ELCIO FRANKLIN DE ARRUDA

**ESTIMAÇÃO DE ESTADOS DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM
SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA UTILIZANDO ESTRATÉGIAS
EVOLUTIVAS**

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Doutor em Engenharia

São Paulo
2008

ELCIO FRANKLIN DE ARRUDA

**ESTIMAÇÃO DE ESTADOS DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM
SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA UTILIZANDO ESTRATÉGIAS
EVOLUTIVAS**

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Doutor em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia de Energia e
Automação Elétricas

Orientador: Prof. Livre Docente
Nelson Kagan

São Paulo
2008

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 10 de julho de 2008.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Arruda, Elcio Franklin de

**Estimação de estados de distorções harmônicas em sistemas elétricos de potência utilizando estratégias evolutivas / E.F. de Arruda. -- ed.rev. -- São Paulo, 2008.
125 p.**

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Transmissão de energia elétrica 2.Distribuição de energia elétrica 3.Geração de energia elétrica I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

À minha querida Érika.

Tecendo a Manhã

(João Cabral de Melo Neto)

*"Um galo sozinho não tece a manhã:
ele precisará sempre de outros galos.*

*De um que apanhe esse grito que ele
e o lance a outro: de um outro galo
que apanhe o grito que um galo antes
e o lance a outro; e de outros galos
que com muitos outros galos se cruzam
os fios de sol de seus gritos de galo
para que a manhã, desde uma tela tênue,
se vá tecendo, entre todos os galos.*

*E se encorpando em tela, entre todos,
se erguendo tenda, onde entrem todos, no toldo
(a manhã) que plana livre de armação.*

*A manhã, toldo de um tecido tão aéreo
que, tecido, se eleva por si: luz balão".*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais que neste país do futebol me incentivaram a jogar.

Aos meus irmãos que sempre me motivaram nos treinos e contribuíram significativamente em minhas atuações.

Ao Tirso Tarrau que me motivou através de sua luta contínua nos campos da vida.

Aos meus professores do ensino primário ao colegial que muito me ensinaram e estão diretamente relacionados à minha formação tática.

Aos professores universitários e pós-universitários que indicaram as melhores jogadas para se conseguir um gol.

Ao Professor Nelson Kagan que foi um técnico paciente nesta partida.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, juíza e estádio desta partida.

À Érika Dib que além de conselheira e massagista tornou-se minha verdadeira empresária.

Ao Aloísio Dib e à Maria Elisa Celestino, componentes da torcida organizada, pelos cutucões e críticas quanto às regras.

Aos meus amigos do time que contribuíram com meu desempenho.

Aos meus amigos torcedores que me apoiaram mesmo em momentos de derrotas.

À torcida adversária.

A Deus por ter criado todo esse jogo.

RESUMO

Esta teste de doutorado tem como objetivo o desenvolvimento de um algoritmo de Estimção de Estados de Distorções Harmônicas (EEDH) em Sistemas Elétricos de Potência. Embora o custo dos medidores de qualidade de energia tenha diminuído, ainda é inviável a utilização de medidores para a monitoração de todas as barras de um sistema elétrico real, pois o sistema de monitoração tornar-se-ia demasiadamente oneroso. Sendo assim, torna-se necessária à utilização de algoritmo capaz de estimar, a partir de um pequeno número de pontos de monitoração, os valores das distorções harmônicas em demais pontos do sistema. Para resolver o problema em estudo, propõe-se a utilização de algoritmo de Estratégias Evolutivas. Tal algoritmo se mostra viável por sua facilidade de implementação e sua velocidade em encontrar uma solução dentro de um vasto espaço de soluções. Neste contexto, uma solução para o problema de estimação compreende um indivíduo que pode sofrer mutação e recombinação, sendo este avaliado a cada geração do algoritmo. A avaliação de cada indivíduo esta relacionada à minimização do erro quadrático de estimação de tensões nas barras monitoradas do sistema. Para esta realização são utilizadas as informações das distorções provenientes de “medidores”, bem como as informações da rede. O fluxo de carga para a frequência fundamental é realizado e tomado como referência para ajustes de ângulos das distorções harmônicas na ausência de um sistema de sincronização. O algoritmo proposto foi submetido para analisar inicialmente uma rede elétrica hipotética de 4 barras com o intuito de se verificar a capacidade da metodologia. Em seguida uma rede elétrica de 14 barras foi utilizada para configurar os parâmetros do algoritmo de Estratégia Evolutiva. Esta mesma rede foi submetida à análise da estimação da Distorção Harmônica Total. Por fim, com o intuito de explorar as limitações e potencialidades, a metodologia proposta foi aplicada na análise de uma rede de subtransmissão de 50 barras, utilizando modelos por componentes simétricas e por componentes de fase. Os resultados obtidos foram promissores e indicam este ramo de estudos como sendo de grande viabilidade podendo diminuir os custos de um sistema de monitoramento de qualidade de energia elétrica, que se utiliza de EEDH.

Palavras Chave: Qualidade de Energia, Estimção Harmônica, Algoritmos Evolutivos, Estratégias Evolutivas

ABSTRACT

The aim of the present thesis is to develop a Harmonic Distortion State Estimation algorithm for Power Systems. Although the cost of Power Quality Meters has decreased for a while now, it is still not practicable the use of one meter for each real system bus. This demands a Harmonic Distortion State Estimation (HDSE) algorithm to find the harmonic components in buses with no measurement. An Evolutionary Strategy algorithm is proposed in this work to solve the harmonic estimation problem. This algorithm shows good results due to its easy implementation and its quickness to find a solution for a complex problem, as the HDSE demands. In this context a solution for the estimation problem is based on a population of individuals that suffer mutation and recombination operations, and are evaluated in each generation. The individual evaluation is related to the minimization of the sum of square deviations of voltage estimation in buses with measurement. Harmonic data from meters and network data are taken as the model inputs. A load flow determines the system state for the fundamental frequency that provides the reference for the angle adjustment for harmonics. The proposed algorithm was first submitted to analyze a small four bus electrical network to verify the viability of this methodology. After this, a 14 bus electrical network was used to configure the evolutionary strategy algorithm parameters and to determine the Total Harmonic Distortion estimation. Finally, in order to understand the limitations and capability of the proposed methodology, a 50 bus subtransmission three-phase network was analyzed by models based on symmetrical components and phase components. The obtained results are very promising and indicate a considerable cost reduction in power quality monitoring systems.

Keywords: Power Quality, Harmonic Estimation, Evolutionary Algorithms, Evolutionary Strategies

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Modelos de cargas: (a) modelo paralelo e (b) modelo série.....	42
Figura 3.1 - Fluxo de informação em um sistema genético	45
Figura 3.2 – Evolução de uma população durante uma geração.	47
Figura 3.3 – Fluxograma representativo do algoritmo de Estratégia Evolutiva.....	55
Figura 3.4 – Função exemplo do algoritmo de EE – ponto máximo da função em destaque..	56
Figura 3.5 – Indivíduos da população inicial representados pelos círculos em cor cinza.	57
Figura 3.6 – Indivíduos filhos em cor cinza claro gerados por mutação a partir dos indivíduos pais em cor cinza escuro.	57
Figura 3.7 – Indivíduos selecionados para a segunda geração.....	58
Figura 3.8 – Indivíduos da segunda geração em cinza escuro, seus filhos gerados por mutação em cinza claro e um indivíduo gerado por recombinação em preto.....	58
Figura 3.9 – Indivíduos selecionados para a terceira geração.	59
Figura 3.10 – Indivíduos da terceira geração em cinza escuro e seus filhos gerados por mutação em cinza claro.	60
Figura 3.11 – Indivíduos da quarta geração em cinza escuro e seus filhos gerados por mutação em cinza claro.	60
Figura 3.12 – Indivíduos da sexta geração em cinza escuro e ponto de máximo global em preto.	60
Figura 5.1 – Representação dos indivíduos (a) na frequência fundamental e (b) e uma ordem harmônica n.....	70
Figura 5.2 – Representação vetorial dos indivíduos para EEDH de uma ordem harmônica n.	70
Figura 5.3 – Representação vetorial dos indivíduos com os parâmetros estratégicos.....	71
Figura 5.4 – Representação de um indivíduo pai e seus filhos gerados por mutação.	72
Figura 5.5 – Operador Recombinação.	73
Figura 5.6 – Ilustração do vetor diferença utilizado na avaliação de um indivíduo.....	74
Figura 5.7 – Método de seleção ($\mu+\lambda$).....	76
Figura 5.8 – Fluxograma esquemático de funcionamento do EEDH proposto.....	79
Figura 5.9 – Representação vetorial dos indivíduos para uma análise trifásica.....	80

Figura 6.1 – Rede elétrica de quatro barras utilizada inicialmente para verificar a aplicabilidade da metodologia proposta.	84
Figura 6.2 – Rede elétrica de 14 barras utilizada para análise.	86
Figura 6.3– Erro médio de estimação em função do número de indivíduos na população inicial.	90
Figura 6.4 – Evolução dos passos de mutação para diferentes valores iniciais	91
Figura 6.5 – Evolução dos passos de mutação em função do parâmetro β	93
Figura 6.6 – Evolução dos passos de mutação em função da forma de recombinação.	95
Figura 6.7 – Evolução dos passos de mutação em função da forma de evolução: $(\mu+\lambda)$ e (μ,λ)	96
Figura 6.8 – Nota média dos melhores indivíduos (eixo das ordenadas) para cada ordem harmônica em função das gerações (eixo das abscissas).	99
Figura 6.9 – Evolução dos passos de mutação (eixo das ordenadas) para cada ordem harmônica (H) considerada em função das gerações (eixo das abscissas).	100
Figura 6.10 – Rede elétrica de 50 barras utilizada na análise das distorções harmônicas.	103
Figura 6.11 – Onze medidores instalados aleatoriamente na rede – primeiro caso de análise.	106
Figura 6.12 – Erros relativos de estimação por ordem harmônica H e para as três fases – primeiro caso de análise.	107
Figura 6.13 – Média dos erros relativos de estimação para cinco casos rodados por ordem harmônica H e para as três fases – primeiro caso de análise.	107
Figura 6.14 – Nota média dos melhores indivíduos para cada ordem harmônica em função das gerações - primeiro caso analisado com a rede de 50 barras: 11 medidores instalados aleatoriamente.	108
Figura 6.15 – Evolução dos passos de mutação cada ordem harmônica considerada em função das gerações - primeiro caso analisado com a rede de 50 barras: 11 medidores instalados aleatoriamente.	109
Figura 6.16 – Média dos erros relativos de estimação para cinco casos rodados por ordem harmônica H e para as três fases considerando 20 indivíduos por geração – primeiro caso de análise.	110
Figura 6.17 – Oito medidores instalados aleatoriamente na rede – segundo caso de análise.	111
Figura 6.18 – Média dos erros relativos de estimação para cinco casos rodados por ordem harmônica H – oito medidores instalados aleatoriamente na rede (segundo caso de análise).	111

Figura 6.19 – Nove medidores instalados na rede tendo sido priorizadas barras de carga – terceiro caso de análise.	112
Figura 6.20 – Erros relativos de estimação por ordem harmônica H e para as três fases – nove medidores instalados em barras de carga (terceiro caso de análise).	113
Figura 6.21 – Erros de estimação nas barras que não possuem cargas instaladas considerando oito medidores instalados aleatoriamente no sistema (segundo caso de análise)s.	114
Figura 6.22 – Erros de estimação nas barras que não possuem cargas instaladas considerando nove medidores instalados somente em barras de carga (terceiro caso de análise).	114
Figura 6.23 – Comparação dos erros de estimação através das buscas monofásicas e trifásicas.	116
Figura 6.24 – Comparação dos valores dos módulos das correntes harmônicas injetadas nas barras considerando a estimação pela busca monofásica e trifásica.	116
Figura 6.25 – Comparação dos valores dos módulos das tensões harmônicas nas barras considerando a estimação pela busca monofásica e trifásica.....	117
Figura 6.26 – Comparação dos valores dos ângulos das tensões harmônicas nas barras considerando a estimação pela busca monofásica e trifásica.....	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação das ordens harmônicas quanto à seqüência de fase.....	26
Tabela 6.1 – Valores de tensão e corrente de referência para a terceira harmônica no primeiro caso analisado.....	84
Tabela 6.2 – Parâmetros do indivíduo de referência para o primeiro caso analisado.....	84
Tabela 6.3 – Resultados obtidos usando dois medidores e 100 gerações no primeiro caso analisado.	85
Tabela 6.4 – Resultados obtidos usando dois medidores e 300 gerações.	85
Tabela 6.5 – Resultados utilizando 3 medidores alocados em uma rede de 14 barras.	87
Tabela 6.6 – Resultados utilizando 6 medidores alocados em uma rede de 14 barras.	87
Tabela 6.7 – Resultados utilizando 8 medidores alocados em uma rede de 14 barras.	88
Tabela 6.8 – Resultados utilizando 8 medidores alocados em uma rede de 14 barras com 1000 gerações de simulação.	88
Tabela 6.9 – Erro médio para uma dada ordem harmônica em função do número de mutações por indivíduo em cada geração.	92
Tabela 6.10 – Erro de estimação em função do parâmetro β de auto-adaptação.	93
Tabela 6.11 – Erro relativo na estimação em função da forma de recombinação.....	95
Tabela 6.12 – Erro relativo de estimação em função da forma de evolução.....	97
Tabela 6.13 – Erro de estimação (%) para as ordens harmônicas consideradas individualmente.....	98
Tabela 6.14 – Valores de DHT de referência e calculados e erros relativos e absolutos de estimação.	101
Tabela 6.15 – Valores de DHT de referência e calculados e erros relativos e absolutos de estimação, considerando apenas 3 medidores instalados no sistema.	101
Tabela 6.16 - Valores de THD de referência e calculados e erros relativos e absolutos de estimação, considerando 3 medidores de tensão e um de corrente.	102
Tabela 6.17 – Dados de ligações da rede elétrica de 50 barras em estudo.	104
Tabela 6.18 – Dados das cargas ligadas na rede em estudo.....	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DDT	- Distorção de Demanda Total
DHT	- Distorção Harmônica Total
DNA	- Ácido Desoxirribonucleico
EE	- Estratégia Evolutiva
EEDH	- Estimacão de Estados de Distorções Harmônicas
EMC	- Electromagnetic Compatibility
FACTS	- <i>Flexible AC Transmission System</i>
FFT	- <i>Fast Fourier Transform</i>
FSM	- <i>Finite State Machine</i>
GPS	- <i>Global Positioning System</i>
HD	- <i>Harmonic Domain</i>
IA	- Inteligência Artificial
IEC	- <i>International Electronics Commission</i>
IEEE	- <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LAV	- <i>Least Absolute Value</i>
LS	- <i>Least Square</i>
QE	- Qualidade de Energia
RNA	- Ácido Ribonucleico
SEP	- Sistemas Elétricos de Potência
SF	- Série de Fourier
SVD	- <i>Singular Value Decomposition</i>
TDF	- Transformada Discreta de Fourier
TF	- Transformada de Fourier
TIF	- <i>Telephone Influence Factor</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Δ	- Esquema de ligação em delta de transformador ou gerador;
λ	- Número de indivíduos filhos;
μ	- Número de indivíduos pais;
τ'	- Taxa de aprendizado;
σ'_i	- Variação do parâmetro σ de índice i ;
σ_i	- Passo de mutação;
a_j	- Coeficiente de Fourier para a frequência w_j ;
C	- Capacitância;
F	- Espaço fenotípico;
G	- Espaço genotípico;
h	- Ordem harmônica individual;
Hz	- Unidade Hertz
$I_{A,B,C}$	- Correntes do Primário;
$I_{a,b,c}$	- Correntes do Secundário;
$I_{p0,1,2}$	- Correntes de seqüência do primário;
$I_{s0,1,2}$	- Correntes de seqüência do secundário;
L	- Indutância;
β	- Parâmetro auxiliar na auto-adaptação;
$N(0,1)$	- Valor sorteado com distribuição normal de média 0 e desvio padrão 1. Este se mantém constante para cada indivíduo;
n_c	- número de cálculos para uma tarefa computacional;
n_h	- Conjunto de ordens harmônicas;
$Ni(0,1)$	- Valor sorteado a cada geração com distribuição normal de média 0 e desvio padrão 1;
$P(t)$	- Conjunto de indivíduos pais;
p.u.	- Por unidade;
$Q(t)$	- Conjunto de indivíduos que podem ser considerados para a seleção;
R	- Resistência elétrica;

R_a	- Resistência de armadura;
s	- Variável pertencente ao domínio da frequência;
T	- Período de uma função;
t	- Variável tempo, geração de evolução;
$V_{A,B,C}$	- Tensões de fase do Primário;
$V_{a,b,c}$	- Tensões de fase do Secundário;
$V_{p0,1,2}$	- Tensões de seqüência do primário;
$V_{s0,1,2}$	- Tensões de seqüência do secundário;
w	- Frequência angular;
x	- Reatância;
x''_d	- Reatância sub-transitória;
Y	- Esquema de ligação em estrela de transformador ou gerador;
Z	- Impedância;
Z_0	- Impedância de Seqüência zero;
Z_1	- Impedância de Seqüência positiva;
Z_2	- Impedância de Seqüência negativa.

SUMÁRIO

RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIV
1 - INTRODUÇÃO	18
1.1 Considerações Preliminares	18
1.2 Objetivos	20
1.3 Organização do Documento	20
2 - AS DISTORÇÕES HARMÔNICAS NOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.....	21
2.1 Conceituação	22
2.2 A Teoria de Fourier	23
2.2.1 Série de Fourier	24
2.2.2 Transformada contínua de Fourier.....	24
2.2.3 Transformada discreta de Fourier.....	25
2.3 Caracterização das Distorções Harmônicas	25
2.4 Normas	27
2.5 Indicadores	29
2.6 Aplicações das Medições das Distorções Harmônicas	30
2.7 Fontes de Distorções Harmônicas	32
2.8 O Efeito das Distorções Harmônicas nos Sistemas Elétricos de Potência	33
2.8.1 Perdas Térmicas em um Ambiente com Distorções Harmônicas	33
2.8.2 Os Efeitos das Distorções Harmônicas nos Diversos Equipamentos	34
2.9 Modelagem de Equipamentos dos Sistemas Elétricos de Potencia para Estudos das Componentes Harmônicas	37
2.9.1 Impedância na Presença de Ordens Harmônicas	38
2.9.2 Efeito Pelicular	38
2.9.3 Modelagem dos Geradores.....	38
2.9.4 Modelagem de Capacitâncias Shunt de Linhas	39
2.9.5 Modelagem de Bancos de Capacitores	40
2.9.6 Modelagem de Transformadores	40
2.9.7 Modelagem de Cargas.....	41
3 - A ESTRATÉGIA EVOLUTIVA NO CONTEXTO DOS ALGORITMOS EVOLUTIVOS	43
3.1 Base Biológica.....	43
3.2 Fenótipo e Genótipo	46
3.3 Os Algoritmos Evolutivos.....	48
3.4 A Estrutura de um Algoritmo Evolutivo.....	50
3.5 Estratégias Evolutivas.....	51
4 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	61

5 -	METODOLOGIA ADOTADA PARA ESTIMAÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS.....	68
5.1	Estratégia Evolutiva Aplicada à Estimação das Distorções Harmônicas	69
5.1.1	Representação dos Indivíduos	69
5.1.2	Operador Mutação	71
5.1.3	Recombinação	72
5.1.4	Avaliação.....	73
5.1.5	Seleção	76
5.2	Formulação do Problema de Estimação das Distorções Harmônicas.....	77
5.3	Análise Trifásica.....	80
5.3.1	Diferenças Quanto à Representação dos Indivíduos	80
5.3.2	Modificações no Módulo de Avaliação	81
5.3.3	Modificações na Formulação do Problema.....	82
6 -	RESULTADOS.....	83
6.1	Estimação das Distorções Harmônicas em uma Rede de Quatro Barras.....	83
6.2	Estimação das Distorções Harmônicas em uma Rede de Quatorze Barras	85
6.3	Ajustes nos Parâmetros do Algoritmo de Estratégia Evolutiva	89
6.3.1	Ajuste do Número de Indivíduos.....	89
6.3.2	Ajuste do Passo de Mutação.....	90
6.3.3	Ajuste do Número de Mutações por Indivíduo	91
6.3.4	Ajuste da Auto-Adaptação	92
6.3.5	Ajuste do Operador Recombinação.....	94
6.3.6	Ajuste da Forma de Evolução	96
6.4	Estimação da Distorção Harmônica Total em uma Rede de 14 Barras	97
6.5	Estimação das Distorções Harmônicas em pontos de uma rede elétrica de 50 Barras	102
7 -	CONCLUSÕES	119
7.1	Trabalhos Futuros	122
8 -	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	123

---

1 - INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Preliminares

Mensurar o impacto do conteúdo de fontes harmônicas no desempenho de um sistema elétrico consiste num aspecto importante em Qualidade de Energia (QE).

Admitindo-se conhecidos os locais e o conteúdo harmônico injetado no sistema elétrico, medidas que mitiguem o impacto das distorções em outras barras do sistema podem ser projetadas com a utilização de filtros passivos ou ativos. No entanto, na maioria das vezes, as fontes de distorções não são conhecidas [1].

Embora o custo dos medidores de qualidade de energia tenha atingido valores não tão altos, ainda é inviável a utilização de medidores para a monitoração de todas as barras de um sistema elétrico real, pois o sistema de monitoração tornar-se-ia demasiadamente oneroso.

Sendo assim, torna-se necessária a utilização de algoritmo capaz de estimar, a partir de um pequeno número de pontos de monitoração, os valores das distorções harmônicas em pontos específicos do sistema. Desta forma, o algoritmo de Estimação de Estado de Distorções Harmônicas (EEDH) compreende o processo reverso dos processos de simulação. Os simuladores analisam a resposta de um sistema elétrico dada a injeção de corrente harmônica em um ou mais pontos do sistema, enquanto os estimadores indicam os valores de injeção de corrente harmônica a partir das respostas do sistema elétrico através de medições.

A metodologia de EEDH consiste em uma ferramenta eficiente e econômica para o monitoramento do conteúdo harmônico em um sistema elétrico de potência. Um sistema estimador de harmônicas pode ser formulado a partir da topologia da rede elétrica, das matrizes de admitâncias para as frequências harmônicas e da localização de medidores [2].

Um caminho para a busca da solução do problema de estimação dos níveis de distorção harmônica é através da técnica de busca exaustiva. Esta técnica consiste em discretizar os valores das correntes (módulo e ângulo) em valores pré-determinados e simular cada uma das combinações possíveis destes valores, comparando assim com os valores de medições disponíveis. No entanto, esta é uma solução que exige enorme esforço

computacional, inviabilizando sua implementação para um sistema real em uma estação de trabalho tradicional, mesmo para redes elétricas pequenas.

Uma outra técnica utilizada para a estimação emprega o método estatístico de Monte Carlo, onde são simuladas, aleatoriamente, um grande número de possíveis soluções (valores de correntes injetadas), para então, utilizando um critério de avaliação adequado ao problema, optar pela melhor (ou melhores) solução (ou soluções) que atendam ao critério de avaliação.

A utilização de algoritmos da área de Sistemas Inteligentes, como o proposto: Estratégias Evolutivas, torna-se viável por sua facilidade de implementação e sua velocidade em encontrar uma solução dentro do espaço de soluções frente às técnicas tradicionais supracitadas. Esta proposta compreende a maior contribuição deste trabalho ao estado da arte da estimação das distorções harmônicas nos Sistemas Elétricos de Potência (SEPs).

Estimar o estado de uma rede quanto ao nível de distorção harmônica é um problema naturalmente complexo por exigir uma confiança mínima nas informações provenientes de medidores de qualidade de energia. Além da segurança quanto à calibração do medidor, o método de transmissão dos dados, fidelidade da rede utilizada nas simulações frente à rede real entre outros fatores capazes de acarretar discrepâncias entre o sistema real e o sistema simulado, tem-se o problema da sincronização das informações provenientes dos medidores.

Em se tratando dos métodos de EEDH propriamente ditos, têm-se diversas abordagens na literatura. Uma das primeiras referências encontrada sobre o assunto compreende a referência [3] que apresenta um método para identificar fontes de sinais harmônicos no SEP. A referência [4] ilustra a importância da especificação das medições, bem como dos equipamentos utilizados no processo de estimação e a referência [5] apresenta um método de EEDH onde foi utilizado GPS (*Global Positioning System*) para a sincronização dos dados de medição.

Desta forma propõe-se nesta tese utilizar as formas de onda armazenadas pelos medidores e as informações provenientes do fluxo de carga para ajustar os fasores medidos proporcionando uma “sincronização” dos dados de medição. Tal adoção se torna de grande viabilidade por diminuir os custos de um sistema de EEDH.

1.2 Objetivos

Esta tese tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma metodologia capaz de estimar distorções harmônicas em SEPs utilizando EEs.

Para tanto, será necessário o desenvolvimento de um algoritmo para a realização do fluxo de carga harmônico e outro do algoritmo de EE propriamente dito. Um terceiro módulo será implementado para a coordenação das etapas de cálculo contemplando as diversas variáveis de análise.

1.3 Organização do Documento

No Capítulo 2 deste documento denominado “As Distorções Harmônicas nos Sistemas Elétricos de Potência” é apresentada uma breve conceituação e caracterização das distorções harmônicas presentes em SEPs. Este capítulo contempla também as limitações de emissões de distorções exigidas por normas, os efeitos das distorções em equipamentos dos sistemas, bem como a modelagem dos principais equipamentos utilizados.

