



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**GUSTAVO GONÇALVES DOS SANTOS**

**UMA CONTRIBUIÇÃO À ESTRATÉGIA PARA ALOCAÇÃO DE MEDIDORES E  
ESTIMAÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS**

UBERLÂNDIA

2018

**GUSTAVO GONÇALVES DOS SANTOS**

**UMA CONTRIBUIÇÃO À ESTRATÉGIA PARA ALOCAÇÃO DE MEDIDORES E  
ESTIMAÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciências, área de concentração: Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. José Rubens Macedo Junior

UBERLÂNDIA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

S237c Santos, Gustavo Gonçalves dos, 1993-  
2018 Uma contribuição à estratégia para alocação de medidores e  
estimação das distorções harmônicas / Gustavo Gonçalves dos Santos. -  
2018.  
116 f. : il.

Orientador: José Rubens Macedo Júnior.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.  
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.111>  
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Sistemas elétricos de potência -  
Teses. 3. Sistemas de energia elétrica - Estimação de Estado - Teses. 4.  
Algoritmos computacionais - Teses. 5. Análise harmônica - Teses. I.  
Macedo Júnior, José Rubens. II. Universidade Federal de Uberlândia.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

**GUSTAVO GONÇALVES DOS SANTOS**

**UMA CONTRIBUIÇÃO À ESTRATÉGIA PARA ALOCAÇÃO DE MEDIDORES E  
ESTIMAÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciências, área de concentração: Engenharia Elétrica.

---

Prof. José Rubens Macedo Junior  
Orientador

---

Prof. Alexandre Cardoso  
Coordenador da Pós-Graduação



Dedico este trabalho aos meus pais, Walter e Gírlane, e a minha irmã, Jaqueline, por todo amor e constante apoio aos meus estudos.

---

# AGRADECIMENTOS

---

Agradeço a **Deus**, pela vida.

Ao meu orientador, **Prof. José Carlos de Oliveira**, pela presença, atenção e confiança durante a realização da minha pesquisa. Também, sou grato pelos ensinamentos e bons exemplos que contribuíram para a minha formação.

Aos meus pais, **Walter Santos e Girlane Santos**, e a minha irmã **Jaqueline Santos**, por todo amor e incentivo empreendidos aos meus estudos. Sou grato também aos demais familiares pela torcida sempre constante para o meu sucesso.

A minha namorada **Renata Caroline** pelo companheirismo e paciência durante o mestrado.

Ao meu amigo **Thales Lima** pela grande ajuda no desenvolvimento dessa pesquisa.

Estendo o meu agradecimento aos demais amigos, professores e colegas do Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, em especial, **André Luiz Barroso, Andréia Crico, Antônio Delaiba, Arthur Costa, Camila Chaves, Fabricio Montes, Fernando Silva, Geraldo Caixeta, Guilherme Xavier, Ivan Nunes, Isaque Gondim, Henrique Neto, Jaqueline Rezende, José Rubens, José Wilson, Lais Resende, Leonardo Rosenthal, Lucas Tiago, Márcio Arvelos, Michelly Lima, Pedro Barra, Raquel Filiagi, Roberta Ramos e Victor Lucas** pelos conhecimentos transmitidos e bons momentos compartilhados.

À **FAPEMIG** pelo apoio financeiro fornecido ao longo da pesquisa por meio da bolsa de mestrado e subsídios concedidos para a publicação de artigos em eventos nacionais.

Enfim, a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

*Ainda que eu falasse  
A língua dos homens  
E falasse a língua dos anjos,  
Sem amor eu nada seria.*

*É só o amor! É só o amor  
Que conhece o que é verdade.  
O amor é bom, não quer o mal,  
Não sente inveja ou se envaidece.*

*O amor é o fogo que arde sem se ver;  
É ferida que dói e não se sente;  
É um contentamento descontente;  
É dor que desatina sem doer.*

*Ainda que eu falasse  
A língua dos homens  
E falasse a língua dos anjos  
Sem amor eu nada seria.*

*É um não querer mais que bem querer;  
É solitário andar por entre a gente;  
É um não contentar-se de contente;  
É cuidar que se ganha em se perder.*

*É um estar-se preso por vontade;  
É servir a quem vence, o vencedor;  
É um ter com quem nos mata a lealdade.  
Tão contrário a si é o mesmo amor.*

*Estou acordado e todos dormem.  
Todos dormem. Todos dormem.  
Agora vejo em parte,  
Mas então veremos face a face.*

*É só o amor! É só o amor  
Que conhece o que é verdade.*

*Ainda que eu falasse  
A língua dos homens  
E falasse a língua dos anjos,  
Sem amor eu nada seria.*

*Composição: Renato Russo (recortes do Apóstolo Paulo e de Camões).*

---

## RESUMO

---

Diante do reconhecido aumento dos níveis de distorções harmônicas presentes nas redes de distribuição e transmissão e o estabelecimento de limites para esses fenômenos pelas agências regulatórias, a busca por meios otimizados destinados à determinação dos níveis de distorções presentes nas redes elétricas têm motivado várias pesquisas voltadas para a questão dos estimadores de estado harmônico aplicados a esse fim. Tais desafios se fazem prementes visto o grande número de pontos físicos presentes nas redes elétricas e que requerem monitorações diversas, fato este determinante para a busca de meios que venham, a partir de um número mínimo de medidores, determinar o estado operacional com que se encontra um determinado complexo elétrico quanto aos indicadores ora contemplados. Para o cumprimento das metas ora postas, reconhece-se, na atualidade, a existência de métodos diversos visando a alocação dos medidores e a estimação de estado, cujo último se apresenta como ferramenta de elevada aplicabilidade para os denominados sistemas determinados como também para os subdeterminados. Focando, pois, esta área de concentração, esse trabalho está direcionado ao processo avaliativo do desempenho de cinco algoritmos evolutivos e, através de simulações conduzidas por um programa desenvolvido para os fins desta pesquisa, tais procedimentos são testados e avaliados quanto a sua eficácia para o atendimento aos requisitos da correlação entre os níveis das distorções harmônicas existentes e aqueles prescritos pela legislação.

**Palavras-Chaves:** algoritmos para estimação de estado, alocação de medidores, estimação de estado harmônico, otimização da medição, sistemas determinados e indeterminados.

---

# ABSTRACT

---

In view of the recognized increase in the levels of harmonic distortions present in the distribution and transmission networks and the establishment of limits for this phenomenon by regulatory agencies, the search for optimized means to determine the levels of distortions present in the electric networks has motivated several researches aimed at the question of the harmonic state estimators applied for this purpose. Such challenges become urgent considering the large number of physical points present in the electrical networks and that require monitoring, a fact that is determinant for the search of means that come, from a minimum number of meters, to determine the operational state in which it is an electrical complex regarding the indicators considered herein. In this context, it is recognized that there are several methods for the meters' allocation and state estimation procedures, whose the last is a highly applicable tool for the so-called determined systems, as well, as non-determined ones. Focusing on this area of concentration, this work is directed to the evaluation process of the performance of five evolutionary algorithms and, through simulations conducted through a program developed for the purposes of this research, such procedures are tested and evaluated as to their effectiveness for the requirements of the correlation between the levels of existing harmonic distortions and those required by the required standards.

**Keywords:** determined and non-determined systems, harmonic state estimation, measurement optimization, meters' allocation, state estimation algorithms.

---

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

---

Figura 1 - Seleção por roleta .....	34
Figura 2 - Crossover de cromossomos binários .....	34
Figura 3 - Mutação de cromossomo binário .....	35
Figura 4 - Mutação no espaço de busca $\mathbb{R}^2$ .....	36
Figura 5 – Esquema de mutação do ED .....	40
Figura 6 - Ilustração do processo de recombinação .....	40
Figura 7 - Representação da linha por um circuito $\pi$ .....	50
Figura 8 - Representação do transformador .....	50
Figura 9 - Componentes típicos dos sistemas de medição de tensão e corrente .....	53
Figura 10 - Um sistema de aquisição de dados baseados em medições fasoriais sincronizadas para EEH .....	54
Figura 11 - Sistema 5 barras .....	55
Figura 12 - Fluxograma do processo de estimação das distorções harmônicas via algoritmos evolutivos .....	65
Figura 13 - Sistema do IEEE de 14 barras.....	69
Figura 14 – Resultados para a EEH: (a) DIT e DTT estimadas, (b) DIT e DTT referenciais e (c) Erro de estimação.....	71
Figura 15 – Resultados do algoritmo com estratégia evolutiva canônica (7 medidores) para as tensões harmônicas .....	78
Figura 16 – Resultados do algoritmo híbrido (7 medidores) para as tensões harmônica .....	79
Figura 17 – Resultados do algoritmo EDA (7 medidores) para as tensões harmônicas.....	79
Figura 18 – Resultados do algoritmo SOA (7 medidores) para as tensões harmônicas.....	80
Figura 19 – Síntese da análise comparativa (usando 7 medidores) dos desempenhos dos algoritmos através da média dos resultados de EEH para todos os barramentos do sistema..	80
Figura 20 – Resultados do algoritmo com estratégia evolutiva canônica (5 medidores) para as tensões harmônicas .....	82
Figura 21 – Resultados do algoritmo híbrido (5 medidores) para as tensões harmônicas .....	82
Figura 22 – Resultados do algoritmo EDA (5 medidores) para as tensões harmônicas.....	83

Figura 23 – Síntese da análise comparativa (usando 5 medidores) dos desempenhos dos algoritmos através da média dos resultados de EEH para todos os barramentos do sistema..	83
Figura 24 - Resultados do algoritmo híbrido (3 medidores) para as tensões harmônicas .....	84
Figura 25 - Resultados do algoritmo EDA (3 medidores) para as tensões harmônicas .....	85
Figura 26 - Síntese da análise comparativa (usando 3 medidores) dos desempenhos dos algoritmos através da média dos resultados de EEH para todos os barramentos do sistema..	85

---

# LISTA DE TABELAS

---

Tabela I - Síntese das publicações atinentes à alocação de medidores .....	21
Tabela II - Síntese das publicações atinentes à EEH.....	26
Tabela III - Resultados das distorções de tensão (em %) obtidos pelo HarmZs .....	52
Tabela IV - Resultados de distorções de tensão em (%) obtidos pelo programa em MATLAB® .....	52
Tabela V – Matriz de conexão (MC) para o sistema de 5 barras .....	55
Tabela VI – Exemplo do vetor de alocação (VA) para o sistema de 5 barras.....	57
Tabela VII - Matriz de conectividade (MC).....	58
Tabela VIII - Vetor de redundância (VR) .....	58
Tabela IX - Vetor de co-conectividade (VCC).....	59
Tabela X - Vetor final (VF).....	59
Tabela XI - Dados das barras na base de 100 MVA .....	67
Tabela XII - Dados dos ramos na base de 100 MVA.....	67
Tabela XIII - Tensão de referência nas barras.....	67
Tabela XIV - Correntes harmônicas injetadas.....	68
Tabela XV - Alocação dos medidores para o sistema de 14 barras .....	70
Tabela XVI - Vetor final para o sistema de 14 barras .....	70
Tabela XVII - Melhor resultado de EEH (em %) do algoritmo com EE canônica .....	74
Tabela XVIII – Erro absoluto de EEH (em %) do melhor resultado do algoritmo com EE canônica.....	75
Tabela XIX - Pior resultado de EEH (em %) do algoritmo com EE canônica.....	75
Tabela XX - Erro absoluto de EEH (em %) do pior resultado do algoritmo com EE canônica .....	76
Tabela XXI – Média dos 30 resultados de EEH (em %) do algoritmo com EE canônica .....	76
Tabela XXII - Erro absoluto da média dos 30 resultados de EEH (em %) determinados pelo algoritmo com EE canônica.....	77



---

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

---

AG	Algoritmo Genético
BGA	<i>Breeder Genetic Algorithm</i>
CMA	<i>Covariance Matrix Adaptation</i>
CSA	<i>Cumulative Step Size Adaptation</i>
DTT	Distorção Total de Tensão
DVS	Decomposição em Valores Singulares
ED	Evolução Diferencial
EDA	Evolução Diferencial Alternativo
EE	Estratégias Evolutivas
EEH	Estimador de Estado Harmônico
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HEPCO	<i>Hokuriku Electric Power Company</i>
LP	<i>Learning Period</i>
MC	Matriz de Conectividade
MEAT	<i>Multiobjective Evolutionary Algorithm with Tables</i>
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
MMQP	Método dos Mínimos Quadrados Ponderados
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PC	Probabilidade de Cruzamento
PMU	<i>Phasor Measurement Units</i>
PR	Problema de Recobrimento
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
RNA	Redes Neurais Artificiais
SADE	<i>Self-Adaptive Differential Evolution</i>
SOA	<i>Seeker Optimization Algorithm</i>
VA	Vetor de Alocação
VCC	Vetor de Co-conectividade
VRF	Vetor de Restrição Final

---

# SUMÁRIO

---

## CAPÍTULO I

<b>INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>15</b>
1.1    Considerações Iniciais .....	15
1.2    Estado da Arte.....	16
1.2.1    Alocação de Medidores para Estimação de Estado das Distorções Harmônicas.....	17
1.2.2    Estimação de Estado das Distorções Harmônicas .....	21
1.3    Contribuições desta Dissertação .....	27
1.4    Estrutura da Dissertação .....	28

## CAPÍTULO II

<b>MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO E OTIMIZAÇÃO .....</b>	<b>29</b>
2.1    Considerações Iniciais .....	29
2.2    Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) .....	30
2.3    Algoritmos de Computação Evolucionária.....	32
2.3.1    Algoritmo Genético .....	32
2.3.2    Estratégias Evolutivas.....	35
2.3.3    Algoritmo de Evolução Diferencial.....	39
2.3.4    Algoritmo de Busca Otimizada .....	43

## CAPÍTULO III

<b>ESTRATÉGIA PARA A ESTIMAÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS .....</b>	<b>47</b>
3.1    Considerações Iniciais .....	47
3.2    Fluxo Harmônico .....	48
3.2.1    Solução Direta no Domínio da Frequência.....	48
3.2.2    Modelagem dos Componentes e Matriz de Admitâncias .....	49
3.2.3    Software de Análise do Fluxo Harmônico e Validação.....	51
3.3    Estrutura da Medição para EEH .....	53
3.4    Estratégia de Alocação dos Medidores .....	54

3.5	Determinação das Distorções Harmônicas .....	60
<b>CAPÍTULO IV</b>		
<b>ESTUDOS DE CASOS.....</b>		<b>66</b>
4.1	Considerações Iniciais .....	66
4.2	Sistema Elétrico Utilizado como Teste.....	66
4.3	Resultados para a Alocação dos Medidores .....	68
4.4	Resultados para a EEH .....	71
4.4.1	Resultados de Estimação pelo MMQ .....	71
4.4.2	Resultados Estimação pelos Algoritmos Evolutivos .....	72
<b>CAPÍTULO V</b>		
<b>CONCLUSÕES.....</b>		<b>87</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>		<b>91</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>		<b>99</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>		<b>103</b>
<b>APÊNDICE C .....</b>		<b>108</b>
<b>APÊNDICE D .....</b>		<b>111</b>
<b>APÊNDICE E.....</b>		<b>115</b>

## INTRODUÇÃO GERAL

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A operação segura de um sistema elétrico de potência é garantida pelo fornecimento ininterrupto da energia com os padrões desejáveis de qualidade. Historicamente, o quesito qualidade da energia elétrica (QEE) tornou-se preocupante a partir da década de 1980, período marcado pela mudança de perfil dos consumidores industriais devido a crescente inserção de dispositivos mais eficientes baseados nos recursos proporcionados pela área da eletrônica de potência. Neste particular, vale ressaltar que, ao mesmo tempo que tais equipamentos devem ser supridos por tensões senoidais para a garantia do seu funcionamento pleno, os mesmos são caracterizados pelo seu comportamento não linear e atuam, por conseguinte, como potenciais fontes de correntes e tensões harmônicas, as quais impactam fortemente nos padrões de qualidade da energia do sistema [1].

Somado às questões pontuais dos mais diversos produtos presentes nas instalações industriais, comerciais e residenciais, destacam-se, ainda, as grandes perspectivas do agravamento das distorções harmônicas com o crescente aumento das conexões de unidades de geração, a exemplo dos parques eólicos e complexos fotovoltaicos e eólicos [2].

A relevância do tema ora tratado, ou seja, das distorções harmônicas, encontra grande respaldo quando das considerações de seus efeitos negativos na forma de aquecimentos, sobretensões e operação imprópria de vários componentes das redes elétricas [3].

À luz da multiplicidade de equipamentos causadores de distorções harmônicas e das preocupações como as acima apontadas, torna-se evidente a necessidade da regulamentação do assunto através de órgãos governamentais que estabelecem diretrizes para a definição, quantificação, medição e limitação dos fenômenos em pauta [4]. No Brasil, a matéria é normatizada através do módulo 8 do documento PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Este documento indica os valores de referência para os níveis máximos de distorções, em conformidade com a classe de tensão e a ordem

harmônica [5]. Também, à nível da rede básica, cabe ainda destacar que o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), possui diretrizes próprias, nos termos estabelecidos em [6].

Ressalva que, para que haja o cumprimento destas medidas, devem ser realizadas campanhas de medição ou acompanhamentos contínuos das grandezas ora tratadas, as quais são necessariamente feitas por meio de medições diretas em campo. Assim procedendo, torna-se viável a correlação entre os padrões exigidos e aqueles efetivamente praticados pelas empresas do setor elétrico. Diante desta realidade, fica evidenciado que a instalação de medidores de qualidade da energia elétrica, todavia, reconhecendo o grande número de barramentos e linhas que compõe um determinado sistema, a disponibilização de medidores para todos os pontos requeridos não é uma proposta trivial, haja vista os custos dos medidores, canais de comunicação, requisitos de armazenamento, tratamento de dados, dentre outros fatores [7].

Assim sendo, para fins de minimização dos custos de monitoramento da rede, naturalmente, uma solução plausível consiste em fazer a combinação de medições parciais e estimar as demais variáveis envolvidas no sistema. Nesse propósito, um vasto número de pesquisas tem sido desenvolvido, as quais são sintetizadas em muitas publicações [7-52]. Estas compreendem trabalhos direcionados à proposição de métodos voltados para a estimação de estado harmônico (EEH), os quais se destinam a identificar a localização de fontes harmônicas e estimar as tensões e/ou correntes harmônicas para os pontos de interesse dos complexos elétricos. Tal procedimento se apoia em medições em pontos estratégicos e não na totalidade dos barramentos que compõem as redes, fato este que irá reduzir custos com medidores, canais de comunicação, mão de obra especializada, otimização de bancos de dados advindos dos registros, etc.

## 1.2 ESTADO DA ARTE

Esta seção encontra-se imbuída do propósito de destacar os principais trabalhos encontrados no âmbito da temática dessa dissertação.

Em consonância com os propósitos desta pesquisa, a descrição do material bibliográfico feita a seguir está subdividida em dois grandes grupos, a saber:

- Alocação otimizada dos instrumentos de medição;
- Estimação de estado quanto as distorções harmônicas.

No que se refere a alocação dos medidores, os primeiros trabalhos objetivaram a determinação de pontos ótimos de medição baseada em resultados de estimação. Em geral, os processos empregados foram embasado em técnicas de análise de sensibilidade e eliminação sequencial. Sintetizando, as metodologias primaram por empregar várias combinações possíveis de localização dos monitores, sendo atribuído, como resultado ideal, aquela que oferecesse o menor número de medidores, com erros de estimação aceitáveis.

Em meados do ano 2000, novas pesquisas introduziram métodos diferentes para a alocação dos medidores, os quais basearam-se essencialmente na topologia da rede. Nesses, foram empregadas ferramentas clássicas para problemas de otimização, como algoritmos de programação inteira, algoritmo genético (AG) e decomposição em valores singulares (DVS), sendo este último um aprimoramento do método dos mínimos quadrados (MMQ).

No que se refere aos métodos de EEH propriamente ditos, dentre as ferramentas de otimização mais utilizadas destacam-se: DVS e algoritmos evolutivos. A primeira oferece soluções para o caso de sistema sobredeterminado e determinado, contudo, em caso de sistema subdeterminado, essa provém uma solução particular e não oferece soluções para pontos não observáveis do sistema. Já a segunda depende do número e posicionamento dos monitores, assim como do algoritmo implementado, o qual deve ter seus parâmetros ajustados para cada sistema.

Uma vez tecidos os comentários gerais acima, procede-se, na sequência, a apresentação e análise dos procedimentos mais difundidos para a alocação e estimação de estado, para os fins aqui almejados.

### **1.2.1 Alocação de Medidores para Estimação de Estado das Distorções Harmônicas**

Um dos primeiros trabalhos de alocação visando a EEH foi publicado em [8]. Nesta referência, usando o critério da mínima variância, é proposta uma técnica sequencial, baseada na inserção, um de cada vez, de medidores individuais. Os resultados demonstraram que nem sempre a melhor localização é sequencial.

A publicação [9] propôs um método de alocação de medidores para sistemas de distribuição através de redes neurais artificiais (RNA). Inicialmente são determinadas as regiões de alocação dos medidores, usando do processo de clusterização, baseada em algoritmos de lógica nebulosa (*fuzzy*). Em seguida, por meio do processo de retropropagação do erro, são determinadas as localizações exatas para os mesmos. Os resultados de um estudo de caso feito

para um sistema de 18 barras, demonstrou que, mesmo usando apenas 2 medidores, a identificação das fontes harmônicas foi bem-sucedida em mais de 80% dos casos. Contudo, vale ressaltar que, nesse artigo, foi pressuposta uma condição idealizada de que não há alterações significativas nas fontes harmônicas presentes no sistema.

Uma investigação sobre a influência da conexão dos transformadores na localização dos medidores de qualidade da energia elétrica foi realizada em [10]. As simulações feitas nesse trabalho para o sistema de 220 kV da Nova Zelândia mostraram que, dependendo do lado em que sejam feitas as medições nos transformadores, a observabilidade do sistema pode ser afetada.

Em [11] é empregada uma técnica baseada na eliminação sequencial para a determinação do número mínimo de medidores. A metodologia empregada parte do pressuposto que algumas barras não possuem fontes harmônicas e as demais estariam produzindo harmônicos. O Método DVS é empregado para a detecção dos pontos não observados na rede.

A referência [12] contemplou uma técnica baseado em AG, utilizando como função objetivo a minimização do traço da matriz de covariância, resultante dos valores estimados e verdadeiros de correntes das barras não monitoradas. Como esclarecido no artigo, o cálculo foi feito baseado no fato que alguns barramentos são suspeitos de possuírem fontes harmônicas. O procedimento foi aplicado ao sistema do IEEE de 14 barras e constatou-se que, comparativamente aos métodos sequencial e de eliminação sequencial, o AG apresentou melhor desempenho com o aumento do número de medidores alocados.

Também utilizando a técnica de eliminação sequencial, em [13] foi utilizada uma metodologia de alocação pela análise da observabilidade via técnicas de maximização de esparsidade. O algoritmo determina o número máximo de fontes harmônicas na rede, estabelece a matriz de admitância e a seguir estabelecem os possíveis candidatos a medição, os quais são removidos a cada iteração.

Uma abordagem semelhante aos trabalhos [12] e [13] foi apresentada em [14]. Esse foi embasado na busca da minimização do traço de covariância entre os valores verdadeiros e estimados de corrente harmônica, usando do MMQ para estimação das fontes de correntes harmônicas. O procedimento de alocação adotado é sequencial e detecta a cada medidor posicionado, que mede a tensão de um barramento e a corrente de um ramo conectado a esse, quais barramentos se tornam observáveis.

Numa linha distinta aos trabalhos anteriores, baseando-se essencialmente na topologia da rede, a referência [15] propôs um método de alocação fundamentado nas leis de Kirchhoff e de Ohm. Este reconhece que o número de canais de medição por Unidades de Medição Fasorial (PMUs, *Phasor Measurement Units*) são limitados, contudo, a rigor, não há nenhuma restrição ou penalização que evite a violação de tal restrição, sendo apenas informado o número máximo de correntes de ramos que deve ser medida.

As publicações [16] e seguiram o mesmo princípio de alocação adotado em [15], sendo empregado o algoritmo de programação inteira *branch-and-bound*. Nesses trabalhos, conseguiu-se impor restrições para as soluções, as quais consideraram aspectos quanto à localização e a importância de cada barra, assim como, a existência de equipamentos e disponibilidade de canal de comunicação.

Em [17] foi descrito um método de alocação baseado em AG. O procedimento consiste em buscar uma solução ótima via MMQ, aplicável ao sistema totalmente observável. Para tanto, as possíveis posições dos monitores são representadas pelos cromossomos binários do AG, de modo que o número de bits ativos corresponde a presença do medidor e, por sua vez, inativo, ausência do mesmo. Desse modo, em consonância com as propriedades do MMQ, em todas as situações testadas, o número de variáveis de estado é o mesmo de medições e, assim sendo, a única operação do AG pertinente é a mutação, a qual sempre acontece entre duas posições do cromossomo, uma alterando um bit ativo (número 1) e outra um bit inativo (número 0).

O trabalho [18] utiliza um algoritmo de evolução diferencial (ED) para determinar o número máximo de PMUs requeridos que garantam o número mínimo de barramentos sem monitoramento. Também, usou-se nesse trabalho, a técnica de DVS para detectar, caso existam, pontos do sistema não observáveis pelos medidores inseridos na rede. Em [19], os mesmos autores apresentaram um método para localização de medidores usando algoritmo de busca otimizado (SOA, *seeker optimization algorithm*) determinado pela minimização da soma dos máximos erros relativos de EEH nos diferentes barramentos obtidos pelo MMQ. Pelo procedimento adotado, os erros de tensão harmônica são mais valorizados no processo de alocação para os harmônicos de menor ordem.

Em [20] foi feita uma investigação com princípios similares ao apresentado em [7]. O princípio estabelecido foi fundamentado no fato que, se a tensão de um barramento e as correntes dos ramos que sai dele são observáveis, as tensões das demais barras são igualmente observáveis. Dessa forma, os autores propuseram uma metodologia para solucionar o problema de alocação através da busca da maximização de redundância das medidas baseada em um



algoritmo evolutivo multiobjetivo com tabelas (*MEAT, multiobjective evolutionary algorithm with tables*).

De acordo com [7], [16], [18], [19] e [20], o processo de alocação dos medidores é feito a partir da premissa que um equipamento de monitoração é capaz de medir as correntes de todos os ramos adjacentes ao barramento no qual ele esteja conectado. Contudo, essa condição não é realista, uma vez que os medidores comerciais possuem um número limitado de canais de medição. Diante disso, em [21] pode ser identificada uma contribuição aos trabalhos supracitados através da restrição do número de registros por medidor. Ainda, como o número de possibilidades de alocação é muito grande, nesse trabalho considerou-se desvantajosa a utilização do algoritmo BB que apresenta múltiplas soluções e, por isso, empregou-se o AG.

Em se tratando de sistemas radiais, em [22] foi feito um estudo de alocação para sistemas de distribuição, os quais são caracterizados por serem predominantemente radiais. Para a determinação dos pontos de medição, foi utilizado recursos associados com AG e aplicada a técnica DVS para verificação da existência de pontos não observáveis no sistema. Este foi o mesmo procedimento adotado em [18].

O trabalho [23] foi centrado num método bastante simples de alocação de medidores para sistemas radiais de distribuição. O procedimento consistiu na conexão dos PMUs no início do alimentador e na penúltima barra do ramo principal. Adicionalmente, também são adicionados PMUs nas barras em que a corrente passante encontra uma bifurcação para seu caminho, ou seja, barras em que existem ramos adjacentes conectados.

Visando o aspecto de sensibilidade às distorções harmônicas, em [24] foi apresentada uma metodologia para a indicação das regiões onde, necessariamente, deveriam ser instalados medidores.

Sintetizando, a Tabela I mostra os principais trabalhos atrelados com o tema da alocação ótima de medidores, para fins da determinação dos níveis de distorções harmônicas presentes numa rede elétrica.

Tabela I - Síntese das publicações atinentes à alocação de medidores

<b>Autor</b>	<b>Ano</b>	<b>Estratégia adotada / Algoritmo</b>
Farach, Grady e Arapostathis	1993	Técnica sequencial, critério da mínima variância / MMQ
Hong e Chen	1999	Clusterização / Lógica nebulosa e RNA
Marin, <i>et. al.</i>	2003	Observabilidade analisando a topologia da rede / AG
Yu e Watson	2004	Observação da influência da conexão dos transformadores / DVS
Madtharad, <i>et. al.</i>	2005	Técnica de eliminação sequencial / DVS
Kumar, Das e Sharma	2005	Traço da matriz de covariância / AG
Eldery, <i>et. al.</i>	2006	Observabilidade analisando a topologia da rede / BB
Reis	2007	Observabilidade analisando a topologia da rede / BB
Liao	2007	Técnica de eliminação sequencial e observabilidade / <i>Sparsity maximization</i>
Dehkordi, Fesharaki e Kiyomarsi	2009	Problema de otimização / AG, MMQ
Rad, Mokhtari e Karimi	2012	Traço da matriz de covariância, técnica sequencial e observabilidade / MMQ
Ketabi, Sheibani e Nosratabadi	2012	Problema de otimização / ED
Ketabi, Sheibani e Nosratabadi	2012	Problema de otimização / SOA
Almeida e Kagan	2013	Observabilidade analisando a topologia da rede / AG
Branco, <i>et. al.</i>	2015	Problema de otimização / MEAT
Melo	2015	Técnica sequencial / MMQP
Breda, Vieira e Oleskovicz	2016	Problema de otimização / DVS, AG
Santos, <i>et. al.</i>	2016	Deteção de barramentos mais sensíveis

### 1.2.2 Estimação de Estado das Distorções Harmônicas

Inicialmente, cabe ressaltar que a referência [25] foi a precursora nos estudos de estimação de estado aplicados à sistemas elétricos de potência. Esse trabalho foi dividido em três partes: a primeira e a segunda caracterizadas pela modelagem e algoritmos gerais para estimação de estado, e uma terceira, dedicada às discussões relacionadas com problemas associados à implementação, a exemplo dos custos computacionais vinculados com os processamentos e armazenamentos.

