

Fonte: Autoria Própria.

Após a apresentação dos gráficos encontrados com a sintonia automática de controladores, pode-se observar tendo em vista a análise linear que os controladores sintonizados automaticamente pelo algoritmo proposto foram eficazes, pois forneceram um bom amortecimento ao sistema nos modos antes mal amortecidos.

Além disso, para efeito de análise não linear a sintonia automática proposta se confirmou robusta uma vez que com a aplicação de dois pontos de operação distintos sendo um deles não estipulado no projeto a fim de validar a sintonia, a mesma manteve o sistema estável para ambos os pontos.

Tais informações demonstram que a sintonia realizada de forma automática apresenta grande vantagem e se torna uma alternativa viável se comparada ao

método de sintonia manual, uma vez que o tempo demandado para a sintonia automática foi visivelmente reduzido.

Como base de comparação, pode-se verificar na Tabela 7 dados envolvendo os dois métodos de sintonia, enfatizando o amortecimento encontrado pelos mesmos no ponto mais crítico da simulação, e o tempo que tais sintonias levaram para serem realizadas:

Tabela 7 - Dados comparativos

SINTONIA	AMORTECIMENTO (%)	TEMPO (s)
MANUAL	5,7590	14400
AUTOMÁTICA	5,4306	1020

Fonte: Aatoria Própria.

Analisando a Tabela 7 pode-se verificar a eficiência do método de sintonia automático proposto considerando o critério N-1 estabelecido pelo ONS. O Algoritmo genético proposto encontrou parâmetros adequados para todos os controladores em um tempo reduzido, e após a aplicação de tal sintonia em uma simulação linear forneceu um amortecimento ligeiramente maior do que o mínimo estipulado pelo projeto, no caso de 5%.

Deve-se lembrar que todas as simulações foram realizadas em computador *notebook* com processador Intel Core i3 M330 com 4GB de memória RAM e sistema operacional 64bits utilizando o software Matlab[®] executado em ambiente *Windows 7*.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho é proposto um método de sintonia automático de controladores do tipo PSS baseado em algoritmo genético considerando o critério N-1 do ONS para diversos pontos de operação de um sistema elétrico teste. Tais pontos de operação citados se diferem de outras propostas, uma vez que neste trabalho não são executados mudanças de carga no sistema, mas sim possíveis mudanças topológicas obtidas a partir do sistema teste *New England – New York* originando assim setenta e um pontos de operação distintos a serem sintonizados de forma simultânea.

Através dos resultados apresentados, pode-se verificar em um primeiro momento que a sintonia realizada de forma manual forneceu um amortecimento consideravelmente bom com a adição de oito controladores inseridos de maneira estratégica, atingindo o amortecimento mínimo de 5% estipulado pelo projetista, fato este que pode ser verificado através do panorama apresentado pelos cinco pontos selecionados dentre os mais críticos do sistema. Em um segundo momento, a sintonia automática realizada pelo algoritmo genético proposto encontrou parâmetros para os dezesseis controladores capazes de fornecer ao sistema o amortecimento mínimo estipulado de 5% em um tempo visivelmente menor, ficando evidente o ganho de tempo e de qualidade pelo método de sintonia automático se comparado ao método de sintonia manual.

Levando em consideração os resultados obtidos, pode-se concluir que a sintonia automática de controladores do tipo PSS realizada a partir da aplicação do algoritmo genético clássico proposto no trabalho se torna uma potente ferramenta de otimização, uma vez que a sintonia encontrada pelo algoritmo se confirmou robusta o suficiente para manter o sistema estável e atender a todos os pontos de operação estipulados no projeto em um tempo visivelmente reduzido.

Por fim, deve-se ressaltar que o trabalho é um ponto de partida para trabalhos futuros e estudos envolvendo a sintonia automática de controladores PSS de sistemas elétricos de potência considerando o critério N-1 previsto pelo ONS.

REFERÊNCIAS

AMABIS, J. M.; MARTHO, G. R. **Curso Básico de Biologia**. São Paulo: Ed. Moderna Ltda., 1985.

ARCISZEWSKI, T.; JONG, K. A. D. Evolutionary Computation in Civil Engineering: Research Frontiers. **Civil and Structural Engineering Computing**, p. 161-184, 2001.

CASTOLDI, M. F., **Algoritmo Híbrido para Projeto de Controladores de Amortecimento de Sistemas Elétricos de Potência Utilizando Algoritmos Genéticos e Gradiente Descendente**. 2011. 172p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.

CEPEL. *ANAREDE*. Manual do Usuário. Rio de Janeiro. 2008.

CEPEL. *ANATEM*. Manual do Usuário. Rio de Janeiro. 2008.

DASILVA, N. F. **Fontes de Energia Renováveis Complementares Na Expansão do Setor Elétrico Brasileiro: O Caso da Energia Eólica**. 2006. 250p. Tese (Doutorado em Ciências em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

EIBEN, A. E.; SMITH, J. E. **Introduction to Evolutionary Computing**. Natural Computing Series. Berlin: Springer, 2003.

GABRIEL, P.H.R.; DELBEM, A.C.B. **Fundamentos de Algoritmos Evolutivos**. Relatório Técnico: Notas Didáticas do ICMC – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. New York: Addison-Wesley, 1989.

GOLDBERG, D. E. **The Design of Innovation: Lessons from and for Competent Genetic Algorithms**. Boston: Kluwer, 2002.

HOLLAND, J. **Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence. Complex Adaptive System**, 2^o ed, Cambridge: MIT Press, 1992.

ITAIPU BINACIONAL. **Usina Hidrelétrica de ITAIPU**. Disponível em: <<http://www.itaipu.gov.br/>>. Acesso em: 21 Ago. 2013.

JUNIOR, S. C. M.; CASTOLDI, M. F.; RODRIGUES, C. R.; RAMOS, R. A. Sintonia Simultânea e Coordenada de Controladores de Sistemas Elétricos de Potência Utilizando Evolução Diferencial. **Congresso Brasileiro de Automática (CBA)**, 2012.

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. New York: McGraw-Hill, 1994.

OLIVEIRA, R. V. **Projeto de Controladores de Amortecimento para Sistemas Elétricos de Potência**. 2006. 161p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

OLIVEIRA, R. V.; KUIAVA, R.; RAMOS, R. A.; BRETAS, N.G. Automatic Tuning Method for the Design of Supplementary Damping Controllers for Flexible Alternating Current Transmission System Devices. **IET – Generation, Transmission e Distribution**, v.3, p. 919-929, 2009.

PATACA, L. C. **Análise de Contingências com Critério N-1 em Sistemas Elétricos de Potência Utilizando Computação Paralela em Matlab**. 2012.67p. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2012.

RAMOS, R. A.; ALBERTO, L. F. C.; BRETAS, N. G. **Modelagem de Máquinas Síncronas Aplicada ao Estudo de Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência**. 2000. 78p. Apostila de Engenharia Elétrica - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2000.

REZENDE, S. O. **Sistemas Inteligentes: Fundamentos e Aplicações**. Barueri, São Paulo: Ed. Malone, 2003.

ROWELL, D. **Analysis and Design of Feedback Control Systems**, Cambridge: MIT Press, 2002.