A teoria das EEs no contexto dos Algoritmos Evolutivos (AEs) é apresentada no Capítulo 3. As teorias que vinculam as teorias evolucionárias biológicas às teorias matemáticas são apresentadas neste capítulo e finalmente é explicitada a ferramenta utilizada.

Um “Levantamento Bibliográfico” sobre a estimação de distorções harmônicas em SEPs é apresentada no Capítulo 4. Tal levantamento bibliográfico delinea as tendências científicas no que tange o tema desta tese.

O Capítulo 5 apresenta a metodologia adotada para atingir o objetivo principal deste trabalho que é estimar distorções harmônicas em SEPs utilizando EEs. Desta forma, é apresentada a formulação do problema com as configurações dos operadores evolutivos.

Resultados da aplicação da metodologia em redes elétricas para a estimação de distorções harmônicas são apresentados no Capítulo 6 e, no Capítulo 7, são apresentados os comentários e conclusões finais com respeito à metodologia proposta.

---

2 - AS DISTORÇÕES HARMÔNICAS NOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

A eletricidade foi utilizada nas indústrias, na maior parte do século vinte, predominantemente, em motores, iluminação e equipamentos para aquecimento. Tais formas de utilização da eletricidade causam pouco efeito na forma de onda fundamental na frequência do sistema (50 ou 60 Hz, neste texto será utilizada a frequência de 60 Hz como a fundamental) fornecida pelas concessionárias. Estas são chamadas de cargas lineares, uma vez que os valores de corrente variam proporcionalmente em relação à tensão.

Poucas indústrias como siderúrgicas e metalúrgicas utilizavam eletricidade para alimentar fornos a arco, os quais distorcem as formas de onda. A distorção ocorre devido à forma de onda de corrente não ser diretamente proporcional à de tensão. Estas cargas são chamadas cargas não-lineares [1].

As cargas não-lineares distorcem a forma de onda de frequência fundamental originando ondas senoidais com frequências múltiplas inteiras da fundamental. Tais formas de ondas de frequências múltiplas são chamadas “harmônicas”. Por exemplo, a harmônica de segunda ordem ou segunda harmônica é uma forma de onda com frequência igual a 120 Hz, a terceira harmônica: 180 Hz. A combinação das harmônicas, incluindo a harmônica fundamental, produz uma forma de onda, ainda periódica, porém não senoidal. Esta mudança na forma de onda senoidal original é chamada “Distorção Harmônica”.

Nos últimos 25 anos, tem ocorrido um aumento considerável no uso de equipamentos micro-processados que são cargas não-lineares. Exemplos destas cargas são: sistemas computadorizados, controladores de velocidade, conversores AC/DC, máquinas de raios-X, lâmpadas eletrônicas, equipamentos de ressonância magnética, entre outros.

Por outro lado, tem-se o aumento de equipamentos sensíveis às distorções em substituição aos equipamentos robustos anteriormente utilizados. Além disso, os equipamentos sensíveis podem ser causadores de distorções nas formas de onda de tensão e corrente.

A partir do exposto, torna-se natural o estabelecimento de normas que obriguem as concessionárias de distribuição fornecer aos seus consumidores uma forma de onda de tensão com “pureza” adequada, isto é, com baixo conteúdo de harmônicas de forma a não prejudicar equipamentos sensíveis.

Estas situações formam a base para se dispender atenção considerável para a qualidade da energia elétrica e reconhecer as distorções harmônicas como grande fonte de distorção na forma de onda [6].

A maior parte dos estudos relacionados às distorções harmônicas têm se concentrado em avaliar o impacto de cargas não lineares e analisar certas situações de distorção. Como exemplos de estudos que podem ser realizados, têm-se os equipamentos que monitoram a impedância (ou frequência) de uma determinada barra (*Impedance Scan ou Frequency Scan*) em relação a uma determinada frequência harmônica, detectando assim situações de ressonância que podem causar sobrecorrente (ressonância série) ou sobretensão (ressonância paralela). Outro exemplo consiste no estudo do fluxo de potência harmônica, que calcula os fluxos de correntes e tensões nas barras para as frequências harmônicas, incluindo a fundamental. Os resultados obtidos deste estudo podem auxiliar no projeto de várias alternativas de filtros harmônicos [7].

2.1 Conceituação

Um conceito de ondas harmônicas amplamente encontrado na literatura é: “forma de onda senoidal possuindo frequência múltipla inteira da forma de onda de frequência fundamental”.

Matematicamente, podem-se conceituar as distorções harmônicas através da teoria de Fourier. Quando se é mencionada uma determinada ordem harmônica, pode-se associar um coeficiente da decomposição do sinal em série de Fourier. Desta forma, por exemplo, a componente de terceira harmônica é representada pelos coeficientes de decomposição da série de Fourier de terceira ordem.

Tal fato baseia-se na afirmativa da teoria de Fourier de que um sinal periódico pode ser decomposto em sinais senoidais de frequências múltiplas de uma frequência fundamental.

Como o foco desta tese não é apresentar de forma aprofundada a teoria de Fourier, basta afirmar que a existência física dos sinais de tensão e corrente (energia finita) é suficiente para a existência da série de Fourier, como pode ser visto com maiores detalhes em [8].

Diante do exposto, cabe apresentar de forma sucinta a Teoria de Fourier.

2.2 A Teoria de Fourier

A Transformada de Fourier (TF), batizada em homenagem a Jean-Baptiste Joseph Fourier, é uma transformada integral que expressa uma função em termos de funções de base senoidal, i.e., como soma ou integral de funções senoidais multiplicadas por coeficientes ("amplitudes"). Existem diversas variações diretamente relacionadas desta transformada, dependendo do tipo de função a transformar [8].

As transformadas de Fourier são amplamente aplicadas em disciplinas científicas — em Física, Teoria dos números, Análise combinatória, Processamento de sinal, Teoria das probabilidades, Estatística, Criptografia, Acústica, Oceanografia, Óptica, Geometria e outras áreas. Nos campos relacionados com o processamento de sinal, a transformada de Fourier é tipicamente utilizada para decompor um sinal nas suas componentes em frequência e suas amplitudes, o que constitui a base da análise das distorções harmônicas nos SEPs.

Como características principais da transformada, têm-se:

- As transformadas são operadores lineares e, com a devida normalização, são também ortogonais (uma propriedade conhecida como o teorema de Parseval).
- As transformadas possuem suas formas inversas, e a transformada inversa possui praticamente a mesma forma da transformada.
- As funções de base senoidais são funções de diferenciação, o que implica que esta representação transforma equações diferenciais lineares com coeficientes constantes em equações algébricas ordinárias. (Por exemplo, num sistema linear invariante no tempo, a frequência é uma quantidade conservada, logo o comportamento em cada frequência pode ser resolvido independentemente.).
- Através do teorema de convolução, as transformadas tornam a complicada operação de convolução em multiplicações simples, o que as torna um método eficiente de calcular operações como a multiplicação polinomial.
- A versão discreta da transformada de Fourier pode ser calculada rapidamente por computadores, utilizando algoritmos baseados na transformada rápida de Fourier.

2.2.1 Série de Fourier

Dada uma função periódica g , esta pode ser decomposta, como apresentado em [8, 9], na forma:

$$g(s) = \sum_{h=-\infty}^{+\infty} a_h e^{j2\pi f s} \quad , a_h \in R \quad (2.1)$$

onde $f = 1/T$. Esta decomposição da função $g(t)$ é chamada de Série de Fourier (SF) de $g(t)$. A SF mostra que qualquer função periódica pode ser decomposta como a soma infinita de funções periódicas (senos e cossenos). Uma vez que esta decomposição torna fácil a análise do conteúdo harmônico da função g , a teoria de Fourier pode, também, ser entendida como uma análise no domínio da frequência.

O coeficiente a_h na eq. 2.1 da SF mede a amplitude da componente de frequência w_j na função g . Em particular, se $a_h=0$, esta componente de frequência não está presente na função. A amplitude da componente de frequência a_h é obtida através da expressão

$$a_h = \int_0^L f(u) e^{-j2\pi w_h u} du \quad , \quad (2.2)$$

onde L é o período da função.

Fourier foi o primeiro a estudar sistematicamente tais séries infinitas, após investigações preliminares de Euler, D'Alembert, e Daniel Bernoulli. Ele aplicou estas séries à solução da equação do calor, publicando os seus resultados iniciais em 1807 e 1811, e publicando a sua *Théorie analytique de la chaleur* em 1822. De um ponto de vista moderno, os resultados de Fourier são algo informal, em boa parte devido à falta de uma notação concisa de funções e integrais nos inícios do século 19. Mais tarde, Dirichlet e Riemann expressaram os resultados de Fourier com grande precisão e rigor formal.

2.2.2 Transformada contínua de Fourier

A teoria apresentada para a Série de Fourier se adequa perfeitamente para funções periódicas, uma vez que se pode representar de forma exata esta função como a soma de funções periódicas, representando fielmente seu espectro de frequências.

Para o caso de a função f não ser periódica usa-se a Transformada Contínua de Fourier, mais conhecida como TF. Utilizando a equação apresentada para a SF, pode-se vislumbrar o conceito da TF. Para tanto, pode-se assumir que a variável $s=w_h$ na eq. 2.2 pode assumir qualquer valor. Desta forma obtém-se:

$$f(s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(u) e^{j2\pi su} \cdot du . \quad (2.3)$$

O valor de $f(s)$ representa uma medida do conteúdo de frequência s da função f . Este valor é conhecido como a Transformada de Fourier [9].

2.2.3 Transformada discreta de Fourier

A forma digital da TF é conhecida como a Transformada Discreta de Fourier (TDF). Esta é usada em computadores, seja para aplicações científicas ou em processamento digital de sinais, através de valores discretos [9].

A TDF pode ser escrita da seguinte forma:

$$f_h = \sum_{k=0}^{n-1} x_k \frac{2\pi j}{n} h k \quad h = 0, \dots, n-1 \quad (2.4)$$

Um método largamente utilizado para o cálculo computacional desta versão é o algoritmo FFT (*Fast Fourier Transform*), cuja complexidade é $O(n_c \log n_c)$ contra $O(n_c^2)$ necessários para o mesmo cálculo.

2.3 Caracterização das Distorções Harmônicas

Diferentemente de fenômenos transitórios como descargas atmosféricas que duram milissegundos ou fenômenos momentâneos como os afundamentos e elevações de tensão que podem durar de poucos ciclos a um minuto, as distorções harmônicas são, classicamente de regime permanente e produzem distorções periódicas e contínuas nas formas de onda de tensão e corrente, embora existam estudos focando variações temporais das distorções harmônicas. Estas formas de ondas periódicas são descritas pelo seu conteúdo harmônico, no qual as magnitudes e os ângulos de fase são obtidos utilizando-se a análise de Fourier. A soma das componentes harmônicas individuais reproduz a forma de onda original, como descrito didaticamente na referência [10].

Se as cargas, os sistemas de transmissão e distribuição são equilibrados, as formas de onda de tensão e correntes são idênticas e defasadas exatamente por $\pm 120^\circ$. Neste caso, existem somente harmônicas características que são de sequência zero para ordens $n_h = 3m$ (m

$= 1, 2, 3, \dots$), seqüência positiva para ordens $n_h = 3m-2$, e de seqüência negativa para ordens $n_h = 3m-1$, como ilustrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Classificação das ordens harmônicas quanto à seqüência de fase.

Ordem Harmônica	Seqüência de Fase
Primeira	+
Segunda	-
Terceira	0
Quarta	+
Quinta	-
Sexta	0
...	...

Como ilustração, apresenta-se a seguir a demonstração matemática da classificação em seqüência zero da harmônica de terceira ordem.

Sejam:

$$V_{A1}(t) = V_{max} \text{sen}(wt)$$

$$V_{B1}(t) = V_{max} \text{sen}\left(wt + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$V_{C1}(t) = V_{max} \text{sen}\left(wt - \frac{2\pi}{3}\right)$$

Para a harmônica de terceira ordem teria-se:

$$V_{A3}(t) = V_{3max} \text{sen}[3(wt)] = V_{3max} \text{sen}(3wt)$$

$$V_{B3}(t) = V_{3max} \text{sen}\left[3\left(wt + \frac{2\pi}{3}\right)\right] = V_{3max} \text{sen}(3wt)$$

$$V_{C3}(t) = V_{3max} \text{sen}\left[3\left(wt - \frac{2\pi}{3}\right)\right] = V_{3max} \text{sen}(3wt)$$

Logo têm-se que

$$V_{A3}(t) = V_{B3}(t) = V_{C3}(t) \text{ indicando a classificação dos fasores em diagrama de seqüência zero (em fase).}$$

As impedâncias de seqüência positiva e de seqüência negativa diferem das impedâncias de seqüência zero para a maioria das cargas e equipamentos da rede, incluindo linhas de transmissão, cabos e transformadores. Sendo assim, torna-se necessária a avaliação separada de cada componente. Além do mais, o efeito de cada componente de seqüência pode diferir para cada equipamento. Tensões de seqüência zero equilibradas não afetam cargas

conectadas em delta (ex.: motores e bancos de capacitores). Com relação aos transformadores, componentes de tensão e corrente de sequência zero não são transferidas quando das conexões dos enrolamentos em delta-estrela ou em delta-zigzag [7].

Quanto à simetria da forma de onda distorcida pode-se avaliar o conteúdo de algumas ordens harmônicas como segue:

- A simetria de ordens ímpares (funções ímpares) é caracterizada por $f(-t) = -f(t)$ e sua decomposição na forma discreta de Fourier não possui o componente cosseno da expansão.
- A simetria de ordens pares (funções pares) é caracterizada por $f(-t) = f(t)$ e sua decomposição na forma discreta de Fourier não possui o componente seno da expansão.
- Formas de onda semi-simétricas, $f(t \pm T/2) = -f(t)$, possuem componente contínua (cc) nula e resultam no cancelamento das ordens harmônicas pares (2, 4, 6, ...). Esta característica permite ignorar harmônicas de ordens pares em sistemas elétricos de potência, uma vez que estes consistem em componentes bilaterais que produzem tensões e correntes que são semi-simétricas.

2.4 Normas

Diferentes países têm desenvolvido suas próprias normas relacionadas às “Distorções Harmônicas” e estipulado seus próprios limites de emissão de acordo com suas condições e requisitos individuais. Contudo, com a crescente globalização, a necessidade de se utilizar equipamentos com limites harmônicos projetados de acordo com as normas de um país em outro país, convergiu na formulação de normas internacionais quanto às distorções harmônicas. Dentre as principais normas internacionais, a série de normas IEC 61000 da EMC Normas e a norma IEEE 519:1992 contemplam definições e diretrizes para as distorções harmônicas.

Como apresentado em [6] segue um breve resumo destas principais normas:

IEC 61000-2-1: 1990 - IEC 61000-2-1 define harmônicos como tensões e correntes senoidais com frequências múltiplas inteiras da frequência no qual o sistema de suprimento é projetado para operar (60 Hz para o Brasil). Esta também delinea as maiores fontes harmônicas a partir de três categorias de equipamentos, que são: equipamentos dos SEPs, cargas industriais e cargas residenciais.

Correntes harmônicas são geradas em pequena escala e causam pequenos níveis de distorções a partir de equipamentos de geração, transmissão e distribuição e são geradas em grande escala e causam altos níveis de distorções a partir de cargas industriais e residenciais. Equipamentos de alta potência que usam retificação, especialmente aqueles com atenuação capacitiva, são os maiores contribuintes de distorções. Tradicionalmente, a saturação do núcleo do transformador durante a energização é a principal fonte de harmônicos dos equipamentos do sistema.

A carga industrial considerada maior poluente é o conversor estático de potência, que fornece energia a equipamentos industriais através de chaves eletrônicas. Fornos de indução e a arco também contribuem significativamente para as distorções. Embora sejam de baixa potência, o grande número de cargas residenciais em uso simultaneamente, e por longos períodos, proporciona grandes distorções harmônicas nos SEPs. Os equipamentos residenciais que causam maiores distorções são os alimentados por retificadores com grandes capacitores de atenuação, tais como computadores e televisores.

Normas anteriores tais como IEC 555-3 se concentram em especificar os limites de emissão para vários tipos de equipamentos conectados ao SEP. IEC 61000-3-2 (1998) e IEC 61000-3-4 (1998) delineiam os limites de emissão de equipamentos com corrente de alimentação menor que 16 A por fase e maior que 16 A por fase, respectivamente.

IEEE 519:1992 - IEEE 519:1992 também identifica as maiores fontes harmônicas nos SEPs. As fontes harmônicas descritas nesta norma incluem os conversores de energia, fornos a arco, compensadores estáticos de reativos, inversores, controladores de fase, ciclo-conversores, chaves de suprimentos e moduladores por largura de pulso. Esta apresenta as formas típicas de onda distorcidas, as ordens harmônicas e o nível de distorção de cada componente causados por cada equipamento mencionado. Esta descreve também como o sistema elétrico responderia na presença das distorções, incluindo também os fenômenos de ressonância série e paralela e o efeito da carga do sistema na magnitude de tais ressonâncias. Tendo como base as características típicas de sistemas de distribuição de baixa tensão, sistemas industriais e sistemas de transmissão, esta discute a resposta destes sistemas para distorções harmônicas.

Os efeitos das distorções harmônicas na operação de vários equipamentos ou cargas estão também incluídos nesta norma. Estes equipamentos constituem motores e geradores, transformadores, cabos, capacitores, equipamentos eletrônicos, equipamentos de medição, relés, chaves e conversores estáticos. Interferência nas redes telefônicas como resultado das distorções harmônicas nos SEPs são também discutidas. A norma apresenta também diversos

métodos possíveis para reduzir a interferência telefônica causada por distorções harmônicas nos SEPs.

Descrevem-se também os métodos de análise e requisitos de medição para avaliar os níveis de distorção harmônica nos SEPs. Sintetizam-se os métodos para calcular correntes harmônicas para calcular respostas em frequência e para modelar vários componentes do SEP para análise da propagação harmônica. A seção relacionada à medição ressalta a importância e lista vários monitores de frequências harmônicas. Descreve também requisitos de precisão e seletividade (habilidade em distinguir uma componente harmônica de outras) para estes monitores.

A norma descreve métodos para projeto de compensadores de reativos para sistemas com distorções harmônicas. Várias configurações de compensadores estáticos são discutidas indicando que alguns equipamentos, tais como alguns tiristores, são também fontes de distorções. Esta também aborda várias técnicas para reduzir a quantidade de correntes harmônicas injetadas nos sistemas alternados. Recomendações para consumidores e concessionárias são feitas para reduzir as distorções para níveis toleráveis. Esta norma conclui com recomendações para calcular novas fontes harmônicas através de medições e modelo detalhado e estudos de simulações. Apresentam-se diversos exemplos para ilustrar como as recomendações podem ser implementadas efetivamente.

2.5 Indicadores

O indicador harmônico mais conhecido é o de Distorção Harmônica Total (DHT). Este é definido como a porcentagem da amplitude das distorções em relação à componente fundamental, como apresentado na eq.(2.5). Para a maioria das aplicações é suficiente considerar as harmônicas das ordens 2ª a 25ª, no entanto normas especificam ordens que superam a 50ª.

$$DHT = \frac{\sqrt{\left(\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2\right)}}{U_1} \quad (2.5)$$

O indicador DHT pode ser adaptado para avaliar o desgaste em vários equipamentos do sistema. No entanto este indicador é normalmente utilizado para avaliar a qualidade das tensões do sistema [11].

Distorções Harmônicas Totais de Corrente (DHT_c) podem também ser calculadas através da eq. (2.6), no entanto esta pode ser mal interpretada para valores baixos de cargas com frequência fundamental. Um valor alto de DHT_c para uma dada corrente injetada pode não ser significativo se o sistema está com baixos valores de carga, mesmo sendo baixos os valores das distorções, a relação destes para o valor da fundamental é alto.

$$DHT_I = \frac{\sqrt{\left(\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2\right)}}{I_1} \quad (2.6)$$

Para evitar tal ambigüidade a IEEE Standard 519:1992 [12] definiu o fator de Distorção de Demanda Total (DDT), apresentado na eq.(2.7). Este fator é similar ao DHT_I, diferindo no fato deste ser obtido como uma porcentagem do valor nominal ou valor máximo de corrente, ao invés de usar a porcentagem do valor da corrente fundamental. Uma vez que o sistema é projetado para suportar os valores nominais ou máximos, torna-se mais realista e usual medir os níveis de distorção em relação a estes valores ao invés de utilizar um valor flutuante e função da carga do sistema.

$$DDT = \frac{\sqrt{\left(\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2\right)}}{I_{No\ min\ al}} \quad (2.7)$$

Além destes fatores gerais, existem outros índices que são específicos para equipamentos afetados pelas distorções harmônicas, onde se podem citar os índices relacionados aos transformadores e capacitores shunt [6].

2.6 Aplicações das Medições das Distorções Harmônicas

Utilizando-se os equipamentos projetados para a medição das componentes harmônicas, ou obtendo-se os valores das distorções a partir de aplicativos que tratam valores de uma forma de onda medida, podem ser realizados vários estudos, como a avaliação do impacto da distorção harmônica em uma determinada barra do sistema em um tipo de equipamento sensível.

Os equipamentos projetados para a medição de harmônicas armazenam ou fornecem os valores dos módulos e ângulos das diversas componentes harmônicas de tensão e corrente, ou mesmo o valor de um indicador como a DHT.

A medição de ângulos de fases entre componentes de tensões e correntes harmônicas, juntamente com suas amplitudes, é necessária para as seguintes proposições [6]:

1. Avaliar o fluxo harmônico através do sistema;
2. Identificar fontes de suprimento e consumo de componentes harmônicas;
3. Calcular a soma de fatores de distorção para diferentes cargas conectadas em uma mesma barra do sistema;
4. Estabelecer circuitos equivalentes para calcular o impacto de novas cargas poluentes, ou a eficiência de equipamentos mitigadores tais como filtros.

A direção da potência ativa para uma determinada ordem harmônica de interesse pode auxiliar a identificar a fonte do distúrbio. Para identificar a direção do fluxo de potência ativa é necessário conhecer o ângulo entre a tensão e a corrente para uma predeterminada ordem harmônica. Neste estudo não é necessário o conhecimento do atraso de fase da componente harmônica de tensão ou corrente em relação à fundamental (defasagem absoluta). Por outro lado, tal defasagem é necessária para avaliar o acoplamento entre frequências de cargas não lineares. Dentre os possíveis estudos adicionais fornecidos com o conhecimento da defasagem absoluta, pode-se citar alguns[6]:

1. As medições de diferentes pontos e diferentes sistemas podem ser comparadas;
2. Torna-se possível avaliar o impacto de conexões ou rearranjo de redes, ou mesmo aumento local de cargas poluentes. Harmônicas de ângulos de fase similares serão sobrepostas aumentando o valor da distorção, enquanto aquelas com ângulos de fase opostos se compensarão diminuindo os níveis de distorção;
3. Ângulos de componentes harmônicas auxiliam na avaliação do efeito global do distúrbio ou mesmo no projeto de filtros ou medidas de diminuição dos efeitos das distorções.
4. Estimar, a partir de medidores instalados em algumas barras do sistema, as distorções harmônicas em outras barras.

Cuidados extras são necessários no tratamento dos instrumentos de medições e na interpretação dos resultados, quando é necessária uma sincronização precisa através de múltiplos canais para a medição dos ângulos absolutos.

2.7 Fontes de Distorções Harmônicas

O comportamento das diversas cargas não-lineares no sistema elétrico possui, naturalmente, características harmônicas diferentes.

Intuitivamente é natural perceber que as magnitudes e fases das componentes de distorção geradas por um forno a arco são diferentes das geradas por um micro-computador. Uma determinada ordem harmônica das duas cargas consideradas pode até possuir grande similaridade, no entanto espera-se que o efeito global seja diferente.

Por outro lado, espera-se que o efeito global das distorções de dois fornos a arco, mesmo possuindo tamanhos (potência) diferentes, ou dois micro-computadores diferentes, seja similar [7].

Pode-se caracterizar as cargas não-lineares (fontes de distorções harmônicas) de diversas formas. Seguem algumas:

- Tipos Tradicionais
  - Transformadores
  - Máquinas rotativas
  - Fornos a arco
- Tipos “Modernos” – Eletrônicas
  - Lâmpadas fluorescentes
  - Controles eletrônicos
  - Equipamentos controlados por tiristores que incluem:
    - Retificadores
    - Inversores
    - Compensadores estáticos de reativos
    - Ciclo-conversores
    - Sistemas de transmissão em tensão constante

A caracterização das diversas cargas podem ainda ser ampliada, fornecendo informações cada vez mais específicas de cada equipamento do sistema.

Para a análise de um sistema elétrico amplo, as informações de algumas cargas mais representativas pode auxiliar na avaliação do comportamento das distorções.

2.8 O Efeito das Distorções Harmônicas nos Sistemas Elétricos de Potência

O aumento no uso de cargas e dispositivos não-lineares tem aumentado os problemas nos SEPs devido às distorções harmônicas. Esta seção tem o objetivo de apresentar de uma forma geral o efeito das distorções harmônicas nos equipamentos e cargas dos SEPs [7].

A referência [13] divide o efeito das distorções harmônicas em três categorias gerais:

- Efeito nas condições térmicas de operação dos equipamentos: as distorções aumentam as perdas dos equipamentos e conseqüentemente aumentam a temperatura de operação;
- Efeito na isolação dos equipamentos: o valor de pico da forma de onda de tensão pode ser incrementado na presença de distorções harmônicas (efeito conhecido como fator de crista da tensão), dependendo dos ângulos de fase das componentes harmônicas. A vida útil dos materiais utilizados na isolação pode ser afetada por esse efeito;
- Mau funcionamento de equipamentos causado pelas distorções na forma de onda.