Focando especificamente as questões associadas com EEH, em [26] e [27] reconhece-se os trabalhos pioneiros. Nesses foi proposto o uso do MMQ para a localização de fontes harmônicas. O procedimento adotado foi embasado no fluxo harmônico reverso, isto é, o estimador, a partir das tensões harmônicas de barramentos, deveria calcular as distintas injeções de correntes harmônicas nos pontos supostamente atribuídos à produção dos fenômenos em

pauta. Todavia, a constatação final foi que o espectro das correntes harmônicas injetadas se mostrou impreciso, principalmente quanto às maiores ordens.

O trabalho [28] contemplou o emprego do filtro de Kalman como alternativa para obter a EEH em medições com imprecisões. Os resultados desse artigo, para o sistema teste do IEEE de 14 barras, provaram que esta técnica pode ser empregada para sistemas cujas medidas apresentam desvio padrão em relação ao valor real entre 1 e 10%. Contudo, em [29] foram demonstradas fragilidades no filtro de Kalman, como a forte dependência da informação a priori do processo e do ruído da medição que é desconhecido ou é aproximado em situações práticas, e, como alternativa, propôs-se uma adaptação nesse baseada na análise de correlação.

Seguindo a mesma linha de pesquisa de [28] e [29], em [30] foi proposta uma adaptação do filtro de Kalman para EEH para sistemas dinâmicos, a qual se mostrou eficaz aos propósitos traçados. Os mesmos autores, em [31], utilizaram uma abordagem estatística obtida da simulação de Monte Carlo para investigar o impacto de medições com imprecisões e erros grosseiros de estimação. Os resultados indicaram que há maiores preocupações em sistemas subdeterminados, nos quais os erros são maximizados.

A técnica de RNA foi aplicada em [32] para a EEH. A abordagem apresentada nesse artigo sugeriu que uma rede neural pode ser treinada para determinar o comportamento das fontes harmônicas presentes no sistema elétrico de potência de forma eficaz.

A referência [33] explorou o emprego de um algoritmo de EEH, levando-se em consideração as distorções na forma de onda da tensão e da corrente. O estimador oferece uma resposta na forma de uma parte real e outra imaginária. A função de Lagrangian é usada para a otimização da solução do problema e o resultado é obtido via fatoração de Cholesky.

Considerando que alguns barramentos não possuem fontes harmônicas, em [34] foi empregada uma metodologia, baseada no MMQ, que conseguiu realizar a EEH em sistemas indeterminados. Nesse trabalho, o esforço computacional é minimizado por um procedimento de redução do número de variáveis desconhecidas, sendo essas restritas a tensão de barramentos suspeitos e separadas, também, em parte real e imaginária.

Em [35] foi criado um *software* usando Borland Delphi. Este se apresentou como uma ferramenta de programação visual para a metodologia de [34], introduzindo uma interface gráfica e um banco de dados, além de ferramentas de engenharia para a monitoração e controle das distorções harmônicas em sistemas elétricos de potência.

Na continuidade de [34], em [36] foi proposto o uso da EEH para estimar as admitâncias equivalentes das cargas do sistema, além das fontes de harmônicos propriamente ditas. Segundo

o artigo, as barras de cargas, suspeitas de possuírem fontes harmônicas, podem ser classificadas em absorvedoras ou supridoras de harmônicos. Aquelas que recebem as correntes harmônicas foram representadas por uma fonte de corrente com o sinal oposto ao do fluxo convencional (que é o da geração).

Em [37] foi apresentado um algoritmo de EEH para a identificação das fontes harmônicas baseado no método de DVS, de sistemas parcialmente observáveis, a partir do conhecimento dos resultados de medições de tensão dos barramentos, correntes de injeção e correntes dos ramos. Além disso, o artigo apontou para o fato que os medidores podem ser movidos da alta para a média tensão, sem comprometer os resultados, desde que não houvesse geração de harmônicos no sistema de alta tensão.

Na mesma linha, em [38] mostrou que, embora a DVS exija um maior esforço computacional e capacidade de memória, o seu uso se faz vantajoso devido a alta confiabilidade e ao fato de garantir não só a solução do problema, como também a identificação de pontos não observáveis na rede.

Em [39], por meio de um Sistema de Posicionamento Global (GPS, *Global Positioning System*) verificou-se a aplicação do EEH em tempo real para o sistema japonês Hokuriku Electric Power Company (HEPCO), sendo desenvolvido um indicador resultante de uma distribuição gaussiana capaz de detectar as medições ruins e excluí-las sistematicamente. Os resultados de estimação obtidos foram validados com medições reais.

Na mesma linha que [32], em [40] foi apresentado um método de EEH usando RNA. O procedimento de treinamento foi feito por medições harmônicas realizadas por um período de tempo (saída das RNA) associadas com resultados de fluxo de carga (entradas). Pela metodologia adotada nesse artigo as redes treinadas são capazes de estabelecer uma relação entre o fluxo de carga da fundamental e o fluxo harmônico. Cabe ressaltar que, embora seja elucidado no artigo a importância da localização dos medidores, não é feito nenhum procedimento a esse respeito.

A referência [13], já mencionada quando das considerações sobre as questões da alocação, também se apresenta consonante com a EEH empregando a maximização de esparsidade. A metodologia proposta foi capaz de identificar, por meio do conhecimento das tensões, correntes nos ramos e injetadas para alguns barramentos, fontes harmônicas na presença de ruídos de medição, desvios do modelo padrão e pequenas injeções de corrente. Além disso, o seu uso também pode ser estendido para estimação de sistemas indeterminados.

Em [41] foi considerado um método para a estimativa de fontes harmônicas por meio de uma abordagem *bayesiana*. O algoritmo desenvolvido fornece as informações das possíveis localizações de fontes harmônicas, bem como sobre o grau de confiabilidade dessas. Embora os resultados demonstraram a eficácia em encontrar as cargas geradoras de harmônicas, os autores ressaltaram que a metodologia não pode ser empregada para compartilhamento de responsabilidade harmônica, devido as imprecisões nas pseudomedidas.

O trabalho [42] foi centrado numa análise de sensibilidade para avaliar o grau de dominância de uma fonte harmônica específica de um determinado barramento nos resultados do fluxo harmônico do sistema como um todo, avaliando o efeito da mudança de potência de cada uma das fontes. Nesse, a EEH foi alcançada utilizando-se das leis de Kirchhoff para determinar os valores nos barramentos desconhecidos.

O artigo [43] contemplou uma metodologia baseada em algoritmos evolutivos (com utilização de estratégias evolutivas), visando a busca da estimação das correntes harmônicas injetadas e, por conseguinte, das correspondentes tensões de cada barramento. O processo almejou, sobretudo, a minimização do erro quadrático das tensões nas barras que continham medidores.

Apoiado em [19] foram também realizados trabalhos voltados para a EEH através do algoritmo SOA. O procedimento adotado consistiu em minimizar o somatório do erro relativo de tensões harmônicas complexas estimadas (avaliando-se a soma dos erros relativos da parte real e da parte imaginária da tensão harmônica). Os resultados desse artigo mostraram que desempenhos dos estimadores usando SOA foram melhores do que aqueles que empregaram AG.

Avançando no tema, em [44] foi feita a proposição de uma metodologia que emprega apenas dois medidores, sendo um alocado na subestação e outro no final do alimentador ou em alguma ramificação da rede. Para determinar a localização das fontes harmônicas foi implementado um algoritmo com otimização por enxame de partículas (PSO).

Com uma abordagem semelhante ao trabalho [43], em [14] os estudos de EEH foram conduzidos através do método dos mínimos quadrados. Nesse trabalho, foi considerado que as medidas de tensões harmônicas e correntes de ramos de alguns barramentos eram conhecidas e que as demais eram estimadas.

Em [45], avaliou-se a metodologia de [14] para um sistema maior e realizada uma análise de sensibilidade do impacto do acréscimo de medidores a partir do número mínimo ótimo de medidores sobre a precisão dos resultados de estimação.

Um estudo da aplicação dos EEH para sistemas radiais de distribuição com geração distribuída foi publicado em [46]. Em consonância com esta pesquisa, os fasores de tensões dos barramentos são definidos como sendo as variáveis de estado do problema, as quais são determinadas via MMQ.

Em [47] foi empregado um procedimento para a EEH baseado no MMQ, o qual considera as incertezas dos parâmetros da rede. Para tanto, foi proposto um ajuste nos pesos usados no método de otimização, levando-se em consideração as variações das medições (tensão e corrente) e dos parâmetros da rede (essencialmente, resistência das linhas de transmissão).

A referência [48] sugeriu que eventuais erros nas medições poderiam diminuir a confiabilidade dos EEH convencionais. Nesse trabalho foram implementadas as técnicas de localização de fontes harmônicas propostas por [26] e [42] e feito um estudo de caso para o sistema do IEEE de 14 barras, no qual se inseriu duas fontes harmônicas em barramentos distintos e considerou erros de medições de 1% (para mais ou para menos). As conclusões desse estudo de caso indicaram que tanto usado o método de [26] e [42], os resultados estimados indicaram a existência de fontes harmônicas em mais dois barramentos, os quais continham apenas cargas lineares. Embora tais inconsistências, o artigo apontou que a análise da distorção total de corrente foi consideravelmente pequena nas regiões onde há fontes harmônicas (bem abaixo de 15%, valor limite para de acordo com a norma IEEE 519).

Em [49] foi desenvolvida uma estratégia para EEH baseada no algoritmo evolutivo (com o uso de estratégias evolutivas), tal como em [43]. Todavia, há diferenças entre os procedimentos. No primeiro, além das tensões dos barramentos, a metodologia considera conhecidas as informações de corrente de penetração harmônica nos barramentos monitorados.

Baseado em PMUs, o trabalho já mencionado para fins de alocação e identificado por [23] focou uma metodologia capaz de estimar os componentes harmônicos em sistemas de distribuição com topologia radial. Para tanto, considerou-se conhecidas as tensões nodais e as correntes nas linhas com distorções harmônicas e estimou-se as correntes passantes em todas as linhas. Além disso, foram considerados dados históricos de demanda de potência ativa e reativa, os quais restringiram as soluções do problema de otimização.

Ainda visando a aplicação da EEH para sistemas de distribuição radiais, em [22], assim como em [11], [18], [37] e [38], foi utilizada a técnica de DVS para estimar as tensões harmônicas em barramentos sem medição.

A referência [50] propôs uma metodologia no domínio do tempo para a EEH em condições de desequilíbrio do sistema. Foi empregada a propriedade de simetria de meia onda nas formas de onda de tensão e corrente, para reduzi-las de um para meio ciclo, diminuindo assim o esforço computacional despendido durante o processo de estimação.

O trabalho [51] propôs uma abordagem baseada em lógica nebulosa, a qual foi incorporada no processo de alocação dos medidores, para a localização de fontes harmônicas (extraindo a parte não-linear das cargas) em sistemas de distribuição. De acordo com os estudos de casos realizados, tal procedimento melhorou a precisão dos resultados de EEH, contudo, o número de medidores exigidos no processo de estimação foi maior.

Em [52] foi apresentada uma metodologia de EEH em sistemas de transmissão baseando-se na álgebra matricial e na otimização via algoritmo genético. O algoritmo proposto, com base nos dados de entrada de topologia do sistema e de medições parciais de tensões e correntes harmônicas, faz uma análise de sensibilidade para determinar se os resultados estão dentro da margem de valores aceitáveis em termos de identificação da matriz global de admitância.

Resumindo, o grande conjunto de investigações contempladas nos trabalhos ora citados se apresentam agrupados na Tabela II.

Tabela II - Síntese das publicações atinentes à EEH

<b>Autor</b>	<b>Ano</b>	<b>Estimação / Algoritmo</b>
Heydt	1989	Localização de fontes harmônicas / MMQ
Hartana e Richards	1990	Localização de fontes harmônicas / RNA
Najjar e Heydt	1991	Localização de fontes harmônicas / MMQ
Beides e Heydt	1991	Tratamento de erros de medição / Filtro de Kalman
Meliopoulos, Zhang e Zelingher	1994	Modelagem de sistemas assimétricos / Função de Lagrangian e fatoração de Cholesky
Du, Arrillaga e Watson	1996	EEH excluindo indeterminações / MMQ
Du, Arrilaga e Chen	1998	Interface gráfica para EEH / Borland Delphi
Liu	1998	Tratamento de erros de medição / Filtro de Kalman adaptado pelo autor
Du, <i>et. al.</i>	1999	Localização de fontes harmônicas e estimação da admitância equivalente / MMQ
Matair	2000	EEH em sistemas completamente e parcialmente observáveis / DVS
Yu e Watson	2004	EEH em sistemas parcialmente observados, com detecção de pontos não estimados / DVS
Yu, Watson e Arrillaga	2005	Tratamento de erros de medição / Filtro de Kalman adaptado pela autor
Yu, Watson e Arillaga	2005	Análise estatística dos erros de EEH / Simulação de Monte Carlo

Madtharad, <i>et. al.</i>	2005	EEH em sistemas completamente e parcialmente observáveis / DVS
Kanao, Yamashita e Yanagida	2005	Investigação da aplicação em campo dos estimadores de estado harmônico / MMQ
Negnevitsky e Ringrose	2005	Relação entre fluxo de carga e fluxo harmônico / RNA
Liao	2007	EEH em sistemas completamente e parcialmente observáveis / Maximização de esparsidade
Antona, Muscas, Sulis	2009	EEH por meio de uma abordagem <i>bayesiana</i> / Simulação de Monte Carlo
Nguyen, Yang e Choi	2010	Investigação da contribuição de fontes harmônicas / Expressões algébricas desenvolvidas pelos autores
Arruda, Kagan e Ribeiro	2010	EEH via algoritmo de otimização / Estratégia evolutiva
Ketabi, Sheibani e Nosratabadi	2012	EEH via algoritmo de otimização / SOA
Rad, Mokhtari e Karimi	2012	EEH em sistemas completamente observáveis / MMQ
Ferreira, Sarmiento e Reineri	2013	Localização de fontes harmônicas / MMQ
Rakpenthai, <i>et. al.</i>	2013	EEH considerando incertezas dos parâmetros da rede / MMQ
Armenta, Romero e García	2015	Investigação dos erros de medição / MMQ
Sepulchro, Encarnação e Brunoro	2015	EEH via algoritmo de otimização / Estratégia evolutiva
Melo	2015	EEH em sistemas completamente observáveis / MMQ
Breda, Vieira e Oleskovicz	2016	EEH em sistemas completamente e parcialmente observáveis / DVS
Molina-Moreno, Medina e Cisneros-Magaña	2017	EEH no domínio do tempo / Princípio da simetria de meia onda
Moradifar, Foroud e Firouzjah	2017	EEH, localização de fontes harmônicas / Lógica nebulosa
Bečirović, Pavić e Filipović-Grčić	2017	Análise de sensibilidade do método de EEH / AG, Redução de Kron

### 1.3 CONTRIBUIÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO

Dentro do contexto de pesquisas caracterizado nas seções precedentes, fica, pois, evidenciado que a presente dissertação de mestrado se encontra direcionada a investigações voltadas para a questão da alocação dos medidores de harmônicos e estimação das distorções harmônicas, tendo por meta a otimização do cumprimento das determinações estabelecidas pelos agentes reguladores nacionais.

O grande desafio ora posto se apresenta aplicável à sistemas subdeterminados para os quais os métodos convencionais baseados no MMQ mostra fragilidades e sua aplicação é, por conseguinte, questionável aos propósitos da determinação das distorções harmônicas em redes elétricas comerciais.



Inserido nesta linha de trabalhos, esta dissertação está focada na:

- Apresentação dos fundamentos de quatro algoritmos evolutivos já existentes, os quais serão empregados em procedimentos para a EEH em sistemas subdeterminados;
- Estabelecer um algoritmo híbrido para os fins supra postos;
- Avaliar o desempenho dos mesmos através de estudos de casos.

## **1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Além do presente capítulo introdutório, esta dissertação encontra-se sistematizada como segue:

### **CAPÍTULO II – Métodos de Estimação e Otimização**

Nesta seção é feita a descrição dos métodos de estimação baseados nos mínimos quadrados e dos métodos de otimização randômica, aplicáveis aos problemas de alocação de medidores de qualidade da energia elétrica e nos procedimentos de estimação das distorções harmônicas.

### **CAPÍTULO III – Estratégia para a Estimação das Distorções Harmônicas**

Esta etapa está centrada na modelagem computacional de sistemas elétricos para os objetivos estabelecidos, elaboração e validação de um software de análise para a realização de estudos de fluxo harmônico e apresentação das estratégias para alocação de medidores e estimação das distorções harmônicas.

### **CAPÍTULO IV – Implementação Computacional dos Algoritmos de Estimação e Otimização**

Este capítulo encontra-se focado no desenvolvimento do aplicativo computacional destinado a correlacionar o sistema elétrico, os métodos de estimação e otimização e, por fim, a realização de estudos de desempenho para avaliação da eficácia dos algoritmos utilizados.

### **CAPÍTULO V – Conclusões.**

Por fim, as principais constatações e contribuições realizadas por esta dissertação são sumarizadas, discutidas e apontados os horizontes para novos desenvolvimentos na área.

### **Referências Bibliográficas.**

Neste particular, são destacadas as referências que contribuíram, essencialmente, para a elaboração desta dissertação.

# MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO E OTIMIZAÇÃO

## 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Dentro do vasto campo da Engenharia Elétrica, as questões associadas com os denominados Sistemas de Energia se apresentam com expressivos e reconhecidos desenvolvimentos. Neste grande cenário emerge temas como o aqui tratado, qual seja, a utilização de processos de estimação e otimização associando as mais distintas técnicas e recursos disponibilizados para a solução de problemas de operação dos sistemas, a exemplo daqueles atrelados com a monitoração, otimização da operação, determinação de indicadores de desempenho, etc. [53, 54].

Inserido no universo de desafios presentes, a busca por meios que primem pela redução de custos materiais e humanos, obtenção de grandezas representativas das condições operacionais de forma otimizada, dentre outros quesitos, são elementos motivadores para trabalhos de estimação e otimização, como o aqui focado.

No que tange aos métodos de estimação mais difundidos na literatura atinente destaca-se o MMQ, o qual, como já referido, é caracterizado pelo seu baixo tempo de resposta e fácil implementação, muito embora sua restrição a sistemas observáveis.

Por outro lado, os métodos de otimização são caracterizados pela busca da minimização de uma função ou mais variáveis em um determinado domínio [55] quando não há uma representação matemática satisfatória ou a mesma resulta em sistema indeterminado. Também, sua aplicabilidade se apresente com grande relevância para a solução de problemas de alta complexidade, nos quais o cálculo analítico não pode ser aplicado ou apresenta um custo inviável [56].

De acordo com o algoritmo de solução, esses métodos podem ser classificados como:

- **Determinísticos:** nestes, os algoritmos empregados são caracterizados por gerar uma sequência determinística de soluções, as quais, obedecendo alguns teoremas, garantem a solução ótima, que pode não ser necessariamente a resposta ótima global [55]. Este é, por

exemplo, o caso do algoritmo de programação inteira *branch-and-bound* usado para a alocação de medidores na rede;

- Métodos probabilísticos: para estes, os algoritmos introduzem no processo de otimização dados e parâmetros estocásticos e se caracterizam por não necessitar de formulações complexas, sendo que a função objetivo não precisa necessariamente ter uma representação matemática. Cabe ressaltar que esses métodos se apresentam com forte tendência aplicativa nos últimos anos, principalmente devido aos avanços dos recursos computacionais.

No âmbito da qualidade da energia elétrica, diversas pesquisas tem sugerido o emprego desses métodos para solucionar distintos tipos de problema [57, 58], dentre os quais pode-se incluir a EEH, foco dessa dissertação de mestrado.

## 2.2 MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS (MMQ)

De uma forma geral, em ciências experimentais, observacionais ou medições, os dados coletados estão sujeitos a erros aleatórios e incontrolláveis. Adicionalmente, muitas das vezes são desejáveis obter estimativas a partir desses. Para solucionar esse tipo de problema o MMQ é um dos mais populares, sendo que uma das suas propriedades mais importantes é o critério da mínima variância, o qual, basicamente, consiste em estimar os resultados com a menor variância possível [59].

A modelagem matemática para um problema de estimação com um vetor de medidas  $\mathbf{Z}$  e outro de variáveis de estado  $\mathbf{X}$  (a serem estimadas), relacionados por meio de uma matriz  $\mathbf{H}$ , é dado por (2.1) [45]. Cada medição, contém ainda um erro  $\varepsilon$ , que geralmente é representado por uma distribuição gaussiana (normal) com média  $\mu$  e sua variância  $\sigma^2$  [23].

$$\mathbf{Z} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (2.1)$$

A representação matricial, exemplificada em (2.2), é uma das formas mais indicadas para se modelar problemas de MMQ [59].

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1m} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n1} & h_{n2} & \cdots & h_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_m \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Sendo:

$n$  o número de medições;

$m$  o número de variáveis de estado;

$z_i$  cada elemento  $i$  do vetor  $z$ ;

$h_{ij}$  cada elemento  $ij$  da matriz  $H$ ;

$x_i$  cada elemento  $i$  do vetor  $x$ .

Nessa formulação matricial, comumente é adicionada uma matriz de simétrica  $V_x$ , a qual é composta na sua diagonal principal pela variância  $\sigma^2$  associada com cada medida e os demais elementos com as covariâncias  $cov(z_i, z_j)$ , que reflete o grau de interdependência entre os dados de medição, conforme (2.3) [59].

$$V_z = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & cov(z_1, z_2) & \cdots & cov(z_1, z_n) \\ cov(z_1, z_2) & \sigma_2^2 & \cdots & cov(z_2, z_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ cov(z_1, z_n) & cov(z_2, z_n) & \cdots & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Assim sendo, na solução do MMQ, objetiva-se minimizar  $Q(x)$ , expressa em (2.4) [59].

$$Q(x) = (Z - HX)^T V^{-1} (Z - HX) \quad (2.4)$$

Derivando  $Q(x)$  em relação a cada um dos seus parâmetros e igualando a zero, obtém-se o valor estimado de  $x$ , que é dado por (2.5) [59].

$$X = (H^T V^{-1} H)^{-1} H^T V^{-1} Z \quad (2.5)$$

Quando não há covariância entre os dados (variáveis são independentes), a equação de (2.5) é expressa conforme (2.6). Nesse caso, a matriz inversa de  $V$  é uma matriz diagonal, com pesos inversamente às respectivas variâncias, sendo conhecida como matriz de pesos  $W$ . Vale ressaltar que medidas feitas com um mesmo equipamento (mesmo  $\sigma$ ), a incerteza desse afetará todos os dados igualmente [45].

$$X = (H^T W H)^{-1} H^T W Z, \quad (2.6)$$

$$\mathbf{W} = \mathbf{V}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_1^2} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_2^2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{1}{\sigma_n^2} \end{bmatrix}$$

Usualmente, o método de estimação da forma expressa em (2.6), a qual incorpora a matriz de pesos e, por sua vez, “penaliza” os valores de  $\mathbf{Z}$  sujeito a alta variância, é conhecido como método dos mínimos quadrados ponderados (MMQP) [23]. Vale ressaltar que esses métodos (MMQ ou MMQP) são restritos a solução de problemas cujas equações constituí um sistema observável. Em outras palavras, o número de medições  $m$  deve ser maior ou igual ao número de variáveis de estado  $n$  [60].

Nesse particular, no caso de  $m$  ser maior do que  $n$ , poderá existir um vetor  $\mathbf{X}$  que não ajustará perfeitamente ao vetor  $\mathbf{Z}$ . Como alternativa, apresenta-se na literatura o método de decomposição em valores singulares, o qual detecta singularidades na matriz  $\mathbf{H}$  e provém uma solução particular e um vetor nulo para cada singularidade. Assim sendo, em sistemas subdeterminados existirão variáveis não estimadas [60].

## 2.3 ALGORITMOS DE COMPUTAÇÃO EVOLUCIONÁRIA

Os algoritmos de computação evolucionária ou, simplesmente, algoritmos evolutivos, pertencem aos métodos probabilísticos de otimização e serão abordados nesse capítulo de uma maneira mais detalhada, visto sua direta aplicação aos objetivos dessa dissertação.

Sintetizando, os algoritmos evolutivos baseiam-se numa dada população inicial, constituída por indivíduos aleatórios, num espaço D-dimensional, que representam o conjunto de soluções iniciais e contém um fator de qualidade determinado por uma função objetivo (*fitness*). A partir de uma sequência de operações iterativas, caracterizando assim, o processo evolutivo, pode ser atingido a solução ótima do problema.

### 2.3.1 Algoritmo Genético

O AG foi criado por John Holland em 1960 e, posteriormente, aprimorado por seus alunos e colegas da Universidade de Michigan entre a década de 1960 e 1970. Em 1975, no

livro “*Adaptation in Natural and Artificial Systems*” o algoritmo foi publicado pela primeira vez como uma inspiração de fenômenos naturais de adaptação dos indivíduos [61].

Na natureza, o processo de seleção natural consiste em selecionar os indivíduos que apresentem os melhores genes e, por sua vez, estão mais adaptados a determinada condição ambiental, eliminando assim os que estiverem em desvantagem. Para tanto, tais indivíduos sofrem um processo de recombinação, no qual os descendentes herdam os genes dos pais e outro, mais raro, de mutação, no qual um ou mais genes são alterados aleatoriamente [62]. Por analogia, esses processos de seleção, recombinação e mutação constituem o algoritmo de AG.

No AG, os indivíduos representam as possíveis soluções para o problema de otimização. Na maioria das aplicações com esse algoritmo, eles são representados por um cromossomo composto de genes (cadeia binária) e possui um fator de qualidade atribuído pela função objetivo. Essa função é que determina o processo de otimização e, por isso, deve ser escalonada de modo a manter os níveis apropriados de competição e prevenir a convergência prematura devido à presença de superindivíduos que possam dominar o processo de seleção. Ao conjunto de indivíduos dá-se o nome de população [58].

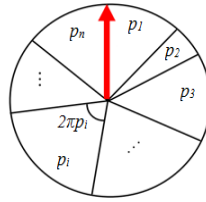
Os três operadores típicos que caracterizam o processo evolutivo do AG são detalhados a seguir [58, 62, 63].

#### a) Seleção

Esse operador faz uma ou mais cópias de alguns indivíduos que possuem uma alta nota da função objetivo. Portanto, os indivíduos que possuem “boas notas” terão mais chances de serem preservados e passarem para as próximas gerações. Existem diversos processos de seleção, sendo mais populares de roleta e torneio.

No método de seleção por roleta, determina-se, para cada indivíduo, em conformidade com o seu valor da função objetivo  $f_i$ , a probabilidade  $p_i$  de o indivíduo ser selecionado e o tamanho da população  $tampop$ , conforme (2.7). Na sequência, são gerados números randômicos entre 0 e 1, os quais são comparados, durante o processo de “rotação da roleta”, com a probabilidade acumulada e, no caso de essa ser menor, o indivíduo correspondente é selecionado.

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^{tampop} f_i} \quad (2.7)$$

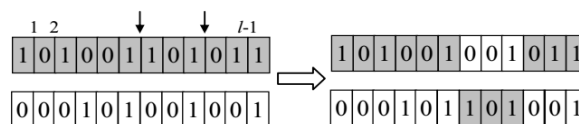


**Figura 1 - Seleção por roleta [63]**

Por outro lado, a seleção por torneio consiste na competição entre três ou mais cromossomos escolhidos aleatoriamente, sendo, que dentre esses, os dois que obtiverem as maiores notas serão selecionados.

### **b) Recombinação**

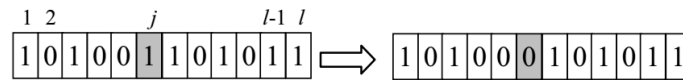
Esse operador, também conhecido como operador de cruzamento, seleciona dois indivíduos de uma dada geração e trocam informações (genes) entre eles. Em se tratando de números binários, é feito o corte dos cromossomos e, por conseguinte, a troca dos genes (*bits*) correspondentes, conforme a Figura 2. Por outro lado, em adaptações para números reais, é feito a média aritmética entre esses ou, em alguns casos, a média ponderada. Note que o operador de recombinação faz com que os indivíduos descendentes tenham uma alta probabilidade de apresentar um desempenho melhor do que seus pais e também ampliam o espaço de busca [63].



**Figura 2 - Crossover de cromossomos binários [63]**

### **c) Mutação**

O operador de recombinação, explicado anteriormente, pode não ser suficiente para se criar uma nova solução. Nesse contexto, se insere o operador de mutação, o qual consiste em alterar aleatoriamente um determinado indivíduo, o qual passará a ser chamado de indivíduo mutante. No caso de números binários, o processo de mutação é bastante simples e, normalmente, consiste em trocar um ou mais *bits* (genes do cromossomo), conforme a Figura 3. Por sua vez, em adaptações para número reais, uma das técnicas mais usadas consiste em gerar um novo indivíduo aleatoriamente [63].