2.8.1 Perdas Térmicas em um Ambiente com Distorções Harmônicas

Os efeitos das harmônicas relacionados à temperatura de operação dos equipamentos, podem ser analisados separadamente de acordo com o material. As perdas mais comuns estão apresentadas abaixo, de acordo com [7]:

- Perdas no cobre: o aumento das perdas no cobre devido às harmônicas pode ser mensurado pelo indicador de distorção harmônica total de corrente ou de tensão.
- Perdas no ferro: as perdas no ferro são encontradas em núcleos de ferro magnetizados por uma dada excitação ou que esteja girando em um campo magnético. Estas são as chamadas perdas por “Histerese” e correntes parasitas que, por variarem com a frequência, resultam em redução da eficiência e aumento da temperatura do núcleo.

2.8.2 Os Efeitos das Distorções Harmônicas nos Diversos Equipamentos

As harmônicas causam aumento das perdas e diminuição da vida útil dos equipamentos. A terceira harmônica resulta na condução de corrente no neutro do sistema que pode ter a ordem de grandeza da corrente de fase mesmo para cargas equilibradas.

Além do exposto, o fenômeno da ressonância associado a uma harmônica pode danificar equipamentos. As harmônicas podem interferir na atuação de relés de proteção, equipamentos de medição, circuitos de controle e comunicação e equipamentos eletrônicos de consumidores. Equipamentos sensíveis podem sofrer mau funcionamento ou falha de algum componente.

De forma um pouco mais detalhada pode-se citar os efeitos das distorções para alguns equipamentos dos SEPs [7].

Bancos de Capacitores:

As harmônicas afetam bancos de capacitores das formas como segue [7, 12]:

- Os capacitores conduzem altos valores de correntes, uma vez que as reatâncias dos capacitores diminuem com o aumento da frequência, estes atuam como filtros harmônicos canalizando as altas frequências do sistema. Desta forma, tensões harmônicas produzem altas correntes podendo causar dano ao capacitor.
- As harmônicas tendem a aumentar as perdas dielétricas. Aquecimento adicional e perda de vida útil são conseqüências diretas.
- Os capacitores combinados com fontes indutivas podem formar ressonâncias paralelas. Na presença da ressonância, as harmônicas são amplificadas. A tensão resultante deste efeito excede a tensão nominal do capacitor podendo causar dano a este.

Transformadores:

Os transformadores operando em ambientes distorcidos por harmônicas podem sofrer os seguintes efeitos:

- Aumento nas perdas no cobre e do fluxo de dispersão nos enrolamentos devido às correntes harmônicas;
- Aumento das perdas por histerese e correntes parasitas.
- A possibilidade de ocorrência de ressonância entre as reatâncias do transformador e do capacitor para correção do fator de potência torna-se possível.

- Aumento de fadigas nos materiais isolantes devido ao aumento no valor de pico da tensão.

Estes efeitos causam aquecimento do transformador e, conseqüentemente, perda de sua vida útil [7].

Máquinas Rotativas:

O maior efeito das tensões e correntes harmônicas nas máquinas rotativas é o aumento do aquecimento devido às perdas no cobre e no ferro nas frequências harmônicas. Portanto as componentes harmônicas afetam a eficiência e podem afetar o torque da máquina [12].

As correntes harmônicas em motores podem causar aumento da emissão de ruído audível em comparação com a excitação puramente senoidal. As harmônicas também produzem uma distribuição do fluxo resultante no entreferro que pode causar problemas como o impedimento de uma partida suave da máquina.

Outros efeitos possíveis são:

- Oscilações mecânicas em sistemas combinados turbina-gerador ou motor-carga e, conseqüentemente, fadiga mecânica;
- A circulação de correntes harmônicas no estator da máquina pode gerar circulação de harmônicas no rotor. Isto causa aquecimento do rotor e pode causar torques pulsantes ou causar a redução no torque da máquina;

Cabos de Energia:

Os cabos quando envolvidos em ressonância podem ser sujeitos a sobretensões e ao efeito corona, o qual pode causar falha de seu isolamento. Cabos, constantemente submetidos a níveis, mesmo baixos, de harmônicas são propensos ao aquecimento anormal.

Efeitos conhecidos como “efeito pelicular” e “efeito de proximidade” tornam-se mais evidentes na presença de correntes não senoidais em um condutor. Tais efeitos aumentam o aquecimento do condutor em relação ao fluxo apenas de correntes senoidais [12].

Equipamentos Eletrônicos:

Os Equipamentos eletrônicos são suscetíveis a falha na operação causada por distorções harmônicas. O funcionamento destes equipamentos é, normalmente, dependente da precisão do ponto de mudança de sinal (ponto em que a forma de onda cruza o zero) ou outro aspecto da forma de onda do sinal de tensão. As distorções harmônicas podem causar deslocamento do ponto de mudança de sinal ou do ponto em que o sinal de uma fase se torna maior que o de outra fase. Estes instantes representam ponto crítico de muitos tipos de circuitos eletrônicos de controle e podem causar má operação a partir destes deslocamentos.

Outros equipamentos eletrônicos podem ser afetados pela transmissão de ondas harmônicas através de suas fontes de suprimento ou pelo acoplamento magnético de harmônicas nos componentes do equipamento.

Computadores e equipamentos similares, como controladores lógicos programáveis, freqüentemente requerem fontes alternadas com níveis de distorção global da tensão (THD) não superiores a 5% e com nível harmônico para uma ordem individual não superior a 3%. Altas ordens harmônicas podem causar mau funcionamento dos equipamentos e em alguns casos levar a sérias conseqüências. Instrumentos de medição podem ser afetados de forma a fornecer dados errôneos. Talvez os mais sérios destes sejam em instrumentos médicos. Interferências harmônicas menos dramáticas podem ocasionalmente ser percebidas em equipamentos de rádio e televisão, assim como em equipamentos de reprodução de vídeo e áudio [12].

2.9 Modelagem de Equipamentos dos Sistemas Elétricos de Potencia para Estudos das Componentes Harmônicas

Uma análise rigorosa do comportamento eletromagnético dos componentes do SEP requer o uso das teorias de campo. No entanto, a aplicação direta das equações de Maxwell para a solução de problemas práticos é limitada [1]. O uso de circuitos equivalentes simplificados para a maioria dos equipamentos do SEP tem levado a soluções aceitáveis para problemas eletromagnéticos práticos.

Considerando, idealmente, a natureza convencional do SEP contendo uma só frequência, a maioria dos estudos analíticos no passado focava a frequência fundamental.

Embora o sistema elétrico possua uma natureza dinâmica, este é normalmente subdividido em regiões de regime quase permanente para o propósito de simulações. Para cada região em regime permanente, as equações diferenciais que representam a dinâmica do sistema são transformadas em equações algébricas dependentes do fator “ $j\omega$ ” e o circuito é resolvido em função dos fasores de tensões e correntes na frequência fundamental.

Pela definição, distorções harmônicas resultam de condições de operação periódicas em regime permanente e sua análise deveria também ser formulada em função de fasores no domínio da frequência.

Salienta-se, no entanto, que o comportamento complexo de alguns componentes do sistema requerem uma modelagem mais sofisticada que abrangem os domínios tempo e frequência [1].

Neste trabalho, as distorções harmônicas nos SEPs são estudadas a partir dos valores de tensões e correntes nas barras do sistema. Uma forma de se obter esses valores é através de medições com equipamentos apropriados instalados nos pontos de interesse. No entanto, para se obter esses valores através de simulações, torna-se necessária uma adequada modelagem dos equipamentos que compõem a rede elétrica a ser estudada.

Para os estudos relacionados com as distorções harmônicas a modelagem dos componentes da rede elétrica é fundamental para a segurança e precisão dos resultados [7]. Esta seção apresenta a modelagem de alguns equipamentos do SEP.

2.9.1 Impedância na Presença de Ordens Harmônicas

Um elemento com resistência R e reatância indutiva $X_L = 2\pi fL$ possui impedância $Z = R + jX_L$ na frequência fundamental. De uma forma geral a impedância deste elemento, considerando R e L independentes da frequência na presença de harmônicas se torna:

$$Z(h) = R + jhX_L \quad (2.5)$$

onde h é a ordem harmônica.

Por outro lado, um elemento capacitivo possui reatância $X_C = 1/(2\pi fC)$ na frequência fundamental. A impedância deste elemento, na presença de harmônicas, se torna:

$$X_c(h) = \frac{X_c}{h}. \quad (2.6)$$

2.9.2 Efeito Pelicular

Em um condutor, a corrente se concentra cada vez mais na superfície à medida que a frequência aumenta. Este fenômeno acarreta no aumento da resistência e a diminuição da indutância, e é chamado efeito pelicular. Considerando este efeito as impedâncias dos geradores e transformadores na presença de harmônicas podem ser expressas como segue [7]:

$$Z(h) = \begin{cases} h \cdot (R + jX), & \text{para transformadores} \\ \sqrt{h} \cdot R + jhX, & \text{para geradores} \end{cases} \quad (2.7)$$

Para linhas de transmissão pode-se considerar $\frac{R(h)}{R} = \frac{X(h)}{X} = \sqrt{h}$ para altas frequências [7], logo:

$$Z(h) = \sqrt{h} \cdot (R + jX), \text{ para linhas de transmissão} \quad (2.8)$$

2.9.3 Modelagem dos Geradores

Na presença de distorções harmônicas, a impedância de um gerador, desconsiderando o efeito pelicular, será:

$$Z = \begin{cases} Z_0(h) = Ra + jhX_0, & h = 3n \\ Z_1(h) = Ra + jhX_d'', & h = 3n + 1. \\ Z_2(h) = Ra + jhX_2, & h = 3n - 1 \end{cases} \quad (2.9)$$

Onde,

R_a é a resistência de armadura

X_d'' é a reatância sub-transitória

X_2 é a reatância de seqüência negativa

X_0 é a reatância de seqüência zero

h é a ordem harmônica.

Considerando o efeito pelicular, como já apresentado, a resistência de armadura torna-se:

$$R_a(h) = \sqrt{h} \cdot R_a \quad (2.10)$$

2.9.4 Modelagem de Capacitâncias Shunt de Linhas

Como apresentado em [7], a capacitância shunt de linhas de transmissão pode ser representada pela matriz:

$$C_{abc} = \begin{bmatrix} C_{aa} & -C_{ab} & -C_{ac} \\ -C_{ba} & C_{bb} & -C_{bc} \\ -C_{ca} & -C_{cb} & C_{cc} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Os termos negativos fora da diagonal da matriz são devidos a uma tensão positiva aplicada em um fase induzir cargas positivas nesta fase e cargas negativas nas outras fases.

Para um banco equilibrado de capacitores as capacitâncias próprias e mútuas são:

$$C_{aa} = C_{bb} = C_{cc} = C_s \quad (2.12)$$

$$C_{ab} = C_{ac} = C_{bc} = C_m \quad (2.13)$$

Desta forma, substituindo as equações 2.12 e 2.13 em 2.11 tem-se:

$$C_{abc} = \begin{bmatrix} C_s & -C_m & -C_m \\ -C_m & C_s & -C_m \\ -C_m & -C_m & C_s \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Aplicando a transformação de Spinor [14], no resultado anterior [7], tem-se:

$$C_{012} = \begin{bmatrix} C_0 & 0 & 0 \\ 0 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & C_2 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Onde:

$$C_0 = C_s - 2C_m \quad (2.16)$$

$$C_1 = C_2 = C_s + C_m = C_0 + 3C_m \quad (2.17)$$

Na presença de distorções harmônicas, as reatâncias tornam-se:

$$X_c(h) = \frac{X_c}{h} = \begin{cases} \frac{1}{hw(C_s - 2C_m)}, & h = 3n \\ \frac{1}{hw(C_s + C_m)}, & \text{demais casos.} \end{cases} \quad (2.18)$$

2.9.5 Modelagem de Bancos de Capacitores

As matrizes de impedâncias de fase e seqüência para um banco de capacitores são dados por [7]:

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} \frac{-jX_c}{h} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-jX_c}{h} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-jX_c}{h} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$Z_{012} = \begin{bmatrix} \frac{-jX_c}{h} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-jX_c}{h} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-jX_c}{h} \end{bmatrix}. \quad (2.20)$$

Ou seja, $Z_0 = Z_1 = Z_2 = -\frac{jX_c}{h}$

2.9.6 Modelagem de Transformadores

Como apresentado em [7] existem diversas formas de representação dos transformadores trifásicos de acordo com a sua ligação no SEP. Será apresentada nesta seção a modelagem do transformador ligado em $Y_{aterrado} - \Delta$. Esta modelagem é também encontrada nas referências [6] e [1].

Considerando o valor em p.u. da admitância do transformador, tem-se a matriz de admitâncias nodais correspondente:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ -I_a \\ -I_b \\ -I_c \end{bmatrix} = y \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{-1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \frac{-1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ 0 & 0 & 1 & \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{-1}{\sqrt{3}} \\ \frac{-1}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{-1}{\sqrt{3}} & 0 & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{-1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Onde os índices maiúsculos representam as grandezas do primário e os índices minúsculos, as grandezas do secundário do transformador.

A partir da eq. 2.21 obtém-se a matriz de admitâncias de seqüências como apresentada na eq. 2.22.

$$\begin{bmatrix} I_{p0} \\ I_{p1} \\ I_{p2} \\ I_{s0} \\ I_{s1} \\ I_{s2} \end{bmatrix} = y \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & e & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & f \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & e & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{p0} \\ V_{p1} \\ V_{p2} \\ V_{s0} \\ V_{s1} \\ V_{s2} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Onde $e = -1\angle 30^\circ$ e $f = -1\angle -30^\circ$.

2.9.7 Modelagem de Cargas

Uma forma comum de modelar as cargas dos SEPs é apresentada na Figura 2.1 extraída da referência [7]. A utilização de um desses modelos depende do estudo e da aplicação. De uma forma geral, o modelo paralelo Figura 2.1(a) é utilizado para representar cargas concentradas e o modelo em série, Figura 2.1(b), para representar cargas individuais.

Figura 2.1 – Modelos de cargas: (a) modelo paralelo e (b) modelo série.

Na presença de harmônicas, a admitância e a impedância das cargas ligadas em paralelo e série podem ser escritas como nas eqs. 2.23 e 2.24 que seguem:

$$Y_p(h) = \frac{1}{R_p} - jh \frac{1}{X_p} \quad (\text{modelo paralelo}) \quad (2.23)$$

$$Z_s(h) = R_s + jhX_s \quad (\text{modelo série}). \quad (2.24)$$

Salienta-se que a modelagem das cargas nos estudos que envolvem distorções harmônicas têm sido foco de estudos em diversos centros de pesquisas. A modelagem aqui apresentada compreende a modelagem clássica encontrada na literatura.

Para estudos mais aprofundados das distorções é indicada uma análise mais detalhada quanto aos modelos de cargas específicos. Este estudo não foi abordado com detalhes nesta tese devido ao fato de a modelagem implementada não utilizar o modelo das cargas nas frequências harmônicas, e sim correntes de cargas obtidas a partir de valores de tensões medidas ou estimadas.

---

3 - A ESTRATÉGIA EVOLUTIVA NO CONTEXTO DOS ALGORITMOS EVOLUTIVOS

As bases dos algoritmos evolutivos advêm dos conceitos de inteligência e evolução, que são intimamente ligados. A inteligência compreende uma parte natural da vida e pode, também, ser um processo mecânico possível de simular. A inteligência não é uma propriedade que pode ser limitada filosoficamente somente a estruturas biológicas e deve ser igualmente aplicada às máquinas. Uma vez entendido o processo, métodos para sua realização devem convergir funcionalmente e tornarem-se fundamentalmente idênticos, representando fielmente a inteligência, seja ela em um sistema vivo ou em uma máquina [15].

A maioria das pesquisas em Inteligência Artificial (IA) simula sintomas de comportamentos inteligentes observados em humanos. Como contraste, a referência [15] propõe uma definição de inteligência que não se caracteriza na comparação com o comportamento humano. A inteligência é então definida como “a capacidade de um sistema em se adaptar para alcançar um objetivo em um dado ambiente”. A natureza da inteligência é irrelevante, sua funcionalidade seria a mesma se a inteligência ocorrer em um indivíduo, um grupo social ou uma outra espécie desenvolvida. Ao invés de se focar nos seres humanos e visar simular seu comportamento e seu processo cognitivo, torna-se mais prudente reconhecer os seres humanos como produtos de uma evolução e que em se modelando processos evolucionários podem-se criar entidades capazes de gerar comportamento inteligente. A Computação Evolutiva, simulação da evolução em um computador, proporciona a base para se navegar em uma nova filosofia de máquina inteligente.

Os algoritmos desenvolvidos para realizar a computação evolutiva são conhecidos como Algoritmos Evolutivos. As diversas formas de se enfatizar uma determinada característica da evolução são o que diferem entre si os diferentes algoritmos evolutivos.

3.1 Base Biológica

A rapidez com que se partiu de observações para demonstrações experimentais, considerando mecanismos fundamentais envolvidos em um dado experimento, tornou a

história da genética fascinante para muitos. Tal fato ocorreu a partir da segunda metade do século XIX.

As primeiras idéias fundamentadas acerca da hereditariedade surgiram efetivamente em 1866, com o monge agostiniano Gregor Mendel. Focando o problema com lógica e simplicidade Mendel escolheu material adequado e com características contrastantes e desenvolveu um programa de cruzamentos controlados. A partir desta metodologia, os resultados foram tratados de forma eficiente e Mendel pode sugerir fatores causais (hoje chamados de genes) como os responsáveis pelos fenômenos observados. Até então não se havia chegado tão perto da compreensão real da hereditariedade (faltando apenas elucidar os mecanismos celulares envolvidos), mas foram necessários mais de 30 anos para que a comunidade científica reconhecesse a importância e eficácia destes resultados [16]. É curioso constatar que um dos fatores que dificultou a assimilação dos resultados de Mendel foi justamente o intenso debate reinante nos meios científicos após a divulgação das leis de seleção natural de Darwin.

Desde Darwin, a teoria da evolução vem sendo a principal idéia unificadora nas mais diversas áreas da biologia, pois a seleção natural é a força propulsora que distingue os sistemas biológicos dos demais sistemas físicos e químicos.

A teoria da seleção natural não prevê apenas a ocorrência de variações sucessivas em indivíduos de uma dada espécie, fato já conhecido anteriormente, mas também indica o tipo de variação, as quais devem necessariamente conduzir o organismo a uma melhor adaptação ao meio. O ponto forte da teoria darwinista (Charles Darwin, naturalista inglês, 1809-1882) é justamente a explicação de como se dá a adaptação, sendo que a teoria lamarckista (Jean Baptiste de Lamarck, naturalista francês, 1744-1829), a única alternativa a esta idéia na época, não podia explicar o processo adaptativo. No entanto, a rejeição da teoria lamarckista não podia ser demonstrada de forma simples. Até o início do século XX, não estava ainda claro qual das duas teorias explicava melhor o processo evolutivo. Lamarck acreditava na herança direta de características adquiridas pelos indivíduos durante sua vida. Darwin, por sua vez, propôs que a seleção natural, associada à diversidade, poderia explicar melhor a evolução. O próprio Darwin, embora certo de que sua teoria descrevia os fatores predominantes do processo evolutivo, não descartava totalmente a teoria lamarckista, acreditando que ela podia representar um pequeno papel neste processo. A teoria lamarckista foi considerada viável até que um trabalho publicado em 1893 passou a ser amplamente aceito. Weismann, autor do trabalho, constatou que organismos superiores apresentam dois tipos de células: as células

germinativas (que passam informação genética aos descendentes) e as células somáticas (que compõem o organismo em suas partes não diretamente associadas à reprodução) [16].

A principal contribuição de Weismann foi indicar a impossibilidade de que informações adquiridas pelas células somáticas sejam transmitidas aos descendentes pelas células germinativas. É possível expressar o argumento de Weismann em termos moleculares, através do dogma central da biologia molecular: a informação pode passar de DNA para DNA, e de DNA para proteína, mas não de proteína para DNA. Neste caso, a informação é representada pela sequência básica do DNA, que é transmitida para novas moléculas de DNA no processo de replicação e que especifica a sequência de aminoácidos das proteínas no processo de tradução. O fato de que a informação passa do DNA para a proteína através do RNA (mensageiro intermediário) complica o argumento, mas não altera a essência, como apresentado na Figura 3.1 extraída da referência [16].

Figura 3.1 - Fluxo de informação em um sistema genético

Com base neste dogma, e assumindo que os ácidos nucleicos representam a única forma de se transmitir informação entre gerações, resultam implicações fundamentais para a evolução. Como toda mudança evolutiva requer modificação nos ácidos nucleicos (por exemplo, via mutação), então estas mudanças são essencialmente acidentais e inerentemente não-adaptativas. Esta idéia compreende a base da teoria neodarwinista [15].

Darwin apresentou as seguintes hipóteses para explicar o processo de seleção natural:

- a. os filhos tendem a ser em maior número que os pais;
- b. o número de indivíduos de uma espécie permanece aproximadamente constante;
- c. de (1) e (2), constata-se a necessidade de luta pela sobrevivência;
- d. dentro de uma mesma espécie, os indivíduos apresentam pequenas diferenças.

O princípio da seleção natural indica que os indivíduos cujas variações se adaptam melhor ao ambiente terão maior probabilidade de sobreviver e se reproduzir. A evolução darwiniana é nada mais que a consequência inevitável da competição entre sistemas de reprodução de informação, operando no interior de uma arena finita [15].

Embora Darwin tenha considerado estas hipóteses como suficientes para explicar a origem das espécies, hoje elas são aceitas apenas como suficientes para explicar os processos

adaptativos em nichos ecológicos. Para transformar esta “teoria de ecologia” em uma “teoria da origem das espécies” é necessário considerar três hipóteses adicionais vinculadas à genética, conduzindo ao neodarwinismo:

- e. algum processo de variação continuada deve ser responsável pela introdução de novas informações junto à carga genética dos organismos;
- f. não há limite para a sucessão de variações que podem ocorrer;
- g. a seleção natural é o mecanismo para preservação das novas informações que correspondam a uma maior adaptação.

Logo, a seleção natural é probabilística, e seu alvo primário é o indivíduo, embora seu efeito resultante se manifeste na espécie como um todo. A espécie é o beneficiário final do processo evolutivo [16]

3.2 Fenótipo e Genótipo

Organismos vivos podem ser vistos como uma dualidade entre seu código genético (genótipo) e suas características comportamentais, fisiológicas e morfológicas (fenótipo) [15]. Em sistemas evoluídos naturalmente, não existe uma relação biunívoca entre um gene (elemento do genótipo) e uma característica (elemento do fenótipo): um único gene pode afetar diversos traços fenotípicos simultaneamente (pleiotropia) e uma única característica fenotípica pode ser determinada pela interação de vários genes (poligenia). Os efeitos de pleiotropia e poligenia geralmente tornam os resultados de variações genéticas imprevisíveis. Sistemas naturais em evolução são fortemente pleiotrópicos e altamente poligênicos. O mesmo não ocorre em sistemas artificiais, onde uma das principais preocupações era o custo computacional do sistema. Assim, em sistemas artificiais, normalmente existe uma relação de um-para-um entre genótipo e fenótipo.

O processo de evolução pode ser formalizado de acordo com Atmar e Fogel [15], como segue: considere dois espaços distintos – um espaço de estados genotípico (codificação) **G** e um espaço fenotípico (comportamental) **F**.

O processo de evolução de uma população em uma geração encontra-se esquematizado na Figura 3.2 extraída de [15].

Figura 3.2 – Evolução de uma população durante uma geração.

O mapeamento f_1 , denominada *epigênese*, mapeia elementos $g_1 \in \mathbf{G}$ em uma coleção particular de fenótipos p_1 do espaço fenotípico $\mathbf{F}$, cujo desenvolvimento é modificado por seu ambiente. Este mapeamento é inerentemente de muitos-para-um, pois existe uma infinidade de genótipos que podem resultar num mesmo fenótipo; elementos de um conjunto infinito de códigos não-expressos (não-participantes na produção do fenótipo) podem existir em g_1 .

O mapeamento f_2 , *seleção*, mapeia fenótipos p_1 em p_2 . Este mapeamento descreve os processos de seleção e migração de indivíduos dentro da população local. Como a seleção natural opera apenas nas expressões fenotípicas do genótipo, o código g_1 não está envolvido no mapeamento f_2 . A referência [17] enfatiza que a seleção atua apenas no sentido de eliminar as variantes comportamentais menos apropriadas do inevitável excesso da população, já que se assume aqui que os recursos provenientes do ambiente são limitados, exigindo a competição pela sobrevivência. Neste processo de competição, a seleção nunca opera sobre uma característica simples, isoladamente do conjunto comportamental [15].

O mapeamento f_3 , *representação ou sobrevivência genotípica*, descreve os efeitos dos processos de seleção e migração em $\mathbf{G}$.

O mapeamento f_4 , *mutação e recombinação*, mapeia códigos $g_2 \in \mathbf{G}$ em $g'_1 \in \mathbf{G}$. Este mapeamento descreve as “regras” de mutação e recombinação, e abrange todas as alterações genéticas. A mutação é um erro de cópia no processo de transmissão do código genético dos pais para a sua prole. Em um universo com diferencial de entropia positivo, erros de

replicação são inevitáveis e a otimização evolutiva torna-se inevitável em qualquer população que se reproduz em uma arena limitada.

Com a criação da nova população de genótipos g'_1 , uma geração está completa. A adaptação evolutiva ocorre em sucessivas iterações destes mapeamentos [15].