**Figura 3 - Mutação de cromossomo binário [63]**

Os processos de recombinação e mutação são regidos por meio de parâmetros de probabilidade de recombinação  $pc$  (*crossover probability*) e mutação  $pm$  (*mutation probability*). Em suma, são gerados números randômicos atribuídos a cada indivíduo, os quais são comparados com esses parâmetros e, no caso de serem menores, gera-se um novo por meio dos operadores correspondentes, caso contrário, ele é conservado. Outro parâmetro a ser definido é o tamanho da população.

Esses três processos caracterizam uma geração do AG e se repetem até que se alcance um critério de parada desejado, como exemplo, alcance do erro mínimo, estagnação do valor ótimo ou número máximo de iterações. Alguns programadores introduzem nesse processo o elitismo, garantindo a conservação do melhor indivíduo para a próxima geração.

### 2.3.2 Estratégias Evolutivas

Em se tratando de codificação com números reais de problemas mais complexos, o AG tradicional não apresenta bons resultados. Nesse cenário, destacam-se as estratégias evolutivas EE (*ES, Evolution Strategy*), desenvolvidas por Rechenberg e Schwefel da Universidade Técnica de Berlin, na década de 1960 [64]. Essa classe de algoritmo caracteriza-se pelo fato de não requerer nenhum conhecimento sobre a geometria do espaço de busca de soluções e, por conseguinte, não privilegiar nenhuma direção de busca [65].

A seguir, serão destacados dois algoritmos embasados em estratégias evolutivas, um primeiro usando uma formulação mais clássica e o outro uma mais moderna. Ambos foram implementados embasando-se nos algoritmos desenvolvidos por [66].

#### 2.3.2.1 Algoritmo com Estratégia Evolutiva Canônica

Na forma mais clássica, as estratégias evolutivas são caracterizadas por uma mutação autoadaptativa, com atualização do passo de mutação a cada iteração. Nesses algoritmos, cada indivíduo  $i$  da população é representado pelo valor da solução candidata  $x_i$  e um parâmetro adaptativo associado a esse  $\sigma_i$ . Esse parâmetro corresponde ao passo de mutação e permite que



um mesmo indivíduo seja avaliado duas vezes, uma em  $x_i$  e outra em  $\sigma_i$ , sendo conhecida a estratégia como do tipo  $(x, \sigma)$  [65].

Quanto aos operadores, a mutação, definida em (2.8), é predominante e fundamenta a geração de novos indivíduos, como na equação (2.9). Nesse contexto, se o parâmetro  $\sigma$  é muito pequeno, o desempenho da estratégia evolutiva será muito fraco. Por sua vez, se esse é muito grande, a efetividade no processo de mutação em encontrar soluções locais se torna rara e, por conseguinte, tem-se uma evolução ruim. Esse entendimento é melhor compreendido pela Figura 4 [67].

$$\sigma'_i = \sigma_i e^{\tau N(0,1) + \tau' N(0,1)} \quad (2.8)$$

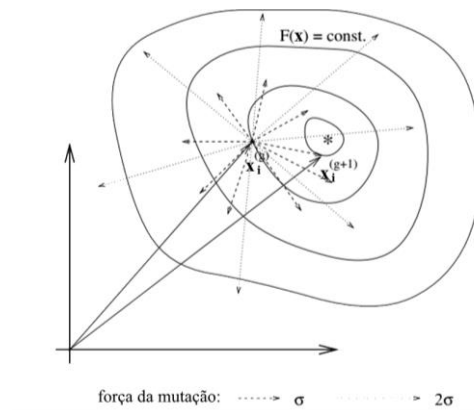
$$x'_i = x_i + \sigma_i N_i(0,1) \quad (2.9)$$

Onde:

$\tau$  e  $\tau'$  são iguais a  $\frac{1}{\sqrt{2n}}$  e  $\frac{1}{\sqrt{2\sqrt{n}}}$ , sendo  $n$  uma constante que deve ser adequada para cada problema;

$N(0,1)$  corresponde a um número randômico da curva gaussiana normalizada (média zero e desvio padrão um);

$N_i(0,1)$  indica que é diferente o número randômico para cada indivíduo.



**Figura 4 - Mutação no espaço de busca  $\mathbb{R}^2$  [67]**

Por sua vez, a recombinação é mais rara e, em geral, consiste na média aritmética entre dois ou mais pais (de  $x_i$  e  $\sigma_i$ ). Em particular, nesse trabalho, essa é feita entre todos os pais existentes, de modo que a geração de novos descendentes se dê a partir de único indivíduo (pai) resultante desse processo. Por fim, existem dois métodos de seleção  $(\mu, \lambda)$  e  $(\mu + \lambda)$ , o primeiro considera apenas os descendentes da população e o segundo seleciona os melhores indivíduos de pais e descendentes [43, 49, 68].

Em resumo, o processo para implementação da estratégia evolutiva com mutação gaussiana, segue as seguintes etapas [68]:

**a) Inicialização**

Gera-se a população inicial com os indivíduos  $(x_i, \sigma_i)$  e avalia de acordo com a função objetivo.

**b) Mutação e recombinação**

Cria os descendentes segundo (2.8) e (2.9) e, se desejado, faz-se a recombinação pela média aritmética entre dois ou mais pais.

**c) Seleção e verificação do critério de parada**

A seleção é feita optando-se pelo método  $(\mu, \lambda)$  ou  $(\mu + \lambda)$ , o critério de parada pode ser pelo número de gerações, erro mínimo, estagnação do erro, ou ainda, pelo passo de mutação.

### 2.3.2.2 Algoritmo com Estratégia Evolutiva Moderna

Uma extensão da forma canônica de estratégia evolutiva, consiste na incorporação de um operador de mutação, baseando-se na adaptação de uma matriz de covariância (CMA, *Covariance Matrix Adaptation*) e do tamanho de passo  $\sigma$  (CSA, *Cumulative Step Size Adaptation*) proposto no ano de 1996, por Hansen e Ostermier. Essa moderna estratégia é conhecida como sendo do tipo  $(x, \sigma, \theta)$  e tem por objetivo aumentar a probabilidade de novas gerações com o mesmo passo de mutação, prover um mecanismo de controle da taxa de mudança dos parâmetros da estratégia e manter os parâmetros ajustados sem alterações no caso de seleção aleatória [64, 69].

A matriz de covariância  $\mathbf{C}$  é uma matriz  $n \times n$ , em que  $n$  é o número de variáveis, a qual é inicializada como sendo uma matriz identidade  $\mathbf{I}$ . Essa matriz representa todos os resultados de variâncias e covariâncias da distribuição de mutação, sendo que para a primeira geração de descendentes essa não terá nenhum efeito [69].

Como foi indicado inicialmente, a tão conhecida CMA – ES, é fundamentada no processo adaptativo do passo de mutação  $\sigma$ , que é dividido em duas partes, numa primeira na qual a matriz de covariância é adaptada e numa segunda na qual, em geral, o passo de mutação é adaptado [69]. Para tanto, usam-se de dois vetores de parâmetros de evolução  $\mathbf{p}_c$  e  $\mathbf{p}_\sigma$ , o primeiro para a adaptação da matriz de covariância e o segundo para adaptação da dimensão do

passo global, respectivamente definidos em (2.10) e (2.11) [64]. Observa-se que, assim como no algoritmo de estratégia evolutiva canônica, foi feito neste trabalho a recombinação dos parâmetros envolvidos, conforme especificado anteriormente.

$$\mathbf{p}'_c = \left(1 - \frac{1}{\tau}\right) \mathbf{p}_c + \sqrt{\frac{\mu}{\tau} \left(2 - \frac{1}{\tau}\right)} * \frac{\mathbf{r}_{\Delta\sigma}}{\sigma} \quad (2.10)$$

$$\mathbf{p}'_\sigma = \left(1 - \frac{1}{\tau}\right) \mathbf{p}_\sigma + \sqrt{\frac{\mu}{\tau} \left(2 - \frac{1}{\tau}\right)} * \mathbf{r}_{std} \quad (2.11)$$

Sendo:

$\tau$  é igual a  $\frac{1}{\sqrt{n}}$ , sendo  $n$  o tamanho do vetor  $\mathbf{x}$ ;

$\mu$  é o número de pais;

$\mathbf{r}_{\Delta\sigma}$  é a recombinação (média aritmética) dos vetores de variações do sigma;

$\mathbf{r}_{std}$  é a recombinação (média aritmética) dos vetores de distribuição gaussiana normalizada;

De posse de  $\mathbf{p}_c$  atualizado, a matriz de covariância  $\mathbf{C}$  é adaptada, segundo (2.12) e (2.13), sendo a última equação usada em [66] para reforçar a simetria [64, 67].

$$\mathbf{C} = \left(1 - \frac{1}{\tau'}\right) \mathbf{C} + \frac{\mathbf{p}_c}{\tau'} * \mathbf{p}_c^T \quad (2.12)$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{C} + \mathbf{C}^T \quad (2.13)$$

Sendo:

$\tau$  é igual a  $n^2$ , sendo  $n$  o tamanho do vetor  $\mathbf{x}$ ;

$\mathbf{p}_c^T$  é igual a trasposta do vetor  $\mathbf{p}_c$ .

Também, com  $\mathbf{p}_\sigma$  atualizado, o passo de mutação  $\sigma$  é definido por (2.14) [66].

$$\sigma = \sigma * e^{\frac{\mathbf{p}_\sigma^T \mathbf{p}_\sigma - n}{2n\sqrt{n}}} \quad (2.14)$$

Enfim, o processo de criação dos novos descendentes parte de um único pai, sendo o mesmo inicializado aleatoriamente e depois obtido como o resultante do processo de recombinação de vários pais. Assim, cada filho é gerado de acordo com (2.15). O processo de

seleção consiste em selecionar os  $\mu$  melhores indivíduos, os quais, por conseguinte, tendem a possuir bons parâmetros de ajuste [64, 67].

$$\mathbf{x}'_i = \mathbf{x} + \sigma_i \sqrt{\mathbf{C}} N_i(0,1) \quad (2.15)$$

Onde:

$\sqrt{\mathbf{C}}$  é a raiz quadrada da matriz de covariância, equivalente à transposta da matriz resultante da decomposição de Cholesky da matriz de covariância  $\mathbf{C}$ .

### 2.3.3 Algoritmo de Evolução Diferencial

O ED foi proposto como uma nova classe de algoritmos evolutivos em 1997. Similar ao AG, as soluções candidatas, aqui também denominadas de indivíduos, sofrem, ao longo do processo evolutivo, mutação, recombinação e seleção, de forma que, em cada processo iterativo, a geração atual seja melhor do que a anterior. O processo de evolução diferencial é detalhado a seguir [58].

#### a. Mutação

Tendo em mente uma determinada geração  $G$ , para cada indivíduo da população ( $\mathbf{x}_{(i,G)}$ ), definido por um denominado vetor alvo (*target*), gera-se um vetor mutante por (2.16). A Figura 2 ilustra o esquema de mutação do ED.

$$\mathbf{v}_{i,G+1} = \mathbf{x}_{r1,G} + F \cdot (\mathbf{x}_{r2,G} - \mathbf{x}_{r3,G}) \quad (2.16)$$

Sendo:

- $\mathbf{v}_{i,G+1}$  é o elemento do vetor mutante;
- $r1, r2$  e  $r3$  representam as posições de distintos indivíduos;
- $F$  é o fator de mutação.

A constante real  $F$  é responsável por controlar a amplitude da diferença entre dois indivíduos. Geralmente, é usado um fator de mutação no intervalo de 0 a 2. Quanto maior for essa constante, maior o salto e mais rápido o algoritmo chega ao ótimo global, porém, as chances de não detectar um vale ou um pico na função objetivo são aumentadas. Por outro lado, um fator de mutação muito pequeno faz com que o algoritmo tenha um tempo maior de convergência e consiga refinar bem o espaço de busca próximo. Contudo, isso pode ocasionar a estagnação do indivíduo em um ótimo local.

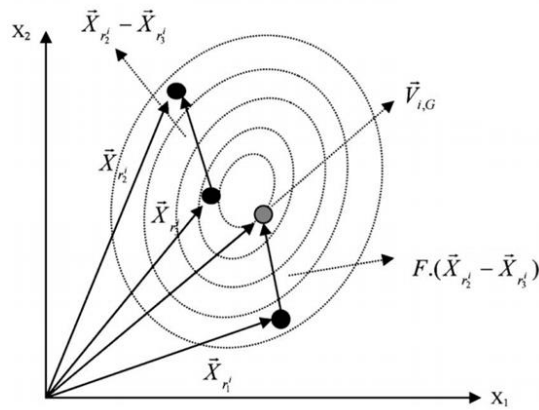


Figura 5 – Esquema de mutação do ED [70]

### b. Recombinação

Com a finalidade de aumentar a diversidade dos valores dos vetores, o procedimento de recombinação é realizado e gera-se um novo vetor chamado teste (*trial*), o qual é formado segundo (2.17).

$$u_{i,G+1} = \begin{cases} v_{ji,G+1} & \text{se } rand(j) \leq PC \\ x_{ji,G} & \text{se } rand(j) > PC \end{cases} \quad (2.17)$$

Onde:

- $u_{i,G+1}$  é o vetor teste;
- $v_{ji,G+1}$  é o elemento  $j$  do vetor mutante;
- $x_{ji,G}$  é o elemento  $j$  do vetor alvo;
- $rand(j)$  é um número aleatório entre 0,0 e 1,0;
- $PC$  é a probabilidade de recombinação.

A probabilidade de recombinação é geralmente escolhida em um intervalo entre 0,0 e 1,0. Deve ser selecionada uma alta taxa para aumentar a diversidade da população e, assim, obter melhores resultados. A Figura 6 representa o processo de recombinação aqui referido.

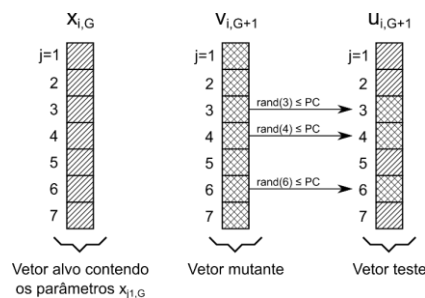


Figura 6 - Ilustração do processo de recombinação [58]

### c. Seleção

A operação de seleção determina o melhor indivíduo entre os vetores alvo e teste para compor a nova população da geração  $G+1$  de acordo com o valor da função objetivo.

O algoritmo descrito acima refere-se à formulação clássica do ED. Entretanto, desde sua primeira publicação, diversos trabalhos têm discutido sobre o ganho com possíveis aprimoramento no mesmo. Nesta dissertação serão sintetizadas as variações do ED sugeridas por [71] e [72], as quais foram implementadas nesse trabalho.

#### 2.3.3.1 Algoritmo de Evolução Diferencial Alternativo

Em [71] é proposto um aprimoramento do método de ED, introduzindo no algoritmo uma nova direção para a mutação baseada na diferença entre o melhor e pior indivíduo de uma geração específica. Além disso, duas estratégias de mutação, uma aleatória e outra de mutação modificada (*BGA, Breeder Genetic Algorithm*), são inseridos para evitar a estagnação em soluções locais. Em síntese, destaca-se as seguintes modificações:

1) Definem-se as taxas de mutação e *crossover* em função da geração atual e do número total de gerações, conforme (2.18).

$$PC = PC_{\max} + (PC_{\min} - PC_{\max}) \left(1 - \frac{G}{GEN}\right)^k \quad (2.18)$$

Sendo:

$G$  é a geração atual;

$GEN$  é o número máximo de gerações;

$PC_{\min}$  e  $PC_{\max}$  denotam o valor mínimo e máximo da probabilidade de crossover;

$k$  é um número positivo.

2) Um número randômico entre 0 e 1 é comparado à taxa de mutação. No caso desse número ser maior do que a taxa de mutação, é feita a operação considerando a diferença entre o melhor e pior indivíduo, do contrário, a mutação convencional do algoritmo de ED é utilizada. A medida que se aumenta o número de gerações, a taxa de mutação diminui e, logo, explora-se mais o novo esquema de direção da mutação, convergindo mais rapidamente para a solução desejada.

3) A cada determinado número K de gerações, calcula-se a diferença entre a função objetivo atual e a anterior e, no caso, de essa ser menor do que um valor pré-estipulado  $\delta$ , é introduzido uma mutação aleatória, ou uma mutação BGA modificada, de modo a aumentar o espaço de busca, conforme detalhado em [71].

### 2.3.3.2 Algoritmo de Evolução Diferencial Autoadaptativo

Em [72] é proposto um algoritmo de evolução diferencial autoadaptativo (*SADE, self-adaptive DE*), no qual o vetor de mutação e os parâmetros associados a esse são gradualmente adaptados de acordo com o seu histórico de experiências prévias. Para alcançar um bom desempenho é apropriado testar diferentes estratégias de evolução, distintas formas de mutação e configuração dos parâmetros  $p_c$ ,  $F$  e o tamanho da população. Diante disso, o algoritmo SADE apresenta as seguintes alterações em relação ao ED convencional:

1) Inicialmente deve ser implementada mais de uma estratégia para geração do vetor mutante. Dessa forma, até que se alcance um número mínimo de gerações pré-definidas, denominado por período de aprendizado LP (*learning period*), durante o processo de mutação, cada indivíduo sorteará aleatoriamente uma dessas estratégias e, de acordo com a probabilidade de *crossover*, construirá o vetor teste. As estratégias de mutação adotadas nessa dissertação foram as mesmas de [72] e estão descritas em (2.16), (2.19), (2.20) e (2.21).

$$v_{i,G+1} = x_{i,G} + F(x_{best,G} - x_{i,G}) + F(x_{r1,G} - x_{r2,G}) + F(x_{r3,G} - x_{r4,G}) \quad (2.19)$$

$$v_{i,G+1} = x_{i,G} + F(x_{r1,G} - x_{r3,G}) + F(x_{r4,G} - x_{r5,G}) \quad (2.20)$$

$$v_{i,G+1} = x_{r1,G} + K(x_{r1,G} - x_{i,G}) + F(x_{r2,G} - x_{r3,G}) \quad (2.21)$$

Onde:

$x_{best,G}$  é o melhor indivíduo da geração;

$k$  é o parâmetro de controle, gerado aleatoriamente entre 0 e 1.

Após esse período de observação, é contado a quantidade de sucesso e falha dos vetores testes, sendo que o termo “sucesso” aqui estabelecido refere-se à condição do vetor teste ser substituído na próxima geração e o termo “falha”, o caso contrário. Assim sendo, a partir da geração  $G$  (LP+1), define-se a taxa de probabilidade para cada estratégia conforme (2.22).

$$p_{k,G} = \frac{S_{k,G}}{\sum_{k=1}^K S_{k,G}}, \quad (2.22)$$

$$S_{k,G} = \frac{\sum_{g=G-LP}^{G-1} n s_{k,G}}{\sum_{g=G-LP}^{G-1} n s_{k,G} + \sum_{g=G-LP}^{G-1} n f_{k,G}} + \varepsilon$$

Onde:

- $p_{k,G}$  é a probabilidade da estratégia k ser escolhida na geração G;
- $S_{k,G}$  representa a taxa de sucesso da estratégia k;
- $ns_{k,G}$  número de vetores teste usando a estratégia k que foram usados na próxima geração;
- $nf_{k,G}$  número de vetores testes usando a estratégia k que foram descartados na próxima geração;
- $\varepsilon$  constante com baixo valor ( $\varepsilon = 0,01$  é usado para evitar a possibilidade de taxas de sucesso nula).

2) Os parâmetros do ED de mutação e crossover podem ser adequados para cada problema. No caso dessa dissertação foi adotado a mesma estratégia de [72]. Assim sendo, o parâmetro F é variado por meio de distribuição normal com média de 0,5 e desvio padrão 0,3, denotado por  $N(0,5;0,3)$ . Por sua vez, a probabilidade de crossover é obtida por meio de uma distribuição com média CRm e desvio padrão 0,1, denotado por  $N(CRm;0,1)$ . O valor de CRm é inicializado em 0,5 para as estratégias e em cada iteração é armazenado o valor gerado da PC. Ao final das LP iterações, é calculada a mediana dos valores de PC e atribuído a CRm.

### 2.3.4 Algoritmo de Busca Otimizada

Em 2006, foi proposto em [73] um novo algoritmo de otimização denominado algoritmo de busca otimizada (SOA, *seeker optimization algorithm*). O conceito do algoritmo baseia-se no processo de aprendizado do ser humano, com sua memória, experiência e razões de incerteza. Nesse algoritmo, assume-se que no espaço de busca (domínio das variáveis) existe uma região de vizinhança próxima ao melhor global. Assim sendo, seguindo os valores de aptidão das variáveis, a busca será intensificada nestas regiões que contém boas soluções.

No SOA, os indivíduos são denominados de buscador e, ao longo de um processo iterativo, atualiza suas posições de acordo baseado em sua experiência individual e coletiva. Ainda, por meio de uma lógica nebulosa (*fuzzy*), é introduzido no algoritmo diversas técnicas de busca [74].

A seguir é descrito o algoritmo SOA [74, 19], iniciando pela equação principal (2.23) que rege o comportamento dos buscadores.

$$x_{ij}(t + 1) = x_{ij}(t) + \alpha_{ij}(t)d_{ij}(t) \quad (2.23)$$

Sendo:



$x_{ij}(t + 1)$  é a nova posição do buscador  $i$  (na geração  $t + 1$ ) em cada dimensão  $j$ ;  
 $x_{ij}(t)$  é a posição atual do posição do buscador  $i$  (na geração  $t$ ) em cada dimensão  $j$ ;  
 $\alpha_{ij}(t)$  e  $d_{ij}(t)$  indicam, na ordem, o tamanho do passo e a direção do buscador  $i$  em cada dimensão  $j$ .

Para evitar a convergência para mínimos locais, a população é dividida em subpopulações, sendo que o pior indivíduo de cada subpopulação sofre um processo de cruzamento, conforme (2.24), e pode ser substituído por um indivíduo de outra subpopulação.

$$x_{k_n j, pior} = \begin{cases} x_{l j, melhor} & \text{se } R_j \leq 0,5 \\ x_{k_n j, pior} & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.24)$$

Onde:

$x_{k_n j, pior}$  é o pior indivíduo da subpopulação  $k$  na  $n^a$  posição em cada dimensão  $j$ ;

$x_{l j, melhor}$  é o melhor indivíduo da subpopulação  $l$  em cada dimensão  $j$ ;

$R_j$  é um no número randômico entre 0 e 1.

Para determinar a direção de busca, primeiramente calcula-se os gradientes de dados conforme a função sinal das equações (2.25), (2.26), (2.27) e (2.28), sendo a última calculada a partir da 3ª iteração. Todas essas equações envolvem os buscadores de uma mesma subpopulação.

$$\vec{d}_{i, ego}(t) = sinal(\vec{p}_{i, melhor}(t) - \vec{x}_i(t)) \quad (2.25)$$

$$\vec{d}_{i, alt_1}(t) = sinal(\vec{g}_{i, melhor}(t) - \vec{x}_i(t)) \quad (2.26)$$

$$\vec{d}_{i, alt_2}(t) = sinal(\vec{l}_{i, melhor}(t) - \vec{x}_i(t)) \quad (2.27)$$

$$\vec{d}_{i, pro}(t) = sinal(x_i(t_1) - \vec{x}_i(t_2)) \quad (2.28)$$

Sendo:

$\vec{d}_{i, ego}(t)$  é a direção egoísta dada pela função sinal do resultado da subtração entre a melhor posição histórica  $\vec{p}_{i, melhor}(t)$  e a posição atual  $\vec{x}_i(t)$  do buscador;

$\vec{d}_{i, alt_1}(t)$  é a direção altruísta dada pela função sinal do resultado da subtração entre a melhor posição já encontrada na vizinhança do buscador  $\vec{g}_{i, melhor}(t)$  e a posição atual  $\vec{x}_i(t)$ ;

$\vec{d}_{i,alt_2}(t)$  é a direção altruísta dada pela função sinal do resultado da subtração entre a melhor posição encontrada na vizinhança do buscador  $i$  na geração corrente  $l_{i,melhor}(t)$  e a posição atual  $\vec{x}_i(t)$ ;

$\vec{d}_{i,pro}(t)$  é a direção dada pela função sinal do resultado da subtração entre as 2 posições anterior a posição da geração recorrente ( $x_i(t_1)$  e  $\vec{x}_i(t_2)$ ), sendo que  $x_i(t_1)$  deve ser melhor do que  $\vec{x}_i(t_2)$ ).

De acordo com os resultados das equações (2.25), (2.26), (2.27) e (2.28), para cada dimensão  $j$ , é calculado o número de vezes que o resultado foi igual a 0, 1 ou -1. Atribui-se então a probabilidade de a direção ser positiva ( $p_j^1$ ), negativa ( $p_j^{-1}$ ) ou nula ( $p_j^0$ ), conforme (2.29).

$$p_j^m = \frac{\text{o número de } m}{4} \quad (2.29)$$

Finalmente, atribui-se a direção do buscador  $d_{ij}(t)$ , da equação (2.23), por meio de (2.30), levando-se em consideração as probabilidades resultantes de (2.29).

$$d_{ij}(t) = \begin{cases} 0 & \text{se } r_j \leq p_j^0 \\ +1 & \text{se } p_j^0 < r_j \leq p_j^0 + p_j^1 \\ -1 & \text{se } p_j^0 + p_j^1 < r_j \leq 1 \end{cases} \quad (2.30)$$

No SOA, o passo de mutação é dado por meio de uma lógica nebulosa. Nesse caso os buscadores são ordenados de (1 a  $s$ ), sendo  $s$  a quantidade total de indivíduos da subpopulação. Dessa forma, primeiramente calcula-se o ganho de passo por (2.31).

$$\mu_i = \mu_{max} - \frac{s - I_i}{s - 1}(\mu_{max} - \mu_{min}) \quad (2.31)$$

Onde:

$\mu_{max}$  é o valor máximo de associação, próximo de 1;

$\mu_{min}$  é o valor mínimo de associação, pequeno, mais próximo de 0;

$I_i$  é a posição de ordenação do indivíduo da subpopulação.

Em seguida é calculado o parâmetro  $\delta$  pela equação (2.32).

$$\delta = \omega \text{ mod}(x_{\text{melhor}} - x_{\text{aleatório}}) \quad (2.32)$$

Sendo:

$\omega$  é um parâmetro usado para decrescer o tamanho do passo ao longo do processo iterativo;

$x_{\text{melhor}}$  é a melhor posição da subpopulação;

$x_{\text{aleatório}}$  é a posição de um buscador escolhido randomicamente, deve ser a mesma para todos os buscadores da subpopulação.

Finalmente, varia-se o ganho de passo, por meio de uma função randômica que gera número entre  $\mu_i$  e calcula-se o passo de busca, conforme (2.33), a qual soluciona (2.23).

$$\begin{aligned} \alpha_{ij} &= \delta_j \sqrt{-\ln(\mu_{ij})}, \\ \mu_{ij} &= \text{aleatório}(\mu_i, 1) \end{aligned} \quad (2.33)$$

# ESTRATÉGIA PARA A ESTIMAÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

## 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

De acordo com esclarecimentos já feitos, o procedimento de EEH consiste em determinar o nível de tensão para as ordens harmônicas de interesse em todas as barras do sistema, a partir do conhecimento do conteúdo harmônico real presente em alguns locais da rede, informações essas advindas de medidores de qualidade de energia instalados em pontos estratégicos. A estimação é feita individualmente para cada ordem harmônica, sendo realizada em função daquelas mais significativas para um estudo específico, ou então, de todas as ordens harmônicas disponibilizadas pelos medidores.

Visando atender tais objetivos, como contextualizado no capítulo 1, são várias as metodologias empregadas para a EEH, iniciando pela determinação do número e a localização dos instrumentos de medição na rede, visando, sobretudo, a obtenção de bons resultados de estimação. De fato, um mal posicionamento dos mesmos poderá impactar fortemente no processo de estimação e produzir erros grosseiros. Na sequência, tem-se a etapa da estimação propriamente dita através dos algoritmos considerados no capítulo anterior.

Vale ressaltar que, tanto quanto a metodologia de alocação e estimação de estado harmônico empregada, também a modelagem da configuração da rede exerce forte influência na qualidade dos resultados.

Objetivando, pois, contemplar todos os pontos acima referidos através de uma ferramenta computacional de análise, procede-se, nesse capítulo, ao desenvolvimento de meios para o estabelecimento dos recursos voltados para a modelagem da rede e seus componentes, das estratégias para alocação e estimação, obtendo-se, ao seu final, os recursos necessários para o processo de análise desta dissertação.

## 3.2 FLUXO HARMÔNICO

O fluxo de potência ou fluxo de carga, consiste em uma análise algébrica das condições de operação do sistema de energia elétrica em regime permanente, cuja representação é feita por equações não lineares, as quais são resolvidas através de métodos computacionais já desenvolvidos no passado [75].

Dentro da mesma linha de trabalhos, ao longo do tempo foram desenvolvidas diversas estratégias para os denominados estudos de fluxo harmônico, os quais conduzem aos valores das grandezas representativas das distorções de tensões e correntes nos complexos elétricos [76].