O biólogo Sewell Wright propôs, em 1931, o conceito de superfície de adaptação para descrever nível de adaptação de indivíduos e espécies. Uma população de genótipos é mapeada em seus respectivos fenótipos que por sua vez são mapeados na superfície de adaptação. Cada pico (máximo local) da superfície de adaptação corresponde a uma coleção de fenótipos otimizada, e portanto a um ou mais conjuntos de genótipos otimizados. A evolução é um processo que conduz, de forma probabilística, populações em direção a picos da superfície, enquanto que a seleção elimina variantes fenotípicas menos apropriadas. Outros pesquisadores propõem uma visão invertida da superfície de adaptação: populações avançam descendo picos da superfície de adaptação até que um ponto de mínimo seja encontrado.

Qualquer que seja o ponto de vista, a evolução é inerentemente um processo de otimização. A seleção produz fenótipos tão próximos de um ponto ótimo quanto possível, dadas condições iniciais, restrições ambientais e parâmetros evolutivos. Observe, no entanto, que em sistemas biológicos reais, não existem superfícies de adaptação estáticas. O ambiente está em constante mudança e, conseqüentemente, populações estão em constante evolução em direção a novos pontos “ótimos”. Neste caso, assumindo que as mudanças ambientais são significativas, a taxa evolutiva deve ser suficientemente elevada para acompanhar as mudanças ambientais.

3.3 Os Algoritmos Evolutivos

Como apresentado em [16], os conceitos de computação evolutiva têm sido empregados em uma variedade de disciplinas, desde ciências naturais e engenharia até biologia e ciência da computação. A idéia básica surgida nos anos 50 é aplicar o processo de evolução natural como um paradigma de solução de problemas, a partir de sua implementação em computador.

Um ponto positivo na utilização da computação evolutiva está na possibilidade de se resolver um determinado problema pela simples descrição matemática do que se quer ver presente na solução, não havendo necessidade de se indicar explicitamente os passos até o resultado, que certamente seriam específicos para cada caso. Embora os algoritmos evolutivos

correspondam a uma seqüência de passos até a solução, estes passos são os mesmos para uma ampla gama de problemas, fornecendo robustez e flexibilidade. Sendo assim, a computação evolutiva deve ser entendida como um conjunto de técnicas e procedimentos genéricos e adaptáveis, a serem aplicados na solução de problemas complexos, para os quais outras técnicas conhecidas são ineficazes ou nem sequer são aplicáveis.

Em termos históricos, três algoritmos para computação evolutiva, descritos de forma mais abrangente nas referências [15] e [18], foram desenvolvidos independentemente:

- *algoritmos genéticos* – introduzidos por Holland em 1975 com o objetivo de formalizar matematicamente e explicar rigorosamente processos de adaptação em sistemas naturais e desenvolver sistemas artificiais (simulados em computador) que retenham os mecanismos originais encontrados em sistemas naturais. Os algoritmos genéticos empregam operadores chamados *crossover* e *mutação* (a serem apresentados mais adiante);
- *programação evolutiva* – introduzida por Fogel, foi originalmente proposta como uma técnica para criar inteligência artificial através da evolução de máquinas de estado finito (FSM);
- *estratégias evolutivas* – por Rechenberg e Schwefel, foram inicialmente propostas com o objetivo de solucionar problemas de otimização de parâmetros, tanto discretos como contínuos. Em virtude de empregarem principalmente os operadores de *mutação*, grandes contribuições em relação à análise e síntese destes operadores foram elaboradas.

A computação evolutiva engloba, portanto, uma família de algoritmos inspirados na teoria evolutiva de Darwin. Os primeiros livros e teses sobre computação evolutiva já apresentavam demonstrações impressionantes acerca da capacidade dos algoritmos evolutivos, apesar das limitações de hardware existentes na época. No entanto, de modo similar a outras iniciativas de propor métodos de solução de problemas inspirados na natureza, tal como redes neurais artificiais e sistemas nebulosos, os algoritmos evolutivos também tiveram que atravessar um longo período de rejeição e incompreensão antes de receberem o reconhecimento da comunidade científica. Os progressos verificados nos anos 90 confirmaram o poder impressionante dos algoritmos evolutivos na solução de problemas reais de elevada complexidade, assim como evidenciaram suas limitações. A referência [19] aborda o tema “Computação Evolutiva” de forma aprofundada e abrangente. A referência [20] cita outros trabalhos importantes para um aprofundamento no estudo desta técnica, sob vários pontos de vista.

Os algoritmos evolutivos não devem ser considerados “prontos para uso”, mas sim um elenco de procedimentos gerais que podem ser prontamente adaptados a cada contexto de aplicação [20].

3.4 A Estrutura de um Algoritmo Evolutivo

Apesar das abordagens supracitadas terem sido desenvolvidas de forma independente, seus algoritmos possuem uma estrutura comum. O termo algoritmo evolutivo é usado como uma denominação comum a todas essas abordagens. A estrutura de um algoritmo evolutivo pode ser dada na forma [20]:

```

t = 0;
inicie P(t);
avale P(t);
enquanto (critério de parada não satisfeito) faça
    P'(t) = variação P(t);
    avale P'(t);
    Q(t) = f[P(t)];
    P(t + 1) = seleção [P'(t) U Q(t)];
    t = t + 1
fim

```

Neste algoritmo, $P(t)$ denota uma população de μ indivíduos na geração t . Q representa um conjunto de indivíduos que podem ser considerados para a seleção. Por exemplo, Q pode ser igual ao conjunto $P(t)$, no entanto Q também pode ser igual ao conjunto nulo. Desta forma o conjunto Q pode ser escrito como uma função da população $P(t)$, ou seja $Q(t) = f[P(t)]$. Uma nova geração de indivíduos $P'(t)$ de tamanho λ é gerada pela variação do conjunto $P(t)$ através de operadores tais como recombinação e/ou mutação. Os novos indivíduos $P'(t)$ são então avaliados medindo-se a “distância” de cada um destes da solução “ótima” do problema considerado. Como produto da avaliação, a cada indivíduo é atribuído uma nota (medida de adaptação), sendo que as maiores notas são atribuídas aos indivíduos que representam uma solução mais próxima da almejada. Então, uma nova população é formada na iteração $t + 1$ pela seleção dos indivíduos mais adaptados.

Após um determinado número de gerações, a condição de parada deve ser atendida, a qual usualmente indica a existência, na população, de um indivíduo que represente uma

solução aceitável para o problema, ou quando o número máximo de gerações foi atingido [18] e [20].

As abordagens evolutivas apresentadas nesta seção diferem em diversos aspectos, dentre os quais se destacam: estruturas de dados utilizadas para codificar um indivíduo, operadores genéticos empregados, métodos para criar a população inicial e métodos para selecionar indivíduos para a geração seguinte. Entretanto, perdura o princípio comum: uma população de indivíduos sofre algumas transformações e durante a evolução os indivíduos competem pela sobrevivência [16].

3.5 Estratégias Evolutivas

As Estratégias Evolutivas (EE) foram desenvolvidas por Rechenberg e Schwefel. Estes iniciaram os estudos neste campo nos anos 60 na *Technical University of Berlin*, na Alemanha. A metodologia inicial, denominada (1+1)-EE [15], utilizava um único indivíduo e este gerava através de mutação um único descendente. O operador seleção era então aplicado nestes indivíduos, pai e filho, e o melhor indivíduo permanecia na próxima geração. Na prática este algoritmo de otimização possui duas grandes desvantagens: (1) o passo constante de variação em cada geração tornava o processo lento para convergir para uma solução ótima, e (2) a fragilidade do método de busca ponto-a-ponto poderia tornar o processo suscetível a estagnar em um mínimo local.

Schwefel desenvolveu o uso de múltiplos pais e filhos em estratégias evolutivas como sucessão do trabalho de Rechenberg que usava múltiplos pais porém um único filho gerado através dos operadores mutação e recombinação. Duas propostas têm sido amplamente exploradas, denominadas por $(\mu+\lambda)$ -EE e (μ,λ) -EE. Na primeira proposta, μ pais são utilizados para criar λ filhos e todas soluções competem pela sobrevivência de μ novos pais para a próxima geração. Na última proposta somente os λ filhos competem pela sobrevivência e os μ pais são completamente alterados a cada geração.

A representação dos indivíduos em estratégias evolutivas é baseada em valores reais diretamente ligados aos parâmetros de otimização que representam solução do problema. Esta representação pode ser expressa de forma geral através da eq. 3.1.

$$f : \mathbf{M} \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \quad (3.1)$$

Em algoritmos genéticos a mutação foi introduzida como um operador de menor expressão introduzindo variabilidade aos indivíduos através da mudança da informação

genética contida em um locus do indivíduo. Este operador, em algoritmos genéticos, atua em uma pequena porcentagem dos indivíduos de acordo com uma função de distribuição de probabilidade. Em EE a mutação compreende o principal operador de evolução. Os indivíduos consistem em variáveis objetivo $x_i \in \mathfrak{R}$ ($1 \leq i \leq n$) e são chamados de parâmetros estratégicos. O operador mutação atua em cada elemento do vetor de forma independente adicionando um valor aleatório pertencente a uma distribuição normal com variância zero e desvio padrão σ . Desta forma a geração de filhos é criada a partir da mutação como apresentado na eq. 3.2

$$x'_i = x_i + \sigma \cdot N_i(0,1) \quad (3.2)$$

onde $N_i(0,1)$ é um número aleatório com desvio padrão unitário e média nula.

O desvio padrão σ presente na eq. 3.2 representa o passo de mutação para a geração dos indivíduos filhos. Este passo, na formulação apresentada, permanece constante por toda evolução. Desta forma, para um passo de mutação pequeno a evolução é lenta e, conseqüentemente o algoritmo demorará em encontrar uma solução para o problema proposto. Por outro lado, a escolha de um passo maior de mutação proporcionará uma evolução mais rápida, porém a grande variação dos indivíduos em torno da solução ótima pode direcioná-los para um ótimo local ou apresentar dificuldade na convergência do algoritmo.

Como mencionado em [20], Schwefel introduziu novos parâmetros na representação dos indivíduos de forma a controlar o passo de mutação ou passo de evolução. Tais parâmetros proporcionaram a auto-adaptação dos indivíduos. Neste procedimento, detalhado na referência [21], o passo de mutação passa a representar uma variável que também sofre mutação e ao mesmo tempo fornece instruções ao indivíduo de como sofrer mutação [15].

Formalmente um indivíduo $\vec{a} = (\vec{x}, \vec{\sigma})$ consiste em variáveis objetivo $\vec{x} \in \mathfrak{R}^n$ e parâmetros estratégicos $\vec{\sigma} \in \mathfrak{R}_+^n$. Desta forma a mutação com auto-adaptação ocorre como apresentado na eq. 3.3.

$$\begin{aligned} \sigma'_i &= \sigma_i \cdot \exp(\tau' \cdot N(0,1) + \tau \cdot N_i(0,1)) \\ x'_i &= x_i + \sigma'_i \cdot N_i(0,1) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Onde:

$\sigma'_i \rightarrow$ variação do parâmetro σ de índice i

$\sigma_i \rightarrow$ passo de mutação

- $N_i(0,1)$ → valor sorteado a cada geração com distribuição normal de média 0 e desvio padrão 1.
- $N(0,1)$ → valor sorteado com distribuição normal de média 0 e desvio padrão 1. Este se mantém constante para cada indivíduo.
- τ' → taxa de aprendizado ($\propto (\sqrt{2\beta})^{-1}$)
- τ → taxa de aprendizado ($\propto (\sqrt{2\sqrt{\beta}})^{-1}$)

Neste esquema de mutação utiliza-se frequentemente $\beta=2$, como mencionado na referência [20]. As vantagens deste esquema sobre o mecanismo auto-adaptativo original de adição, advindo dos algoritmos de programação evolutiva, foram indicadas após extensivas investigações empíricas. O esquema original é representado pela eq. 3.4, onde $\alpha \approx 0.2$.

$$\sigma'_i = \sigma_i \cdot [1 + \alpha \cdot N(0,1)] \quad (3.4)$$

O operador recombinação, aliado à mutação, tem por objetivo introduzir variabilidade à busca aleatória da solução do problema. Parte-se do princípio que a troca de informações “genéticas” entre indivíduos de uma mesma espécie pode resultar em indivíduos melhores, ou também, evitar que o algoritmo convirja para “ótimos” locais.

O cruzamento consiste em criar um novo indivíduo que contenha informação genética resultante da combinação das informações genéticas de seus pais.

Uma forma de se realizar a recombinação em estratégias evolutivas consiste em obter os parâmetros de cada indivíduo gerado por um processo de reprodução, assim como seus passos de mutação, através da média aritmética dos parâmetros e dos passos dos indivíduos pais.

Os indivíduos pais utilizados pelo operador recombinação são escolhidos aleatoriamente e o número de recombinações por população é determinado por um valor de porcentagem da população inicial.

Matematicamente, pode-se obter a recombinação através das eqs. 3.5 e 3.6 que seguem.

$$x_i(indiv3) = \frac{x_i(indiv1) + x_i(indiv2)}{2} \quad (3.5)$$

$$\sigma_i(indiv3) = \frac{\sigma_i(indiv1) + \sigma_i(indiv2)}{2} \quad (3.6)$$

A avaliação dos indivíduos da população deve indicar o quão perto da melhor solução está um indivíduo, considerando que cada indivíduo representa uma solução para o problema.

Sendo assim, o algoritmo genérico para as EE envolve tipicamente três passos que devem ser repetidos até que um determinado número limite de iterações seja excedido ou que uma solução desejável seja obtida:

1. Uma população de possíveis soluções é escolhida aleatoriamente, representando uma população inicial de indivíduos pais. O número de indivíduos na população é altamente relevante para a velocidade da otimização, mas não há meios de saber de antemão qual o número apropriado de indivíduos.

2. Cada população de pais é replicada em uma nova população. Cada uma das soluções descendentes é modificada de acordo com operadores de mutação e recombinação.

3. Cada solução descendente é avaliada pela computação de sua adequação. Tipicamente são empregados métodos estocásticos para determinar N soluções que serão mantidas na população de soluções, entretanto isso é ocasionalmente feito de modo determinístico. O tamanho da população não precisa necessariamente ser mantido constante, nem um número fixo de descendentes é determinado para cada progenitor.

Os processos de mutação e recombinação, conhecidos como operadores, não dependem, a priori, da natureza do problema. Já a formulação do indivíduo e o método de avaliação devem ser adaptados ao problema específico.

A Figura 3.1 apresenta um fluxograma para o desenvolvimento de um algoritmo de EE. Como apresentado, uma população inicial é gerada e em seguida avaliada. O critério de parada é verificado para a população inicial embora a probabilidade de se obter uma solução ótima para o problema nesta etapa seja desprezível para a maioria dos casos. Após a primeira avaliação e checagem do critério de parada é gerada uma população de indivíduos filhos caso o critério não seja verificado. Os indivíduos filhos são gerados através dos operadores mutação e recombinação. Novamente a atual geração de indivíduos é avaliada e nesta etapa pode também ser selecionada a população de pais para a próxima etapa, que pode ser a próxima geração de indivíduos pais ou a solução do problema. O critério de parada é novamente verificado e, caso não o seja atendido, o procedimento retorna à etapa de geração dos indivíduos filhos.

Figura 3.3 – Fluxograma representativo do algoritmo de Estratégia Evolutiva.

Graficamente pode-se descrever o funcionamento do algoritmo de EE utilizando a função apresentada na Figura 3.4. Com o objetivo de maximizar a função $F(x)$, tem-se:

- Os indivíduos de EE representarão um valor de x ;
- A avaliação fornecerá uma maior nota para os indivíduos (valores de x) que resultarem em maior valor de $F(x)$, por exemplo o próprio valor de $F(x)$;
- A seleção será realizada pela escolha dos indivíduos com maiores notas, ou seja, os indivíduos mais próximos do valor máximo da função;

Serão sorteados oito indivíduos dentro do intervalo $[-1, 1]$ e cada indivíduo sofrerá duas mutações. A recombinação será apresentada durante a evolução em apenas uma geração.

O objetivo dos indivíduos sorteados é atingir o ponto em destaque na Figura 3.4 que representa o valor máximo da função.

Figura 3.4 – Função exemplo do algoritmo de EE – ponto máximo da função em destaque.

Os indivíduos sorteados para a população inicial estão apresentados como círculos em cor cinza na Figura 3.5. Cada um destes círculos/indivíduos será submetido à mutação e gerará outros dois indivíduos, chamados filhos. A Figura 3.6 apresenta os indivíduos filhos gerados por mutação, juntamente com os indivíduos pais.

Figura 3.5 – Indivíduos da população inicial representados pelos círculos em cor cinza.

Figura 3.6 – Indivíduos filhos em cor cinza claro gerados por mutação a partir dos indivíduos pais em cor cinza escuro.

As funções de avaliação e seleção são então acionadas de forma a se obter os melhores indivíduos no conjunto dos pais, juntamente com os filhos. Este método de seleção em que os pais e os filhos são considerados na seleção é chamado de método $(\mu+\lambda)$. A Figura 3.7 apresenta os indivíduos selecionados para a próxima geração. Nesta análise, os indivíduos que se encontram mais à direita do gráfico possuem maiores notas que os indivíduos no centro. Este fato indica a dificuldade de se encontrar o ótimo global neste problema, uma vez que os

indivíduos com maiores notas seguem para um ótimo local. Ainda assim, o algoritmo é capaz de encontrar o ponto de máximo da função, tendo-se os indivíduos localizados no centro da figura com boas notas.

Figura 3.7 – Indivíduos selecionados para a segunda geração.

Novamente os indivíduos selecionados sofrem mutação (Figura 3.8). Nesta etapa é também apresentado o efeito do operador recombinação em que um indivíduo, em destaque na Figura 3.8, é gerado a partir da troca de informações entre dois indivíduos pais previamente escolhidos.

Figura 3.8 – Indivíduos da segunda geração em cinza escuro, seus filhos gerados por mutação em cinza claro e um indivíduo gerado por recombinação em preto.

Novamente os melhores indivíduos são escolhidos (Figura 3.9) gerando a terceira geração de indivíduos pais. Estes serão submetidos à mutação e seleção até que um critério de parada seja satisfeito.

Figura 3.9 – Indivíduos selecionados para a terceira geração.

A Figura 3.10 apresenta os indivíduos da terceira geração com seus filhos gerados por mutação. Nesta geração os indivíduos localizados próximos do máximo global da função adquirem notas superiores aos indivíduos mais a direita da figura. Este fato garante a convergência do algoritmo para o máximo global, uma vez que no conjunto dos melhores indivíduos estarão presentes os indivíduos mais próximos do máximo global.

Figura 3.10 – Indivíduos da terceira geração em cinza escuro e seus filhos gerados por mutação em cinza claro.

A Figura 3.11 apresenta mais um passo de evolução, com os indivíduos da quarta geração tendo gerado seus filhos por mutação.

Na Figura 3.12 os indivíduos pais da sexta geração, supostamente, satisfazem o critério de parada do problema indicando a convergência do algoritmo.

Figura 3.11 – Indivíduos da quarta geração em cinza escuro e seus filhos gerados por mutação em cinza claro.

Figura 3.12 – Indivíduos da sexta geração em cinza escuro e ponto de máximo global em preto.

---

4 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo visa apresentar os estudos referentes à Estimação de Estados das Distorções Harmônicas (EEDH) encontrados na literatura. Tais estudos compreendem as bases utilizadas para no delineamento do trabalho de pesquisa realizado nesta tese.

Dois ramos de trabalhos que utilizam o termo “Estimação Harmônica” podem ser encontrados na literatura. São estes:

1. Estimação do conteúdo harmônico de uma forma de onda;
2. Estimação das distorções harmônicas em pontos não monitorados de um sistema elétrico a partir de medições em algumas barras.

Como referências da primeira abordagem tem-se, por exemplo, Osowsky [22] que apresenta uma metodologia baseada em redes neurais artificiais para estimar o conteúdo harmônico de uma forma de onda, Lobos *et al* [23] que apresentam um método matemático baseado na decomposição em valor singular (do inglês SVD – *Singular Value Decomposition*) para estimação de distorções harmônicas e inter-harmônicas e Beides *et al* [24] que apresentam uma metodologia de estimação dinâmica do conteúdo harmônico utilizando filtro Kalman.

O trabalho desenvolvido por Hegazy *et al* [25] apresenta o efeito da escolha do modelo utilizado na precisão da estimação harmônica. Os autores abordaram as técnicas *off-line* e *on-line*. Na técnica *off-line* o problema de estimação harmônica foi resolvido utilizando as técnicas: FFT, Mínimos Quadrados (do inglês LS – *Least Square*) e Mínimo Valor Absoluto (do inglês LAV – *Least Absolute Value*). A técnica FFT apresentou maiores erros quando os parâmetros básicos pré-estabelecidos para a estimação sofreram variações. A técnica LS apresentou alta sensibilidade na presença de medições espúrias, o que não ocorreu com a técnica LAV que rejeita medições espúrias e obtém uma estimação com pequenos erros. Quanto à técnica *on-line* o problema de estimação foi resolvido utilizando-se a análise de séries temporais e redes neurais artificiais. A metodologia de séries temporais foi resolvida utilizando três técnicas diferentes: mínimos quadrados, filtro Kalman e valor da média mínima. Nesta abordagem a técnica de mínimos quadrados apresentou os menores erros de estimação. No entanto a metodologia de séries temporais apresentou sensibilidade quanto à ordem modal utilizada. A metodologia utilizando Redes Neurais Artificiais apresentou erros

tão pequenos quanto a técnica de mínimos quadrados utilizando a melhor ordem modal para a estimação.

No entanto, o escopo do trabalho desta tese refere-se à segunda abordagem: estimar o conteúdo harmônico em barras não monitoradas em uma rede elétrica a partir de medições em algumas barras. Dentro deste escopo foram selecionados os trabalhos que representam o estado da arte para serem apresentados.

Como primeira referência destaca-se Heydt [3] que descreveu um método para identificar fontes de sinais harmônicos no Sistema Elétrico de Potência (SEP). Uma vez que a maior parte dos estudos referentes às distorções harmônicas buscava analisar o problema do fluxo de uma determinada carga harmônica no SEP, o autor tratou o problema reverso: Identificar uma fonte de distorções harmônicas em um sistema. Para tratar o problema foi proposto um estimador utilizando o método dos Mínimos Quadrados que calcula o espectro de injeção nas barras suspeitas de serem fontes de sinais harmônicos. Desta forma, quando é encontrada uma injeção de frequências harmônicas na rede através da barra, esta é identificada como uma fonte de sinais harmônicos. Tal identificação é baseada no fato de que em uma rede de transmissão linear, a potência ativa associada às tensões e às correntes da mesma frequência é conservada, o que possibilitou a definição de duas formas de identificação de fontes harmônicas: uma através de medições de correntes e outra através de medições de tensões. Um ponto destacado pelo autor refere-se aos erros que podem ocorrer devido às perdas de potências ativa e reativa, erros inerentes ao método de estimação e erros na modelagem do sistema elétrico (parâmetros concentrados). Os testes apresentados no artigo foram realizados utilizando-se medições obtidas através de um sistema telefônico que permitiram a sincronização no tempo das medições. Apesar das fontes de erros citadas e considerando um número suficiente de pontos de medição, o método é capaz de identificar fontes harmônicas e em alguns casos identificar o tipo de fontes harmônicas.

Najjar *et al* [26] propõem um método de EEDH baseado na técnica de mínimos quadrados a partir da lei de Kirchhoff. Utilizando uma matriz de pesos para os pontos de medição, a metodologia proposta aumenta a confiança nos resultados oferecendo notas altas para as barras com medições melhores, e notas baixas para barras com medições menos confiáveis. A partir de medições simultâneas enviadas a um ponto central de processamento, o espectro harmônico dos sinais é analisado através da Transformada Rápida de Fourier (do inglês FFT – *Fast Fourier Transform*). As implementações práticas revelaram que para ordens harmônicas superiores a 19^a, a metodologia fornece erros elevados devido a baixa amplitude destes sinais.

Outro trabalho a ser destacado é o desenvolvido por Meliopoulos *et al* [4], que apresentaram as especificações de Hardware e Software necessários para o desenvolvimento de um sistema de medição de Harmônicos. O objetivo desta especificação é a realização de medições simultâneas de sinais harmônicos em diversas partes do SEP, tendo uma mesma referência de tempo com uma precisão necessária, possibilitando a estimação de fontes harmônicas em barras do SEP sem medição. Os autores descrevem duas formas de sincronização do tempo: uma utilizando GPS, e outra utilizando as saídas de um estimador de estados, uma vez que foram consideradas medições realizadas em todos os pontos da rede, a redundância existente possibilita alto grau de precisão na sincronização. Tal trabalho especifica os medidores a serem utilizados, os computadores locais, o computador central, bem como os softwares responsáveis pelo tratamento dos sinais medidos. O computador central é o responsável pela estimação de sinais harmônicos.

Farach *et al* [27] trataram o problema de localização ótima de medidores para a detecção de fontes harmônicas no SEP. Para a solução deste problema, os autores propuseram o critério da mínima variância. Na formulação apresentada, os valores de tensão nas barras e correntes injetadas são variáveis aleatórias, sendo as correntes injetadas definidas como uma distribuição Gaussiana. A distribuição das injeções das correntes harmônicas nas barras indicará as fontes de distorções no sistema. Os valores de correntes sorteados são avaliados através de comparação com os valores medidos, buscando-se assim a convergência para valores que minimizem o erro de estimação. Os autores ressaltaram também a facilidade de se incorporar na formulação informações conhecidas sobre o conteúdo harmônico de determinadas barras do sistema em estudo. Para tal formulação o processo de solução apoiou-se nas seguintes características chave: um modelo que descreveu a relação entre as medições e as variáveis a serem estimadas, um critério de estimação, um modelo matemático para os erros inerentes ao problema e nas características da melhor configuração para medição ou observação visando a identificação de fontes de distorções harmônicas.