### 3.2.1 Solução Direta no Domínio da Frequência

A formulação mais simples, conhecida como método da solução direta no domínio da frequência, utiliza apenas a sequência positiva e calcula as diversas impedâncias constituintes das redes considerando, individualmente, cada frequência de interesse [77]. Esta técnica, pelos seus princípios, não apresenta uma solução iterativa rede-carga, não inclui a modelagem explícita dos dispositivos geradores de harmônicos e realiza os cálculos para um equivalente monofásico representativo de sistemas de natureza trifásica equilibrada.

Neste sentido, o processo de cálculo em pauta se fundamenta na montagem da matriz representativa das impedâncias harmônicas que totalizam a rede, injetam as correntes harmônicas conhecidas produzidas e, para cada frequência, calcula as tensões por meio do teorema da superposição [76, 77]. Esta é a estratégia sintetizada pela equação (3.1).

$$\dot{V}_h = \dot{Z}_h \dot{I}_h \quad (3.1)$$

Onde:

$\dot{V}_h$  é o vetor das tensões harmônicas resultantes;

$\dot{Z}_h$  é a matriz das impedâncias harmônicas;

$\dot{I}_h$  é o vetor das correntes harmônicas injetadas no sistema.

Para cada ordem harmônica, a matriz  $\dot{Z}_h$  é obtida através do inverso da matriz de admitâncias dada em (3.2).

$$Y_h = \begin{bmatrix} Y_{11_h} & Y_{12_h} & \cdots & Y_{1k_h} & \cdots & Y_{1m_h} \\ Y_{21_h} & Y_{22_h} & \cdots & Y_{2k_h} & \cdots & Y_{2m_h} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ Y_{k1_h} & Y_{k2_h} & \cdots & Y_{kk_h} & \cdots & Y_{km_h} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{m1_h} & Y_{m2_h} & \cdots & Y_{mk_h} & \cdots & Y_{mm_h} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Sendo:

$Y_{kk_h}$  é a admitância própria da barra genérica k, na frequência correspondente a ordem harmônica h.

$Y_{km_h}$  é a admitância mútua entre as barras genéricas k e m, na ordem harmônica h.

### 3.2.2 Modelagem dos Componentes e Matriz de Admitâncias

De acordo com princípios básicos, os componentes capacitivos, indutivos e resistivos são modelados, em função da frequência (f), conforme (3.3), (3.4) e (3.5). Esta última expressão objetiva considerar o efeito da ordem harmônica sobre o valor da resistência [78]. Todavia, tal influência, via de regra, é desconsiderada para as análises, até porque, qualquer aumento de resistência implicaria em atenuações dos fenômenos e a sua não inserção conduz a cálculos mais conservativos.

$$X_C(\omega) = \frac{1}{\omega C} \quad (3.3)$$

$$X_L(\omega) = \omega L \quad (3.4)$$

$$R_h = R_1 \left( \frac{f_h}{f_1} \right)^\alpha \quad (3.5)$$

Onde:

- $\omega$  frequência harmônica angular dada por  $\omega = 2\pi f$ ;
- $X_C(\omega)$  reatância capacitiva em função da frequência;
- $X_L(\omega)$  reatância indutiva em função da frequência;
- h ordem harmônica;
- $R_h$  resistência corrigida na frequência harmônica;
- $R_1$  resistência na frequência fundamental;
- $\alpha$  expoente de correção da frequência.

Em se tratando de componentes de rede cuja representação leva a uma associação série dos componentes básicos supra mencionados, a equação (3.6) expressa sua correspondente admitância Y para as diversas frequências harmônicas [78]:

$$Y(\omega_h) = Z(\omega_h)^{-1} = \left[ R + j \left( \omega_h L - \frac{1}{\omega_h C} \right) \right]^{-1} \quad (3.6)$$

Tal modelo encontra-se identificado, por exemplo, com linhas de transmissão e transformadores, como indicado na Figura 7 e Figura 8, respectivamente.

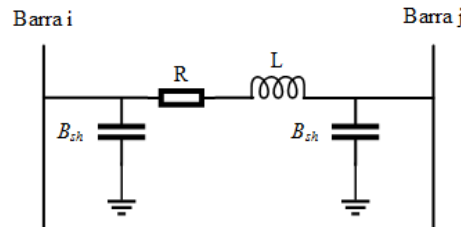


Figura 7 - Representação da linha por um circuito  $\pi$

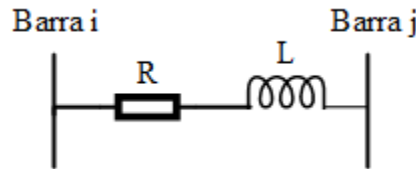


Figura 8 - Representação do transformador

Uma outra linha de componentes de rede se apresenta consonante com composição de elementos inseridos em paralelo. Estes são modelados nos termos estabelecidos pela equação (3.7). A exemplo destes ressaltam-se os reatores, bancos de capacitores, filtros, entre outros.

$$Y(\omega_h) = G + jB_h \quad (3.7)$$

No que se refere as cargas, estas se apresentam constituídas por elementos passivos e eventuais fontes de correntes harmônicas [60]. Todavia, para a maioria das aplicações a parte passiva é desconsiderada e apenas as fontes de corrente são inseridas nos estudos. Esta última hipótese foi adotada ao longo dessa dissertação, isto é, as cargas são sempre tratadas tão apenas como fornecedoras ou consumidoras de correntes harmônicas.

Caso seja necessária a representação dos elementos passivos, estes podem ser encontrados através das equações (3.8) e (3.9), as quais utilizam os consumos de potência ativa e reativa [78].

$$Y_{p(h)} = \frac{1}{R_p} + \frac{j1}{\omega_h X_p}, \quad (3.8)$$

$$R_p = \frac{V^2}{P} \text{ e } X_p = \frac{V^2}{Q}$$

$$Y_{p(h)} = \frac{P - jQ}{V^2} \quad (3.9)$$

Por fim, os barramentos associados com pontos de geração, em conformidade com o programa HarmZs do Cepel [79], estes foram tratados através de uma composição série da resistência de armadura e a reatância subtransitória de eixo direto do gerador equivalente. Isto origina a modelagem contemplada nas expressões (3.10) e (3.11) [80].

$$\dot{Y}_{ij(h)} = -\dot{y}_{ij(h)} \quad (3.10)$$

$$\dot{Y}_{ii(h)} = -\dot{y}_{ii(h)} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \dot{y}_{ij(h)} \quad (3.11)$$

Sendo:

$\dot{Y}_{ij(h)}$  elementos fora da diagonal principal da matriz de admitâncias;

$\dot{Y}_{ij(h)}$  elementos da diagonal principal da matriz de admitâncias;

$\dot{y}_{ij(h)}$  admitância dos parâmetros em série de linha ou transformador;

$\dot{y}_{ii(h)}$  admitância shunt.

### 3.2.3 Software de Análise do Fluxo Harmônico e Validação

Os fundamentos anteriormente expostos e que permitem os requeridos estudos de fluxo harmônico foram, para fins dessa dissertação, implementados software MATLAB® [81]. O resultado deste trabalho permitiu obter uma ferramenta básica para a realização dos trabalhos aqui focados.

Não obstante a confiabilidade intrinsecamente associada com o software comercial acima e a inserção dos modelos de componentes de rede nos moldes postos na seção anterior, é importante reconhecer que o produto, para ser empregado para os fins da EEH deve ser avaliado e ratificado. Para tanto, utilizando-se da topologia e parametrização do clássico sistema conhecido por IEEE de 14 barras, foram feitos estudos para a determinação das distorções de corrente e tensão nos seus mais distintos barramentos e linhas. Muito embora as informações relativas a tal complexo elétrico sejam amplamente conhecidas, tendo em vista sua utilização posterior no capítulo subsequente, o mesmo será detalhado quando da sua menção naquela unidade.



Para fins comparativos, o referido sistema foi modelado e avaliado através do software desenvolvido nessa pesquisa e, numa via alternativa, através do conhecido aplicativo computacional do CEPEL HarmZs [82].

Os resultados obtidos pelo software HarmZs e pelo programa em MATLAB® são exibidos, respectivamente, na Tabela III e na Tabela IV. Observe que os resultados se mostram extremamente aderentes, validando, assim, a ferramenta desenvolvida. Cabe apenas observar que os valores fundamentais das tensões foram adotadas, sempre, iguais a 1 pu.

**Tabela III - Resultados das distorções de tensão (em %) obtidos pelo HarmZs**

Barra	DIT <sub>5h</sub>	DIT <sub>7h</sub>	DIT <sub>11h</sub>	DIT <sub>13h</sub>	DIT <sub>17h</sub>	DIT <sub>19h</sub>	DTT
1	0,6739	0,1592	0,3444	3,8106	0,1604	0,1717	3,8954
2	1,2713	0,3263	0,6630	7,0646	0,2691	0,2723	7,2261
3	1,4645	0,6778	0,8703	5,9907	0,0865	0,2657	6,2712
4	2,5233	0,4850	0,7480	6,1982	0,0850	0,0260	6,7518
5	2,2535	0,3906	0,7242	6,9469	0,1802	0,1150	7,3526
6	3,2585	0,1621	0,1808	2,4069	0,0939	0,0568	4,0598
7	4,4702	0,2376	0,1270	1,0674	0,0320	0,0042	4,6038
8	3,2701	0,1739	0,0929	0,7809	0,0234	0,0031	3,3679
9	6,2470	0,4517	0,1800	1,4576	0,0173	0,0135	6,4332
10	5,7824	0,4303	0,1534	0,7776	0,0267	0,0459	5,8526
11	4,5425	0,2979	0,0355	0,7879	0,0582	0,0452	4,6207
12	3,5044	0,2102	0,1365	2,1299	0,0959	0,0560	4,1100
13	3,6964	0,263	0,1143	1,9128	0,0974	0,0566	4,1734
14	5,1642	0,5288	0,1829	0,2743	0,0641	0,0688	5,2025

**Tabela IV - Resultados de distorções de tensão (em %) obtidos pelo programa em MATLAB®**

Barra	DIT <sub>5h</sub>	DIT <sub>7h</sub>	DIT <sub>11h</sub>	DIT <sub>13h</sub>	DIT <sub>17h</sub>	DIT <sub>19h</sub>	DTT
1	0,6735	0,1591	0,3443	3,8127	0,1604	0,1717	3,8954
2	1,2704	0,3263	0,6628	7,0683	0,2691	0,2723	7,2261
3	1,4636	0,6777	0,8702	5,9942	0,0865	0,2657	6,2712
4	2,5217	0,4849	0,7478	6,2013	0,0850	0,0260	6,7518
5	2,2520	0,3905	0,7241	6,9505	0,1802	0,1150	7,3526
6	3,2560	0,1621	0,1807	2,4080	0,0939	0,0568	4,0598
7	4,4675	0,2378	0,1268	1,0665	0,0320	0,0042	4,6038
8	3,2682	0,1739	0,0928	0,7802	0,0234	0,0031	3,3679
9	6,2419	0,4518	0,1800	1,4587	0,0173	0,0135	6,4332
10	5,7778	0,4304	0,1535	0,7784	0,0267	0,0459	5,8526
11	4,5389	0,2980	0,0355	0,7881	0,0582	0,0452	4,6207
12	3,5017	0,2103	0,1365	2,1308	0,0959	0,0560	4,1100
13	3,6936	0,2631	0,1142	1,9136	0,0974	0,0566	4,1734
14	5,1601	0,5289	0,1829	0,2744	0,0641	0,0688	5,2025

### 3.3 ESTRUTURA DA MEDIÇÃO PARA EEH

Os estimadores de estados são baseados em medições de onda de tensão e corrente processados pelos chamados Unidades de Medição Fasorial (PMUs, *Phasor Measurement Units*), os quais são sincronizados por meio de GPS, como indicado na Figura 9, sendo que as ordens harmônicas são determinadas a partir dos sinais amostrados e da aplicação da Transformada Discreta de Fourier [23, 83].

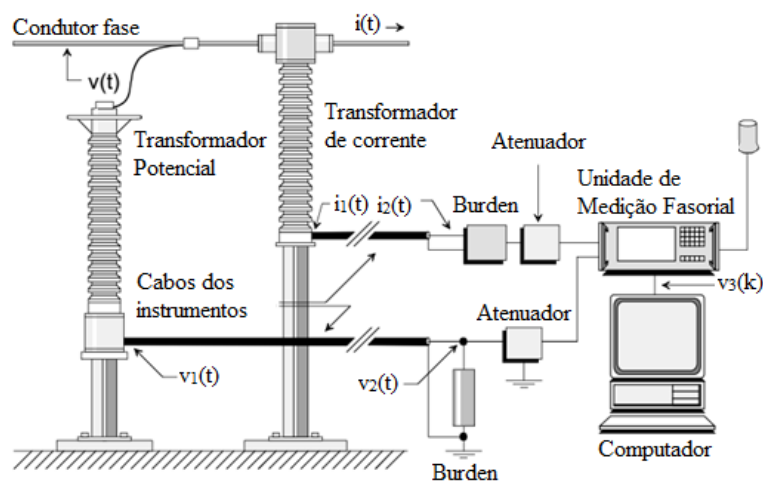
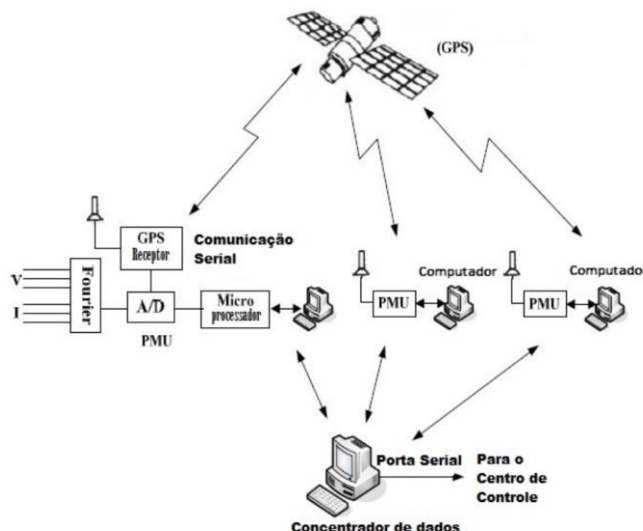


Figura 9 - Componentes típicos dos sistemas de medição de tensão e corrente [83]

Os PMUs são instalados em subestações e enviam os resultados de medições para o centro de controle, conforme a Figura 10. Cada sistema local possui um receptor de GPS para sincronizar as medições de fase harmônica com uma precisão de 1  $\mu$ s, o que equivale a uma exatidão nas medições de até 0,5 graus para o ângulo de fase na 19ª harmônica. Os dados de cada medidor são enviados a uma central mestre. As formas de onda capturada são processadas e eventuais erros dos transformadores de medição são corrigidos por meio de funções de transferência intrínsecas desses instrumentos e do banco de dados armazenados [83, 84].



**Figura 10 - Um sistema de aquisição de dados baseado em medições fasoriais sincronizadas para EEH [23]**

É válido ressaltar a influência de dados com ruídos ou erros grosseiros advindos dos instrumentos de medição, devido, por exemplo, a uma má calibração dos mesmos, no desempenho dos estimadores de estado. Ainda, também é possível que haja erro devido o sincronismo [39, 83]. Assim sendo, na literatura é abordado diversas metodologias para examinar esse efeito [28, 29, 30, 39, 48]. Ainda, cabe ressaltar que esses erros serão mais expressivos para os harmônicos de maior ordem [84].

### 3.4 ESTRATÉGIA DE ALOCAÇÃO DOS MEDIDORES

O processo de alocação dos medidores proposto nessa dissertação está em consonância com os trabalhos desenvolvidos [85, 86, 87, 21]. Esses apresentam uma estratégia para alocação que, por questões de simplicidade de explanação, é ilustrada na forma de uma aplicação direta, empregando-se, para tanto, o sistema do IEEE de 5 barras e 7 linhas de transmissão, indicado na Figura 11 [88].

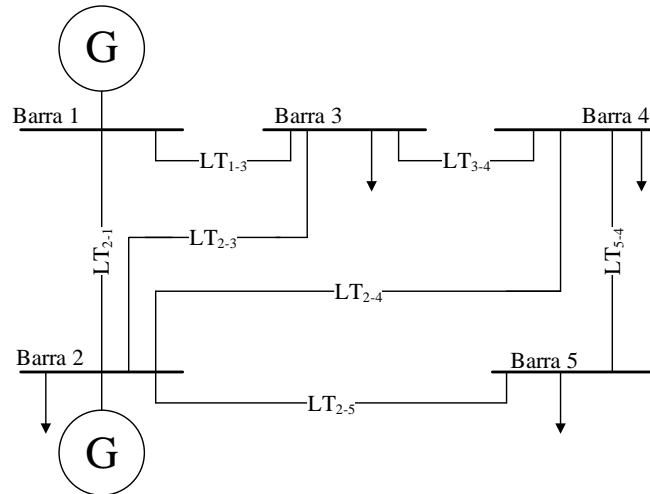


Figura 11 - Sistema 5 barras [88]

Os passos a serem seguidos para se atingir os propósitos da alocação dos medidores se apresentam constituídos como segue.

### 1) Construção da matriz de conexão

A primeira etapa consiste na análise da topologia da rede. Para tanto, deve ser montada a matriz de conexão (**MX**), com entradas  $mx_{jk}$ , sendo j e k barras genéricas do sistema, conforme (3.12) [89].

$$mx_{jk} = \begin{cases} 0, & \text{se o ramo } j \text{ não é conectado na barra } k \\ 1, & \text{se o ramo } j \text{ é conectado na barra } k \end{cases} \quad (3.12)$$

Para o caso do sistema de 5 barras aqui considerado é então obtida a matriz de conectividade da Tabela V. A soma dos elementos de cada coluna da matriz de conectividade corresponde ao número de ramos que sai de cada barramento.

Tabela V – Matriz de conexão (MC) para o sistema de 5 barras

	1	2	3	4	5
1	0	1	1	0	0
2	1	0	1	1	1
3	1	1	0	1	0
4	0	1	1	0	1
5	0	1	0	1	0

## 2) Problema de Recobrimento

A otimização da alocação dos medidores é considerada como sendo um Problema de Recobrimento (PR). De uma forma geral, os PR compreendem questões como entrega, roteamento, agendamento e localização, para os quais é necessário garantir que todo cliente seja atendido por, pelo menos, um veículo, pessoa ou serviço de qualquer natureza. No processo de localização dos medidores, o PR consiste em encontrar o custo mínimo para monitoramento de um sistema, usando, para tanto, uma quantidade mínima de monitores que garanta a observabilidade de todo o sistema [7].

O PR não possui uma única solução, mas, ao contrário, apresenta uma vasta gama de resultados que atendem ao problema estabelecido. A metodologia apresentada em [7] utiliza como estratégia para restringir o número de soluções, diferentes custos para a instalação dos monitores, de modo que os barramentos que apresentarem menores custos para instalação serão prioritários no processo de alocação. Complementando esse trabalho, a estratégia de [87], aponta que deve-se considerar que os medidores possuem um número limitado de canais de medição, fato este que implica num aumento do número de medidores para monitorar todo o sistema elétrico. Para solucionar o PR, ambas referencias supracitadas implementaram o algoritmo *branch-and-bound* que tem como característica a exploração e apresentação de todas as soluções possíveis.

Nesse trabalho, a estratégia de alocação proposta é fortemente embasada nas publicações acima e na referência [21], a qual utiliza o AG para a obtenção, de forma mais rápida, de uma única solução contida no método *branch-and-bound*. É válido ressaltar que, por se tratar de um algoritmo evolutivo, não são exploradas todas as soluções e, desse modo, em se tratando de aplicações reais, deve-se testar mais de uma vez o algoritmo de alocação, até que se alcance uma solução que seja de maior interesse.

## 3) Vetor de alocação

O vetor de alocação (**VA**) contém os locais em que os medidores estarão conectados para as medições de tensão e corrente de ramo. A Tabela VI exhibe um exemplo do vetor de alocação para o sistema de 5 barras. Nesse caso são empregados 3 medidores, os quais monitoram as tensões dos barramentos 3 e 5 e as correntes dos ramos entre os barramentos 1 e 3, 2 e 5 e 4 e 5. Vale destacar que, para esse sistema, existem 14 possibilidades de combinações conjuntas de medições de tensão e corrente. Assim sendo, é fácil perceber que em sistemas

maiores (com mais barras e ramos) existirão muito mais combinações, o que dificulta a alocação por métodos de programação inteira, como é o caso do *branch-and-bound*.

**Tabela VI – Exemplo do vetor de alocação (VA) para o sistema de 5 barras**

$(v_1, i_{1-2})$	$(v_1, i_{1-3})$	$(v_2, i_{1-2})$	$(v_2, i_{2-3})$	$(v_2, i_{2-4})$	$(v_2, i_{2-5})$	$(v_3, i_{1-3})$	$(v_3, i_{2-3})$	$(v_3, i_{3-4})$	$(v_4, i_{2-4})$	$(v_4, i_{3-4})$	$(v_4, i_{4-5})$	$(v_5, i_{2-5})$	$(v_5, i_{4-5})$
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1

#### 4) Restrições para o Problema de Recobrimento

A modelagem desse PR seguiu os mesmos critérios de [87], os quais são sucintamente explanados na sequência.

##### a) Restrição de conectividade

Baseada na lei de Kirchooff da tensão, avalia-se se a tensão de um determinado barramento é medida ou pode ser calculada e se a corrente de um ramo é medida. Essa avaliação é feita por meio de uma matriz de conectividade  $MC$ , cujas linhas correspondem as variáveis em análise (tensão dos barramentos e correntes dos ramos) e as colunas resultam em possíveis combinações de medições (tensão de barramento e corrente de ramo). Cada elemento da  $MC$  é um número binário: valor um (1) para o caso da variável que está sendo monitorada e valor zero (0) em caso negativo.

Por exemplo, considerando conhecidos os resultados das medições de tensão em uma barra genérica  $i$  e a corrente de ramo entre as barras  $i$  e  $j$ , tem-se as grandezas  $(v_i, i_{i-j})$ , sendo:

- o elemento  $MC(v_i, (v_i, i_{i-j}))$  é igual a 1, tensão  $v_i$  é medida;
- o elemento  $MC(v_j, (v_i, i_{i-j}))$  é igual a 1, tensão  $v_j$  pode ser calculada;
- o elemento  $MC(i_{ij}, (v_i, i_{i-j}))$  é igual a 1, corrente  $i_{ij}$  é medida;
- os demais elementos da  $MC$  correspondentes a coluna  $(v_i, i_{i-j})$  serão iguais a zero.

De acordo com o vetor de alocação, determina-se o vetor de conectividade ( $VC$ ), conforme (3.13) [87].

$$VC = MC \times VA^t \quad (3.13)$$

A Tabela VII exhibe os resultados da  $MC$  para o sistema de 5 barras.

Tabela VII - Matriz de conectividade (MC)

	$(v_1, i_{1-2})$	$(v_1, i_{1-3})$	$(v_2, i_{1-2})$	$(v_2, i_{2-3})$	$(v_2, i_{2-4})$	$(v_2, i_{2-5})$	$(v_3, i_{1-3})$	$(v_3, i_{2-3})$	$(v_3, i_{3-4})$	$(v_4, i_{2-4})$	$(v_4, i_{3-4})$	$(v_4, i_{4-5})$	$(v_5, i_{2-5})$	$(v_5, i_{4-5})$
$v_1$	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
$v_2$	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0
$v_3$	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0
$v_4$	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1
$v_5$	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1
$i_{12}$	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
$i_{13}$	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
$i_{23}$	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0
$i_{24}$	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0
$i_{25}$	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0
$i_{34}$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
$i_{45}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1

## b) Restrição de redundância

A restrição de redundância baseia-se também na lei de Kirchhoff da tensão. Analisando-se a **MC**, os vetores de redundância-de e redundância-para (**VR<sub>DE</sub>** e **VR<sub>PARA</sub>**) avaliam se as correntes entre os ramos são medidas ou calculadas e, caso afirmativo, com qual redundância.

Continuando o processo de alocação para o sistema aqui considerado, seu vetor de redundância é dado na Tabela VIII.

Tabela VIII - Vetor de redundância (VR)

	<b>VR<sub>DE</sub></b>	<b>VR<sub>PARA</sub></b>	<b>VR (VR<sub>DE</sub> <math>\cap</math> VR<sub>PARA</sub>)</b>
$i_{12}$	1	1	1
$i_{13}$	1	1	1
$i_{23}$	1	1	1
$i_{24}$	1	1	1
$i_{25}$	1	2	1
$i_{34}$	1	1	1
$i_{45}$	1	2	1

## c) Restrição de co-conectividade

Essa restrição tem como objetivo garantir a possibilidade do cálculo da corrente de uma dada carga ou geração. Essa condição é dada pelo vetor de co-conectividade (**VCC**), o qual deve ter seus elementos não nulos e, para tanto, requer as correntes dos ramos desse barramento. Isto equivale a avaliar as tensões das barras adjacentes. O **VCC** é embasado no **VC** e sua formulação matemática é dada em [87]. Para o exemplo aqui explorado o **VCC** é dado pela Tabela IX.

**Tabela IX - Vetor de co-conectividade (VCC)**

<u>VCC</u>	
$i_1$	1
$i_2$	2
$i_3$	1
$i_4$	2
$i_5$	1

Pelas restrições explicitadas acima, é obtido o vetor final (VF), resultante da união do VC, VCC e VR. Todos os elementos do VF devem ser maiores ou iguais a 1, indicando assim que as grandezas de tensão do barramento e corrente de ramo são medidas ou calculadas. Observa-se que como VR terá todos os seus elementos unitários, desde que se atenda aos critérios de restrição de redundância, pode-se dizer que o VF carrega consigo também a redundância do sistema, de modo mais particular, de VC e VCC.

Para o sistema de 5 barras, com o vetor de alocação da Tabela VI, o VF é dado na Tabela X. Esta evidencia que não há indeterminações no sistema.

**Tabela X - Vetor final (VF)**

$v_1$	2
$v_2$	3
$v_3$	2
$v_4$	3
$v_5$	3
$i_{12}$	2
$i_{13}$	2
$i_{23}$	2
$i_{24}$	2
$i_{25}$	2
$i_{34}$	1
$i_{45}$	2

### 5) Processo de otimização

Por fim, o processo de otimização consiste em, dadas as restrições do PR, determinar a quantidade mínima de monitores necessários, bem como de suas posições no sistema. Para tanto, a função objetivo é definida pelo somatório dos elementos correspondentes ao vetor de alocação, conforme (3.14). A Tabela VI é um exemplo de uma solução para o problema de 5 barras, visto que, conforme exemplificado anteriormente, atendeu todas as restrições impostas.



$$F = \min \sum_{n=1}^{2 \cdot n^{\circ} \text{ ramos}} VA(i) \quad (3.14)$$

Devido ao fato do AG escolher uma única solução, considerou-se, na função objetivo, o somatório do desvio padrão do vetor de restrição final  $\sigma(VRF)$ , de forma que as soluções que apresentarem o menor desvio padrão e, portanto, maior observabilidade do sistema como um todo, serão privilegiadas.

$$F = \min \sum_{n=1}^{2 \cdot n^{\circ} \text{ ramos}} VA(i) + \sigma(VF) \quad (3.15)$$

No AG, os indivíduos correspondem aos possíveis vetores de alocação, a exemplo da indicação da Tabela VI, onde cada posição é um número binário, determinando ou não a existência de um medidor (números 1 ou 0). Valer ressaltar que os parâmetros desse algoritmo (número de indivíduos da população, pc e pm e o número de iterações mínimas) devem ser ajustados para cada sistema.

Neste trabalho adotou-se a técnica de elitismo que consiste em preservar o melhor indivíduo da geração atual para a próxima, garantindo, assim que as gerações seguintes terão resultados iguais ou melhores que as anteriores.

### 3.5 DETERMINAÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Conforme já explorado, para sistemas completamente observáveis, os métodos embasados no MMQ são mais atrativos devido a facilidade de implementação e sua rapidez para a solução de problemas de estimação. Por outro lado, em situações nas quais o número de variáveis de estado desconhecidas é inferior ao número de resultados de medições, o problema de estimação é caracterizado como um sistema subdeterminado. Portanto, nessas condições, não será mais possível a solução usando os métodos convencionais de estimação. Para contornar tais dificuldades, alguns trabalhos usam como estratégia a exclusão de singularidades do sistema, o que implica na inviabilidade de se estimar as variáveis não observadas.

Assim sendo, nessa dissertação é adotada uma proposição alternativa, que se apresenta na forma de caracterizar o problema de estimação como sendo de otimização. Desse modo, as soluções são geradas por meio de algoritmos evolutivos, os quais, norteados por uma função

objetivo, caracterizada pela minimização do erro quadrático entre as variáveis de medição e as soluções geradas pelos algoritmos, estimam todas as grandezas do sistema.

Resumindo, a estratégia adotada nesta pesquisa consiste em usar o MMQ para estimar as variáveis de estado em pontos de monitoramento em sistema determinado ou sobredeterminado e, por sua vez, de métodos randômicos para estimar as variáveis não observadas em sistema subdeterminado. Os procedimentos usados para atingir tais objetivos são detalhados na sequência e estão em consonância com o método de alocação detalhado na seção anterior.

### 3.5.1 Estimação das variáveis via MMQ

O procedimento de estimação em pontos observáveis do sistema foi embasado no trabalho de [45]. De uma forma geral, o problema de estimação é caracterizado, para cada ordem harmônica  $h$ , conforme (3.16).

$$\mathbf{z}(h) = \mathbf{H}(h)\mathbf{x}(h) + \mathbf{e}(h) \quad (3.16)$$

Onde:

$\mathbf{z}(h)$  é o vetor com os resultados de medidas de tensão e/ou corrente;

$\mathbf{H}(h)$  é uma matriz conhecida, formada pelas admitâncias dos elementos de ramos;

$\mathbf{x}(h)$  é o vetor das variáveis de estado, no caso das tensões harmônicas  $V(h)$ ;

$\mathbf{e}(h)$  é o vetor de erros de medição.