Meliopoulos *et al* [5] desenvolveram um sistema de EEDH como o método de mínimos quadrados utilizando uma modelagem trifásica para o sistema em estudo. Tal implementação utilizou também, medidas de tensão e corrente sincronizadas via GPS. Foi apresentada uma análise de sensibilidade do impacto de assimetrias e desequilíbrios nos resultados da estimação. Segundo este desenvolvimento, a estimação de estados realizada na frequência fundamental em um sistema trifásico, representa um subcaso do método desenvolvido, que compreende uma nova geração de algoritmos estimadores para o SEP. Outra contribuição apresentada pelos autores consiste na discussão da importância da

modelagem e extensão da análise tradicional de observabilidade para a os EEDH. Os autores propuseram também a utilização do nível de confiança das medições como informações de entrada para o algoritmo de estimação.

Du *et al* [28] propuseram um algoritmo de EEDH para funcionar continuamente a partir de medições contínuas de distorções harmônicas em sistemas elétricos com modelamento trifásico e desequilibrado. Os autores utilizaram o conhecimento do sistema em estudo como ponto principal de informações de entrada para o algoritmo proposto, tornando o problema de estimação sobre-determinado, diminuindo o número de variáveis de estado do problema. O conhecimento prévio do sistema permitiu eliminar barras que eram fontes de distorções e determinar as barras suspeitas de serem fontes de distorção. Este procedimento acarretou na diminuição do esforço computacional a ser utilizado para estimação permitindo a aplicação do algoritmo em casos contínuos. As medições das distorções a serem utilizadas no trabalho foram viabilizadas por novos equipamentos em que a sincronização das informações foi obtida através de um canal de comunicação com GPS. O algoritmo foi aplicado em um sistema real e apresentou informações completas referentes ao conteúdo harmônico do sistema com a localização e os tipos de fontes de distorções harmônicas.

Ma *et al* [29] propuseram uma metodologia para alocação ótima de medidores de distorções harmônicas juntamente com uma técnica de EEDH. Os filtros de Kalman são utilizados para tratar os problemas. A metodologia foi aplicada em uma rede elétrica trifásica desequilibrada. Através de um modelo de estimação baseado em filtro de Kalman tendo as injeções de correntes harmônicas como variáveis de estado, é realizada a análise da covariância dos erros de correntes harmônicas injetadas pelo filtro de Kalman. Este procedimento é usado para determinar a alocação ótima de medidores. Com a alocação ótima fornecida o filtro de Kalman é capaz de estimar e localizar cada injeção harmônica no SEP. A eficiência da metodologia foi verificada utilizando medições simuladas e reais.

Os quesitos de implementação de um *software* para EEDH foram apresentados no trabalho desenvolvido por Du *et al* [2]. Neste trabalho os autores focaram os pontos principais necessários para a implementação e introduziram conceitos desta implementação em programação orientada a objetos, interface gráfica com o usuário, banco de dados e arquitetura de *software*. O *software* apresentado permite a edição de uma rede elétrica em um módulo gráfico, inserindo componentes e seus parâmetros. Os dados dos componentes são então armazenados em um banco de dados possibilitando a montagem das matrizes de admitâncias nodais da rede para cada componente harmônica que serão, também,

armazenadas no banco de dados. O usuário pode também inserir os pontos de medição na rede e utilizar o módulo do *software* destinado à análise da observabilidade do sistema de medição, que irá mostrar a parte observável do sistema diretamente no diagrama da rede. Desta forma os pontos de medição poderão ser alterados até que o grau de observabilidade do sistema esteja adequado ou pode-se acionar o módulo de localização ótima de pontos de medição de forma que todo o sistema esteja observável, considerando as medições sincronizadas.

O trabalho realizado e apresentado na referência [28] por Du *et al*, foi implementado utilizando três sistemas teste e os resultados foram apresentados na referência [30]. Desta forma os autores demonstraram a habilidade do sistema de EEDH proposto em identificar fontes e as cargas harmônicas remotas, utilizando medições sincronizadas e assimétricas. O sistema de EEDH resultou em uma ferramenta eficiente para avaliar o impacto de fontes harmônicas desconhecidas no desempenho de todo o SEP.

Meliopoulos *et al* [31] apresentam um sistema de medição de distorções harmônicas implementado com 150 medições, sendo 138 grandezas trifásicas. O sistema foi desenvolvido para capturar medições sincronizadas via GPS a cada 15 minutos. Como os transformadores utilizados para efetuar as medições eram os já existentes no sistema elétrico escolhido, os autores implementaram uma metodologia de correção dos erros de medição, baseando-se na função de transferência desses transformadores. Em seguida os dados de medições harmônicas “corrigidos” são capturados por um computador central para serem processados. O processamento das medições é efetuado por um EEDH que fornece a observabilidade da rede, estima as distorções em barras sem medição através da técnica de mínimos quadrados e avalia a qualidade das medições através da técnica baseada no nível de confiança. O sistema proposto foi avaliado pelos autores aplicado não só no monitoramento das distorções harmônicas no sistema elétrico, mas também na estimação de parâmetros de linhas de transmissão, no monitoramento de desequilíbrios em transformadores.

Watson *et al* [32] apresentam um método simbólico modificado para detectar a observabilidade de uma rede elétrica com medidores já alocados para a estimação de distorções harmônicas. Segundo os autores a metodologia proposta oferece os benefícios encontrados nas técnicas simbólicas tradicionais e supera os pontos de desvantagens. A observabilidade da rede indica os pontos em que a estimação realizada através de um sistema EEDH é confiável ou não. Desta forma, torna-se possível indicar sub-regiões do sistema que possam ser monitoradas e também sub-regiões não monitoráveis com a configuração de medidores proposta.

Na referência [33], Matair *et al* apresentam um método de EEDH baseado na técnica de SVD que compreende uma técnica matemática utilizada para resolver sistemas de equações sub-determinados. Através desta metodologia os autores propõem a solução de parte de um SEP, sem a necessidade dos medidores “observarem” toda a rede elétrica e sim ilhas da rede elétrica. Os autores propõem simular os resultados de tensões harmônicas através a injeção de correntes e em seguida comparar as tensões estimadas como forma de validação da metodologia proposta e definição da observabilidade dos medidores. Este trabalho foi aplicado em uma rede trifásica de mais de 100 barras.

Yu *et al* [34] também utilizaram a técnica SVD como técnica matemática para estimação das distorções harmônicas. Os autores apresentaram o princípio da técnica de SVD e a aplicaram uma rede contendo uma ilha não observável e, também uma rede contendo duas ilhas não observáveis. Foi realizada a comparação dos resultados obtidos utilizando-se a técnica baseada em SVD com a técnica convencional de mínimos quadrados. A metodologia proposta se mostrou superior a técnica convencional apresentando resultados com baixos erros nos casos de análise com ilhas não observáveis o que não é possível para a técnica convencional. Esta técnica dispensa um aplicativo de análise de observabilidade indicando as ilhas observáveis e não observáveis no sistema em análise. Apesar dos benefícios proporcionados pela metodologia proposta, os autores salientaram o maior esforço computacional requerido para solucionar um problema de EEDH.

Na referência [35] Yu *et al* apresentam uma análise da influência das conexões dos transformadores na alocação de medidores para a estimação das distorções harmônicas. Os autores abordaram três possibilidades de conexões: “estrela-aterrado X estrela-aterrado”, “estrela-aterrado X estrela” e “estrela-aterrado X delta”. As conclusões obtidas neste trabalho permite diminuir o espaço de busca em um algoritmo de alocação ótima de medidores para estimação. Como exemplo, foi constatado que para conexões “estrela-aterrado X delta” o uso de medições no lado estrela-aterrado é suficiente para observar os lados primário e secundário do transformador. A localização de medidores em transformadores pode, também, degradar a observabilidade de todo o sistema, e conseqüentemente a estimação das distorções harmônicas.

Kanao *et al* [36] aplicaram a técnica de EEDH em um sistema elétrico japonês. Na implementação foram utilizados dados de medições sincronizados via GPS. Parâmetros das linhas de transmissão foram obtidos utilizando-se os dados de medições para a frequência fundamental. Na metodologia proposta os autores coletam as medições, determinam os parâmetros das linhas de transmissão e em seguida executam a EEDH. O método EEDH

utilizado, baseado na técnica dos mínimos quadrados, é capaz de excluir dados considerados errados e determinar os valores mais prováveis das medições. Este procedimento aumentou a eficiência da estimação.

Madtharad *et al* [37] apresentam um algoritmo para quantificação do número mínimo de medidores e a alocação ótima destes medidores na rede elétrica de forma a diminuir do custo de um sistema EEDH que observe todo sistema em análise. Os autores utilizam um algoritmo de EEDH baseado na técnica SVD, desta forma quando da não obtenção das informações de todos os medidores o algoritmo ainda assim fornece resultados corretos para as regiões observáveis do sistema. O algoritmo responsável pela quantificação do número mínimo de medidores e suas alocações no SEP é baseado em uma técnica que analisa o condicionamento da matriz de medições. Quanto menor o número que quantifica o condicionamento da matriz melhor a resposta proposta. O algoritmo foi testado em dois sistemas elétricos, um sistema trifásico desequilibrado de grande porte e o sistema IEEE 14 barras equilibrado.

Yu *et al* [38] apresentaram uma análise estática dos erros na estimação das distorções harmônicas advindos de ruídos ou erros grosseiros que correspondem a falhas em medidores ou na comunicação dos dados. Os autores obtiveram através da técnica de Monte Carlo uma função de distribuição de probabilidade de erros na estimação simulando um grande número de casos (cinco mil casos) que correspondiam, cada um, um valor de erro introduzido na medição. Através deste procedimento foi possível sinalizar os pontos da rede com maior sensibilidade a erros devido a ruídos nas medições. Quanto aos erros grosseiros foi constatada a grande dificuldade de se estimar com fidelidade o conteúdo harmônico, sendo esta possível para problemas super determinados.

Como última referência encontrada, tem-se o trabalho desenvolvido por Watson [39] que apresenta uma técnica avançada para análise harmônica denominada Domínio Harmônico (do inglês HD – *Harmonic Domain*). Esta técnica compreende uma plataforma onde a modelagem da rede e componentes não lineares são realizados para cada frequência harmônica em seus diagramas apropriados. Desta forma a metodologia apresentada resolve um problema de fluxo harmônico utilizando modelos para cada componente do SEP para cada frequência, linearizados em torno do ponto de operação. Os autores apresentaram a modelagem da matriz Jacobiana para a formulação da técnica de Newton utilizada na metodologia. O trabalho apresenta também o conceito da técnica de EEDH encontrada nas referências [34] e [6], que se baseia em mínimos quadrados e utiliza SVD.

---

5 - METODOLOGIA ADOTADA PARA ESTIMAÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Este capítulo visa apresentar a metodologia desenvolvida neste trabalho de doutorado com suas principais contribuições ao estado da arte quanto à estimação de distorções harmônicas em SEPs.

Como apresentado no capítulo anterior, os métodos utilizados para realizar a estimação de conteúdos harmônicos em SEPs são baseados em algoritmos tradicionais e em geral utilizando o método dos mínimos quadrados. A idéia principal desses métodos é, a partir de medidores instalados em algumas barras do sistema, obter as distorções em barras sem medição através de distribuições de probabilidade, minimizando os erros de estimação nas barras monitoradas. Tais métodos necessitam da sincronização dos dados de medições, o que normalmente é realizado através de ferramentas como GPS, o que tornam a solução do problema complexa.

Como contribuição principal, este trabalho propõe resolver o problema de estimação das distorções harmônicas utilizando um algoritmo de otimização da área de Sistemas Inteligentes. Tal solução se torna viável por sua facilidade de implementação e sua velocidade em encontrar uma solução dentro do espaço de soluções frente às técnicas tradicionais.

Estimar o estado de uma rede quanto ao nível de distorção harmônica é um problema naturalmente complexo por exigir uma confiança mínima nas informações provenientes de medidores de qualidade de energia. Além da segurança quanto à calibração do medidor, o método de transmissão dos dados, fidelidade da rede utilizada nas simulações frente à rede real entre outros fatores capazes de acarretar discrepâncias entre o sistema real e o sistema simulado, tem-se o problema da sincronização das informações provenientes dos medidores.

Outro ponto importante deste trabalho consiste na forma utilizada para a sincronização das informações. Embora o custo de canais de GPS não esteja hoje considerado oneroso, a solução proposta é utilizar, quando da ausência de um sistema sincronizador via GPS, os dados do fluxo de carga da frequência fundamental como referência para a sincronização do conteúdo harmônico, o que não apresentaria custo ao sistema de estimação.

Desta forma, propõe-se utilizar as formas de onda armazenadas pelos medidores e as informações provenientes do fluxo de carga para a sincronização dos dados de medição. Tal adoção se torna de grande viabilidade por diminuir os custos de um sistema de EEDH.

Deve-se salientar que todos os desenvolvimentos realizados neste trabalho utilizaram-se do aplicativo Matlab® sem a utilização de nenhum pacote comercial para os cálculos dos fluxos de carga, fundamental e harmônico, e para as análises através do algoritmo de EE. Desta forma, todos os módulos foram desenvolvidos especificamente para esta tese.

5.1 Estratégia Evolutiva Aplicada à Estimação das Distorções Harmônicas

O capítulo 3 apresentou a estrutura básica de algoritmo para EE. Para resolver um problema de EEDH utilizando EE, é necessário configurar os mecanismos de representação e avaliação ao problema específico.

Os operadores de mutação e recombinação são considerados estáticos na formulação do problema, sendo assim desnecessários ajustes para a aplicação ao problema. Ainda assim estes operadores serão reapresentados, identificando sua atuação no problema proposto.

5.1.1 Representação dos Indivíduos

O indivíduo utilizado para a solução do problema em estudo deve representar um possível estado harmônico do sistema. Sendo assim, o indivíduo considerado consistirá em uma porcentagem dos módulos (k) e a variação (ϕ) dos ângulos das correntes injetadas em barras do sistema elétrico. Tais porcentagens e variações de ângulos serão obtidas em relação aos parâmetros da frequência fundamental. Ou seja, para n_b barras de estimação a serem consideradas, tem-se que a dimensão do indivíduo deve ser de $2n_b$, correspondendo às n_b porcentagens de módulo e às n_b variações de ângulos.

A Figura 5.1-(a) apresenta os fasores de corrente de frequência fundamental de um sistema elétrico de três barras. Nesta representação, os índices inferiores dos fasores indicam a ordem harmônica que, para o caso é igual a 1, representando a frequência fundamental. Os índices superiores indicam o número da barra de injeção da corrente.

Na Figura 5.1-(b) os parâmetros k e ϕ representam, a ponderação no módulo da corrente fundamental e a variação no ângulo, respectivamente, para uma determinada ordem harmônica n .

Figura 5.1 – Representação dos indivíduos (a) na frequência fundamental e (b) e uma ordem harmônica n .

Sendo assim, os indivíduos referentes à ordem harmônica n_h podem ser expressos, como apresentado na Figura 5.2, através dos parâmetros k e ϕ .

$$Indivíduo = \begin{Bmatrix} k_n^1 & \phi_n^1 \\ k_n^2 & \phi_n^2 \\ k_n^3 & \phi_n^3 \end{Bmatrix}$$

Figura 5.2 – Representação vetorial dos indivíduos para EEDH de uma ordem harmônica n .

Além das informações citadas, cada parâmetro de estimação do indivíduo possui também um fator que estabelece o seu passo de mutação σ . Sendo assim, cada porcentagem de módulo e variação de ângulo possui um passo de mutação associado.

A Figura 5.3 apresenta os indivíduos com seus passos de mutação ou parâmetros evolutivos, onde cada parâmetro k ou ϕ do indivíduo possui um passo de mutação σ associado.

$$Indivíduo = \begin{Bmatrix} k_n^1 & \sigma_{k,n}^1 & \phi_n^1 & \sigma_{\phi,n}^1 \\ k_n^2 & \sigma_{k,n}^2 & \phi_n^2 & \sigma_{\phi,n}^2 \\ k_n^3 & \sigma_{k,n}^3 & \phi_n^3 & \sigma_{\phi,n}^3 \end{Bmatrix}$$

Figura 5.3 – Representação vetorial dos indivíduos com os parâmetros estratégicos.

O conhecimento prévio dos parâmetros do indivíduo pode ser incorporado ao problema através de restrições nos sorteios da população inicial ou penalização na avaliação. Desta forma, pode-se evitar por exemplo, que uma corrente harmônica de módulo superior à fundamental seja sorteada ou adquira boa pontuação na evolução da população.

5.1.2 Operador Mutação

Como já descrito no capítulo 3, em Estratégias Evolutivas, a mutação exerce um papel central no direcionamento da evolução de um único indivíduo. É através deste operador que um indivíduo se multiplica e, através de regras definidas (por exemplo: a escolha dos melhores indivíduos), busca-se aperfeiçoar a população.

O número de mutações é definido de forma a se controlar a evolução da população em cada geração. Sendo assim, cada indivíduo gera outros “ m ” indivíduos. As variações impostas por mutação são de pequeno passo em torno do indivíduo original. Desta forma, a cada geração, a população de indivíduos originais mais filhos caminham para uma configuração melhor através da escolha dos melhores indivíduos da população.

Como exemplo, a Figura 5.4 apresenta um indivíduo e suas mutações. O parâmetro ‘ x_i ’ do indivíduo pode representar tanto uma porcentagem de módulo da corrente fundamental para uma determinada ordem harmônica como a variação de um ângulo. A partir dos dados do indivíduo pai, destacado na figura, obtém-se os indivíduos filhos através das eqs. 5.1 e 5.2 já apresentadas no capítulo 3.

Figura 5.4 – Representação de um indivíduo pai e seus filhos gerados por mutação.

$$\sigma'_i = \sigma_i \cdot \exp(\tau \cdot N(0,1) + \tau \cdot N_i(0,1)) \quad (5.1)$$

$$x'_i = x_i + \sigma'_i \cdot N_i(0,1) \quad (5.2)$$

5.1.3 Recombinação

O operador recombinação, aliado à mutação, tem por objetivo introduzir variabilidade à busca aleatória da solução do problema. Parte-se do princípio que a troca de informações “genéticas” entre indivíduos de uma mesma espécie pode resultar em indivíduos melhores, ou também, evitar que o algoritmo convirja para “ótimos” locais.

O cruzamento consiste em criar um novo indivíduo que contenha informação genética resultante da combinação das informações genéticas de seus pais.

Os parâmetros de cada indivíduo gerado por um processo de recombinação, bem como os passos de mutação associados a esse indivíduo, são obtidos para a aplicação proposta, através de formulações como a média aritmética dos parâmetros e dos passos dos indivíduos pais ou a troca das informações dos indivíduos, o que significa gerar um indivíduo com a porcentagem de módulo de um dos pais e a variação de ângulos do outro pai.

A Figura 5.5 apresenta graficamente o operador recombinação nas formulações, média aritmética e troca de informações. Nesta figura têm-se representado dois indivíduos pais 1 e 2 que representam variações em módulo da corrente fundamental em um eixo e as variações de ângulos no outro eixo para a terceira harmônica. A partir destes indivíduos gera-se o indivíduo 3 a partir da média aritmética dos parâmetros dos pais e o indivíduo 4 através da troca das informações dos pais.

Figura 5.5 – Operador Recombinação.

Matematicamente pode-se representar esse operador na formulação através de média com as eqs. 5.3 e 5.4 já apresentadas no capítulo 3.

$$x_i(indiv3) = \frac{x_i(indiv1) + x_i(indiv2)}{2} \quad (5.3)$$

$$\sigma_i(indiv3) = \frac{\sigma_i(indiv1) + \sigma_i(indiv2)}{2} \quad (5.4)$$

5.1.4 Avaliação

A avaliação dos indivíduos da população deve indicar o quão perto da melhor solução está um indivíduo, considerando que cada indivíduo representa uma solução para o problema.

Uma vez que se pretende estimar valores de distorções harmônicas em pontos de uma rede elétrica tendo-se em mãos os valores das distorções em pontos de medições, o procedimento de avaliação dos indivíduos da população medirá a proximidade dos valores (tensão ou corrente) propostos nos indivíduos dos valores medidos.

Nesta tese propõem-se a representação das correntes injetadas nas barras e seus respectivos ângulos como os indivíduos a serem submetidos ao processo de evolução. No entanto, o objetivo da metodologia é estimar os valores das tensões harmônicas nas barras.

A avaliação das tensões obtidas a partir das correntes, que são os indivíduos do algoritmo, consiste em um ponto fundamental relacionado à modelagem do problema em EEs. Este processo tratará os dados de tensão obtidos dos medidores juntamente com os dados cadastrados da rede e os dados do fluxo de carga para a avaliação de um indivíduo.

Sendo assim, serão armazenados os valores de tensões harmônicas obtidas dos medidores de qualidade de energia distribuídos na rede e os ângulos dos fasores de tensão medidos serão ajustados de acordo com os ângulos obtidos a partir do fluxo de carga convencional. A diferença entre os valores dos ângulos, calculado pelo fluxo de carga e obtido dos medidores na frequência fundamental, será repassada para os ângulos medidos para as outras ordens harmônicas.

Tendo sido ajustados os fasores medidos, serão sorteados aleatoriamente fatores de proporção, a partir dos quais serão obtidos os valores de corrente a serem injetadas nas barras. Estes valores sorteados consistem nos indivíduos a sofrerem evolução.

Desta forma, os valores das tensões serão calculados a partir das correntes obtidas dos indivíduos do algoritmo, das correntes medidas e da matriz admitância da rede para a ordem harmônica considerada.

Para o problema em estudo, a função de avaliação será determinada a partir do módulo do fasor diferença. Este fasor é obtido a partir dos fasores: tensão harmônica medida e tensão obtida das correntes harmônicas injetadas representadas pelo indivíduo em análise. A nota de um indivíduo será então obtida a partir deste fasor. Uma vez que quanto menor a magnitude do fasor diferença, melhor será o indivíduo que está sendo avaliado. A Figura 5.6 abaixo ilustra o fasor diferença considerado na avaliação dos indivíduos.

Figura 5.6 – Ilustração do vetor diferença utilizado na avaliação de um indivíduo.

O módulo do fasor diferença é então considerado o erro relativo de estimação e é calculado através da equação que segue:

$$ee_i^h = \left| \dot{V}_h^i - \dot{V}_{hM}^i \right| \quad (5.5)$$

$$\dot{V}_h^i = \sum_{j=1}^{nb} Z_h^{ij} \dot{I}_h^j \quad (5.6)$$

onde:

ee_i^h : é o erro de estimação na barra i , ordem harmônica h ;

$\dot{V}_h^i$: tensão calculada para uma determinada barra do sistema, a partir de um indivíduo que representa as correntes injetadas nas barras para a ordem harmônica em análise;

$\dot{V}_{hM}^i$: tensão harmônica medida na barra em análise;

Z_h^{ij} : Elemento (ij) da matriz de impedâncias nodais na frequência h , que é dada pela inversa da matriz de admitâncias: $[Z_h] = [Y_h]^{-1}$.

$\dot{I}_h^j$: Corrente harmônica obtida através dos indivíduos evolutivos, dada por $\dot{I}_h^j = k_h^j \cdot I_1^j \cdot e^{j(\theta_l^j + \phi_h^j)}$.

nb : número de barras do sistema com injeção harmônica.

A nota de um determinado indivíduo nas estimações de distorções harmônicas para a frequência h , que expressa a sua avaliação na EE deve ser obtida a partir dos erros de estimação de cada barra. Sendo assim, para um sistema de monitoramento de qualidade de energia com n_{med} medições, foi adotada como a nota de um indivíduo o inverso da soma dos erros quadrados de estimação. Esta nota é expressa pela eq. 5.7 que segue:

$$Nota_h = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n_{med}} (ee_i^h)^2} \quad (5.7)$$

Foram também considerados na avaliação valores que se situam fora do intervalo admitido para um indivíduo. Sendo assim, por exemplo, indivíduos que possuam módulo de tensão superior à tensão fundamental serão penalizados obtendo notas baixas.

5.1.5 Seleção

No algoritmo evolutivo proposto a operação de seleção dos indivíduos para a formação de gerações futuras é determinística, pois se limita a selecionar ou os melhores indivíduos dentre o universo da população inicial somada aos filhos originados por mutação e recombinação ou simplesmente os melhores indivíduos originados por mutação e recombinação.

Denominada $(\mu+\lambda)$ e (μ,λ) , estas metodologias de seleção que serão avaliadas neste trabalho prevêm que μ indivíduos pais gerem $\lambda > \mu$ indivíduos filhos. Na primeira o conjunto união de indivíduos pais e indivíduos filhos é então utilizado, de tal forma que nas gerações futuras, mantendo o número de indivíduos da população inicial, os indivíduos serão melhores ou iguais aos indivíduos das gerações passadas, porém os melhores são selecionados, caracterizando o elitismo. Na segunda metodologia, os indivíduos da população são necessariamente diferentes que as gerações passadas aumentando a diversidade das informações em cada geração.

A Figura 5.7 apresenta o modelo de seleção $(\mu+\lambda)$.

Figura 5.7 – Método de seleção $(\mu+\lambda)$.

5.2 Formulação do Problema de Estimação das Distorções Harmônicas

Considere um sistema elétrico com nb barras e n ordens harmônicas $[h_1 \dots h_n]$ a serem estudadas.