Sendo os valores de  $\mathbf{e}(h)$  não são conhecidos, o problema de estimação pode ser resolvido segundo (3.17). Na equação é inserida a matriz de pesos  $\mathbf{W}(h)$ , expressa em (3.18). Nessa os elementos da diagonal principal (não nulos) são dados em função do desvio padrão associado com cada uma das  $k$  medições (de tensão  $\sigma_v$  e corrente  $\sigma_i$ ) [45].

$$\mathbf{x}^{*,est}(h) = (\mathbf{H}^T(h)\mathbf{W}\mathbf{H}(h))^{-1}\mathbf{H}(h)^T\mathbf{W}\mathbf{z}(h) \quad (3.17)$$

$$W(h) = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_{1v}^2} & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_{2v}^2} & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \frac{1}{\sigma_{kv}^2} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \ddots & \frac{1}{\sigma_{1i}^2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\sigma_{ki}^2} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Aplicando os procedimentos para o sistema de 5 barras aqui as correntes de ramos  $\dot{I}_{1,3}$ ,  $\dot{I}_{2,5}$  e  $\dot{I}_{4,5}$  podem ser obtidas pelas equações de (3.8) – (3.10).

$$\dot{I}_{1,3} = (\dot{V}_1 - \dot{V}_3)\dot{Y}_{1,3} \quad (3.19)$$

$$\dot{I}_{2,5} = (\dot{V}_2 - \dot{V}_5)\dot{Y}_{2,5} \quad (3.20)$$

$$\dot{I}_{4,5} = (\dot{V}_4 - \dot{V}_5)\dot{Y}_{4,5} \quad (3.21)$$

Sendo:

$\dot{I}_{i,j}$  a corrente que flui da barra  $i$  para a barra  $j$ ;

$\dot{V}_i$  a tensão do barramento  $i$ ;

$\dot{Y}_{i,j}$  a admitância de ramo entre as barras  $i$  e  $j$ .

As equações supracitadas podem ser representadas na sua forma matricial, conforme (3.22).

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{1,3} \\ \dot{I}_{2,5} \\ \dot{I}_{4,5} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{Y}_{1,3} & 0 & -\dot{Y}_{1,3} & 0 & 0 \\ 0 & \dot{Y}_{2,5} & 0 & 0 & -\dot{Y}_{2,5} \\ 0 & 0 & 0 & \dot{Y}_{4,5} & -\dot{Y}_{4,5} \end{bmatrix}}_{Y_{LB}} \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \dot{V}_3 \\ \dot{V}_4 \\ \dot{V}_5 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Desse modo, incluindo-se as medições de tensão, a equação matricial (3.22) pode ser expandida conforme (3.23).

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_3 \\ \dot{V}_5 \\ \dot{I}_{1,3} \\ \dot{I}_{2,5} \\ \dot{I}_{4,5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \dot{Y}_{1,3} & 0 & -\dot{Y}_{1,3} & 0 & 0 \\ 0 & \dot{Y}_{2,5} & 0 & 0 & -\dot{Y}_{2,5} \\ 0 & 0 & 0 & \dot{Y}_{4,5} & -\dot{Y}_{4,5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \dot{V}_3 \\ \dot{V}_4 \\ \dot{V}_5 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Generalizando, para um sistema de  $n$  barras, com medidores de 1 a  $k$ , para cada ordem harmônica  $h$ , o equacionamento de (3.23) pode ser representado por (3.24) [45].

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \vdots \\ \dot{V}_k \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_k \end{bmatrix}}_{Z(h)} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{k \times k} & \mathbf{0} \\ \dot{Y}_{LB(1:k,1:k)} & \dot{Y}_{LB(1:k,k+1:n)} \end{bmatrix}}_{H(h)} \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \vdots \\ \dot{V}_n \end{bmatrix}}_{X(h)} \quad (3.24)$$

Sendo:

$\mathbf{I}_{k \times k}$  é a matriz identidade;

$\mathbf{0}$  matriz nula de preenchimento de  $H(h)$ .

Para o sistema de 5 barras, com base em (3.24), o equacionamento de (3.23) fica rearranjado conforme (3.25). Cabe ressaltar que a redundância de medição de tensão da barra 5 não foi expressa em (3.25).

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_3 \\ \dot{V}_5 \\ \dot{I}_{1,3} \\ \dot{I}_{2,5} \\ \dot{I}_{4,5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\dot{Y}_{1,3} & 0 & \dot{Y}_{1,3} & 0 & 0 \\ 0 & -\dot{Y}_{2,5} & 0 & \dot{Y}_{2,5} & 0 \\ 0 & -\dot{Y}_{4,5} & 0 & 0 & \dot{Y}_{4,5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_3 \\ \dot{V}_5 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \dot{V}_4 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

### 3.5.2 Estimação das variáveis via algoritmos evolutivos

Conforme mostra o fluxograma da Figura 12, primeiramente é feita a leitura dos parâmetros dos componentes do sistema, além das tensões harmônicas informadas pelos medidores posicionados de acordo com **VA**. Após isso, é realizada, para cada ordem harmônica, a estimação da tensão harmônica, empregando-se os algoritmos evolutivos, descritos na seção 2.3. Finalmente, são realizados os cálculos das distorções totais de tensão (DTT) reais e estimadas e avaliados os erros associados ao processo empregado.

Para o problema de otimização formulado, o objetivo é minimizar os erros das tensões harmônicas dos barramentos e das correntes harmônicas dos ramos obtidas dos medidores. Para tanto, independentemente do algoritmo empregado, as soluções candidatas (denominadas por indivíduos ou buscadores) representam o vetor de correntes. Esse se apresenta constituído pelos

módulos e ângulos das correntes harmônicas injetadas nas barras da rede elétrica sob análise. Para cada geração é feita a análise do fluxo harmônico para obtenção dos níveis das tensões nas barras do sistema e determinadas as correntes de ramos para posterior cálculo da função objetivo, conforme (3.26).

$$F = \min \sum_{n=1}^{n^{\circ} \text{ medidores}} (V_i^{med} - V_i^{est})^2 + [(I_{ij}^{med} - I_{ij}^{est})Z_{ij}]^2 \quad (3.26)$$

Onde:

$V_i^{med}$  é a tensão do barramento  $i$  informada pelo medidor;

$V_i^{est}$  é a tensão do barramento  $i$  estimada;

$I_{ij}^{med}$  é a corrente do ramo  $ij$  informada pelo medidor;

$I_{ij}^{est}$  é a corrente do ramo  $ij$  estimada;

$Z_{ij}$  é a impedância do ramo  $ij$ .

Portanto, a função objetivo é dada pela soma dos erros quadráticos entre as tensões reais e estimadas adicionado a soma dos erros quadráticos entre as correntes reais e estimadas multiplicadas pela impedância equivalente do ramo. Também, é feita uma avaliação das distorções individuais de tensão de todos os barramentos, sendo penalizados por (3.27) resultados que estejam com tensões maiores do que 15% em algum desses.

Ao longo de um processo evolutivo, novas soluções candidatas são geradas e os valores da função objetivo tendem a diminuir e, por conseguinte, as tensões estimadas se aproximam daquelas informadas pelos medidores. Como critério de parada, pode ser escolhido o número de iterações mínima, erro mínimo admitido, estagnação do erro, entre outros.

$$F = F + 100\max(0, V_i^{est} - 0,15) \quad (3.27)$$

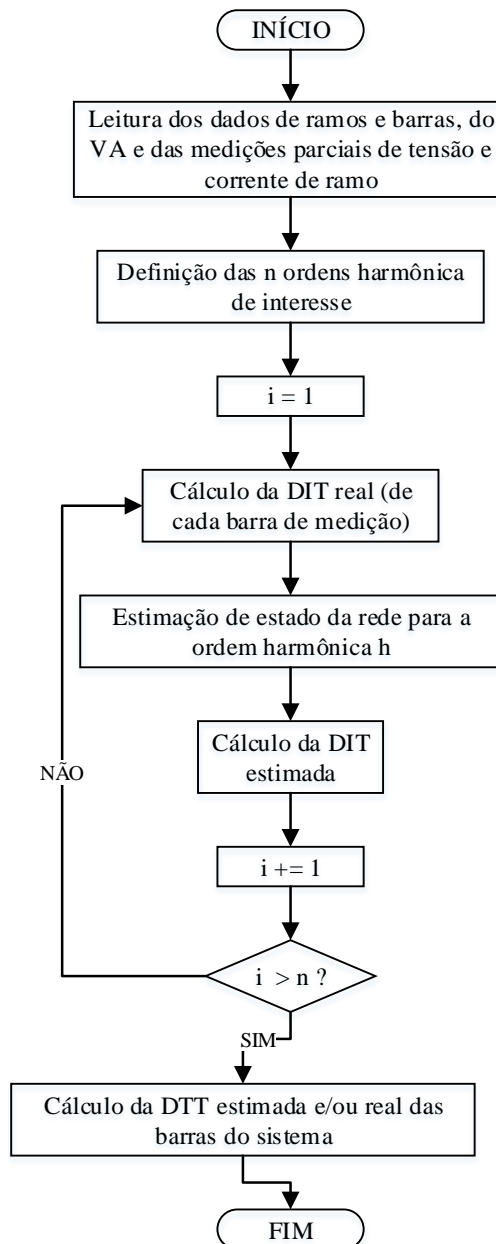


Figura 12 - Fluxograma do processo de estimação das distorções harmônicas via algoritmos evolutivos

### ESTUDOS DE CASOS

#### 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma vez estabelecidos os princípios que norteiam o processo de alocação e estimação, o presente capítulo tem por objetivo avaliar o desempenho das estratégias consideradas para fins dessa pesquisa.

Para tanto, são realizados estudos investigativos para um sistema elétrico típico, para o caso o conhecido complexo identificado por arranjo IEEE de 14 barras. Para este sistema são realizadas injeções de correntes harmônicas para barramentos pré-definidos como possuidores de cargas não lineares, as quais são empregadas para o estabelecimento, via fluxo harmônico, das informações consideradas como referências para os trabalhos comparativos.

Contando, pois, com tais informações procede-se, na sequência, a instalação de medidores em pontos genericamente selecionados e, com base nas informações advindas de seus registros de tensões e correntes harmônicas, são aplicados os métodos selecionados para a estimação das grandezas correspondentes para os barramentos e linhas outras que aquelas monitoradas. Correlacionando-se os resultados assim obtidos com aqueles estabelecidos como referência é feita uma análise da eficácia do método para EEH.

#### 4.2 SISTEMA ELÉTRICO UTILIZADO COMO TESTE

A metodologia de EEH empregada nessa dissertação de mestrado foi avaliada empregando-se o sistema do IEEE de 14 barras mostrado na Figura 13. O arranjo se encontra constituído por geradores, compensadores síncronos, cargas lineares, cargas não-lineares, linhas de transmissão, transformadores e banco de capacitores. Os parâmetros representativos desses componentes são exibidos nas Tabelas XI - XIV. Para os transformadores, considerou-se tapes unitário.

Tabela XI - Dados das barras na base de 100 MVA

Barra	Tensão		Carga		Geração		Shunt (pu)
	Módulo (pu)	Ângulo (graus)	MW	Mvar	MW	Mvar	
1	1,060	0,000	-	-	232,4	-16,9	-
2	1,045	-4,983	21,7	12,7	40	42,4	-
3	1,010	-12,725	94,2	19,0	-	23,4	-
4	1,018	-10,313	47,8	-3,9	-	-	-
5	1,020	-8,774	7,6	1,6	-	-	-
6	1,070	-14,221	11,2	7,5	-	12,2	-
7	1,062	-13,360	-	-	-	-	-
8	1,090	-13,360	-	-	-	17,4	-
9	1,056	-14,939	29,5	16,6	-	-	0,19
10	1,051	-15,097	9,0	5,8	-	-	-
11	1,057	-14,791	3,5	1,8	-	-	-
12	1,055	-15,076	6,1	1,6	-	-	-
13	1,050	-15,156	13,5	5,8	-	-	-
14	1,036	-16,034	14,9	5,0	-	-	-

Tabela XII - Dados dos ramos na base de 100 MVA

Ramo	De	Para	R (pu)	X (pu)	B (pu)
1	1	2	0,01938	0,05917	0,0528
2	1	5	0,05403	0,22304	0,0492
3	2	3	0,04699	0,19797	0,0438
4	2	4	0,05811	0,17632	0,0340
5	2	5	0,05695	0,17388	0,0346
6	3	4	0,06701	0,17103	-
7	4	5	0,01335	0,04211	-
8	4	7	-	0,20912	-
9	4	9	-	0,55618	-
10	5	6	-	0,25202	-
11	6	11	0,09498	0,19890	-
12	6	12	0,12291	0,25581	-
13	6	13	0,06615	0,13027	-
14	7	8	-	0,17615	-
15	7	9	-	0,11001	-
16	9	10	0,03181	0,08450	-
17	9	14	0,12711	0,27038	-
18	10	11	0,08205	0,19207	-
19	12	13	0,22092	0,19988	-
20	13	14	0,17093	0,34802	-

Tabela XIII - Tensão de referência nas barras

Barra(s)	Tensão Base (kV)
1, 2, 3, 4 e 5	69
8	18
6, 7, 9, 10, 11, 12, 13 e 14	13,8



Para realização dos estudos de casos, foram inseridas fontes harmônicas em 6 barramentos, a saber: barras 3, 4, 9, 10, 13 e 14. No que tange às correntes harmônicas injetadas, estas foram com as seguintes ordens: 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup>, 13<sup>a</sup>, 17<sup>a</sup> e 19<sup>a</sup>. A Tabela XIV indica os locais e os valores das correntes harmônicas adotadas. Estas não se apresentam no sistema teste original e correspondem exatamente aquelas utilizadas no Capítulo 3 para produção das distorções de tensão da Tabela III e da Tabela IV - valores a serem adotados como referência (gabarito). É relevante destacar que os estudos de fluxo harmônico adotaram, para todas as barras, 1 pu para suas tensões fundamentais. Também, os barramentos contendo cargas e injeções de harmônicos foram considerados como fontes ideais de correntes e para os demais as cargas foram retiradas.

Tabela XIV - Correntes harmônicas injetadas

	Barra	5h	7h	11h	13h	17h	19h
3	Módulo (A)	12,3580	6,1790	2,4459	4,9561	1,2229	1,2229
	Ângulo (°)	20,24	237,15	347,59	149,70	149,70	144,17
4	Módulo (A)	12,3580	6,1790	2,4459	4,9561	1,2229	1,2229
	Ângulo (°)	184,30	232,62	47,18	153,85	153,85	123,14
9	Módulo (A)	26,0677	13,1947	5,1492	10,2983	2,5746	2,5746
	Ângulo (°)	82,73	113,64	247,13	186,09	186,09	79,17
10	Módulo (A)	9,0110	4,5055	1,9309	3,5400	0,9655	0,9655
	Ângulo (°)	142,24	313,09	197,14	241,61	241,61	274,23
13	Módulo (A)	10,2983	5,1492	1,9309	4,1837	0,9655	0,9655
	Ângulo (°)	32,03	85,00	184,58	303,44	303,44	28,23
14	Módulo (A)	14,1602	7,0801	2,8964	5,7928	1,2873	1,2873
	Ângulo (°)	199,82	47,99	126,32	107,47	107,47	187,71

### 4.3 RESULTADOS PARA A ALOCAÇÃO DOS MEDIDORES

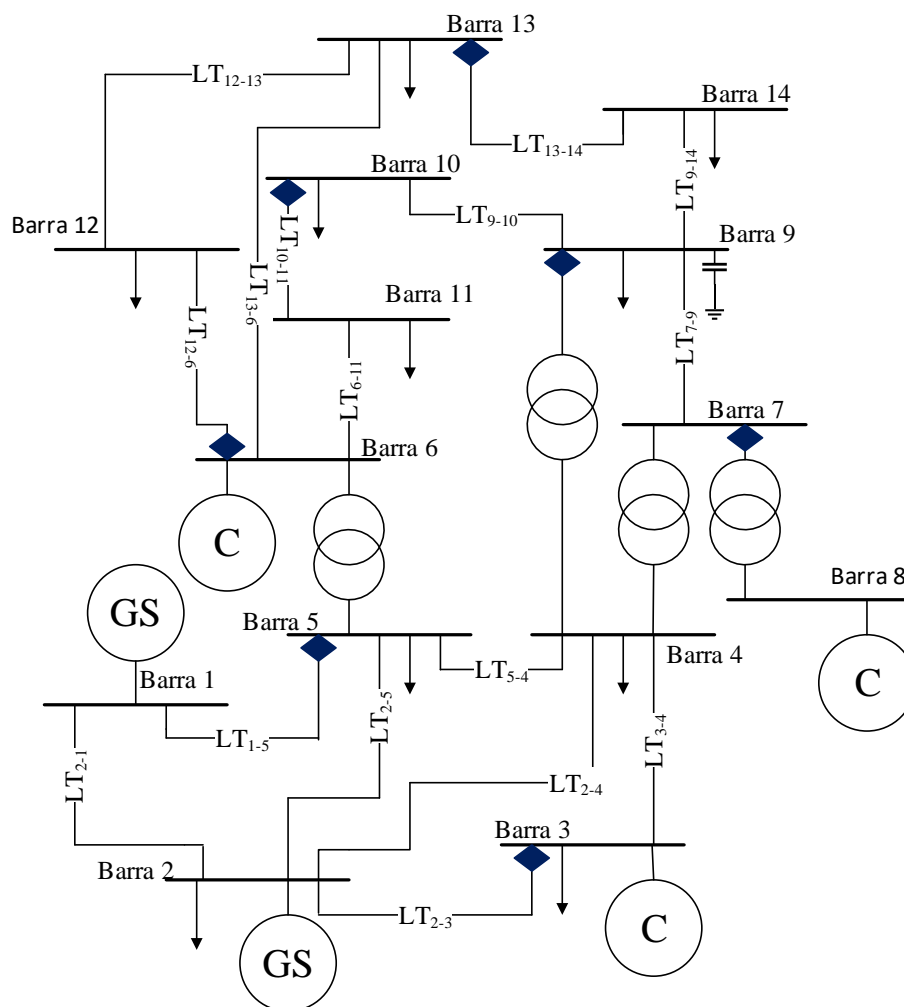
A alocação dos medidores foi realizada nos termos descritos na seção 3.4, não priorizando um ou outro barramento. Vale ressaltar que, em se tratando de problemas reais, é interessante que o usuário estime o custo de instalação, de modo a permitir que o AG busque uma alocação ótima para a instalação de equipamentos de medição, de forma a atender alguns quesitos impostos pela instalação (facilidade de conexão, disponibilidade de TCs e TPs, acessos, etc). Quanto a parametrização do AG, não houveram diferenças significativas entre os métodos de seleção por roleta e torneio, sendo os demais ajustes determinados da seguinte forma:

- Número de indivíduos da população igual a 100;
- Probabilidades de crossover e de mutação iguais a 0,80 e 0,20, respectivamente;

- Número de iterações igual a 300.

A Tabela XV exibe um dos resultados de alocação encontrados pelo AG, sendo instalados, nesse caso, um total de 7 medidores foram encontrados como sendo o número ótimo de equipamentos. Este valor se apresenta em total consonância com os resultados obtidos em [21], [87], [13] e [14], os quais utilizaram como sistema teste o mesmo aqui empregado. Esses medidores estão representados na forma de losangos na Figura 13. Diante do número de medidores assim definidos fica evidenciado que o sistema permite o monitoramento das tensões para 50% dos barramentos e de 35% das correntes nos ramos. Assim procedendo o sistema estará sendo completamente monitorado, visto que, por exemplo, uma vez medida a tensão na barra 13 e a corrente entre os ramos 13 e 14, pode-se prontamente calcular a tensão na barra 14. A observabilidade é pois garantida pelo vetor final exibido na

Tabela XVI, uma vez que nenhum dos seus elementos são nulos.



**Figura 13 - Sistema do IEEE de 14 barras**

**Tabela XV - Alocação dos medidores para o sistema de 14 barras**

Número do medidor	Tensão do barramento	Corrente de ramo	
		De	Para
1	3	3	2
2	5	5	1
3	6	6	12
4	7	7	8
5	9	9	4
6	10	10	11
7	13	13	14

**Tabela XVI - Vetor final para o sistema de 14 barras**

$v_1$	2
$v_2$	2
$v_3$	2
$v_4$	2
$v_5$	2
$v_6$	2
$v_7$	2
$v_8$	2
$v_9$	2
$v_{10}$	2
$v_{11}$	2
$v_{12}$	2
$v_{13}$	2
$v_{14}$	2
$i_{1-2}$	2
$i_{1-5}$	2
$i_{2-3}$	2
$i_{2-4}$	2
$i_{2-5}$	2
$i_{3-4}$	1
$i_{4-5}$	2
$i_{4-7}$	2
$i_{4-9}$	2
$i_{5-6}$	1
$i_{6-11}$	2
$i_{6-12}$	2
$i_{6-13}$	2
$i_{7-8}$	2
$i_{7-9}$	2
$i_{9-10}$	1
$i_{9-14}$	1
$i_{10-11}$	2
$i_{12-13}$	1
$i_{13-14}$	2

## 4.4 RESULTADOS PARA A EEH

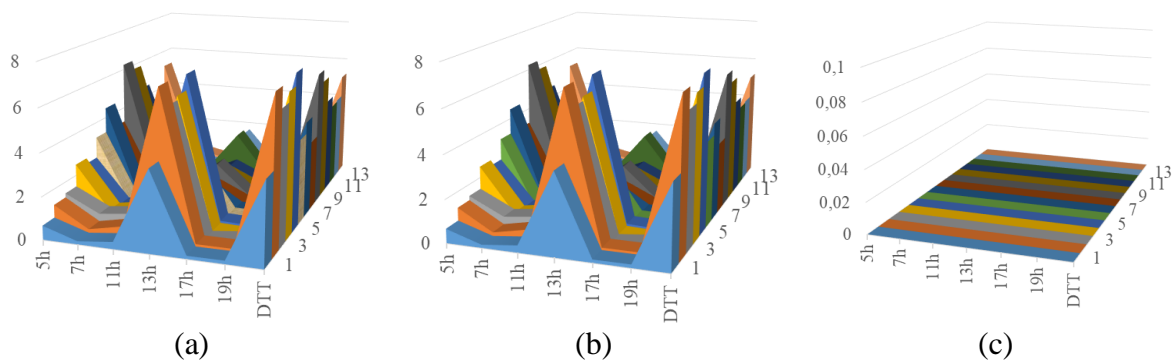
Dado o **VA** da Tabela XV, a partir dos conceitos explorados nessa dissertação, foram feitos estudos de casos objetivando obter a estimação das demais grandezas do sistema, particularmente das tensões harmônicas dos barramentos sem monitoramento. Conforme constatado pelo **VF** expresso na

Tabela XVI, o sistema em estudo é completamente observável, fato este que o qualifica ao processo de estimação via MMQ. Na sequência, faz-se a retiradas de medidores, estabelecendo, assim, condições de um sistema subdeterminado, sendo, pois, imperativo o uso dos algoritmos evolutivos para solucionar o problema da EEH.

### 4.4.1 Resultados de Estimação pelo MMQ

Como neste trabalho não foi considerada a existência de erros de medição, na solução do problema de estimação via MMQ é pressuposto que todos os desvios padrões sejam iguais a 1 e que não haja covariância entre os dados (**V** = matriz identidade de ordem 14). Dessa forma, a matriz **W** não terá influência na obtenção dos resultados de medição.

Os resultados de estimação são exibidos na Figura 14. Note que, se desconsiderado os erros de medição, a estimação via MMQ obtém resultados idênticos aos esperados (valores de referência advindos do fluxo harmônico do Capítulo 3).



**Figura 14 – Resultados para a EEH: (a) DIT e DTT estimadas, (b) DIT e DTT referenciais e (c) Erro de estimação**

Para os casos de sistemas subdeterminados, as variáveis de **x(h)** não estimadas, segundo avaliação do **VF**, deverão ser excluídas, assim como as colunas de **H(h)** associadas a essas grandezas. Desse modo, o MMQ torna-se novamente determinável e as soluções são obtidas nos pontos de observação. Também, podem ser aplicadas as técnicas de DVS.

#### 4.4.2 Resultados Estimação pelos Algoritmos Evolutivos

Inicialmente, objetivando uma análise para a validação dos algoritmos evolutivos, o mesmo é aplicado ao sistema adotado numa condição tal que o mesmo se encontra totalmente observável. Naturalmente, esta etapa se apresenta tão somente como um teste de desempenho para a verificação de consistência da estratégia. Uma vez ratificada esta situação, procede-se a utilização da metodologia para estudos de desempenho sob condições não observáveis.

Para atender aos propósitos acima, uma mesma população de 150 indivíduos é usada em todos os algoritmos, sendo que, naqueles em que se utiliza as estratégias evolutivas, devido ao fato de um único indivíduo pai gerar todos os descendentes de uma dada geração, é escolhido um único constituinte dessa população. Como critério de parada, foi definido a estagnação do erro da função objetivo em  $10^{-25}$  por, no mínimo, 50 gerações ou, também, para alguns algoritmos, o número máximo de gerações, visto que após esse período o ganho é pouco significativo.

Conforme já comentado, os indivíduos são compostos de módulo e ângulos para as correntes harmônicas injetadas. Desse modo, para descrição desses, será adotada a nomenclatura “abs” para se referir aos módulos e “ang” para os ângulos. Cabe ressaltar que os parâmetros dos algoritmos, que não forem agora citados, seguem as recomendações das referências bases do Capítulo 2.

Aplicando-se a técnica dos algoritmos evolutivos com estratégia evolutiva canônica determinou-se o número de indivíduos pais igual a 40 e de descendentes igual a 100. Ressalta-se que uma população maior não acrescentou ganhos significativos nos resultados de estimação. Os demais parâmetros foram definidos da seguinte forma:

- Passo de mutação inicial:  $\sigma_{abs} = 0,001$  e  $\sigma_{ang} = 0,005$ ;
- Constante  $n$  igual a 2;
- Número mínimo e máximo de iterações igual a 80000 e 110000, respectivamente.

Por sua vez, na estratégia evolutiva moderna, devido a sua rápida convergência, foi visto uma melhoria nos resultados com o aumento da população. Por tal motivo foram definidos: número de indivíduos pais igual 150 e; de descendentes igual 300. Os demais parâmetros foram determinados da seguinte forma:

- Passo de mutação inicial:  $\sigma_{abs} = 0,0001$  e  $\sigma_{ang} = 0,0005$ ;
- Constante  $n$  igual a 14, equivalente ao número de barras;
- Demais matrizes ou vetores são inicializados em zero;
- Número mínimo de iterações igual a 1000.

Quanto ao algoritmo de EDA, definiu-se os seguintes parâmetros:

- Fator de mutação local e global randômicos, sendo o primeiro entre 0 e 1 e o segundo entre 1 e 2;
- Probabilidade de recombinação:  $PC_{min}$  e  $PC_{max}$  iguais a 0,1 e 0,8;
- Constante  $K$  igual a 75 gerações e  $\delta$  igual a  $10^{-7}$ .
- Número de iterações mínima e máxima igual a 8000 e 15000, respectivamente.

Por sua vez, no SADE definiu-se um período de aprendizado igual a 300 e o número mínimo de iterações iguais a 10000.

Por fim, no SOA definiu-se o número de subpopulações igual a 3 e os demais parâmetros da seguinte forma:

- Número de subpopulações igual a 3;
- Constantes  $\omega$ ,  $\mu_{min}$  e  $\mu_{max}$ , na ordem, iguais a 0,9, 0,0111 e 0,97;
- Número mínimo de iterações igual a 1000.

Em particular, o algoritmo de estratégia evolutiva moderna, da forma como fora implementado nesse trabalho, se apresentou muito rápido na convergência de resultados, tendo se mostrado, todavia, insatisfatórios. Nesse sentido, como estratégia desse trabalho, fez-se o uso desse algoritmo para criação da população inicial do SADE, sendo essa fusão caracterizada nessa dissertação como algoritmo híbrido. Esta combinação, assim como o uso do EDA, até então, não fora identificada como métodos aplicados pelas referências consultadas, portanto, seus usos se mostram como contribuições efetivas dessa pesquisa e seus resultados demonstram melhor desempenho que os demais algoritmos já utilizados.

Quanto a lógica estabelecida para os estudos de casos, esta foi realizada como segue:

- Inicialmente, é estabelecida uma técnica de eliminação sequencial de medidores, a qual exclui os medidores de número 5, 7, 3 e 2;
- Para cada situação os algoritmos de computação evolutiva são avaliados, para cada ordem harmônica, num total de 30 vezes. A quantidade de resultados assim obtidos, por serem demasiados, foram fornecidos no apêndice desse documento. Com base no erro médio, o melhor, a média e o pior dentre os trinta apresentados foram selecionados para fins de apresentação e discussões que se seguem;
- A média dos erros absolutos da distorção harmônica total dos barramentos de cada algoritmo evolutivo testado se apresenta como critério adotado para fins da análise comparativa de desempenho dos algoritmos empregados para a EEH.

#### 4.4.2.1 Resultados para 7 medidores

O melhor, o pior e a média dos 30 resultados de EEH, seguidos dos respectivos erros absolutos entre os resultados esperados e aqueles advindos da estimação, obtidos pelo algoritmo com estratégia evolutiva canônica são exibidos nas tabelas XVII, XVIII, XIV, XX, XXI e XXII.

**Tabela XVII - Melhor resultado de EEH (em %) do algoritmo com EE canônica**

Barra	5h	7h	11h	13h	17h	19h	DTT
<b>1</b>	0,6712	0,1563	0,3295	3,8107	0,1605	0,1605	3,8931
<b>2</b>	1,2823	0,3276	0,6274	7,0582	0,2690	0,2690	7,2186
<b>3</b>	1,3684	0,6782	0,7057	5,9929	0,0863	0,0863	6,2258
<b>4</b>	2,4021	0,4939	0,9189	6,1445	0,0744	0,0744	6,6801
<b>5</b>	2,2747	0,3884	0,7184	6,9712	0,1806	0,1806	7,3827
<b>6</b>	3,2658	0,1587	0,1690	2,4195	0,1044	0,1044	4,0736
<b>7</b>	4,4938	0,2523	0,1273	1,0385	0,0315	0,0315	4,6211
<b>8</b>	3,2874	0,1846	0,0930	0,7596	0,0229	0,0229	3,3805
<b>9</b>	6,1617	0,4625	0,1408	1,4973	0,0146	0,0146	6,3595
<b>10</b>	5,7948	0,4081	0,0860	0,8014	0,0163	0,0163	5,8648
<b>11</b>	4,5482	0,2851	0,0416	0,7810	0,0579	0,0579	4,6244
<b>12</b>	3,5033	0,2082	0,1176	2,1603	0,1119	0,1119	4,1258
<b>13</b>	3,6945	0,2641	0,1153	1,9612	0,1104	0,1104	4,1956
<b>14</b>	5,1653	0,5299	0,0338	0,0160	0,0455	0,0455	5,1930

**Tabela XVIII – Erro absoluto de EEH (em %) do melhor resultado do algoritmo com EE canônica**

<b>Barra</b>	<b>5h</b>	<b>7h</b>	<b>11h</b>	<b>13h</b>	<b>17h</b>	<b>19h</b>	<b>DTT</b>
<b>1</b>	0,00228	0,00281	0,01482	0,00197	0,00004	0,01125	0,00420
<b>2</b>	0,01181	0,00134	0,03546	0,01012	0,00003	0,00331	0,01104
<b>3</b>	0,09523	0,00048	0,16447	0,00129	0,00024	0,17940	0,04855
<b>4</b>	0,11955	0,00899	0,17107	0,05685	0,01059	0,04839	0,07395
<b>5</b>	0,02273	0,00212	0,00568	0,02075	0,00042	0,06564	0,02724
<b>6</b>	0,00975	0,00349	0,01168	0,01153	0,01051	0,04760	0,01522
<b>7</b>	0,02625	0,01458	0,00046	0,02801	0,00046	0,02735	0,02001
<b>8</b>	0,01921	0,01067	0,00024	0,02062	0,00049	0,01985	0,01461
<b>9</b>	0,08020	0,01069	0,03925	0,03853	0,00278	0,00103	0,06911
<b>10</b>	0,01692	0,02231	0,06743	0,02301	0,01042	0,02965	0,01665
<b>11</b>	0,00923	0,01289	0,00611	0,00713	0,00025	0,01267	0,00724
<b>12</b>	0,00158	0,00206	0,01885	0,02946	0,01604	0,05595	0,01756
<b>13</b>	0,00093	0,00102	0,00104	0,04765	0,01300	0,05380	0,02438
<b>14</b>	0,00520	0,00101	0,14907	0,25838	0,01856	0,02326	0,00551

**Tabela XIX - Pior resultado de EEH (em %) do algoritmo com EE canônica**

<b>Barra</b>	<b>5h</b>	<b>7h</b>	<b>11h</b>	<b>13h</b>	<b>17h</b>	<b>19h</b>	<b>DTT</b>
<b>1</b>	0,6424	0,1547	0,3329	6,8865	0,0980	0,0980	6,9276
<b>2</b>	1,2119	0,3168	0,6303	15,0000	0,1512	0,1512	15,0669
<b>3</b>	1,2896	0,4009	0,7195	9,0851	0,1582	0,1582	9,2158
<b>4</b>	2,3247	0,6953	0,9450	10,0370	0,1056	0,1056	10,3704
<b>5</b>	2,3303	0,3808	0,7188	15,0000	0,1601	0,1601	15,2034
<b>6</b>	3,2598	0,1740	0,1649	8,9224	0,0811	0,0811	9,5030
<b>7</b>	4,5130	0,2296	0,0719	11,1336	0,0014	0,0014	12,0159
<b>8</b>	3,3015	0,1679	0,0382	11,8873	0,0099	0,0099	12,3384
<b>9</b>	6,1199	0,4036	0,0993	14,9597	0,0133	0,0133	16,1685
<b>10</b>	5,8116	0,4324	0,2224	3,8202	0,0043	0,0043	6,9718
<b>11</b>	4,5573	0,3027	0,0645	15,0000	0,0438	0,0438	15,6802
<b>12</b>	3,4850	0,2151	0,1138	8,5618	0,0982	0,0982	9,2481
<b>13</b>	3,6620	0,2390	0,1159	17,0456	0,1118	0,1118	17,4372
<b>14</b>	5,0447	0,4719	0,0056	15,0000	0,0414	0,0414	15,8327



**Tabela XX - Erro absoluto de EEH (em %) do pior resultado do algoritmo com EE canônica**

<b>Barra</b>	<b>5h</b>	<b>7h</b>	<b>11h</b>	<b>13h</b>	<b>17h</b>	<b>19h</b>	<b>DTT</b>
<b>1</b>	0,03104	0,00448	0,0114	3,07388	0,06239	0,07368	3,03025
<b>2</b>	0,0585	0,00947	0,03251	7,93169	0,11791	0,12119	7,8373
<b>3</b>	0,17398	0,27679	0,15071	3,09094	0,07174	0,10742	2,9415
<b>4</b>	0,19697	0,21042	0,19712	3,83566	0,0206	0,07958	3,61627
<b>5</b>	0,07832	0,00973	0,00521	8,04954	0,0201	0,04512	7,84794
<b>6</b>	0,00383	0,01189	0,0158	6,51448	0,01281	0,02429	5,44457
<b>7</b>	0,04551	0,0082	0,05493	10,067	0,03064	0,00283	7,4148
<b>8</b>	0,03324	0,006	0,0546	11,1071	0,01354	0,0068	8,97252
<b>9</b>	0,12204	0,04819	0,08079	13,501	0,00407	0,00025	9,73987
<b>10</b>	0,03376	0,00198	0,06899	3,04189	0,02239	0,04161	1,12361
<b>11</b>	0,01837	0,00477	0,02895	14,2119	0,01439	0,00147	11,063
<b>12</b>	0,01672	0,00487	0,02267	6,43096	0,00231	0,04222	5,1399
<b>13</b>	0,0316	0,02415	0,00169	15,132	0,01436	0,05516	13,266
<b>14</b>	0,11544	0,05699	0,17727	14,7256	0,02265	0,02734	10,6342

**Tabela XXI – Média dos 30 resultados de EEH (em %) do algoritmo com EE canônica**

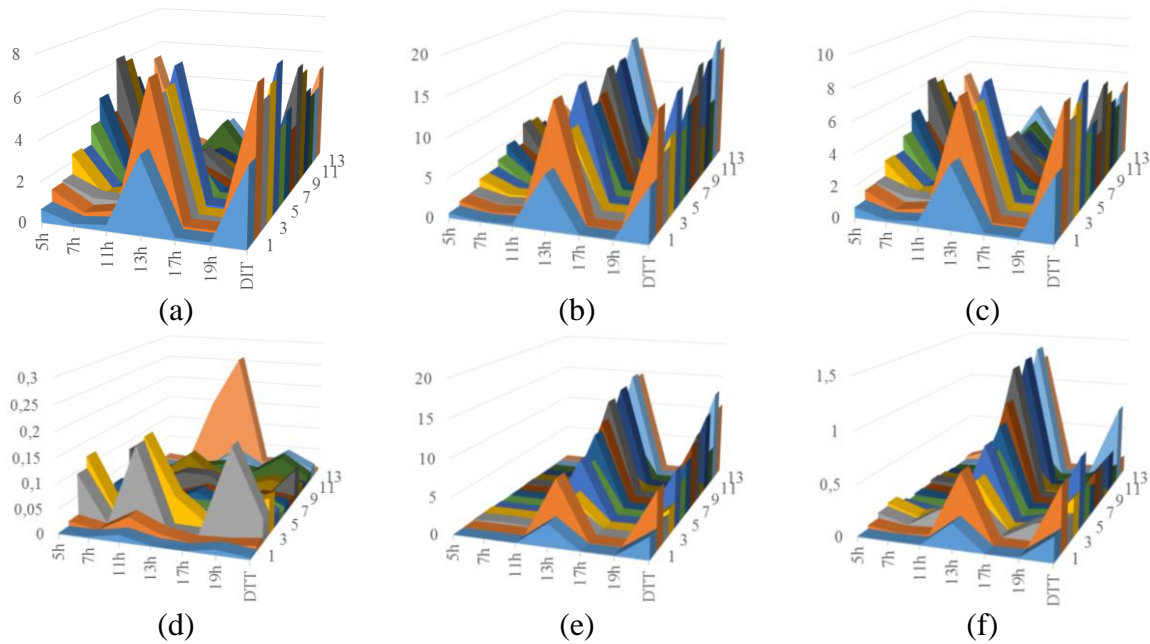
<b>Barra</b>	<b>5h</b>	<b>7h</b>	<b>11h</b>	<b>13h</b>	<b>17h</b>	<b>19h</b>	<b>DTT</b>
<b>1</b>	0,6820	0,1575	0,3339	4,0639	0,1563	0,1563	4,1432
<b>2</b>	1,3129	0,3209	0,6360	7,7264	0,2616	0,2616	7,8782
<b>3</b>	1,3676	0,6661	0,6772	6,3013	0,0897	0,0897	6,5189
<b>4</b>	2,3929	0,4562	0,8516	6,6640	0,0764	0,0764	7,1470
<b>5</b>	2,2988	0,3872	0,7273	7,6887	0,1802	0,1802	8,0712
<b>6</b>	3,2651	0,1558	0,1572	3,0005	0,1015	0,1015	4,4422
<b>7</b>	4,4973	0,2378	0,0180	1,8939	0,0253	0,0253	4,8858
<b>8</b>	3,2900	0,1739	0,0341	1,7974	0,0180	0,0180	3,7533
<b>9</b>	6,1886	0,4953	0,1934	2,7930	0,0165	0,0165	6,8106
<b>10</b>	5,7413	0,4292	0,1665	1,1533	0,0107	0,0107	5,8740
<b>11</b>	4,5208	0,2938	0,0677	2,1480	0,0529	0,0529	5,0147
<b>12</b>	3,4953	0,1856	0,1059	2,4770	0,1100	0,1100	4,2921
<b>13</b>	3,6847	0,2178	0,0941	3,3227	0,1119	0,1119	4,9698
<b>14</b>	5,1242	0,3873	0,0721	1,5506	0,0433	0,0433	5,3685

**Tabela XXII - Erro absoluto da média dos 30 resultados de EEH (em %) determinados pelo algoritmo com EE canônica**

<b>Barra</b>	<b>5h</b>	<b>7h</b>	<b>11h</b>	<b>13h</b>	<b>17h</b>	<b>19h</b>	<b>DTT</b>
<b>1</b>	0,6820	0,1575	0,3339	4,0639	0,1563	0,1563	4,1432
<b>2</b>	1,3129	0,3209	0,6360	7,7264	0,2616	0,2616	7,8782
<b>3</b>	1,3676	0,6661	0,6772	6,3013	0,0897	0,0897	6,5189
<b>4</b>	2,3929	0,4562	0,8516	6,6640	0,0764	0,0764	7,1470
<b>5</b>	2,2988	0,3872	0,7273	7,6887	0,1802	0,1802	8,0712
<b>6</b>	3,2651	0,1558	0,1572	3,0005	0,1015	0,1015	4,4422
<b>7</b>	4,4973	0,2378	0,0180	1,8939	0,0253	0,0253	4,8858
<b>8</b>	3,2900	0,1739	0,0341	1,7974	0,0180	0,0180	3,7533
<b>9</b>	6,1886	0,4953	0,1934	2,7930	0,0165	0,0165	6,8106
<b>10</b>	5,7413	0,4292	0,1665	1,1533	0,0107	0,0107	5,8740
<b>11</b>	4,5208	0,2938	0,0677	2,1480	0,0529	0,0529	5,0147
<b>12</b>	3,4953	0,1856	0,1059	2,4770	0,1100	0,1100	4,2921
<b>13</b>	3,6847	0,2178	0,0941	3,3227	0,1119	0,1119	4,9698
<b>14</b>	5,1242	0,3873	0,0721	1,5506	0,0433	0,0433	5,3685

Observa-se que o melhor resultado de EEH exibido na Tabela XVII se mostra com grande grau de aderência aos desempenhos tomados por referência. Os erros de estimação são fornecidos na Tabela XVIII. O bom desempenho do algoritmo da estratégia evolutiva canônica não foi repetido para todas as simulações realizadas. Nota-se, pela Tabela XIX que, para o pior caso, a tensão de 13ª ordem harmônica no barramento 13 é maior do que 15%, sendo que valores acima desse patamar são altamente penalizados na função objetivo. Esse fato gerou erros consideráveis, os quais se apresentaram em outros barramentos, conforme constato na Tabela XX, especialmente para as ordens harmônicas mais significativas, como a 5ª e 13ª. Com uma certa atenuação, de acordo com a Tabela XXI e a Tabela XXII, verifica-se que a inconsistência dos resultados de EEH se repetiu na média dos resultados.

Esses resultados podem ser melhor compreendidos pelos gráficos tridimensionais da Figura 14 os quais correlacionam os melhores, os piores e as médias dos resultados para as tensões harmônicas fornecidas e seus respectivos erros percentuais em relação aos valores de referência.



**Figura 15 – Resultados do algoritmo com estratégia evolutiva canônica (7 medidores) para as tensões harmônicas para:**

**Magnitudes: (a) melhor, (b) pior e (c) médio**

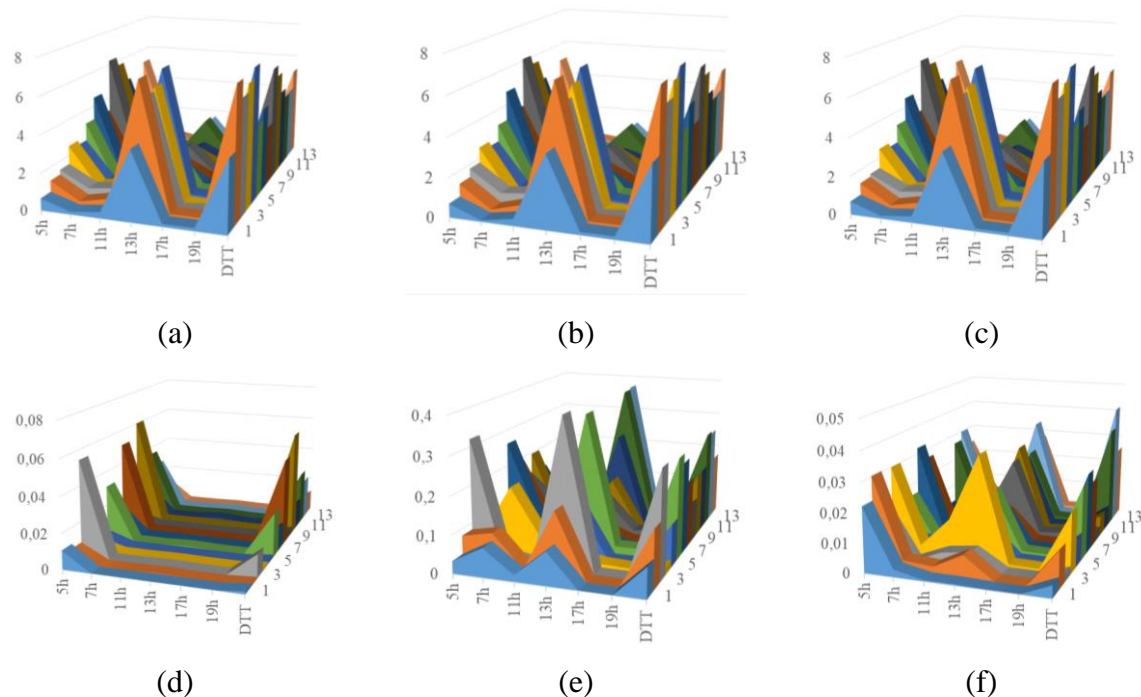
**Erros: (d) melhor, (e) pior e (f) médio**

Para os demais algoritmos testados nessa dissertação, cabe ressaltar que os melhores, piores e a média dos 30 resultados de EEH foram igualmente sistematizados em tabelas conforme as apresentadas anteriormente. Todavia, é evidente o grande volume de resultados obtidos e sua anexação no corpo do texto desta dissertação o estenderia em demasia. Por esse motivo os mesmos são apresentados apenas na síntese gráfica.

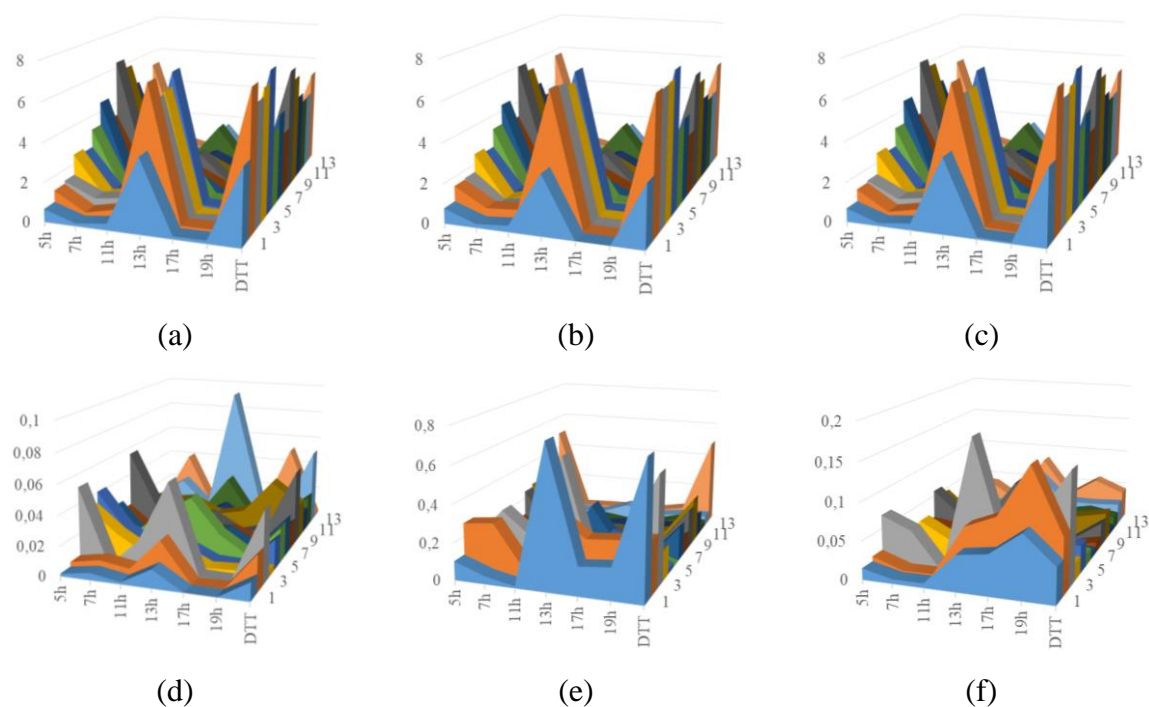
A Figura 16 mostra que o algoritmo híbrido apresenta resultados bastante consistentes, sendo o pior erro absoluto de tensão harmônica estimada menor do que 0,4% e com o erro médio associado as médias das tensões harmônicas estimadas em até 0,05%.

Os resultados de EEH usando-se do EDA também se apresentaram satisfatórios, conforme ilustra os gráficos das figuras Figura 17 e Figura 18. Nota-se que, nos piores casos, no EDA o maior erro absoluto encontrado foi igual a 0,75 no barramento 1 na 13ª harmônica. Contudo, a média dos erros associados a estimação nos distintos barramentos se apresenta em patamares próximos aos alcançados na avaliação dos erros do melhor resultado, indicando o bom desempenho dos mesmos.

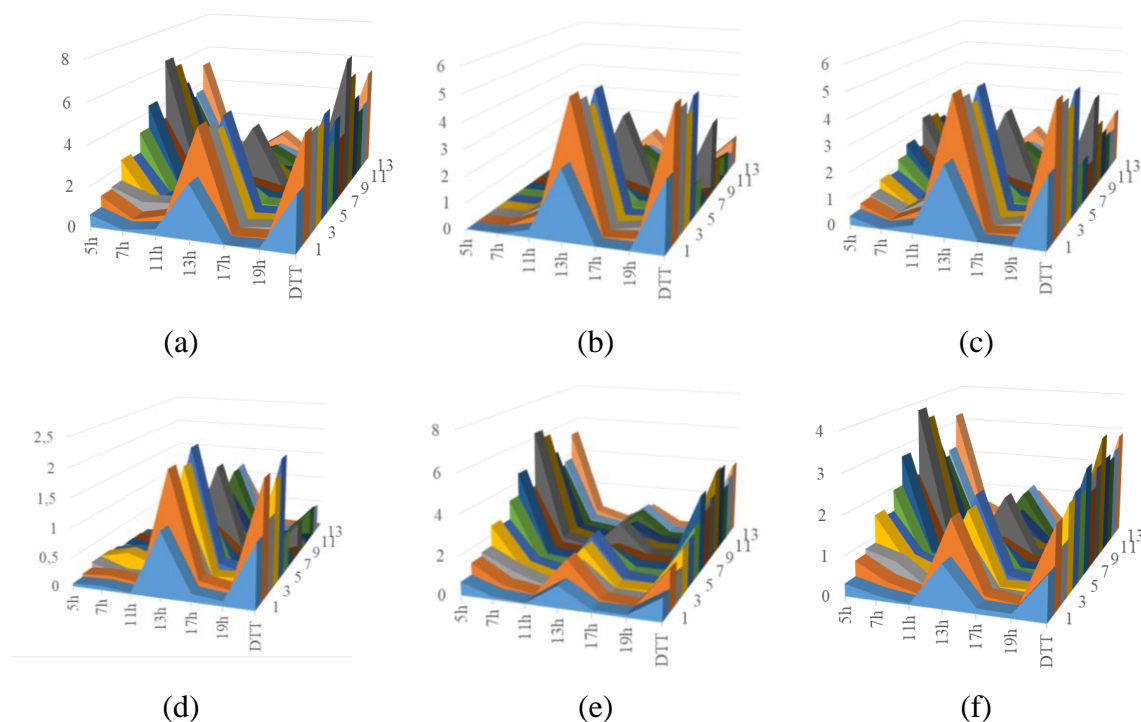
Por fim, o algoritmo SOA apresentou resultados bastante discrepantes em relação aos esperados, conforme evidencia o gráfico da Figura 18. Desse modo, esse algoritmo não será analisado nas condições do sistema subdeterminado.



**Figura 16 – Resultados do algoritmo híbrido (7 medidores) para as tensões harmônicas para:**  
**Magnitudes: (a) melhor, (b) pior e (c) médio**  
**Erros: (d) melhor, (e) pior e (f) médio**

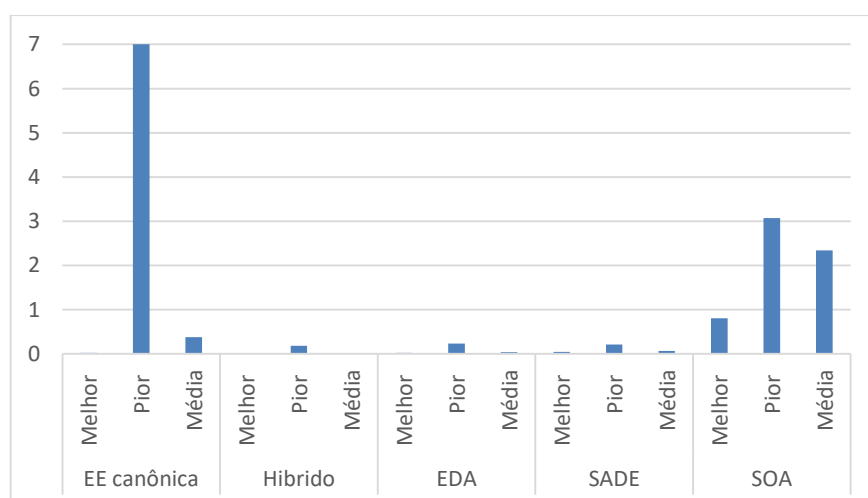


**Figura 17 – Resultados do algoritmo EDA (7 medidores) para as tensões harmônicas para:**  
**Magnitudes: (a) melhor, (b) pior e (c) médio**  
**Erros: (d) melhor, (e) pior e (f) médio**



**Figura 18 – Resultados do algoritmo SOA (7 medidores) para as tensões harmônicas para:**  
**Magnitudes: (a) melhor, (b) pior e (c) médio**  
**Erros: (d) melhor, (e) pior e (f) médio**

Sintetizando os resultados anteriores, os resultados para os algoritmos foram comparados usando-se como parâmetro a média dos erros absolutos de estimação de todos os barramentos constituintes do sistema, como indica a Figura 19. Observa-se que o algoritmo SOA apresenta com os maiores erros enquanto que o algoritmo com EE canônica se mostra caótico apenas para a pior situação.



**Figura 19 – Síntese da análise comparativa (usando 7 medidores) dos desempenhos dos algoritmos através da média dos resultados de EEH para todos os barramentos do sistema**

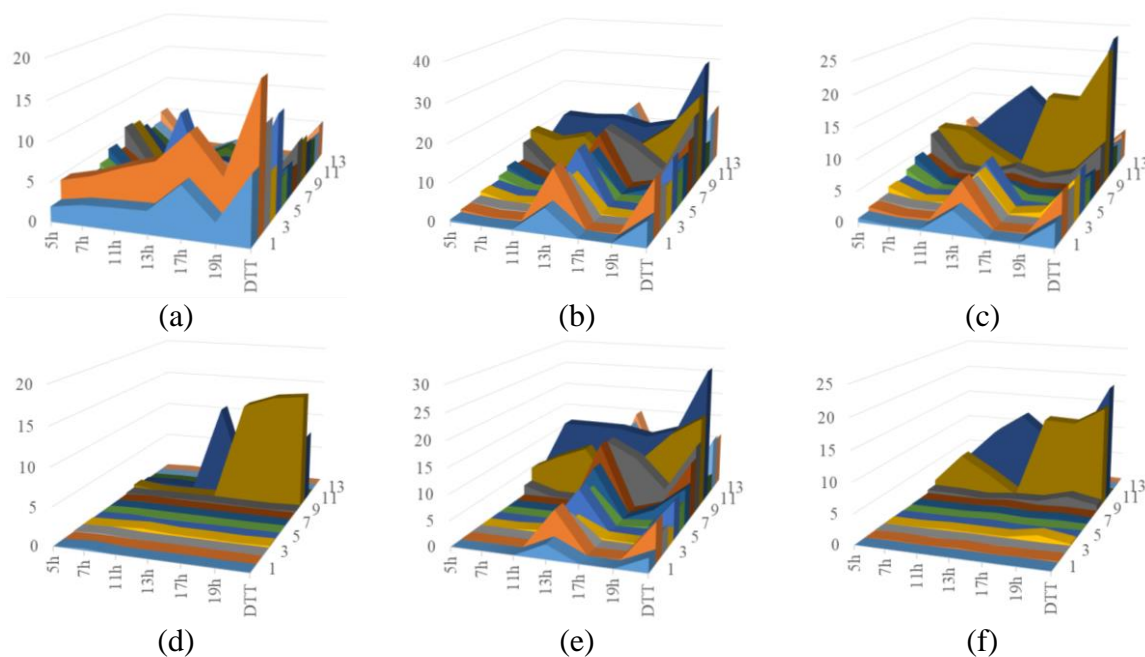
#### 4.4.2.2 Sistema com 5 medidores

Na situação estabelecida com 5 medidores há medições das tensões de 36% dos barramentos e das correntes de 25% dos ramos e, assim, os barramentos 4, 9, 10 e 11 deixam de ser monitorados. Diante desta situação, conforme ilustra o gráfico da Figura 20, o algoritmo de mutação canônica se mostrou com grandes erros de estimação nos pontos sem monitoramento. Observa-se que tal fato se deve a convergência dos resultados em mínimos locais, os quais são caracterizados pelos altos níveis de tensões harmônicas (maiores do que 10 %) apresentados nos pontos de indeterminação do sistema.