O estado da rede para a frequência fundamental é obtido através do fluxo de potência, obtido por métodos convencionais de cálculo. No presente trabalho foi empregado o método de Gauss matricial, que se baseia na seguinte equação:

$$[\mathbf{I}_1] = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{1s} \\ \mathbf{I}_{1c} \end{bmatrix} = [\mathbf{Y}_1][\mathbf{V}_1] = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_1^{ss} & \mathbf{Y}_1^{sc} \\ \mathbf{Y}_1^{cs} & \mathbf{Y}_1^{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{1s} \\ \mathbf{V}_{1c} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

onde:

$[\mathbf{I}_1]$, $[\mathbf{I}_{1s}]$, $[\mathbf{I}_{1c}]$ representam as correntes injetadas respectivamente em todas as barras, nas barras de suprimento e nas barras de carga.

$[\mathbf{V}_1]$, $[\mathbf{V}_{1s}]$, $[\mathbf{V}_{1c}]$ representam as tensões nodais respectivamente em todas as barras, nas barras de suprimento e nas barras de carga.

$[\mathbf{Y}_1]$ é a matriz de admitâncias nodais para a frequência fundamental, particionada de acordo com as barras de suprimento e barras de carga.

Resulta que o vetor de tensões nas barras pode ser obtido a partir das tensões conhecidas nas barras de suprimento e das correntes conhecidas nas barras de carga:

$$[\mathbf{V}_{1c}] = [\mathbf{Y}_1^{cc}]^{-1} \{ [\mathbf{I}_{1c}] - [\mathbf{Y}_1^{cs}] [\mathbf{V}_{1s}] \} \quad (5.9)$$

Caso as correntes $[\mathbf{I}_{1c}]$ sejam funções das tensões $[\mathbf{V}_{1c}]$, como são os modelos de carga conhecidos (potência e impedância constante), a eq. 5.9 pode ser resolvida iterativamente. O fasor $\dot{V}_1^i$ referente à barra i do sistema elétrico, para a solução do FP, pode ser escrito como:

$$\dot{V}_1^i = V_1^i e^{j\theta_1^i} \quad (5.10)$$

O algoritmo utiliza o estado da rede na frequência fundamental, em particular os ângulos θ_1^i , $i=1, \dots, nb$, para ajustar os ângulos dos fasores medidos nas diversas frequências harmônicas. Desta forma, uma dada medição de tensão harmônica na barra i genérica:

$$\dot{V}_{hM}^i = V_{hM}^i e^{j\phi_{hM}^i} \quad (5.11)$$

é ajustada para:

$$\dot{V}_{hM}^i = V_{hM}^i e^{j(\phi_{hM}^i + \theta_1^i)} = V_{hM}^i e^{j\theta_{hM}^i} \quad (5.12)$$

O procedimento acima descrito promove a sincronização dos dados de medição de acordo com as variações em relação ao ângulo da tensão fundamental em cada barra i .

Em seguida, são selecionadas ou escolhidas as ordens harmônicas de interesse no estudo. Esta seleção ou escolha pode ser realizada pela leitura das ordens harmônicas mais significativas, ou todas as harmônicas existentes, em dados de medidores ou fornecidas pelo analisador. As ordens harmônicas de interesse compõem um vetor $\mathbf{H}$, dado por $[h_1 \dots h_n]^t$. O algoritmo de EE é então acionado para cada ordem harmônica do vetor $\mathbf{H}$.

Uma população inicial de indivíduos é então gerada para a ordem harmônica h_i em estudo. Estes indivíduos, nesta proposta, compreendem os fatores de módulo (porcentagem k) e ângulo (variações ϕ) relacionados às correntes para a frequência fundamental. Os indivíduos são então avaliados, como descrito na seção 2.4, e um critério de parada é verificado. O critério de parada pode ser, por exemplo, que a nota do melhor indivíduo seja maior que um valor preestabelecido, ou que o número de gerações não exceda um valor máximo.

Os indivíduos são submetidos aos operadores evolutivos (mutação e recombinação) formando uma nova população que é avaliada e selecionada. O critério de parada é verificado e, caso este não seja satisfeito, a população é novamente submetida aos operadores evolutivos.

Com as considerações supracitadas, tem-se o fluxograma apresentado na Figura 5.8 que mostra esquematicamente o funcionamento do EEDH proposto.

Figura 5.8 – Fluxograma esquemático de funcionamento do EEDH proposto.

5.3 Análise Trifásica

Embora a configuração dos operadores evolutivos, representação dos indivíduos e a formulação do problema apresentada sejam válidos tanto para a análise monofásica quanto a trifásica, serão apresentadas nesta seção as diferenças necessárias a serem observadas na execução de uma análise trifásica do problema de estimação.

5.3.1 Diferenças Quanto à Representação dos Indivíduos

Em uma análise trifásica de uma rede contendo n_b barras de estimação, a dimensão do indivíduo seria $3 \times 2 \times 2 \times n_b$, correspondendo aos indivíduos e seus respectivos passos de mutação para cada barra do sistema e para as 3 fases. Desta forma, o indivíduo apresentado na Figura 5.3 para um caso monofásico, teria cada parâmetro desmembrado em um vetor contendo três parâmetros referentes às fases A, B e C. Esta modelagem está apresentada na Figura 5.9 que segue.

$$Indivíduo = \left\{ \begin{array}{c} \begin{bmatrix} k_n^{1,A} \\ k_n^{1,B} \\ k_n^{1,C} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \sigma_{k,n}^{1,A} \\ \sigma_{k,n}^{1,B} \\ \sigma_{k,n}^{1,C} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \varnothing_n^{1,A} \\ \varnothing_n^{1,B} \\ \varnothing_n^{1,C} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \sigma_{\varnothing,n}^{1,A} \\ \sigma_{\varnothing,n}^{1,B} \\ \sigma_{\varnothing,n}^{1,C} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} k_n^{2,A} \\ k_n^{2,B} \\ k_n^{2,C} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \sigma_{k,n}^{2,A} \\ \sigma_{k,n}^{2,B} \\ \sigma_{k,n}^{2,C} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \varnothing_n^{2,A} \\ \varnothing_n^{2,B} \\ \varnothing_n^{2,C} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \sigma_{\varnothing,n}^{2,A} \\ \sigma_{\varnothing,n}^{2,B} \\ \sigma_{\varnothing,n}^{2,C} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} k_n^{3,A} \\ k_n^{3,B} \\ k_n^{3,C} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \sigma_{k,n}^{3,A} \\ \sigma_{k,n}^{3,B} \\ \sigma_{k,n}^{3,C} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \varnothing_n^{3,A} \\ \varnothing_n^{3,B} \\ \varnothing_n^{3,C} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \sigma_{\varnothing,n}^{3,A} \\ \sigma_{\varnothing,n}^{3,B} \\ \sigma_{\varnothing,n}^{3,C} \end{bmatrix} \end{array} \right\}$$

Figura 5.9 – Representação vetorial dos indivíduos para uma análise trifásica.

Na representação trifásica dos indivíduos, cada fase é reconhecida, pelos operadores mutação e recombinação, como sendo um parâmetro independente. Esta consideração elimina modificações na configuração desses operadores, permitindo utilizá-los tanto nas análises monofásicas, quanto trifásicas.

5.3.2 Modificações no Módulo de Avaliação

No módulo de avaliação, os valores das tensões são obtidos a partir dos indivíduos que correspondem aos valores das correntes injetadas em cada barra do sistema e da matriz de admitâncias nodais da rede para a ordem harmônica considerada.

A matriz de admitâncias nodais é definida de acordo com a representação da rede: monofásica ou trifásica. Para a representação monofásica, são utilizados os dados dos diagramas de seqüências positiva, negativa ou zero de acordo com a ordem harmônica a ser analisada. Como definido no capítulo 2, as freqüências harmônicas $3m-2$ são tratadas com os diagramas e impedâncias de seqüência positiva, $3m-1$ com seqüência negativa e $3m$ com seqüência zero, sendo m pertencente ao conjunto dos números naturais.

Para a representação trifásica é utilizada a matriz de admitâncias nodais em seu modelo por componentes de fase, calculada para a ordem harmônica em análise considerando os desequilíbrios da rede.

Desta forma o erro relativo de estimação continua sendo descrito pela eq. 5.5, porém devendo ser calculado para as três fases. Os valores das impedâncias utilizadas na eq. 5.6 tornam-se blocos 3×3 contendo as impedâncias próprias e mútuas relativas à representação trifásica dos elementos. Matematicamente, os valores trifásicos das tensões harmônicas podem ser obtidos pela eq. 5.13 que segue.

$$\dot{V}_h^{i,ABC} = \sum_{j=1}^{nb} Z_h^{ij,ABC} \dot{I}_h^{j,ABC} \quad (5.13)$$

onde:

$\dot{V}_h^{i,ABC}$: tensão calculada para as três fases de uma determinada barra do sistema, a partir de um indivíduo que representa as correntes injetadas nas barras para a ordem harmônica em análise;

$Z_h^{ij,ABC}$: Elemento (ij) do bloco 3×3 da matriz de impedâncias nodais na freqüência h para as três fases, que é dada pela inversa da matriz de admitâncias nodais: $[Z_h^{ABC}] = [Y_h^{ABC}]^{-1}$

$\dot{I}_h^{j,ABC}$: Correntes harmônicas obtidas através dos indivíduos evolutivos, dada por $\dot{I}_h^{j,ABC} = k_h^{j,ABC} . I_1^{j,ABC} . e^{j(\theta_1^{j,ABC} + \phi_h^{j,ABC})}$ . .

5.3.3 Modificações na Formulação do Problema

Similarmente às considerações necessárias no módulo de avaliação, na formulação do problema, as equações de resolução do fluxo de carga para a frequência fundamental devem ser desmembradas para as três fases.

Sendo assim a eq. 5.8 torna-se:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_1^{ABC} \\ \mathbf{I}_{1C}^{ABC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{1S}^{ABC} \\ \mathbf{I}_{1C}^{ABC} \end{bmatrix} = [\mathbf{Y}_1^{ABC}] \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1^{ABC} \\ \mathbf{V}_{1C}^{ABC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_1^{SS,ABC} & \mathbf{Y}_1^{SC,ABC} \\ \mathbf{Y}_1^{CS,ABC} & \mathbf{Y}_1^{CC,ABC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{1S}^{ABC} \\ \mathbf{V}_{1C}^{ABC} \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

onde:

$[\mathbf{I}_1^{ABC}]$, $[\mathbf{I}_{1S}^{ABC}]$, $[\mathbf{I}_{1C}^{ABC}]$ representam as correntes injetadas nas três fases respectivamente em todas as barras, nas barras de suprimento e nas barras de carga.

$[\mathbf{V}_1^{ABC}]$, $[\mathbf{V}_{1S}^{ABC}]$, $[\mathbf{V}_{1C}^{ABC}]$ representam as tensões nodais de fase respectivamente em todas as barras, nas barras de suprimento e nas barras de carga.

$[\mathbf{Y}_1^{ABC}]$ é a matriz de admitâncias nodais para as três fases na frequência fundamental, particionada de acordo com as barras de suprimento e barras de carga.

---

6 - RESULTADOS

Este capítulo visa apresentar os resultados obtidos da aplicação da metodologia adotada neste trabalho de doutorado ao SEP.

Uma pequena rede elétrica de quatro barras foi utilizada inicialmente para verificar a possibilidade de se estimar o conteúdo harmônico com a metodologia proposta. Em seguida, uma rede de quatorze barras, um pouco mais complexa, foi utilizada para avaliação da metodologia. Estas primeiras análises foram realizadas considerando-se o modelo monofásico do problema, isto é, a partir das impedâncias sequenciais corrigidas de acordo com cada ordem harmônica analisada.

Como forma de se avaliar a sensibilidade do algoritmo quanto à configuração dos parâmetros de EE, foram realizadas variações de cada parâmetro do indivíduo de forma a determinar uma configuração “ótima” para a estimação.

Em seguida, o algoritmo foi avaliado na estimação da Distorção Harmônica Total em barras não monitoradas da rede de 14 barras.

Por fim, uma rede elétrica com 50 barras foi analisada através das duas modelagens propostas, isto é, a modelagem monofásica avaliada pelas impedâncias sequenciais de acordo com cada ordem harmônica, e a modelagem trifásica, avaliada por representação trifásica da rede e seus componentes de fase para cada ordem harmônica. As modelagens trifásica e monofásica foram comparadas, confirmando assim a robustez do algoritmo proposto.

6.1 Estimação das Distorções Harmônicas em uma Rede de Quatro Barras

Como primeira análise foi utilizada a rede elétrica de quatro barras apresentada na Figura 6.1. Foram consideradas cargas não lineares nas barras 3 e 4 do sistema e inicialmente dois medidores nas barras 3 e 4 para a avaliação, tendo-se a barra 2 como barra de interesse para estimação.

Figura 6.1 – Rede elétrica de quatro barras utilizada inicialmente para verificar a aplicabilidade da metodologia proposta.

A Tabela 6.1 apresenta os valores de tensão e corrente de referência consideradas para distorção harmônica de terceira ordem. Os valores de referência representam valores lidos dos medidores.

O indivíduo que deve ser encontrado pelo algoritmo evolutivo é apresentado na Tabela 6.2. Os parâmetros k_3 e k_4 representam a porcentagem do módulo das correntes de 3ª harmônica em relação a fundamental e os parâmetros a_3 e a_4 representam as variações de ângulo de corrente, em radianos, em relação à fundamental. Desta forma, o algoritmo deverá “procurar” valores de seus parâmetros que resultam nas tensões medidas.

Tabela 6.1 – Valores de tensão e corrente de referência para a terceira harmônica no primeiro caso analisado.

Barra	Tensão Referência		Corrente Referência	
	Módulo pu	Ângulo (°)	Módulo pu	Ângulo (°)
2	0,1229	-64,57	0	0
3	0,2650	-63,10	0,0231	-140,70
4	0,2249	-69,47	0,0111	175,60

Tabela 6.2 – Parâmetros do indivíduo de referência para o primeiro caso analisado.

k_3	a_3	k_4	a_4
0,2	1,3	0,12	0,55

O interesse na saída do algoritmo é o valor da tensão harmônica na barra 2 do sistema teste em que, dados valores preestabelecidos de correntes harmônicas nas barras 3 e 4, foram obtidos os valores 0,1229 pu para o módulo e $-64,57^\circ$ para o ângulo da tensão na barra de interesse. Assim, o algoritmo deverá encontrar o valor de tensão descrito para a barra 2 a partir dos valores de corrente obtidos através das populações de indivíduos que serão avaliados.

Considerando uma população inicial de 20 indivíduos, podendo cada indivíduo sofrer cinco mutações por geração e uma taxa de recombinação de 10 %, tem-se a Tabela 6.3 que

apresenta os valores de módulo e ângulo das tensões encontradas para as barras 2, 3 e 4, bem como os valores dos erros encontrados para cada barra, considerando 100 gerações.

Tabela 6.3 – Resultados obtidos usando dois medidores e 100 gerações no primeiro caso analisado.

Barra	Módulo pu	Ângulo (°)	Erro _{rel} (%)
2	0,1210	-63,91	0,24
3	0,2134	-66,48	5,34
4	0,2613	-65,01	4,10

Aumentando-se o número de gerações para 300 foram encontrados os valores apresentados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Resultados obtidos usando dois medidores e 300 gerações.

Barra	Módulo pu	Ângulo (°)	Erro _{rel} (%)
2	0,1200	-64,97	0,30
3	0,2313	-63,41	3,37
4	0,2431	-69,33	1,82

Pode-se observar que os valores obtidos ficaram mais próximos da referência com erros, obtidos utilizando-se a eq. 6.1, inferiores a 5%. Salienta-se que os valores obtidos como resultados podem variar de simulação para simulação por se tratar de um método de busca estatística, no entanto os erros não superaram 5% em nenhuma das 20 simulações realizadas.

$$erro_{rel\%} = \frac{abs(V_{href} - V_{hcalc})}{abs(V_{href})} * 100 \quad (6.1)$$

Onde:

$V_{href} \rightarrow$ Fasor de tensão harmônica de referência;

$V_{hcalc} \rightarrow$ Fasor de tensão harmônica calculado;

6.2 Estimação das Distorções Harmônicas em uma Rede de Quatorze Barras

A rede elétrica apresentada na Figura 6.2 foi utilizada para mais uma análise da metodologia proposta. Os dados desta rede de 14 barras foram obtidos no sítio do *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) [40]. Foi considerada inicialmente, nas

simulações, a componente harmônica de terceira ordem para ser estimada. Injeções de correntes harmônicas foram especificadas simulando as saídas dos medidores instalados.

Figura 6.2 – Rede elétrica de 14 barras utilizada para análise.

Foram selecionados três casos a serem apresentados, que são:

1. alocação de três medidores na rede e estimação da tensão nos onze pontos restantes;
2. alocação de seis medidores na rede e estimação da tensão nos oito pontos restantes;
3. alocação de oito medidores na rede e estimação da tensão nos seis pontos restantes.

Para a primeira análise os medidores foram alocados aleatoriamente nas barras de números: 3, 6 e 9. Na segunda análise os medidores foram alocados nas barras 3, 5, 6, 8, 9 e 14 e na terceira análise os medidores foram alocados nas barras 3, 4, 5, 6, 8, 9, 13 e 14.

Os seguintes parâmetros foram considerados nas simulações:

- a. Número de gerações igual 300;
- b. Número de indivíduos na população inicial igual a 40;
- c. Número de mutações por indivíduo igual a 5;
- d. Taxa de recombinação por geração igual a 10%;

Os resultados de estimação apresentados na Tabela 6.5 referem-se à primeira análise com apenas três medidores instalados na rede. Na Tabela 6.6 e na

Tabela 6.7 são apresentados os resultados para os casos com seis e oito medidores, respectivamente. As linhas em cinza nestas tabelas indicam as barras com medição.

Tabela 6.5 – Resultados utilizando 3 medidores alocados em uma rede de 14 barras.

Barras	Valores Estimados		Erro _{rel} (%)	Valores de Referência	
	3 medidores			Módulo (p.u.)	ângulo (°)
	Módulo (p.u.)	ângulo (°)			
1	0,1365	114,19	2,3886	0,1574	109,68
2	0,1467	113,00	1,2769	0,1561	109,73
3	0,1512	112,39	0,7578	0,1543	109,81
4	0,1458	112,25	0,5258	0,1434	110,39
5	0,1432	112,43	0,6647	0,1460	110,04
6	0,1428	108,56	2,8584	0,1154	112,14
7	0,1417	110,85	2,2229	0,1223	115,61
8	0,1397	109,05	3,0048	0,1201	119,15
9	0,1408	111,20	3,0297	0,1131	116,75
10	0,1401	111,14	3,2212	0,1095	115,92
11	0,1389	110,70	3,0249	0,1100	114,87
12	0,1409	109,72	3,2944	0,1085	112,64
13	0,142	109,35	3,5806	0,1070	112,93
14	0,1448	107,28	4,7888	0,0998	115,12

Tabela 6.6 – Resultados utilizando 6 medidores alocados em uma rede de 14 barras.

Barras	Valores Estimados		Erro _{rel} (%)	Valores de Referência	
	6 medidores			Módulo (p.u.)	ângulo (°)
	Módulo (p.u.)	ângulo (°)			
1	0,1311	113,57	2,80	0,1574	109,68
2	0,1286	113,66	2,92	0,1561	109,73
3	0,1275	114,03	2,88	0,1543	109,81
4	0,1188	114,89	2,67	0,1434	110,39
5	0,1214	113,63	2,60	0,1460	110,04
6	0,1149	102,83	1,87	0,1154	112,14
7	0,1073	118,98	1,65	0,1223	115,61
8	0,1084	120,83	1,22	0,1201	119,15
9	0,1008	120,28	1,39	0,1131	116,75
10	0,0990	119,67	1,25	0,1095	115,92
11	0,1040	111,24	0,91	0,1100	114,87
12	0,1058	107,11	1,07	0,1085	112,64
13	0,1016	110,62	0,68	0,1070	112,93
14	0,0871	122,96	1,80	0,0998	115,12

Tabela 6.7 – Resultados utilizando 8 medidores alocados em uma rede de 14 barras.

Barras	Valores Estimados		Erro _{rel} (%)	Valores de Referência	
	8 medidores			Módulo (p.u.)	ângulo (°)
	Módulo (p.u.)	ângulo (°)			
1	0,1476	108,00	1,07	0,1574	109,68
2	0,1465	107,75	1,09	0,1561	109,73
3	0,1422	108,70	1,25	0,1543	109,81
4	0,1300	110,22	1,35	0,1434	110,39
5	0,1323	109,93	1,37	0,1460	110,04
6	0,1063	111,02	0,93	0,1154	112,14
7	0,1090	113,52	1,40	0,1223	115,61
8	0,1106	115,16	1,25	0,1201	119,15
9	0,0971	114,67	1,64	0,1131	116,75
10	0,0971	114,73	1,26	0,1095	115,92
11	0,0994	114,52	1,06	0,1100	114,87
12	0,0960	113,23	1,25	0,1085	112,64
13	0,0948	112,39	1,23	0,1070	112,93
14	0,0829	113,55	1,71	0,0998	115,12

Os resultados apresentados ilustram a eficiência da metodologia proposta onde os erros de estimação foram inferiores a 5% nos três casos. Comparando os valores estimados com os valores de referência, pode-se verificar que as diferenças de módulo são inferiores a 0,03 p.u. e as diferenças em ângulo são inferiores a 4°.

Considerando-se 1000 gerações de evolução da população e 40 indivíduos na população inicial, as discrepâncias dos valores estimados em relação aos valores de referência foram ainda menores, como pode ser observado na Tabela 6.8 que apresenta os resultados da simulação considerando 8 medidores alocados.

Tabela 6.8 – Resultados utilizando 8 medidores alocados em uma rede de 14 barras com 1000 gerações de simulação.

Barras	Valores Estimados		Erro _{rel} (%)	Valores de Referência	
	8 medidores			Módulo (p.u.)	ângulo (°)
	Módulo (p.u.)	ângulo (°)			
1	0,1561	109,95	0,15	0,1574	109,68
2	0,1551	109,63	0,10	0,1561	109,73
3	0,1492	109,96	0,51	0,1543	109,81
4	0,1352	110,90	0,84	0,1434	110,39
5	0,1382	110,97	0,81	0,1460	110,04
6	0,1156	109,26	0,58	0,1154	112,14
7	0,1181	116,47	0,46	0,1223	115,61
8	0,1232	121,10	0,52	0,1201	119,15
9	0,1065	116,84	0,65	0,1131	116,75
10	0,1028	117,63	0,74	0,1095	115,92
11	0,1066	112,63	0,54	0,1100	114,87
12	0,1048	111,16	0,47	0,1085	112,64
13	0,1028	112,94	0,42	0,1070	112,93
14	0,0883	113,43	1,19	0,0998	115,12

Embora os resultados apresentados nas tabelas compreendam a saída de uma simulação arbitrária, cada caso de estudo foi simulado pelo menos dez vezes e todos os resultados foram similares.

6.3 Ajustes nos Parâmetros do Algoritmo de Estratégia Evolutiva

Com as simulações realizadas verificou-se a necessidade de se ajustar os parâmetros do algoritmo de EE de forma a se otimizar a busca pela solução de estimação. Desta forma foram realizadas simulações utilizando a rede de 14 barras utilizada nas análises anteriores e variando cada parâmetro do algoritmo. As análises nesta etapa focam apenas a estimação da componente harmônica de ordem 3. O número de medidores instalados na rede foi considerado fixo em 6, nas barras 2, 4, 8, 9, 12 e 14 da rede apresentada na Figura 6.2.

6.3.1 Ajuste do Número de Indivíduos

Como primeiro parâmetro de ajuste de um algoritmo de EE tem-se o número de indivíduos na população inicial.

Nas avaliações foram considerados fixos os seguintes parâmetros do algoritmo:

- Número de gerações igual 100;
- Número de mutações por indivíduo igual a 5;
- Taxa de recombinação por geração igual a 10%;
- Passo de mutação inicial igual a 1 para módulos e π para ângulos;
- n referente à auto-adaptação igual a 2;
- Evolução $(\mu+\lambda)$;
- Método de recombinação igual a média;

Foram realizadas trinta simulações para as alternativas: 2 indivíduos, 5 indivíduos, 20 indivíduos, 40 indivíduos, 100 indivíduos e 400 indivíduos.

Os resultados apresentados na Figura 6.3 representam o erro médio das simulações para cada número de indivíduos considerados na população inicial. Pode ser percebido que à medida que é aumentado o número de indivíduos na população inicial o erro na estimação diminui. No entanto a diminuição do erro a partir de 20 indivíduos não é muito significativa, tornando este número de indivíduos na população inicial suficiente para garantir uma boa estimação.

Figura 6.3– Erro médio de estimação em função do número de indivíduos na população inicial.

6.3.2 Ajuste do Passo de Mutação

O passo de mutação indica a distância do indivíduo pai que um indivíduo filho poderá ocupar no espaço de soluções. Um passo muito grande de mutação poderá introduzir muita variação nas populações de filhos descaracterizando o conceito da mutação em EE. Já um passo de mutação muito pequeno implicaria em variações muito pequenas nos indivíduos filhos diminuindo a velocidade de convergência do algoritmo.

Para as porcentagens de módulo foram analisados os valores [0,1 0,5 1 2 5] e para as variações de ângulos os valores [0,1 $\pi/4$ $\pi/2$ π 2π] como passos de mutações iniciais. As análises foram realizadas utilizando as mesmas configurações utilizadas para os ajustes de mutação, sendo o número de indivíduos fixado em 20 e para cada configuração de passo de mutação foram simulados 30 casos.