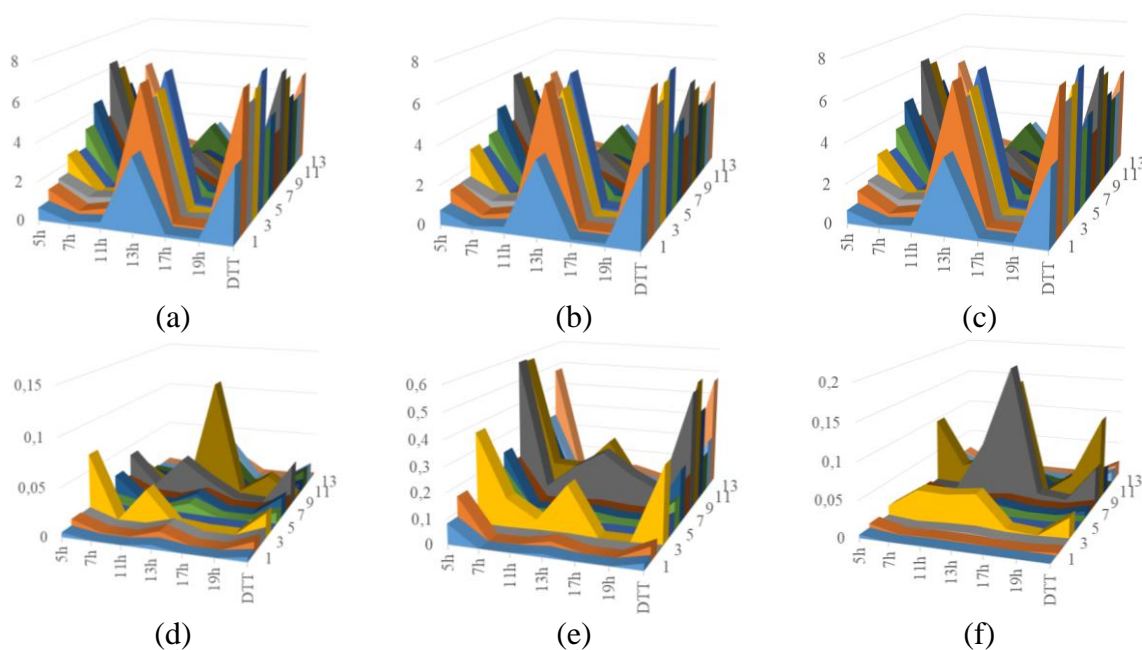
Muito embora esses resultados de estimação do algoritmo com estratégia evolutiva canônica possam colocar em questionamento a aplicação dos procedimentos aqui postos, é importante ressaltar que esse algoritmo já se apresentava com fragilidades mesmo para a situação com 7 medidores. Por esse motivo, esta estratégia não é empregada para os estudos que se seguem.

O algoritmo híbrido se apresentou com resultados bastantes condizentes com o esperado, conforme mostra a Figura 21. Os erros absolutos associados com o melhor e a média dos resultados de estimação tensões harmônicas foi menor do que 0,15 %. Na avaliação do pior resultado, o maior erro encontrado foi de 0,58 % na tensão 5º harmônico no barramento 9, caracterizando um valor menor do que os alcançados nos algoritmos de mutação canônica.

De um modo geral, o algoritmo EDA apresentou bons resultados de estimação, segundo ilustrado na Figura 22, muito embora seu desempenho tenha se mostrado inferior ao anterior. Em contrapartida, observa-se que o melhor resultado e a média obtiveram boas correspondências, sendo o maior erro em torno de 0,30.

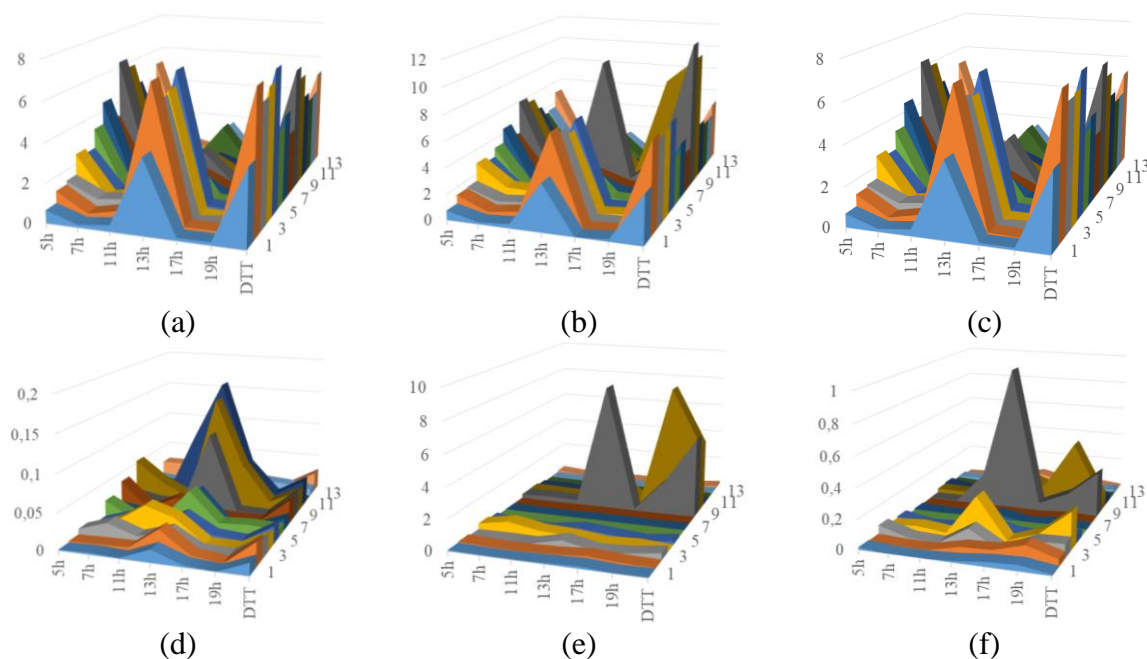


**Figura 20 – Resultados do algoritmo com estratégia evolutiva canônica (5 medidores) para as tensões harmônicas para:**  
**Magnitudes: (a) melhor, (b) pior e (c) médio**  
**Erros: (d) melhor, (e) pior e (f) médio**



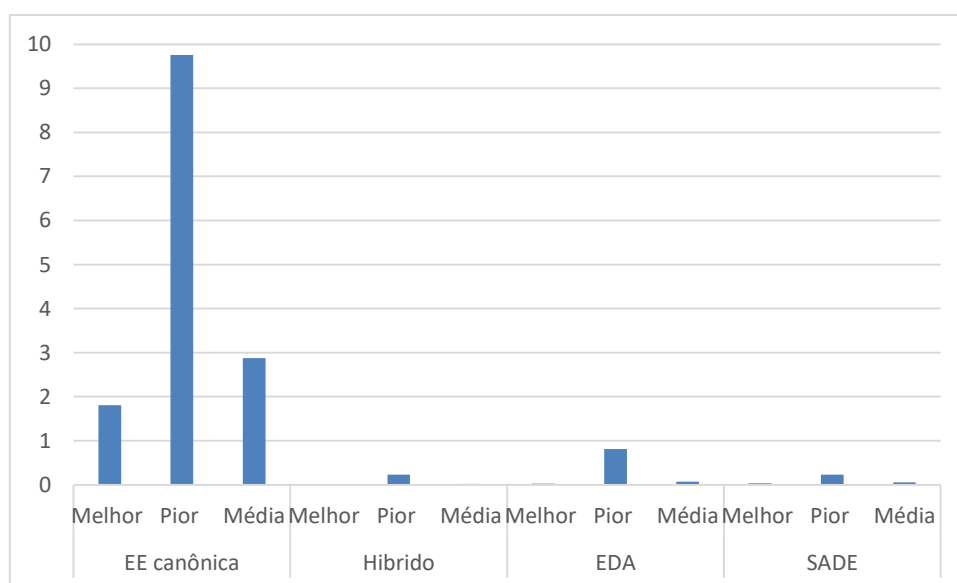
**Figura 21 – Resultados do algoritmo híbrido (5 medidores) para as tensões harmônicas para:**  
**Magnitudes: (a) melhor, (b) pior e (c) médio**  
**Erros: (d) melhor, (e) pior e (f) médio**





**Figura 22 – Resultados do algoritmo EDA (5 medidores) para as tensões harmônicas para:**  
**Magnitudes: (a) melhor, (b) pior e (c) médio**  
**Erros: (d) melhor, (e) pior e (f) médio**

Novamente, a Figura 23 sintetiza as médias dos erros para os diversos algoritmos utilizados. Consta-se que o algoritmo de EE canônica não apresentou um bom desempenho, enquanto que os outros se mostraram bastantes eficazes para esse número de medidores.



**Figura 23 – Síntese da análise comparativa (usando 5 medidores) dos desempenhos dos algoritmos através da média dos resultados de EEH para todos os barramentos do sistema**

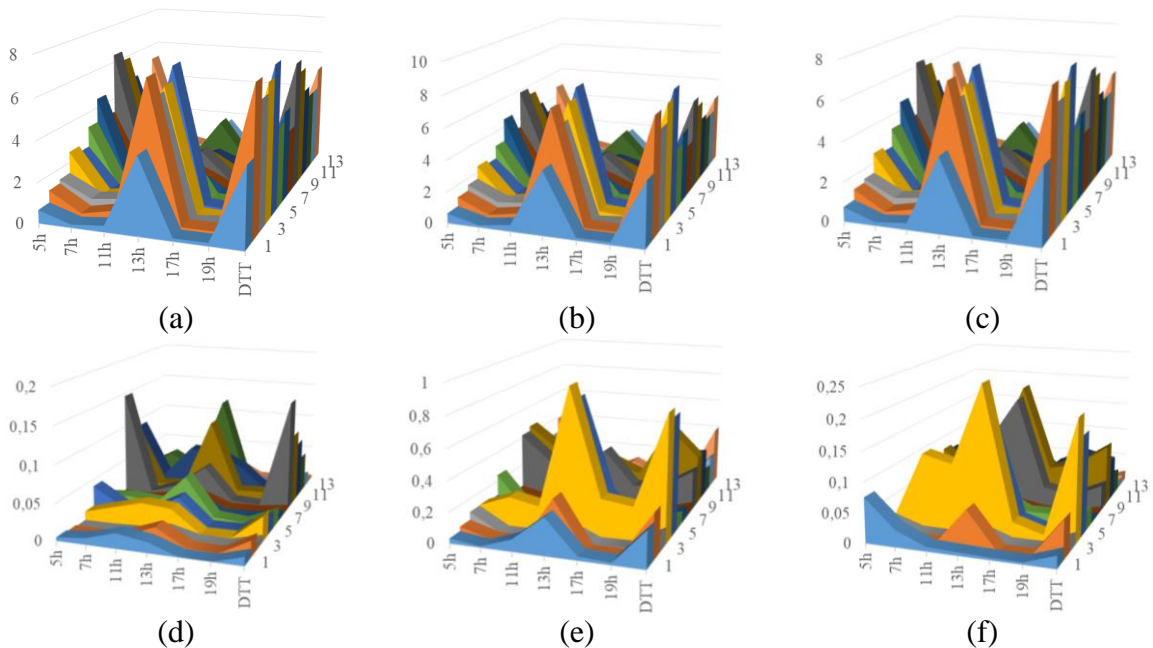


#### 4.4.2.3 Sistema com 3 medidores

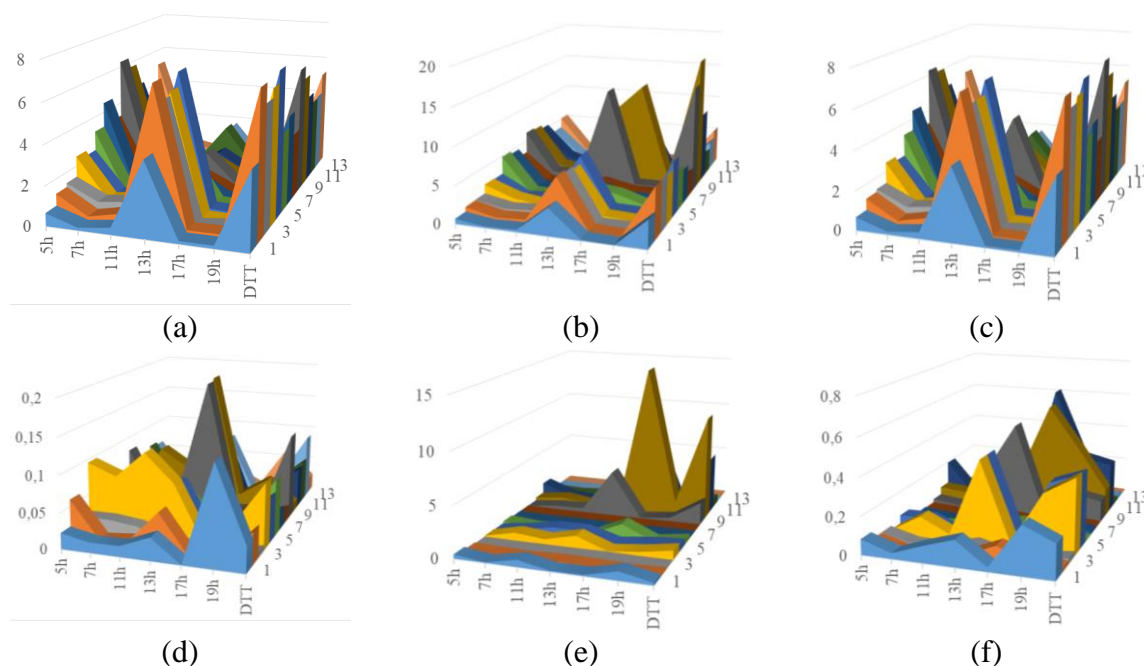
Por fim, foi analisada a situação com 3 medidores, resultando em 8 barramentos não monitorados, sendo eles: 1, 4, 5, 6, 9, 10, 11 e 12.

Para essa quantidade de medidores, o algoritmo híbrido, como indica a Figura 26, apresentou o melhor desempenho, com erros médios inferiores a 0,21%. Para o pior caso, foram atingidos erros absolutos de até 1%.

Por sua vez, o algoritmo EDA que já sinalizava fragilidades no caso de 5 medidores, evidenciou grandes erros de estimação, conforme mostrado na Figura 25. O pior erro atingiu cerca de 14% na barra 10 para a 7ª ordem harmônica. Na média dos 30 resultados, foram constatados erros maiores que 0,35% nas barras 9, 10 e 11. Para esta última chegou-se a erros de até 1%.

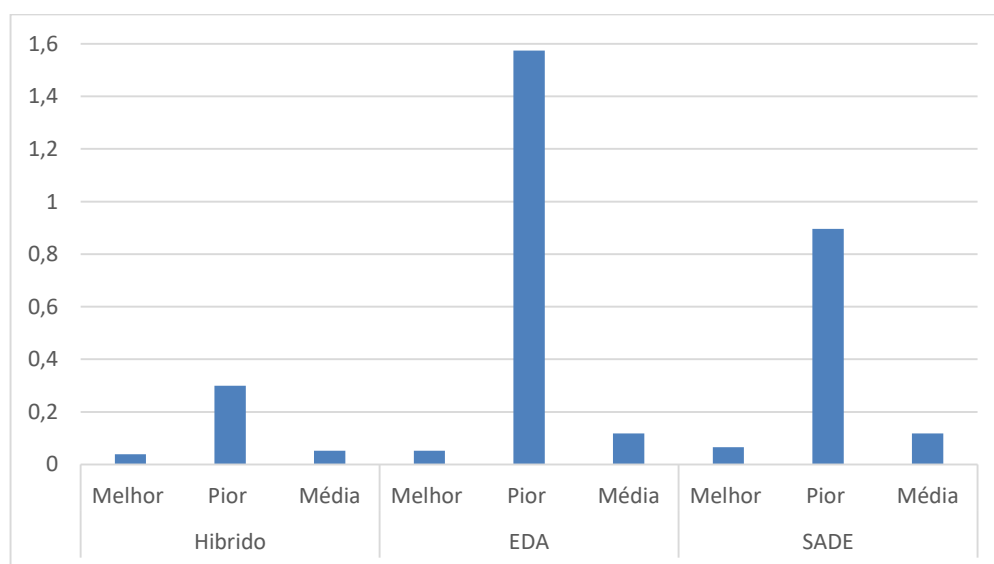


**Figura 24 - Resultados do algoritmo híbrido (3 medidores) para as tensões harmônicas para:**  
**Magnitudes: (a) melhor, (b) pior e (c) médio**  
**Erros: (d) melhor, (e) pior e (f) médio**



**Figura 25 - Resultados do algoritmo EDA (3 medidores) para as tensões harmônicas para:**  
**Magnitudes: (a) melhor, (b) pior e (c) médio**  
**Erros: (d) melhor, (e) pior e (f) médio**

Uma pronta correlação entre os desempenhos dos métodos pode ser feita por meio da Figura 26. Como já ressaltado, o algoritmo híbrido apresentou o melhor resultado.



**Figura 26 - Síntese da análise comparativa (usando 3 medidores) dos desempenhos dos algoritmos através da média dos resultados de EEH para todos os barramentos do sistema**

De acordo com os resultados apresentados para os 3 medidores, os dois algoritmos utilizados apresentaram erros de estimação mais expressivos. Diante desta conjuntura não foram realizados outros estudos associados com maiores reduções de medidores.

Por fim, diante dos resultados obtidos, pode-se constatar que o algoritmo híbrido mostrou o melhor desempenho para todas as situações analisadas. Portanto, dentro do universo de investigações desta pesquisa, o mesmo se mostra mais atrativo para aplicação nos problemas de EEH. Quanto ao algoritmo de EDA, vale ressaltar que o mesmo também apresentou boa aderência nos resultados médios, contudo, em algumas situações, esse ficou preso em mínimos locais, os quais podem ser identificados no pior caso. Finalmente, o algoritmo de estratégia evolutiva canônica não se mostrou eficaz na solução de sistemas subdeterminados. Quanto ao SOA este se mostrou ineficaz até mesmo na condição de sistema determinado.

### CONCLUSÕES

Consonante com a questão do crescente aumento dos níveis de distorções harmônicas presentes nas redes de distribuição e transmissão e a existência da normalização estabelecida pelos agentes reguladores quanto aos limites para tais fenômenos, pesquisas voltadas para a otimização dos processos de monitoração dos indicadores de qualidade de grandes complexos elétricos têm despertado grandes interesses da comunidade científica. Inserido neste cenário, essa dissertação de mestrado, como esclarecido no texto, foi centrada do propósito de investigar métodos que venham a contribuir para este campo da engenharia, através da otimização dos recursos necessários com instrumentação, mão de obra e bancos de dados advindos dos registros dentre outros aspectos.

Dentro da grande área investigativa aqui contemplada, vale ressaltar que os desenvolvimentos atrelados com esta área se apresentam apoiados em dois grandes pilares. Um deles refere-se à questão da alocação ótima dos medidores dentro da rede elétrica, em que pese a localização física dos mesmos e os quantitativos envolvidos, e outro, o processo de estimação das grandezas propriamente ditas.

No que tange ao método de alocação dos medidores, os procedimentos aqui empregados foram embasados na topologia da rede, de modo tal que todo o processo de determinação do número e localização de medidores foi tratado como um problema de recobrimento, o qual é solucionado por meio de recursos oferecidos pelo algoritmo genético. Todavia, fica aqui pontuado que a especificidade deste assunto, também com carácter extremamente desafiador, não é o cerne deste trabalho, visto que as maiores investigações foram voltadas para o campo da estimação de estado dos níveis de distorções harmônicas, aqui definidos por EEH.

Em relação a esta última questão, as investigações foram direcionadas para duas vertentes. Uma delas apoiada nos recursos oferecidos pelo método dos mínimos quadrados (MMQ) que são classicamente conhecidos pela sua potencialidade para a solução de sistemas para casos de sistema em condição plena de observação e, por outro lado, quando do envolvimento de problemas que se mostram com características próprias dos sistemas

indeterminados, subdeterminados ou não observáveis, outras estratégias de análise devem e foram consideradas, a exemplo das técnicas enquadradas como algoritmos evolutivos.

Feita uma avaliação detalhada do estado da arte sobre a questão em foco, os trabalhos, em seu capítulo 2, prosseguiram no sentido de detalhar a metodologia MMQ, a qual possui como fortes atrativos: baixo tempo de resposta e fácil implementação, muito embora sua restrição a sistemas observáveis.

Todavia, em vista do fato que os problemas abordados nessa dissertação se apresentam com características próprias dos sistemas indeterminados, esta foi a direção explorada de forma mais específica nos desenvolvimentos. Para esses últimos cabe aqui ressaltar que os mesmos se classificam em determinísticos probabilísticos, os quais primam por algoritmos que proporcionam maiores simplificações para as formulações complexas. Estes procedimentos, como esclarecido no texto, se mostram com forte tendência aplicativa nos últimos anos, principalmente devido aos avanços dos recursos computacionais. Nessa filosofia essa pesquisa foi baseada no emprego de 4 métodos clássicos, e ainda, ofereceu uma modesta contribuição na forma da utilização de uma solução híbrida, aqui caracterizada como um quinto algoritmo.

Objetivando proceder a aplicação, análise e avaliação da eficácia dos processos de análise, esses foram, na sequência, aplicados à sistemas elétricos com características típicas encontradas em campo. Para tanto, como primeiro passo foi destacada a necessidade da realização de estudos de fluxo harmônico afim de obter informações a serem adotadas como referências para os trabalhos. Para tanto foram tecidos comentários próprios aos requisitos impostos pelo software de análise selecionado, a saber: o aplicativo do Cepel HarmZs. Complementarmente, para a obtenção das grandezas advindas dos pontos de monitoração foi também sintetizada a estrutura física empregada para as atividades de monitoração, nos termos requeridos pelos processos de otimização.

Dentro da estratégia posta, para fins aplicativos, foi empregado o sistema do IEEE de 14 barras, o qual, devidamente parametrizado e implementado computacionalmente, conduziu ao prévio conhecimento de suas condições operativas no que tange às distorções harmônicas de tensões e correntes para os distintos barramentos e linhas. Tais grandezas, como dito, se apresentam como a base dos dados a ser empregada para fins do desempenho e análise da eficácia dos estimadores explorados.

Como não poderia ser diferente, tendo em vista a inexistência de erros de medição, os resultados do MMQ se mostraram idênticos aos adotados como referência. Destaca-se que, para

tais investigações utilizou-se do software Matlab®, no qual foram implementados o sistema e os métodos de análise aqui discutidos.

Focando os desempenhos dos estudos quanto a eficácia dos estimadores de estado classificados na categoria dos algoritmos evolutivos, constatou-se que aquele com a estratégia evolutiva moderna se mostrou com uma velocidade de convergência muito superior aos demais. Porém, os resultados numéricos quanto a EEH se mostraram inconsistentes com os de referência. Por tal motivo, a estratégia desse algoritmo ficou restrita apenas à criação da população inicial do algoritmo de evolução diferencial autoadaptativo (SADE, *Self-Adaptive Differential Evolution*), sendo essa fusão configurada no texto como um algoritmo híbrido.

Tendo em vista que os pormenores dos estudos realizados foram devidamente discutidos no corpo dessa dissertação, apresenta-se, abaixo, uma síntese das principais constatações feitas:

- O algoritmo com estratégia evolutiva canônica, de um modo geral, apresentou boas aderências de resultados para o caso de sistema determinado. Por outro lado, nas condições de sistema subdeterminado, em que esse foi analisado com 6 e 5 medidores, em vários resultados se observa a convergência desses em mínimos locais, sendo que, esse fato já é observado mesmo em alguns dos resultados obtidos com o sistema totalmente observável;
- Por sua vez, o algoritmo híbrido se mostrou o mais eficaz para todas as condições estabelecidas de monitoramento. Cabe ressaltar que esse se manteve com menores discrepância que os demais algoritmos analisados entre o melhor, o pior e a média dos resultados de estimação, sugerindo assim uma maior confiabilidade quanto ao seu uso para os fins dessa pesquisa;
- Também, o algoritmo de evolução diferencial alternativo ofereceu, na média dos resultados, boas estimações. Cabe ressaltar, porém, que em algumas simulações ocorreram grandes discrepâncias, especialmente, nas situações em que o monitoramento foi realizado com um número menor do que 5 medidores;
- Por fim, o algoritmo de busca otimizada (SOA, *seeker optimization algorithm*) já não apresentou bom desempenho na condição de sistema observável, sendo, portanto, considerado inadequado para os procedimentos de estimação estabelecidos nessa dissertação.

Muito embora os resultados dos procedimentos de alocação e estimação tenham se mostrado promissores, reconhece-se que há a necessidade de melhorias nos mesmos antes de suas aplicações em sistemas reais. Dessa forma, como trabalhos futuros, sugere-se:

- Analisar mais situações de alocação dos medidores, de modo a verificar se de fato o número de medidores se faz mais relevante do que a localização dos mesmos em procedimentos de EEH;
- Estender o estudo feito nessa dissertação para sistemas maiores, os quais se apresentam mais consonantes com os sistemas reais;
- Considerar os erros intrínsecos aos processos de medição e transmissão dos dados;
- Aprimorar os algoritmos desenvolvidos objetivando alcançar um menor tempo de resposta;
- Criar uma interface gráfica para visualização dos resultados de estimação com a possibilidade da exportação dos dados em formatos de saída como o CVS (*Comma Separarated Value*);
- Avaliar o desempenho da metodologia em sistemas reais.

# REFERÊNCIAS

- [1] R. C. Dugan, M. F. McGanaghan, S. Santoso and H. W. Beaty, "Electrical Power Systems Quality," McGraw-Hill, Second Edition, p. 167-171, 2004.
- [2] Portal Brasil, "Brasil é o maior gerador de energia eólica da America Latina," 20 de março de 2017. [Online]. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2017/03/brasil-e-o-maior-gerador-de-energia-eolica-da-america-latina>. [Acesso em 21 de outubro de 2017].
- [3] H. M. M. J. Ghorbani, "Impact of Harmonics on Power Quality and Losses in Power Distribution Systems," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 5, no. 1, pp. 166 - 174, 2015.
- [4] J. Haddad, "Ministério de Minas e Energia," Eletrobrás / Procel, dezembro 2004. [Online]. Disponível em: [http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Energ\\_Elet\\_Conceitos\\_Qualid\\_Tarif\\_Eletr\\_Procel-04.pdf](http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Energ_Elet_Conceitos_Qualid_Tarif_Eletr_Procel-04.pdf). [Acesso em 16 de março de 2017].
- [5] Agência Nacional de Engenharia Elétrica - ANEEL, "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional," versão vigente: 01 de janeiro de 2017.
- [6] Operador Nacional do Sistema Elétrico, "Submódulo 2.8 - Gerenciamento dos indicadores de qualidade da energia elétrica da Rede Básica," versão vigente: 01 de janeiro de 2017.
- [7] D. Soares, "Um Algoritmo Branch and Bound para o Problema de Alocação Ótima de Medidores de Qualidade de Energia Elétrica em Rede de Transmissão," Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2007.
- [8] J. Farach, W. 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, no. 3, pp. 1303-1310, 1993. <https://doi.org/10.1109/61.252656>
- [9] Y.-Y. Hong and Y.-C. Chen, "Application of algorithms and artificial-intelligence approach for locating multiple harmonics in distribution systems," *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 146, no. 3, pp. 325 - 329, 1999. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19990164>
- [10] K. Yu and N. Watson, "Influence of transformer configuration on measurement placement in harmonic state estimation," in *International Conference on Power System Technology*, Singapore, Singapore, 2004. <https://doi.org/10.1109/ICPST.2004.1459962>
- [11] 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, no. 2, pp. 1514 - 1521, 2005. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.841309>



- [12] A. Kumar, B. Das and J. Sharma, "Genetic Algorithm-Based Meter Placement for Static Estimation of Harmonic Sources," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1088 - 1096, 2005. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.838520>
- [13] H. Liao, "Power System Harmonic State Estimation and Observability Analysis via Sparsity Maximization," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 15 - 23, 2007. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.887957>
- [14] M. S. Rad, H. Mokhtari and H. Karimi, "An Optimal Measurement Placement Method for Power System Harmonic State Estimation," in *International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering*, Iasi, Romania, 2012. <https://doi.org/10.1109/ICEPE.2012.6463918>
- [15] F. J. Marin, F. Garcia-Lagos and F. S. G. Joya, "Genetic algorithms for optimal placement of phasor measurement units in electrical networks," *Electronics Letters*, vol. 39, no. 19, pp. 14703 - 14705, 2003. <https://doi.org/10.1049/el:20030919>
- [16] M. A. Eldery, E. F. El-Saadany, M. M. A. Salama and A. Vannelli, "A Novel Power Quality Monitoring Allocation Algorithm," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 2, pp. 768 - 777, 2006. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.864045>
- [17] B. M. Dehkordi, F. H. Fesharaki and A. Kiyoumars, "Optimal Measurement Placement for Static Harmonic State Estimation in the Power Systems based on Genetic Algorithm," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 4, no. 2009, pp. 175 - 184, 2009. <https://doi.org/10.5370/JEET.2009.4.2.175>
- [18] A. Ketabi, S. M. Nosratabadi and M. R. Sheibani, "Optimal PMU Placement with Uncertainty Using Pareto Method," *Mathematical Problems in Engineering*, 14 pages, 2012. <http://dx.doi.org/10.1155/2012/501893>
- [19] A. Ketabi, M. R. Sheibani and S. M. Nosratabadi, "Power quality meters placement using seeker optimization algorithm," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 43, no. 1, pp. 141-149, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.04.043>
- [20] H. M. Branco, M. Oleskovicz, A. C. Delbem, D. V. Coury and R. P. Silva, "Optimized allocation of power quality monitors in transmission systems: A multiobjective approach," *Electrical Power and*, vol. 64, pp. 156 - 166, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.06.064>
- [21] C. F. M. Almeida and N. Kagan, "Harmonic State Estimation Through Optimal Monitoring Systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 1, pp. 467 - 478, 2013. <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2235472>
- [22] J. F. D. Breda, J. C. M. Vieira and M. Oleskovicz, "Three-phase harmonic state estimation for distribution systems by using the SVD technique," in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Boston, 2016. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2016.7741789>