A Figura 6.4 apresenta a evolução dos passos de mutação para os valores iniciais considerados. Pode-se perceber que valores iniciais altos para os passos de mutação implicam em menor velocidade de convergência dificultando a obtenção de bons resultados de estimação. Por outro lado, a escolha de valores iniciais muito pequenos converge rapidamente

para zero podendo eliminar a variabilidade na evolução e o algoritmo pode estagnar em ótimos locais.

Figura 6.4 – Evolução dos passos de mutação para diferentes valores iniciais

6.3.3 Ajuste do Número de Mutações por Indivíduo

Outro parâmetro importante de se ajustar é o número de mutações que cada indivíduo de uma população de pais pode sofrer. Este parâmetro está ligado ao comportamento do espaço de soluções, uma vez que quanto maior este parâmetro maior será a cobertura do espaço.

Foram escolhidos para análise os valores [1 5 10 50 100] como número de mutações. Nestas simulações o número de indivíduos foi fixado em 20 e os passos de mutações fixados em 1 para as porcentagens de módulos e $\pi/2$ para as variações de ângulos. Foram realizadas 30 simulações para cada caso considerado.

Como apresentado na Tabela 6.9 o erro de estimação tende a diminuir com o aumento do número de mutações por indivíduo até um certo limite em que os resultados deixam de ser tão dependentes deste parâmetro. Como exemplo, pode-se perceber que variando de 50 para

100 o número de mutações por indivíduo, o erro na estimação melhora nas barras com medição (em destaque cinza na Tabela 6.9), porém pode piorar nas barras sem medição. Outro ponto primordial na escolha do número de mutações por indivíduo em cada geração está em sua relação direta com o aumento no tempo de simulação.

Tabela 6.9 – Erro médio para uma dada ordem harmônica em função do número de mutações por indivíduo em cada geração.

Barra	Número de mutações por indivíduo				
	1	5	10	50	100
1	1,3526	0,6649	0,5273	0,4022	0,4516
2	1,3817	0,4989	0,4346	0,2562	0,1543
3	1,2358	0,3120	0,1531	0,0842	0,0589
4	1,1489	0,5558	0,5385	0,3228	0,2269
5	1,1660	0,6300	0,6175	0,3720	0,3776
6	1,4802	1,1147	0,9023	0,8349	0,9120
7	0,8732	0,2931	0,2621	0,0993	0,0688
8	1,2676	0,4537	0,3389	0,2006	0,1239
9	1,2049	0,6523	0,5334	0,2726	0,1551
10	1,3017	1,0191	0,7979	0,5766	0,8354
11	1,1962	0,9638	1,0658	0,9433	1,2052
12	1,5128	0,4517	0,2922	0,0942	0,0514
13	1,7985	0,9765	0,6746	0,7539	0,9224
14	1,5170	0,5370	0,4112	0,1886	0,0953

6.3.4 Ajuste da Auto-Adaptação

Como apresentado em [20] a auto-adaptação insere na evolução do indivíduo uma correção de seu passo de mutação. Desta forma o passo de mutação deve diminuir à medida que o indivíduo se aproxima do “ótimo”. O comportamento da mutação frente às mudanças nos parâmetros da auto-adaptação pode mudar em sua forma de evolução e velocidade de evolução.

A utilização de um passo de mutação para cada parâmetro do indivíduo fornece maior diversidade na evolução permitindo aos indivíduos evoluir para regiões circulares em torno do indivíduo pai [20].

O parâmetro β está relacionado à velocidade de diminuição do passo a cada geração. Este parâmetro foi avaliado para os valores [0,1 1 2 10 100] sendo rodados 30 casos para cada análise.

Embora o esperado teórico relacionado às variações no parâmetro β fossem expressivos, não foram percebidos benefícios diretos na variação dos valores de β maiores que 1. Para valores menores que 1 foram verificadas variações expressivas na evolução dos passos de mutação, como pode ser verificado na Figura 6.5 que apresenta a evolução dos

passos de mutação para os valores de β considerados. A curva com maior variação nesta figura representa β igual a 0,1. Percebe-se que para os demais valores de β considerados a evolução dos passos de mutação foram similares.

Figura 6.5 – Evolução dos passos de mutação em função do parâmetro β

Tabela 6.10 – Erro de estimação em função do parâmetro β de auto-adaptação.

Barra	Valor do parâmetro β na auto-adaptação				
	0,1	1	2	10	100
1	0,5085	0,5952	0,7417	0,5734	0,7430
2	0,4007	0,3644	0,5359	0,4019	0,4455
3	0,3340	0,2444	0,3433	0,2259	0,2638
4	0,5242	0,4556	0,5093	0,5000	0,5638
5	0,5556	0,4913	0,5639	0,5547	0,5550
6	1,1131	1,3904	1,1678	1,4486	1,1684
7	0,3571	0,3140	0,2545	0,2709	0,2964
8	0,6394	0,5066	0,5088	0,5951	0,4053
9	0,6866	0,7909	0,6228	0,5632	0,5148
10	1,0471	1,3505	1,0594	1,0291	0,8784
11	0,9901	1,3673	1,1234	1,3224	1,0632
12	0,4204	0,4734	0,5121	0,4150	0,5011
13	1,0604	0,9386	0,8408	0,9563	1,0008
14	0,6008	0,6326	0,5012	0,4886	0,5825

Embora se tenha observado a grande variação apresentada na Figura 6.5, os erros na estimação não sofreram variações expressivas em função da modificação deste parâmetro. A Tabela 6.10 apresenta os erros de estimação em cada barra do sistema em estudo para cada valor do parâmetro β considerado. Através da análise dos erros e dos demais parâmetros pré-fixados para análise, não se pode definir um valor ótimo para o parâmetro β .

6.3.5 Ajuste do Operador Recombinação

A forma de se introduzir na evolução variações que tirem um indivíduo resultante da região convergente de evolução pode ser realizada, como já mencionado, através de, por exemplo, média aritmética dos parâmetros e dos passos dos indivíduos pais ou troca das informações, porcentagem de ângulo de um indivíduo com variação de ângulo de outro indivíduo.

Essas duas alternativas foram analisadas tendo sido rodados 100 casos para cada alternativa.

Como apresentado na Figura 6.6 a utilização das médias dos parâmetros como forma de evolução obteve um comportamento com maiores variações frente a utilização da troca de informações entre os indivíduos pais. Embora esta variabilidade na evolução dos passos de mutação não tenha correspondido em grandes variações nos erros de estimação, como apresentados na Tabela 6.11, espera-se que o algoritmo tenha maior dificuldade de convergência para ótimos locais.

Figura 6.6 – Evolução dos passos de mutação em função da forma de recombinação.

Tabela 6.11 – Erro relativo na estimação em função da forma de recombinação.

Barra	Erro em função da forma de recombinação	
	Média	Troca de Informações
1	0,8319	0,8144
2	0,6432	0,5845
3	0,3528	0,3748
4	0,6327	0,5827
5	0,6430	0,6139
6	1,1738	1,3238
7	0,4024	0,3380
8	0,5437	0,6643
9	0,7770	0,6815
10	1,2743	1,1689
11	1,1813	1,0825
12	0,5382	0,6244
13	0,8523	0,9375
14	0,6936	0,6687

6.3.6 Ajuste da Forma de Evolução

Como apresentado na referência [18] não se tem um consenso em relação a forma de evolução. Neste trabalho as formas $(\mu+\lambda)$ e (μ,λ) foram avaliadas tendo sido rodados 100 casos para cada análise.

A Figura 6.7 apresenta a evolução dos passos de mutação para as duas formas de evolução consideradas.

A forma de evolução (μ,λ) apresentou grandes variações nos passos de mutação não convergindo com o passar das gerações de evolução. Pode-se verificar a não convergência desta forma de evolução através dos erros de estimação apresentados na Tabela 6.12.

Figura 6.7 – Evolução dos passos de mutação em função da forma de evolução: $(\mu+\lambda)$ e (μ,λ) .

Tabela 6.12 – Erro relativo de estimação em função da forma de evolução.

Barra	Forma de evolução	
	(μ, λ)	$(\mu + \lambda)$
1	14,7769	0,8454
2	14,6325	0,6937
3	14,4508	0,4865
4	13,4392	0,7645
5	13,6969	0,7716
6	11,8724	1,2729
7	11,4144	0,4601
8	11,2406	0,5736
9	10,6349	0,7973
10	10,3667	1,1879
11	10,5926	1,2099
12	10,8155	0,6366
13	10,5179	1,1006
14	9,4858	0,7107

6.4 Estimação da Distorção Harmônica Total em uma Rede de 14 Barras

Utilizando a mesma rede de 14 barras apresentada na Figura 6.2, o algoritmo proposto foi utilizado para estimar a DHT.

Com medidores instalados nas barras 2, 4, 8, 9, 12 e 14, foram consideradas as ordens harmônicas 3, 5, 7, 9, 11 e 13 na composição da DHT em cada barra do sistema.

Como mencionado, o algoritmo proposto efetua a estimação de cada componente harmônica de forma independente. Em seguida, o cálculo da distorção harmônica total é efetuado.

Como configurações do algoritmo foram consideradas:

- Número de gerações igual 500;
- Número de indivíduos na população inicial igual a 40;
- Número de mutações por indivíduo igual a 5;
- Taxa de recombinação por geração igual a 10%;
- Passo de mutação inicial igual a 1 para módulos e π para ângulos;
- β referente à auto-adaptação igual a 2;
- Evolução $(\mu + \lambda)$;
- Método de recombinação igual à média.

A Tabela 6.13 apresenta os erros de estimação para as ordens harmônicas consideradas individualmente. Esses resultados representam uma média dos erros para os 30 casos rodados para cada ordem harmônica. Pode-se verificar nesta tabela que os valores de erros de estimação para as ordens harmônicas individualmente são muito pequenos. As linhas em destaque na tabela representam as barras com medição.

Tabela 6.13 – Erro de estimação (%) para as ordens harmônicas consideradas individualmente.

Barra	Ordens Harmônicas					
	3	5	7	9	11	13
1	0,3011	1,4361	0,9143	0,2239	0,0416	0,5515
2	0,2087	1,4178	0,2884	0,0352	0,0265	0,4715
3	0,1155	1,3434	0,1728	0,0205	0,0213	0,4600
4	0,2059	1,0616	0,0411	0,0053	0,0017	0,0734
5	0,3408	1,1694	0,2054	0,2230	0,0404	0,4252
6	0,9816	0,7969	0,1441	0,6052	0,5011	0,5294
7	0,0782	0,6707	0,0535	0,0125	0,0875	0,2008
8	0,1786	1,1199	0,1492	0,0124	0,0810	0,1084
9	0,2241	0,5227	0,1913	0,0304	0,1671	0,4033
10	0,1606	0,5286	0,5390	0,2800	0,5236	1,0011
11	0,8894	0,5185	0,2987	0,3013	0,4648	0,7420
12	0,0750	0,2000	0,0556	0,0250	0,0414	0,2551
13	0,7392	0,2835	0,1388	0,2131	0,1332	0,7624
14	0,0842	0,3115	0,3637	0,0717	0,1189	0,6046

A Figura 6.8 apresenta a nota média dos melhores indivíduos para cada ordem harmônica. Esta nota é obtida através do inverso da soma dos desvios quadrados em todas as barras com medição e é computada a cada geração do algoritmo e indica a velocidade de evolução no espaço de resultados. Embora em algumas ordens harmônicas os melhores indivíduos tenham obtido notas superiores a outras ordens, os erros de estimação foram satisfatórios como pode ser observado na Tabela 6.13 apresentada.

O crescimento continuado das notas dos indivíduos em todas as ordens harmônicas confirma o elitismo do algoritmo proposto e sua capacidade de encontrar uma solução para o problema. O crescimento monótono das notas dos melhores indivíduos em alguns casos pode representar uma dificuldade do operador recombinação em imputar uma variabilidade aos indivíduos que os leve mais rapidamente à região de melhor solução do problema, o que está ligado à complexidade do espaço de soluções.

Figura 6.8 – Nota média dos melhores indivíduos (eixo das ordenadas) para cada ordem harmônica em função das gerações (eixo das abscissas).

A Figura 6.9 apresenta a evolução dos passos de mutação para cada ordem harmônica considerada. Pode-se perceber que apesar de variações avulsas nos passos de mutação dos indivíduos em determinadas gerações, estes evoluem para valores próximos de zero.

As variações encontradas na evolução dos passos de mutação representam a escolha de indivíduos frutos de recombinações inserindo variabilidade à evolução.

Uma vez obtidos os valores de tensão para cada ordem harmônica considerada em cada barra do sistema, a DHT é obtida.

Desta forma têm-se os valores apresentados na Tabela 6.14, onde pode-se observar os valores de DHT, de referência e estimados, para cada barra do sistema teste, bem como os erros de estimação, relativo e absoluto.

Figura 6.9 – Evolução dos passos de mutação (eixo das ordenadas) para cada ordem harmônica (H) considerada em função das gerações (eixo das abscissas).

O erro absoluto apresentado na Tabela 6.14 representa o desvio obtido em relação à tensão nominal do sistema em estudo. Este erro é obtido através da eq. 6.2 apresentada como segue. Porém é esperado que os erros em relação aos valores de DHT (erros relativos obtidos através da eq. 6.1) sejam muito superiores. No entanto, os valores obtidos, apresentados na quarta coluna da tabela em análise, ainda assim são pequenos, tendo um valor máximo inferior a 5%.

$$erro_{abs\%} = \frac{abs(V_{href} - V_{hcalc})}{abs(V_{href})} * 100 \quad (6.2)$$

Onde:

$V_{href} \rightarrow$ Fasor de tensão harmônica de referência;

$V_{hcalc} \rightarrow$ Fasor de tensão harmônica calculado;

$V_{Iref} \rightarrow$ Fasor de tensão fundamental de referência.

Um outro estudo realizado foi estimar a DHT com um número reduzido de medidores instalados na rede de 14 barras em análise. Desta forma, foram considerados medidores somente nas barras 2, 8 e 12 do sistema.

A Tabela 6.15 apresenta os valores obtidos de DHT e erros de estimação considerando os três medidores instalados no sistema. Os elevados erros em algumas barras sem medição no sistema são decorrentes da pouca “observabilidade” dos medidores. Ou seja, a acuracidade da metodologia é comprometida devido à longa distância elétrica dos medidores aos pontos de grandes desvios de estimação. Por outro lado, ainda com pouca observabilidade por parte do sistema de medição, os resultados podem ser considerados satisfatórios tomando-se o erro absoluto como parâmetro.

Tabela 6.14 – Valores de DHT de referência e calculados e erros relativos e absolutos de estimação.

Barra	DHT (%)		Erro (%)	
	referência	calculados	relativo	absoluto
1	0,0545	0,0548	0,5468	0,0298
2	0,0528	0,0529	0,1370	0,0072
3	0,0502	0,0496	1,1816	0,0593
4	0,0405	0,0395	2,4706	0,1001
5	0,0421	0,0410	2,7515	0,1159
6	0,0378	0,0379	0,3151	0,0119
7	0,0394	0,0391	0,7450	0,0294
8	0,0426	0,0424	0,2744	0,0117
9	0,0409	0,0407	0,6056	0,0248
10	0,0407	0,0425	4,4646	0,1818
11	0,0398	0,0406	1,8083	0,0721
12	0,0387	0,0388	0,2835	0,0110
13	0,1952	0,2009	2,8884	0,5639
14	0,2082	0,2085	0,1322	0,0275

Tabela 6.15 – Valores de DHT de referência e calculados e erros relativos e absolutos de estimação, considerando apenas 3 medidores instalados no sistema.

Barra	DHT		Erro (%)	
	referência	calculados	relativo	absoluto
1	0,0545	0,0560	2,7401	0,1493
2	0,0528	0,0532	0,6888	0,0364
3	0,0502	0,0481	4,0441	0,2028
4	0,0405	0,0390	3,8868	0,1576
5	0,0421	0,0431	2,2602	0,0952
6	0,0378	0,0428	13,3189	0,5035
7	0,0394	0,0396	0,4340	0,0171
8	0,0426	0,0408	4,1465	0,1765
9	0,0409	0,0438	7,1387	0,2921
10	0,0407	0,0461	13,1931	0,5372
11	0,0398	0,0449	12,5873	0,5016
12	0,0387	0,0370	4,4007	0,1705
13	0,0390	0,0401	2,5793	0,1007
14	0,0416	0,0573	37,6589	1,5682

Uma forma de melhorar os resultados de estimação é inserir no algoritmo outros dados conhecidos ou medidos do sistema em estudo como, por exemplo, dados de medição de corrente. Como a metodologia proposta considera as variações de ângulos e porcentagens de módulos da corrente como indivíduos das populações da estratégia evolutiva, a inserção desta informação garantiria a região de solução ótima para o algoritmo ou para algumas barras do sistema.

A Tabela 6.16 apresenta os erros de estimação considerando 3 medidores de tensão, como no exemplo anterior, e um medidor de corrente harmônica na barra 8 do sistema. Verifica-se a redução considerável dos erros de estimação na maioria das barras do sistema.

Tabela 6.16 - Valores de THD de referência e calculados e erros relativos e absolutos de estimação, considerando 3 medidores de tensão e um de corrente.

Barra	THD (%)		Erro (%)	
	referência	calculados	relativo	absoluto
1	0,0545	0,0542	0,4897	0,0267
2	0,0528	0,0527	0,2176	0,0115
3	0,0502	0,0486	3,1340	0,1572
4	0,0405	0,0384	5,3272	0,2159
5	0,0421	0,0403	4,3416	0,1830
6	0,0378	0,0381	0,7013	0,0265
7	0,0394	0,0380	3,4948	0,1378
8	0,0426	0,0426	0,0602	0,0026
9	0,0409	0,0404	1,2209	0,0500
10	0,0407	0,0404	0,7511	0,0306
11	0,0398	0,0386	3,1834	0,1268
12	0,0387	0,0390	0,7811	0,0303
13	0,0390	0,0443	13,5514	0,5291
14	0,0416	0,0499	19,8447	0,8264

Outra forma de melhorar os resultados seria através do conhecimento de algumas cargas harmônicas na rede. Tais informações indicariam um caminho de evolução ao algoritmo rumo a soluções ainda mais confiáveis.

6.5 Estimação das Distorções Harmônicas em pontos de uma rede elétrica de 50 Barras

Uma análise de maior profundidade das limitações e eficiência da metodologia foi realizada tomando-se uma rede elétrica que representa o circuito de subtransmissão de uma concessionária de energia no Brasil. Esta rede, apresentada na Figura 6.10, possui 50 barras,

32 transformadores delta-estrela alocados em 20 barras e foi analisada em seu modelo trifásico. Os dados das ligações desta rede estão apresentados na Tabela 6.17 que segue.

A rede possui também cargas ligadas em 18 barras. As cargas foram consideradas em sua modelagem de potência constante, trifásicas e equilibradas para a frequência fundamental. Os dados das cargas estão apresentados na Tabela 6.18 que segue.

As primeiras redes analisadas continham mais de 40% de suas barras com monitoração. Este fato não espelha, até o momento, a realidade dos SEPs no Brasil em que em algumas concessionárias esse número é bem menor.

Figura 6.10 – Rede elétrica de 50 barras utilizada na análise das distorções harmônicas.

Tabela 6.17 – Dados de ligações da rede elétrica de 50 barras em estudo.

Ligação entre barras		Tipo de Ligação	Tipo de Cabo (linha)	km Linha	Tipo de Trafo	Potência Trafo (MVA)	Ztrafo (Imag) p.u.
Barra DE	Barra Para						
1	2	linha	Cabo 336	23,50	--	--	--
1	3	linha	Cabo 336	3,50	--	--	--
3	4	linha	Cabo 336	12,50	--	--	--
4	5	linha	Cabo 4/0	16,10	--	--	--
2	3	linha	Cabo 268	20,00	--	--	--
2	6	linha	Cabo 2/0	7,70	--	--	--
2	7	linha	Cabo 1/0	22,00	--	--	--
2	30	linha	Cabo 336	11,00	--	--	--
8	30	linha	Cabo 336	11,00	--	--	--
1	9	linha	Cabo 336	10,50	--	--	--
9	10	linha	Cabo 336	10,00	--	--	--
10	11	linha	Cabo 336	1,00	--	--	--
9	12	linha	Cabo 4/0	0,44	--	--	--
12	13	linha	Cabo 4/0	1,00	--	--	--
12	14	linha	Cabo 336	2,70	--	--	--
14	15	linha	Cabo 336	1,90	--	--	--
15	16	linha	Cabo 336	1,10	--	--	--
1	17	linha	Cabo 4/0	0,64	--	--	--
1	18	linha	Cabo 336	9,20	--	--	--
18	19	linha	Cabo 336	2,40	--	--	--
19	20	linha	Cabo 477	6,40	--	--	--
20	21	linha	Cabo 477	3,50	--	--	--
1	21	linha	Cabo 336	19,00	--	--	--
1	27	linha	Cabo 336	9,20	--	--	--
27	28	linha	Cabo 336	2,40	--	--	--
23	26	linha	Cabo 268	2,50	--	--	--
1	22	linha	Cabo 336	2,80	--	--	--
1	23	linha	Cabo 268	21,00	--	--	--
1	29	linha	Cabo 2/0	3,00	--	--	--
1	24	linha	Cabo 4/0	4,50	--	--	--
24	25	linha	Cabo 4/0	4,70	--	--	--
10	31	trafo	--	--	Delta/Y	10	0,0782
9	32	trafo	--	--	Delta/Y	2*10	0,0752//0,0755
20	33	trafo	--	--	Delta/Y	2*15	0,0867//0,0871
28	34	trafo	--	--	Delta/Y	2*10	0,0755//0,0754
1	35	trafo	--	--	Delta/Y	10	0,075
3	36	trafo	--	--	Delta/Y	2*5	0,0666//0,0737
2	37	trafo	--	--	Delta/Y	2*5	0,0763//0,0763
4	38	trafo	--	--	Delta/Y	2*5	0,0746//0,0760
5	39	trafo	--	--	Delta/Y	10	0,0769
6	40	trafo	--	--	Delta/Y	2*5	0,0724//0,0688
8	41	trafo	--	--	Delta/Y	2*10	0,0772//0,0772
29	42	trafo	--	--	Delta/Y	2*7,5	0,0800//0,0800
22	43	trafo	--	--	Delta/Y	15	0,053
17	44	trafo	--	--	Delta/Y	2*7,5	0,0786//0,0786
11	45	trafo	--	--	Delta/Y	2*15	0,0884//0,0873
12	46	trafo	--	--	Delta/Y	5	0,0886
13	47	trafo	--	--	Delta/Y	2*10	0,0836//0,0845
25	48	trafo	--	--	Delta/Y	12	0,0882
24	49	trafo	--	--	Delta/Y	12,5	0,08082
16	50	trafo	--	--	Delta/Y	7,5	0,0957

Tabela 6.18 – Dados das cargas ligadas na rede em estudo.

Barra	Potência	
	P (MW)	Q (MVar)
31	1,55	0,84
32	10,56	5,70
33	18,17	12,68
34	15,78	8,52
36	4,92	2,66
37	3,61	1,95
38	3,38	1,82
39	8,46	4,57
40	1,77	0,96
41	8,00	4,00
42	8,33	3,80
43	11,88	7,98
44	2,80	1,10
46	2,42	1,75
47	3,59	1,53
48	5,00	2,83
49	4,10	1,46
50	6,00	3,90

As análises a serem apresentadas nesta seção contemplam casos mais próximos da realidade com cerca de 20% das barras com monitoramento das distorções harmônicas.

No primeiro caso de análise foram considerados 11 medidores instalados na rede. Estes foram alocados aleatoriamente nas barras [1 8 12 15 18 25 30 34 40 42 50] em destaque na Figura 6.11. Foram consideradas medições das distorções nas três fases da barra monitorada.

Como configurações iniciais do algoritmo de estimação foram considerados:

- Número de gerações igual 200;
- Número de indivíduos na população inicial igual a 40;
- Número de mutações por indivíduo igual a 5;
- Taxa de recombinação por geração igual a 10%;
- Passo de mutação inicial igual a 1 para módulos e π para ângulos;
- β referente à auto-adaptação igual a 2;
- Evolução $(\mu+\lambda)$;
- Método de recombinação igual à média.

Figura 6.11 – Onze medidores instalados aleatoriamente na rede – primeiro caso de análise.

Nesta primeira análise, foram consideradas as ordens harmônicas 3, 5, 7, 9, 11 e 13 para serem estimadas. Desta forma, foram determinados valores de distorções para as ordens harmônicas em estudo para todas as barras da rede. Os valores determinados foram baseados em dados de medições obtidos da rede de subtransmissão real na qual a rede em estudo foi espelhada.

Considerando as configurações supracitadas foram obtidos os erros absolutos de estimação apresentados na Figura 6.12 que segue. Os erros obtidos para cada barra do sistema estão representados no eixo das ordenadas e o número da barra no eixo das abscissas. Embora não exista uma representação física para os pontos intermediários (entre número das barras), as linhas representam com clareza os valores dos erros em cada fase. Podem ser verificados, a partir destes resultados, os altos erros obtidos nas barras no secundário dos transformadores. O maior valor de erro foi obtido para a terceira ordem harmônica, o que era esperado pela característica do modelo do transformador.

Ainda considerando o caso anterior, foram simulados o mesmo caso cinco vezes e apresentada a média dos erros na Figura 6.13. Pode-se perceber que não foram observadas grandes variações entre um caso simulado isoladamente e uma média de cinco casos. Este resultado ilustra a segurança nos resultados de uma simulação do algoritmo de estimação das distorções harmônicas.

Figura 6.12 – Erros relativos de estimação por ordem harmônica H e para as três fases – primeiro caso de análise.

Figura 6.13 – Média dos erros relativos de estimação para cinco casos rodados por ordem harmônica H e para as três fases – primeiro caso de análise.

A Figura 6.14 apresenta a evolução (nota) dos indivíduos em função das gerações e a Figura 6.15 apresenta a convergência dos passos de mutação. Através destas pode-se notar a boa convergência do algoritmo, uma vez que as notas dos indivíduos melhoraram com o passar das gerações (elitismo) e o passo de mutação diminuiu à medida que se aproximava de um resultado de menor erro de estimação.

Figura 6.14 – Nota média dos melhores indivíduos para cada ordem harmônica em função das gerações - primeiro caso analisado com a rede de 50 barras: 11 medidores instalados aleatoriamente.

Como já mencionado neste trabalho, as variações encontradas na evolução dos passos de mutação (Figura 6.15) representam a escolha/seleção de indivíduos gerados por recombinação, inserindo variabilidade aos indivíduos de uma determinada geração. Esta variabilidade auxilia o algoritmo a sair de zonas de convergência para ótimos locais.

Figura 6.15 – Evolução dos passos de mutação cada ordem harmônica considerada em função das gerações - primeiro caso analisado com a rede de 50 barras: 11 medidores instalados aleatoriamente.

Ainda em relação ao caso mencionado com 11 medidores instalados na rede, a metodologia foi submetida a outra análise diminuindo-se o número de indivíduos nas gerações pela metade, ou seja foram analisados 20 indivíduos por geração. Desta forma foram obtidos os erros apresentados na Figura 6.16 que segue. Pode-se perceber o aumento nos erros de estimação, principalmente nas barras de carga. Nesta análise foram simulados cinco casos para cada ordem harmônica e os resultados apresentados representam a média dos casos analisados.

Figura 6.16 – Média dos erros relativos de estimação para cinco casos rodados por ordem harmônica H e para as três fases considerando 20 indivíduos por geração – primeiro caso de análise.

Na análise que segue (segundo caso de análise), foram considerados os mesmos parâmetros evolutivos do caso anterior, porém foram modificadas as posições e quantidade dos medidores. Neste caso foram considerados 8 medidores instalados nas barras [1 2 9 17 21 22 25 34] como apresentadas na Figura 6.17. A escolha das barras com medidores foi realizada visualmente, com o objetivo (intuitivo) de cobrir uma maior área da rede. Foram simulados 5 casos para cada ordem harmônica e o resultado apresentado refere-se à média.

Embora a distribuição dos medidores na rede tenha sido intuitiva, mesmo com a diminuição do número de medidores ocasionou redução no valor dos erros de estimação, como pode ser observado na Figura 6.18. Este resultado mostra a grande influência da localização dos medidores instalados na rede e a importância de um estudo/análise de otimização quanto a localização dos medidores que formarão um sistema de monitoramento para as distorções harmônicas.

Figura 6.17 – Oito medidores instalados aleatoriamente na rede – segundo caso de análise.

Figura 6.18 – Média dos erros relativos de estimação para cinco casos rodados por ordem harmônica H – oito medidores instalados aleatoriamente na rede (segundo caso de análise).

Outra análise com a rede de 50 barras em estudo foi realizada com a introdução de medidores nas barras de carga. Os parâmetros evolutivos foram os mesmos nas análises anteriores, considerando-se 200 gerações de evolução e 40 indivíduos por geração nas populações.

Como premissa para esta análise tem-se que, por um lado os erros de estimação nas barras de carga serão minimizados, porém isso ocorrerá somente nas barras localizadas nos secundários dos transformadores em que existe um medidor instalado. Isso é esperado pela característica do transformador que é capaz de blindar a propagação de determinadas ordens harmônicas.

Foram considerados nove medidores e estes foram instalados nas barras de carga [32 33 34 36 40 43 44 47 48] sinalizadas na Figura 6.19 que segue.

Figura 6.19 – Nove medidores instalados na rede tendo sido priorizadas barras de carga – terceiro caso de análise.

A Figura 6.20 apresenta os erros relativos de estimação para o caso em análise. Nota-se que ainda existem barras de carga com erros de estimação superiores a 5% para algumas ordens harmônicas.

Como já mencionado, os resultados apresentados para os três casos de análise salientam a importância de um estudo de observabilidade do sistema de medição e alocação ótima dos medidores.

Através dos resultados, pode-se verificar também a eficiência da metodologia proposta onde os erros de estimação são considerados satisfatórios, mesmo em condições de grande dificuldades de estimação (pouca visibilidade por parte do sistema de medição).

Figura 6.20 – Erros relativos de estimação por ordem harmônica H e para as três fases – nove medidores instalados em barras de carga (terceiro caso de análise).

Através da Figura 6.21 e da Figura 6.22 é possível fazer um comparativo dos erros de estimação nas barras que não possuem cargas instaladas. As figuras ilustram os erros considerando os casos de análises:

- oito medidores distribuídos “intuitivamente” na rede – segundo caso de análise com a rede de 50 barras.
- nove medidores instalados somente em barras de carga – terceiro caso de análise com a rede de 50 barras;

Nota-se que os erros de estimação nas barras sem cargas para o segundo caso de análise (Figura 6.21) foram, de uma forma geral, inferiores. Como a maioria dos medidores instalados neste caso de análise foram alocados nas barras sem carga e o transformador delta-estrela isola o sistema para as frequências caracterizadas pelos diagramas de sequência zero, este resultado poderia ser esperado pois as barras analisadas estão melhor observadas.

Figura 6.21 – Erros de estimação nas barras que não possuem cargas instaladas considerando oito medidores instalados aleatoriamente no sistema (segundo caso de análise).

Figura 6.22 – Erros de estimação nas barras que não possuem cargas instaladas considerando nove medidores instalados somente em barras de carga (terceiro caso de análise).

Como forma de comparar as formas monofásica e trifásica de análise de rede, foi gerado o modelo monofásico da rede de 50 barras em estudo. Apesar de o modelo monofásico do estimador utilizar na função de avaliação os diagramas de seqüência (positiva, negativa ou zero) de acordo com a ordem harmônica e o modelo trifásico utilizar o diagrama de fases (impedâncias próprias e mútuas), espera-se que os erros de estimação em ambos casos sejam similares e que os valores obtidos para as distribuições de correntes harmônicas sejam próximos.

Desta forma, foram considerados os oito medidores instalados nas barras [1 2 9 17 21 22 25 34] apresentados na Figura 6.17 e os mesmos parâmetros utilizados no segundo caso de análise. Para a comparação foi utilizada a harmônica de ordem três, que representa um caso crítico de análise por se tratar de uma harmônica com representação em seqüência zero.

A Figura 6.23 apresenta os erros de estimação considerando a análise monofásica e trifásica. Como esperado, os erros de estimação nos dois casos foram bem similares. As diferenças encontradas entre as análises são justificadas pelo caráter estatístico da metodologia empregada.

Como os espaços de busca da solução do problema de estimação harmônica trifásico e monofásico são diferentes, seria possível obter diferentes valores de correntes harmônicas injetadas nas barras que produziram valores similares de tensões harmônicas a serem estimadas. Para verificar o comportamento do algoritmo nesta análise, estão apresentados na Figura 6.24 os valores das correntes encontradas pelo algoritmo. Os valores apresentados, são utilizados juntamente com a matriz de impedâncias da rede (de seqüência zero para o caso monofásico e de fases para o caso trifásico) para a obtenção dos valores das tensões harmônicas que são o objetivo do algoritmo. Pode-se verificar a proximidade dos valores das correntes obtidas. Este resultado reforça a robustez da metodologia indicando a correta busca das distribuições das correntes harmônicas independente do modelo da rede utilizada.

Outra análise nesta simulação está em verificar os valores obtidos das tensões nas barras. Uma vez que o algoritmo, na análise trifásica, busca o resultado de cada fase de forma independente, os valores das tensões, principalmente os ângulos, devem seguir os valores especificados. Para o caso analisado, harmônica de terceira ordem, espera-se que os ângulos sejam próximos para as três fases. A Figura 6.25 apresenta os valores dos módulos das tensões e a Figura 6.26 os valores dos ângulos. Pode-se verificar a proximidade dos valores encontrados que confirmam a robustez do algoritmo desenvolvido.

Figura 6.23 – Comparação dos erros de estimação através das buscas monofásicas e trifásicas.

Figura 6.24 – Comparação dos valores dos módulos das correntes harmônicas injetadas nas barras considerando a estimação pela busca monofásica e trifásica.

Figura 6.25 – Comparação dos valores dos módulos das tensões harmônicas nas barras considerando a estimação pela busca monofásica e trifásica.

Figura 6.26 – Comparação dos valores dos ângulos das tensões harmônicas nas barras considerando a estimação pela busca monofásica e trifásica.

Um ganho ao se utilizar o modelo trifásico está nos resultados de desequilíbrios em cada ordem harmônica, que são obtidos a partir da estimação. Esta informação é de grande importância para as análises de efeitos das distorções harmônicas desequilibradas em equipamentos dos sistemas elétricos.

Por outro lado, tem-se que o tempo de estimação no modelo trifásico é bem maior que o do caso monofásico uma vez que o algoritmo busca cada fase independente. O tempo de estimação pode ser diminuído com a utilização de indivíduos pré-evoluídos ou através de processamento paralelo.

---

7 - CONCLUSÕES

Foi apresentada nesta tese uma metodologia promissora para determinar o estado de uma rede elétrica quanto às distorções harmônicas. A principal contribuição deste trabalho ao estado da arte quanto a EEDH foi a aplicação de EEs como ferramenta para a solução do problema. Além desta contribuição, tem-se a aplicação da metodologia na ausência de métodos de alta tecnologia (por exemplo GPS) para a sincronização dos dados de medições.

O algoritmo proposto partiu de dados de medição de tensões harmônicas em algumas barras do sistema para estimar o conteúdo harmônico (distorções para ordens harmônicas individuais ou DHT) nas demais barras do sistema. A técnica de Estratégias Evolutivas foi utilizada como ferramenta de otimização do problema.

Os métodos matemáticos usuais utilizados para a solução do problema de EEDH, considerando dados inseguros dos medidores, fortes não linearidades, não diferenciabilidade e ruídos freqüentemente apresentam grande dificuldade, quando não incapacidade, de convergência em um problema de otimização. Além disso, funções objetivo variáveis no tempo, como pode ser encontrada em um problema de EEDH, determinam dificuldades extras para os métodos tradicionais [20].

A Estratégia Evolutiva, apresentada nesta tese, compreende uma ferramenta poderosa para solucionar o problema de EEDH, onde indivíduos em uma população que representam uma possível solução são submetidos a operadores evolutivos e avaliação em cada geração. Durante a evolução somente os melhores indivíduos (melhor solução para o problema) sobrevivem. Outro benefício está no baixo número de simulações para se encontrar uma solução aceitável quando comparado com o método estatístico de Monte Carlo [20].

A metodologia apresentada utiliza as saídas do fluxo de carga como referências para ajustar os fasores harmônicos medidos. Estes ajustes podem ser considerados uma forma de se sincronizar as medições nos diversos pontos da rede quando da ausência de outras formas de sincronização como o GPS.

A solução do problema de EEDH, é representada na metodologia por indivíduos compostos por fatores (porcentagem do módulo e variação de ângulo) que representam a corrente harmônica em uma barra em função da corrente fundamental na própria barra. A partir destes indivíduos, correntes harmônicas injetadas nas barras do sistema, os valores das tensões harmônicas são calculados utilizando-se a matriz de admitâncias nodais da rede para a

ordem harmônica considerada. A melhor solução para o problema consiste na distribuição de tensões calculadas que minimizem o erro quadrático entre os valores calculados e os valores medidos.

Os resultados preliminares (com as redes menores) mostraram a potencialidade do algoritmo apresentando erros percentuais inferiores a 5% na estimação de ordens harmônicas individuais.

O efeito das configurações de parâmetros de um algoritmo de Estratégias Evolutivas utilizado na estimação de distorções harmônicas em um sistema elétrico foi também avaliado com o intuito de indicar uma configuração “ótima” para o algoritmo. Para cada variação de parâmetro do algoritmo foram simulados pelo menos 30 casos de forma a se obter maior segurança nos resultados.

Através das análises realizadas na configuração dos parâmetros, pôde-se melhorar a eficiência do algoritmo reduzindo os erros de estimação.

Notou-se que os erros de estimação reduzem com a utilização dos seguintes ajustes de configuração:

- Aumento do número de indivíduos na população inicial;
- Aumento do número de mutações por indivíduo;
- Utilização do método de evolução ($\mu + \lambda$)

Quanto ao ajuste dos passos de mutação iniciais, observou-se que para altos valores o algoritmo pode apresentar dificuldade de convergência e que a escolha dos valores 1 para os módulos e $\pi/2$ para as variações de ângulos apresentaram convergência satisfatória para o algoritmo proposto.

Na formulação da auto-adaptação não foram percebidas grandes influências na evolução das soluções para diferentes valores de β , embora a evolução dos passos de mutação para valores de β menores que 1 tenha apresentado grandes variações com o aumento das gerações.

Outro parâmetro que não apresentou grandes impactos foi a forma de recombinação dos indivíduos, no entanto o método das médias introduziu maior variabilidade aos indivíduos recombinações.

Embora os ajustes realizados neste trabalho tenham focado uma rede de 14 barras, os resultados obtidos servem como indicativo geral para qualquer rede. Tal afirmação foi verificada com a utilização de uma rede trifásica de 50 barras.

O algoritmo proposto com os parâmetros ajustados foi submetido a análise com a rede de 14 barras e foram apresentados os resultados da estimação individual das tensões harmônicas tendo sido consideradas as ordens 3^a, 5^a, 7^a, 9^a, 11^a e 13^a. Foram simulados 30 casos para cada ordem e o algoritmo mostrou-se robusto e com excelentes resultados de estimação.

As distorções estimadas individualmente foram utilizadas para obter a DHT em cada barra. Os resultados obtidos apresentaram erros inferiores a 1% em todas as simulações.

Foram também abordadas formas de diminuição dos erros de estimação em situações de pouca visibilidade por parte do sistema de medição, sendo estas, o conhecimento de cargas harmônicas em pontos da rede em estudo ou informações extras de medição.

Utilizando apenas 3 medidores de tensões harmônicas instalados na rede e os valores de correntes harmônicas em uma das barras, o algoritmo foi capaz de diminuir os erros de estimação em mais de 50% em barras próximas a essas medições quando comparado com a análise desconsiderando as medições de corrente.

Buscando uma completa avaliação da potencialidade da metodologia proposta, foi considerada uma rede de 50 barras em seu modelo trifásico. Esta rede foi baseada em uma rede de subtransmissão de uma concessionária de energia do Brasil.

De forma geral, os resultados apresentaram variações em função da localização dos medidores, o que mostrou a importância de se estudar métodos de alocação ótima de medidores e a observabilidade dos sistemas de monitoramento.

Com esta rede, pôde-se verificar os ajustes realizados anteriormente, onde foram modificados somente os parâmetros número de indivíduos nas populações e número de gerações e foram encontrados erros de estimação inferiores a 10% em todas as barras com um determinado sistema de monitoramento.

Verificou-se, também, a influência dos transformadores delta-estrela, onde medidores instalados nos primários dos transformadores não observam as distorções nos secundários para as ordens harmônicas de sequência zero. Da mesma forma, medidores instalados nos secundários não observam distorções de sequência zero nos primários. Ainda assim os maiores erros relativos de estimação, para as ordens harmônicas de sequência zero, foram aceitáveis.

Uma última análise realizada foi a comparação entre os modelos monofásico e trifásico, onde a partir dos dados da rede de 50 barras foram obtidas as matrizes de admitâncias nodais para os diagramas de seqüências positiva, negativa e zero. Na comparação considerou-se a harmônica de terceira ordem. Os resultados confirmaram a robustez da

metodologia proposta onde foram observados valores de correntes e tensões muito próximos. Foi também verificado o correto comportamento dos valores dos ângulos das tensões e correntes trifásicas nas barras sem monitoramento para a terceira harmônica correspondendo a uma ordem de seqüência zero.

Embora o esforço computacional na análise com modelos trifásicos seja bem maior que na análise com modelo monofásico é possível, na primeira, estimar distorções harmônicas desequilibradas.

Desta forma, foi possível verificar a potencialidade do trabalho, que visa solucionar um problema importante nos SEPs e apresentou como inovação a utilização de Estratégias Evolutivas como ferramenta na solução do problema.

Como fruto desta pesquisa os trabalhos apresentados nas referências [41], [42], [43] e [44] foram publicados em congressos. O trabalho apresentado em [45] foi submetido à revista SBA e o trabalho apresentado em [46] foi submetido à revista *IEEE Transactions on Power Delivery*.

7.1 Trabalhos Futuros

Como trabalhos que somariam ao desenvolvido nesta tese têm-se:

- Desenvolvimento de um método de localização ótima de medidores, visando maior observabilidade de um sistema de monitoramento para distorções harmônicas;
- Aplicação da metodologia em tempo *quasi* real, contemplando mudanças de topologia da rede e da carga em análise, de forma a se verificar o efeito variável no tempo das distorções harmônicas. Este trabalho pode ser realizado considerando populações de indivíduos pré-evoluídos. Outro ponto a ser considerado neste contexto refere-se à determinação de uma solução para uma topologia não pré-definida através de Redes Neurais Artificiais treinadas com várias topologias de rede.
- Aplicação da metodologia utilizando processamento paralelo visando simulação em tempo *quasi* real. Este desenvolvimento contribui, também, na análise do efeito temporal das distorções harmônicas.

---

8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Arrillaga, *Power system harmonic analysis*. Chichester ; New York: Wiley, 1997.
- [2] Z. P. Du, J. Arrilaga, N. R. Watson, and S. chen, "Implementation of Harmonic State Estimation," *Proceedings, 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, vol. 1, pp. 273-278, 14-16 October 1998.
- [3] G. T. Heydt, "Identification of Harmonic Sources by a State Estimation Tecnique," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, p. 8, 1989.
- [4] A. P. S. Meliopoulos, F. Zhang, and S. Zelingher, "Hardware and Software Requirements for a Transmission System Harmonic Measurement System," *Harmonics in Power Systems, ICHPSV*, pp. 330-338, September 22-25 1992.
- [5] A. P. S. Meliopoulos, F. Zhang, and S. Zelingher, "Power System Harmonic State Estimation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, pp. 1701-1709, July 1994.
- [6] J. Arrillaga, N. R. Watson, and S. Chen, *Power system quality assessment*. Chichester; New York: John Wiley & Sons, 2000.
- [7] G. J. Wakileh, *Power systems harmonics: fundamentals, analysis, and filter design*. Berlin; New York: Springer, 2001.
- [8] R. N. Bracewell, *The Fourier transform and its applications*, 3rd ed. Boston: McGraw Hill, 2000.
- [9] L. Velho and J. Gomes, *From fourier analysis to wavelets* vol. 1. Orlando - Florida: SigGraph - ACM, 1998.
- [10] M. Grady and S. W. Santoso, "Understanding power system harmonics," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 21, p. 4, November 2001.
- [11] J. Arrillaga and N. R. Watson, *Power system harmonics*, 2nd ed. West Sussex, England ; Hoboken, NJ: J. Wiley & Sons, 2003.
- [12] IEEE, "IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems," in *Standard*. vol. 519 New York: IEEE, 1993.
- [13] IEEE, "IEEE Working Group on Power System Harmonics - Power System Harmonics - Tutorial Course, 84 EHO 221-2-PWR," *IEEE Power Engineering Society*, 1984.
- [14] J. A. Jardini, "Aplicação de computadores digitais para cálculo de parâmetros elétricos de linhas de transmissão," in *EP - ESCOLA POLITECNICA* vol. Dissertação (Mestrado) São Paulo: Universidade de São Paulo, 1970, p. 72.
- [15] D. B. Fogel, *Evolutionary computation : toward a new philosophy of machine intelligence*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1995.
- [16] F. J. V. Zuben, "Computação Evolutiva: Uma Abordagem Pragmática," in *Anais da I Jornada de Estudos em Computação de Piracicaba e Região (1a JECOMP)*, 2000, pp. 25-45.
- [17] W. Atmar, "Notes on the Simulation of Evolution," *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 5, pp. 130-148, 1994.
- [18] T. Back and H.-P. Schwefel, "Evolutionary Computation: An Overview," in *Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, 1996, pp. 20-29.
- [19] T. Back, D. B. Fogel, and Z. Michalewics, *Handbook of evolutionary computation*. Bristol

New York ; Oxford: Institute of Physics Publishing ;
Oxford University Press, 1997.

- [20] T. Back, U. Hammel, and H.-P. Schwefel, "Evolutionary Computation: Comments on the History and Current State," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 1, pp. 3-17, April 1997.
- [21] H.-P. Schwefel, *Numerical optimization of computer models*. Chichester ; New York: John Wiley & Sons, 1981.
- [22] S. Osowski, "Neural Network for Estimation of Harmonic Components in a Power System," in *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 1992, pp. 129-135.
- [23] T. Lobos, T. Kozina, and H.-J. Koglin, "Power System Harmonics Estimation Using Linear Least Squares Method and SVD," in *Proceedings of the 16th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference - IMTC*, Venice, Italy, 1999, pp. 789-794.
- [24] H. M. Beides and G. T. Heydt, "Dynamic State Estimation of Power System Harmonics Using Kalman Filter Methodology," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, pp. 1663-1670, May 1991.
- [25] Y. G. Hegazy, S. S. Fouda, M. M. A. Salama, and A. Y. Chikhani, "The Effect of Modelling on the Accuracy of the Estimation of Harmonic Voltages in Distribution Systems," in *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Canada, 1994, pp. 131-135.
- [26] M. Y. Najjar and G. T. Heydt, "A hybrid nonlinear-least squares estimation of harmonic signallevels in power systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, pp. 282-288, January 1991.
- [27] J. E. Farach, W. M. Grady, and A. Arapostathis, "An Optimal Procedure for Placing Sensors and Estimating the Locations of Harmonic Sources in Power Systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, pp. 1303-1310, July 1993.
- [28] Z. P. Du, J. Arrilaga, and N. R. Watson, "Continuous Harmonic State Estimation of Power Systems," *IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, vol. 143, pp. 329-336, 1996.
- [29] H. Ma and A. A. Girgis, "Identification and tracking of harmonic sources in a power systemusing a Kalman filter," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, pp. 1659-1665, July 1996.
- [30] Z. P. Du, J. Arrilaga, N. R. Watson, and S. chen, "Identification of Harmonic Sources of Power systems Using State Estimation," *IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, vol. 146, pp. 7-12, January 1999.
- [31] A. P. S. Meliopoulos, B. Fardanesh, S. Zelingher, and G. J. Cokkinides, "Harmonic Measurement System via Synchronized Measurements," *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 2, pp. 1094-1100, 2000.
- [32] N. R. Watson, J. Arrilaga, and Z. P. Du, "Modified Symbolic Observability for Harmonic State Estimation," in *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 2000, pp. 105-111.
- [33] S. S. Matair, N. R. Watson, K. P. Wong, V. L. Pham, and J. Arrilaga, "Harmonic State Estimation: A Method for Remote Harmonic Assessment in a Deregulated Utility Network," in *Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, 2000, pp. 41 - 46.
- [34] K. K. C. Yu and N. R. Watson, "Three-Phase Harmonic State Estimation Using SVD for Partially Observable Systems," in *PowerCon - International Conference on Power System Technology*, 2004, pp. 29-34.

- [35] K. K. C. Yu and N. R. Watson, "Influence of Transformer Configuration on Measurement Placement in Harmonic State Estimation," in *PowerCon - International Conference on Power System Technology*, 2004, pp. 35-40.
- [36] N. Kanao, M. Yamashita, H. Yanagida, M. Mizukami, and Y. Hayashi, "Power System Harmonic Analysis Using State-Estimation Method for Japanese Field Data," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, pp. 970-977, April 2005.
- [37] C. Madtharad, S. Premrudeepreechacharn, N. R. Watson, and R. Saeng-Udom, "An Optimal Measurement Placement Method for Power System Harmonic State Estimation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, pp. 1514-1521, April 2005.
- [38] K. K. C. Yu, N. R. Watson, and J. Arrilaga, "Error Analysis in Static Harmonic State Estimation: A Statistical Approach," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, pp. 1045-1050, April 2005.
- [39] N. R. Watson, "Advanced Harmonic Assessment," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, vol. 3, pp. 2230-2235, June 2005.
- [40] IEEE, "Test Systems for Harmonics Modeling and Simulation," in *Task Force on Harmonics Modeling and Simulation*, *IEEE Power Engineering Society*, <http://grouper.ieee.org/groups/harmonic/simulate/download.htm>, Ed.
- [41] E. F. Arruda and N. Kagan, "Estimação Harmônica Utilizando Algoritmos Evolutivos," in *X Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica - X SEPOPE*, Florianópolis, 2006.
- [42] N. Kagan and E. F. Arruda, "Harmonic Estimation Using Evolutionary Algorithms," in *ICHQP - International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Cascais, 2006.
- [43] E. F. Arruda and N. Kagan, "Efeito da Configuração dos Parâmetros em Estratégias Evolutivas na Estimação Harmônica," in *Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (CBQEE)*, Santos, SP, 2007, p. 6.
- [44] E. F. Arruda and N. Kagan, "Estimação de Distorção Harmônica Total Utilizando Estratégias Evolutivas " in *Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (CBQEE)*, Santos, SP, 2007, p. 6.
- [45] E. F. Arruda and N. Kagan, "Estimação de Estados Harmônicos Usando Estratégias Evolutivas," *submetido à revista SBA - Controle & Automação*, 2008.
- [46] E. F. Arruda, N. Kagan, and P. F. Ribeiro, "Harmonic Distortion State Estimation Using an Evolutionary Strategy," *submitted to IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008.