- [23] I. D. Melo, "Estimação de Estado Harmônico para Sistemas Radiais de Distribuição Usando Medição Fasorial Sincronizada," Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2015.
- [24] G. G. Santos, R. C. F. Gregory, A. C. Santos e J. C. Oliveira, "Uma Proposta para Definição de Áreas de Sensibilidade às Distorções Harmônicas," em *XIV Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica*, Uberlândia, 2016.
- [25] F. C. Schweppe, J. C. Wildes and D. Rom, "Power System Static-State Estimation, Part I, II and III," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 89, no. 1, pp. 120 - 135, 1970. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1970.292678>
- [26] G. T. Heydt, "Identification of harmonic sources by a state estimation technique," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 1, pp. 569-576, Vol. 4, p. 569-576, January 1989. <https://doi.org/10.1109/61.19248>
- [27] M. Najjar and G. Heydt, "A hybrid nonlinear-least squares estimation of harmonic signal levels in power systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, no. 1, pp. 282 - 288, 1991. <https://doi.org/10.1109/61.103749>
- [28] 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, no. 4, pp. 1663 - 1670, 1991. <https://doi.org/10.1109/61.97705>
- [29] S. Liu, "An adaptive Kalman filter for dynamic estimation of harmonic signals," in *8th International Conference On Harmonics and Quality of Power Proceedings*, Athens, Greece, October, 1998. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.838643>
- [30] K. Yu, N. Watson and J. Arrillaga, "An adaptive Kalman filter for dynamic harmonic state estimation and harmonic injection tracking," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1577-1584, 2005. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.838643>
- [31] K. Yu, N. Watson and J. Arrillaga, "Error analysis in static harmonic State estimation: a statistical approach," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1045 - 1050, 2005. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.833895>
- [32] R. Hartana and G. Richards, "Harmonic source monitoring and identification using neural networks," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 5, no. 4, pp. 1098-1104, 1990. <https://doi.org/10.1109/59.99358>
- [33] A. Meliopoulos, F. Zhang and S. Zelingher, "Power system harmonic state estimation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, no. 3, pp. 1701 - 1709, July 1994. <https://doi.org/10.1109/61.311191>
- [34] Z.-P. Du, J. Arrillaga and N. Watson, "Continuous harmonic state estimation of power systems," *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 143, no. 4, pp. 329 - 336, 1996. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19960291>

- [35] Z. Du, J. Arrillaga, N. Watson and S. Chen, "Implementation of harmonic state estimation," in *8th International Conference On Harmonics and Quality of Power Proceedings*, Athens, Greece, 1998. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.1998.759899>
- [36] Z. Du, J. Arrillaga, N. Watson and S. Chen, "Identification of harmonic sources of power systems using state estimation," *IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 146, no. 1, pp. 7 - 12, 1999. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19990061>
- [37] S. S. Matair, N. R. Watson, K. P. Wong, V. L. Pham and J. Arrillaga, "Harmonic State Estimation: A Method for Remote Harmonic Assessment in a Deregulated Utility Network," in *International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, London, UK, April 2000. <https://doi.org/10.1109/DRPT.2000.855636>
- [38] K. Yu and N. Watson, "Three-phase harmonic state estimation using SVD for partially observable systems," in *International Conference on Power System Technology*, Singapore, Singapore, 2004. <https://doi.org/10.1109/ICPST.2004.1459961>
- [39] N. Kanao, M. Yamashita and H. Yanagida, "Power system harmonic analysis using state-estimation method for Japanese field data," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 970 - 977, 2005. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.838632>
- [40] M. Negnevitsky and M. Ringrose, "Monitoring multiple harmonic sources in power systems using neural networks," in *IEEE Russia Power Tech*, St. Petersburg, Russia, June 2005. <https://doi.org/10.1109/PTC.2005.4524736>
- [41] G. D'Antona, C. Muscas and S. Sulis, "State Estimation for the Localization of Harmonic Sources in Electric Distribution Systems," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, no. 5, pp. 1462 - 1470, 2009. <https://doi.org/10.1109/TIM.2009.2014504>
- [42] H. Nguyen, J. Yang and S. Choi, "On harmonic state estimation and the evaluation of harmonic power contributions from sources," in *Power and Energy Society General Meeting*, Providence, RI, USA, 2010. <https://doi.org/10.1109/PES.2010.5589637>
- [43] E. F. d. Arruda, N. Kagan and P. F. Ribeiro, "Harmonic Distortion State Estimation Using an Evolutionary Strategy," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 2, pp. 831 - 842, 2010. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2036922>
- [44] R. A. S. Fernandes, "Localização e Identificação de Consumidores com Alta Contribuição para a Distorção Harmônica de Tensão em Sistemas de Distribuição," Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- [45] M. S. Rad, H. Mokhtari and H. Karimi, "A new algorithm for optimal measurement placement, observability analysis and Harmonic State Estimation in power systems," in *4th Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference*, Tehran, Iran, 2013. <https://doi.org/10.1109/PEDSTC.2013.6506762>

- [46] D. M. Ferreyra, A. C. Sarmiento and C. A. Reineri, "Harmonic State Estimation on a Radial Distribution System with Distributed Generation," *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, vol. 11, no. 1, pp. 499 - 504, 2013. <https://doi.org/10.1109/TLA.2013.6502852>
- [47] C. Rakpenthai, S. Uatrongjit, N. R. Watson and S. Premrudeepreechacharn, "On Harmonic State Estimation of Power System," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, vol. 28, no. 4, pp. 4829 - 4838, 2013. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2273943>
- [48] L. A. H. Armenta, D. R. Romero e J. R. García, "Índice para la identificación de fuentes armónicas en sistemas eléctricos de potencia empleando estimación de estado con error en las mediciones," *Computación y Sistemas*, vol. 19, nº 2, pp. 387 - 397, 2015. <http://dx.doi.org/10.13053/CyS-19-2-1579>
- [49] W. N. Sepulchro, L. F. Encarnação and M. Brunoro, "Harmonic Distortion and Power Flow State Estimation for Distribution Systems Based on Evolutionary Strategies," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 9, pp. 3066 - 3071, 2015. <https://doi.org/10.1109/TLA.2015.7350060>
- [50] I. Molina-Moreno, A. Medina and R. Cisneros-Magaña, "Time domain harmonic state estimation in unbalanced power networks based on optimal number of meters and the principle of half-wave symmetry," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 15, pp. 3871 - 3880, 2017. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.1611>
- [51] A. Moradifar, A. A. Foroud and K. G. Firouzjah, "Intelligent localisation of multiple non-linear loads considering impact of harmonic state estimation accuracy," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 8, pp. 1943 - 1953, 2017. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.1278>
- [52] V. Bečirović, I. Pavic and B. Filipović-Grčić, "Sensitivity analysis of method for harmonic state estimation in the power system," *Electric Power Systems Research*, vol. 154, pp. 515 - 527, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.07.029>
- [53] W. Ongsakul and D. N. Vo, *Artificial Intelligence in Power System Optimization*, Boca Raton, United States: CRC Press, 2013.
- [54] J. Zhu, *Optimization of Power System Operation*, IEEE Press, 2015. <https://doi.org/10.1002/9781118887004>
- [55] G. A. R. Narino, "Otimização de Risers em Cetenária com Amortecedores Hidrodinâmicos," Dissertação (mestrado) da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2004.
- [56] S. F. P. Saramago, "Métodos de Otimização Randômica: Algoritmos Genéticos e Simulated Annealing," SBMAC, São Carlos, 2003.

- [57] W. R. A. Ibrahim and M. M. Morcos, "Artificial intelligence and advanced mathematical tools for power quality applications: a survey," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, no. 2, pp. 668 - 673, 2002. <https://doi.org/10.1109/61.997958>
- [58] A.-A. H. M. Soliman Abdel-Hady Soliman, *Modern Optimization Techniques with Applications in Electric Power Systems*, New York, United States: Springer, p. 57 - 78, 2012. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1752-1>
- [59] O. Helene, *Método dos Mínimos Quadrados com Formalismo Matricial*, São Paulo, Brasil: Livraria da Física, 2006.
- [60] J. F. D. Breda, "Sistema de Monitoramento para Estimação de Estado Harmônico Trifásico para Sistemas de Distribuição Utilizando Decomposição em Valores Singulares," Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.
- [61] M. Mitchell, *An Introduction to Genetic Algorithms*, London, England: MIT Press, pp. 3, 1999.
- [62] Ivan Zelinka; Pandian Vasant; Nader Barsoum, *Power, Control and Optimization*, Springer, p. 75-76, 2013.
- [63] M. G. Xinjie Yu, *Introduction to Evolutionary Algorithms*, New York, United States: Springer, p. 14-28, 2010.
- [64] T. Bäck, C. Foussette and P. Krause, *Contemporary Evolution Strategies*, Berlin, Germany: Springer, 2013.
- [65] R. Tinós, "Computação Evolutiva em Ambientes Dinâmicos," Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2012.
- [66] H. G. Beyer, "Evolution Strategy Examples," FH Vorarlberg University of Applied Sciences, 26 April 2007. [Online]. Available: <https://homepages.fhv.at/hgb/downloads.html>. [Accessed 2017 December 01].
- [67] G. B. Hans and P. S. Hans, "Evolution strategies – A comprehensive introduction," *Natural Computing*, vol. 1, no. 1, pp. 3 - 52, 2002. <https://doi.org/10.1023/A:1015059928466>
- [68] K. Chellapilla, "Combining Mutation Operators in Evolutionary Programming," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 2, no. 3, pp. 91 - 96, 1998. <https://doi.org/10.1109/4235.735431>
- [69] N. Hansen and A. Ostermeier, "Adapting arbitrary normal mutation distributions in evolution strategies: the covariance matrix adaptation," in *Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, Nagoya, Japan, 1996. <https://doi.org/10.1109/ICEC.1996.542381>

- [70] S. Das and P. N. Suganthan, "Differential Evolution: A Survey of the State-of-the-Art," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 15, no. 1, pp. 4 - 31, 2011. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2010.2059031>
- [71] A. W. Mohamed, H. Z. Sabry and M. Khorshid, "An alternative differential evolution algorithm for global optimization," *Journal of Advanced Research*, vol. 3, no. 2, pp. 149 - 165, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2011.06.004>
- [72] A. K. Qin, V. L. Huang and P. N. Suganthan, "Differential Evolution Algorithm With Strategy Adaptation for Global Numerical Optimization," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 13, no. 2, pp. 398 - 417, 2009. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2008.927706>
- [73] C. Dai, Y. Zhu and W. Chen, "Seeker Optimization Algorithm," in *International Conference on Computational and Information Science*, Berlin, Heidelberg, 2006. <https://doi.org/10.1109/ICCIAS.2006.294126>
- [74] C. Dai, W. Chen, Y. Zhu and X. Zhang, "Seeker Optimization Algorithm for Optimal Reactive Power Dispatch," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 1218 - 1231, 2009. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2021226>
- [75] J. Canossa, "Um Programa Interativo para Estudos de Fluxo de Potência," Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2007.
- [76] A. C. Santos e C. E. Tavares, "Desenvolvimento de um aplicativo computacional para cálculo de penetração harmônica em sistemas elétricos e projeto de filtros passivos sintonizados," *Horizonte Científico*, vol. 8, nº 1, 2014.
- [77] M. Silva, "Estudos de Propagação Harmônica em Redes de Distribuição Considerando a Característica Estocástica das Cargas," Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.
- [78] A. M. Variz, "Cálculo do Fluxo de Harmônicos em Sistemas Trifásicos Utilizando o Método de Injeção de Correntes," Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- [79] Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel, "Manual de Utilização do Programa HarmZs Versão 3.0," p. 175, 2016.
- [80] T. L. Oliviera, "Desenvolvimento de Uma Plataforma Computacional Gráfica e de Código Aberto para Estudos de Sistemas de Potência," Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.
- [81] The MathWorks, "MATLAB," Versão 2016a (9.0.0.341360), Natick, U.S.A., 2016.
- [82] Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), "HarmZs - Versão 3.0," Licença acadêmica, Rio de Janeiro, 2016.



- [83] A. P. S. Meliopoulos, B. Fardanesh and S. Zelingher, "Power system state estimation: modeling error effects and impact on system operation," in *Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, Maui, HI, USA, 2001. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2001.926269>
- [84] S. Zelingher, B. Fardanesh, E. Uzunovic, A. S. Meliopoulos and G. Cokkinides, "Harmonic monitoring system via GPS-synchronized measurements - update and new developments," in *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Montreal, Canada, 2006. <https://doi.org/10.1109/PES.2006.1709518>
- [85] M. A. Eldery, E. F. El-Saadany e M. M. A. Salama, "Optimum Number and Location of Power Quality Monitors," em *11th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Romania, 2004. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2004.1409328>
- [86] D. C. S. d. Reis, "Um Algoritmo Branch and Bound para o Problema de Alocação Ótima de Monitores de Qualidade de Energia Elétrica em Redes de Transmissão," Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2007.
- [87] C. F. M. Almeida, N. Kagan, T. P. Souza, N. M. Matsuo, S. X. Duarte, A. B. Neto and A. K. Suematsu, "Locating Power Quality Meters in Order to Perform Harmonic State Estimation," in *15th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Hong Kong, June, 2012. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2012.6381258>
- [88] H. A. Hassan, Z. H. Osman; A. E. Lasheen, "Sizing of STATCOM to Enhance Voltage Stability of Power Systems for Normal and Contingency Cases," *Smart Grid and Renewable Energy*, vol. 5, no. 1, pp. 8-18, 2014. <https://doi.org/10.4236/sgre.2014.51002>
- [89] H Liao, Z. Liu, J. V. Milanovic; N. C. Wolley, "Optimisation Framework for Development of Cost-effective Monitoring of Voltage Unbalance in Distribution Networks," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 1, pp. 240 - 246, 2016. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0757>

**Tabela A.I – Resultados de EEH do algoritmo com estratégia evolutiva canônica**

Tabela R1 - Resultados do T22 - T23 - T24 - T25 - T26 - T27 - T28 - T29 - T30 - T31 - T32 - T33 - T34 - T35 - T36 - T37 - T38 - T39 - T40 - T41 - T42 - T43 - T44 - T45 - T46 - T47 - T48 - T49 - T50 - T51 - T52 - T53 - T54 - T55 - T56 - T57 - T58 - T59 - T60 - T61 - T62 - T63 - T64 - T65 - T66 - T67 - T68 - T69 - T70 - T71 - T72 - T73 - T74 - T75 - T76 - T77 - T78 - T79 - T80 - T81 - T82 - T83 - T84 - T85 - T86 - T87 - T88 - T89 - T90 - T91 - T92 - T93 - T94 - T95 - T96 - T97 - T98 - T99 - T100 - T101 - T102 - T103 - T104 - T105 - T106 - T107 - T108 - T109 - T110 - T111 - T112 - T113 - T114 - T115 - T116 - T117 - T118 - T119 - T120 - T121 - T122 - T123 - T124 - T125 - T126 - T127 - T128 - T129 - T130 - T131 - T132 - T133 - T134 - T135 - T136 - T137 - T138 - T139 - T140 - T141 - T142 - T143 - T144 - T145 - T146 - T147 - T148 - T149 - T150 - T151 - T152 - T153 - T154 - T155 - T156 - T157 - T158 - T159 - T160 - T161 - T162 - T163 - T164 - T165 - T166 - T167 - T168 - T169 - T170 - T171 - T172 - T173 - T174 - T175 - T176 - T177 - T178 - T179 - T180 - T181 - T182 - T183 - T184 - T185 - T186 - T187 - T188 - T189 - T190 - T191 - T192 - T193 - T194 - T195 - T196 - T197 - T198 - T199 - T200 - T201 - T202 - T203 - T204 - T205 - T206 - T207 - T208 - T209 - T210 - T211 - T212 - T213 - T214 - T215 - T216 - T217 - T218 - T219 - T220 - T221 - T222 - T223 - T224 - T225 - T226 - T227 - T228 - T229 - T230 - T231 - T232 - T233 - T234 - T235 - T236 - T237 - T238 - T239 - T240 - T241 - T242 - T243 - T244 - T245 - T246 - T247 - T248 - T249 - T250 - T251 - T252 - T253 - T254 - T255 - T256 - T257 - T258 - T259 - T260 - T261 - T262 - T263 - T264 - T265 - T266 - T267 - T268 - T269 - T270 - T271 - T272 - T273 - T274 - T275 - T276 - T277 - T278 - T279 - T280 - T281 - T282 - T283 - T284 - T285 - T286 - T287 - T288 - T289 - T290 - T291 - T292 - T293 - T294 - T295 - T296 - T297 - T298 - T299 - T300 - T301 - T302 - T303 - T304 - T305 - T306 - T307 - T308 - T309 - T310 - T311 - T312 - T313 - T314 - T315 - T316 - T317 - T318 - T319 - T320 - T321 - T322 - T323 - T324 - T325 - T326 - T327 - T328 - T329 - T330 - T331 - T332 - T333 - T334 - T335 - T336 - T337 - T338 - T339 - T340 - T341 - T342 - T343 - T344 - T345 - T346 - T347 - T348 - T349 - T350 - T351 - T352 - T353 - T354 - T355 - T356 - T357 - T358 - T359 - T360 - T361 - T362 - T363 - T364 - T365 - T366 - T367 - T368 - T369 - T370 - T371 - T372 - T373 - T374 - T375 - T376 - T377 - T378 - T379 - T380 - T381 - T382 - T383 - T384 - T385 - T386 - T387 - T388 - T389 - T390 - T391 - T392 - T393 - T394 - T395 - T396 - T397 - T398 - T399 - T400 - T401 - T402 - T403 - T404 - T405 - T406 - T407 - T408 - T409 - T410 - T411 - T412 - T413 - T414 - T415 - T416 - T417 - T418 - T419 - T420 - T421 - T422 - T423 - T424 - T425 - T426 - T427 - T428 - T429 - T430 - T431 - T432 - T433 - T434 - T435 - T436 - T437 - T438 - T439 - T440 - T441 - T442 - T443 - T444 - T445 - T446 - T447 - T448 - T449 - T450 - T451 - T452 - T453 - T454 - T455 - T456 - T457 - T458 - T459 - T460 - T461 - T462 - T463 - T464 - T465 - T466 - T467 - T468 - T469 - T470 - T471 - T472 - T473 - T474 - T475 - T476 - T477 - T478 - T479 - T480 - T481 - T482 - T483 - T484 - T485 - T486 - T487 - T488 - T489 - T490 - T491 - T492 - T493 - T494 - T495 - T496 - T497 - T498 - T499 - T500 - T501 - T502 - T503 - T504 - T505 - T506 - T507 - T508 - T509 - T510 - T511 - T512 - T513 - T514 - T515 - T516 - T517 - T518 - T519 - T520 - T521 - T522 - T523 - T524 - T525 - T526 - T527 - T528 - T529 - T530 - T531 - T532 - T533 - T534 - T535 - T536 - T537 - T538 - T539 - T540 - T541 - T542 - T543 - T544 - T545 - T546 - T547 - T548 - T549 - T550 - T551 - T552 - T553 - T554 - T555 - T556 - T557 - T558 - T559 - T560 - T561 - T562 - T563 - T564 - T565 - T566 - T567 - T568 - T569 - T570 - T571 - T572 - T573 - T574 - T575 - T576 - T577 - T578 - T579 - T580 - T581 - T582 - T583 - T584 - T585 - T586 - T587 - T588 - T589 - T590 - T591 - T592 - T593 - T594 - T595 - T596 - T597 - T598 - T599 - T600 - T601 - T602 - T603 - T604 - T605 - T606 - T607 - T608 - T609 - T610 - T611 - T612 - T613 - T614 - T615 - T616 - T617 - T618 - T619 - T620 - T621 - T622 - T623 - T624 - T625 - T626 - T627 - T628 - T629 - T630 - T631 - T632 - T633 - T634 - T635 - T636 - T637 - T638 - T639 - T640 - T641 - T642 - T643 - T644 - T645 - T646 - T647 - T648 - T649 - T650 - T651 - T652 - T653 - T654 - T655 - T656 - T657 - T658 - T659 - T660 - T661 - T662 - T663 - T664 - T665 - T666 - T667 - T668 - T669 - T670 - T671 - T672 - T673 - T674 - T675 - T676 - T677 - T678 - T679 - T680 - T681 - T682 - T683 - T684 - T685 - T686 - T687 - T688 - T689 - T690 - T691 - T692 - T693 - T694 - T695 - T696 - T697 - T698 - T699 - T700 - T701 - T702 - T703 - T704 - T705 - T706 - T707 - T708 - T709 - T710 - T711 - T712 - T713 - T714 - T715 - T716 - T717 - T718 - T719 - T720 - T721 - T722 - T723 - T724 - T725 - T726 - T727 - T728 - T729 - T730 - T731 - T732 - T733 - T734 - T735 - T736 - T737 - T738 - T739 - T740 - T741 - T742 - T743 - T744 - T745 - T746 - T747 - T748 - T749 - T750 - T751 - T752 - T753 - T754 - T755 - T756 - T757 - T758 - T759 - T760 - T761 - T762 - T763 - T764 - T765 - T766 - T767 - T768 - T769 - T770 - T771 - T772 - T773 - T774 - T775 - T776 - T777 - T778 - T779 - T780 - T781 - T782 - T783 - T784 - T785 - T786 - T787 - T788 - T789 - T790 - T791 - T792 - T793 - T794 - T795 - T796 - T797 - T798 - T799 - T800 - T801 - T802 - T803 - T804 - T805 - T806 - T807 - T808 - T809 - T810 - T811 - T812 - T813 - T814 - T815 - T816 - T817 - T818 - T819 - T820 - T821 - T822 - T823 - T824 - T825 - T826 - T827 - T828 - T829 - T830 - T831 - T832 - T833 - T834 - T835 - T836 - T837 - T838 - T839 - T840 - T841 - T842 - T843 - T844 - T845 - T846 - T847 - T848 - T849 - T850 - T851 - T852 - T8																																
---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--



Tabela A.II - Resultados de EEH do algoritmo híbrido

Distorção Individual de Tensão de 5º Ordem Harmônica (%)																																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média		
1	0,84	0,67	0,69	0,71	0,70	0,73	0,64	0,68	0,72	0,68	0,72	0,65	0,69	0,78	0,73	0,66	0,67	0,64	0,71	0,70	0,64	0,66	0,72	0,63	0,66	0,69	0,66	0,76	0,64	0,81	0,70		
2	1,44	1,26	1,29	1,34	1,33	1,31	1,18	1,29	1,39	1,32	1,40	1,22	1,31	1,56	1,27	1,25	1,27	1,21	1,35	1,39	1,21	1,25	1,40	1,18	1,22	1,26	1,26	1,31	1,22	1,32	1,30		
3	1,54	1,40	1,39	1,51	1,42	1,35	1,41	1,41	1,53	1,54	1,59	1,37	1,43	1,57	1,39	1,37	1,48	1,35	1,78	1,56	1,34	1,42	1,39	1,39	1,28	1,34	1,52	1,49	1,43	1,42	1,45		
4	2,57	2,46	2,59	2,66	2,49	2,59	2,50	2,45	2,52	2,49	2,48	2,41	2,45	2,63	2,40	2,50	2,50	2,38	2,57	2,54	2,36	2,47	2,50	2,41	2,52	2,51	2,53	2,48	2,38	2,45	2,49		
5	2,38	2,24	2,31	2,36	2,29	2,36	2,23	2,21	2,35	2,24	2,23	2,17	2,23	2,39	2,20	2,23	2,32	2,14	2,29	2,29	2,13	2,24	2,26	2,15	2,25	2,26	2,26	2,25	2,15	2,22	2,26		
6	3,24	3,25	3,26	3,28	3,29	3,28	3,24	3,29	3,24	3,27	3,24	3,19	3,27	3,34	3,22	3,22	3,25	3,19	3,18	3,29	3,24	3,18	3,26	3,23	3,17	3,26	3,23	3,19	3,22	3,20	3,24		
7	4,48	4,52	4,53	4,55	4,45	4,39	4,49	4,51	4,49	4,66	4,41	4,52	4,44	4,61	4,37	4,68	4,45	4,45	4,73	4,55	4,38	4,62	4,54	4,35	4,47	4,50	4,48	4,56	4,38	4,42	4,50		
8	3,28	3,31	3,33	3,33	3,26	3,13	3,30	3,30	3,28	3,40	3,22	3,49	3,25	3,37	3,18	3,42	3,32	3,26	3,46	3,34	3,21	3,38	3,36	3,18	3,27	3,24	3,22	3,34	3,20	3,23	3,29		
9	6,20	6,36	6,32	6,31	6,28	6,12	6,28	6,36	6,28	6,21	6,16	6,27	6,24	6,43	6,14	6,20	6,21	6,29	6,10	6,27	6,18	6,26	6,36	6,10	6,25	6,17	6,24	6,18	6,20	6,20	6,24		
10	5,67	5,81	5,78	5,77	5,75	5,80	5,74	5,84	5,74	5,79	5,93	5,72	5,71	5,88	5,92	5,80	5,68	5,74	5,58	5,74	6,01	5,71	5,81	5,83	5,70	5,86	5,72	5,82	5,89	5,70	5,78		
11	4,46	4,55	4,55	4,55	4,55	4,61	4,51	4,67	4,51	4,55	4,60	4,48	4,51	4,63	4,54	4,52	4,48	4,48	4,40	4,53	4,65	4,47	4,56	4,55	4,42	4,58	4,52	4,53	4,61	4,47	4,54		
12	3,46	3,50	3,49	3,51	3,54	3,47	3,52	3,53	3,47	3,54	3,43	3,43	3,49	3,58	3,43	3,45	3,48	3,43	3,41	3,52	3,47	3,42	3,51	3,50	3,41	3,49	3,47	3,44	3,45	3,43	3,48		
13	3,67	3,69	3,68	3,70	3,70	3,68	3,68	3,72	3,65	3,71	3,63	3,62	3,67	3,78	3,62	3,62	3,67	3,62	3,59	3,72	3,65	3,61	3,70	3,69	3,59	3,72	3,67	3,62	3,64	3,62	3,66		
14	5,19	5,19	5,16	5,17	5,17	5,09	5,13	5,20	5,05	5,18	5,11	5,11	5,12	5,27	5,10	5,07	5,13	5,12	5,00	5,21	5,07	5,07	5,20	5,28	5,09	5,13	5,15	5,19	5,08	5,07	5,14		
Distorção Individual de Tensão de 7º Ordem Harmônica (%)																																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média		
1	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16		
2	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,32		
3	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68		
4	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,50	0,48	0,48	0,48	0,48	0,49	0,48	0,49	0,30	0,49	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,49	0,48	0,48	0,53	0,48		
5	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,29	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39		
6	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16		
7	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,21	0,24		
8	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,22	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,14	0,17		
9	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,52	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,47	0,45		
10	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,44	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,41	0,43		
11	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,29	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,28	0,30		
12	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21		
13	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26		
14	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,52		
Distorção Individual de Tensão de 11º Ordem Harmônica (%)																																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média		
1	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,36	0,34		
2	0,67	0,67	0,67	0,66	0,67	0,66	0,67	0,66	0,66	0,67	0,67	0,66	0,67	0,66	0,66	0,66	0,67	0,66	0,66	0,66	0,67	0,66	0,67	0,66	0,67	0,66	0,67	0,66	0,67	0,66	0,67		
3	0,88	0,88	0,88	0,87	0,88	0,87	0,88	0,87	0,87	0,88	0,88	0,87	0,88	0,87	0,87	0,88	0,87	0,87	0,87	0,88	0,88	0,88	0,87	0,88	0,88	0,88	0,87	0,88	0,88	0,88	0,88		
4	0,73	0,73	0,73	0,75	0,73	0,75	0,73	0,75	0,75	0,73	0,73	0,75	0,73	0,75	0,75	0,73	0,75	0,75	0,73	0,73	0,73	0,75	0,73	0,73	0,75	0,73	0,75	0,73	0,73	0,69	0,73		
5	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72		
6	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18		
7	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13		
8	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09													

Tabela A.III - Resultados de EEH do algoritmo de EDA

Distorção Individual de Tensão de 5ª Ordem Harmônica (%)																																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média		
1	0,66	0,65	0,69	0,68	0,70	0,72	0,67	0,74	0,68	0,70	0,70	0,66	0,72	0,70	0,66	0,66	0,70	0,78	0,64	0,70	0,66	0,71	0,65	0,66	0,68	0,81	0,71	0,65	0,65	0,68	0,69		
2	1,24	1,22	1,34	1,27	1,35	1,41	1,25	1,29	1,28	1,36	1,31	1,24	1,34	1,33	1,25	1,25	1,35	1,54	1,21	1,31	1,23	1,34	1,27	1,24	1,28	1,31	1,27	1,19	1,22	1,27	1,29		
3	1,35	1,29	1,57	1,35	1,44	1,37	1,30	1,47	1,34	1,43	1,46	1,39	1,42	1,42	1,38	1,50	1,30	1,60	1,31	1,36	1,28	1,40	1,44	1,39	1,35	1,34	1,47	1,37	1,37	1,41	1,40		
4	2,44	2,44	2,86	2,62	2,49	2,47	2,47	2,45	2,59	2,44	2,54	2,44	2,76	2,46	2,49	2,42	2,43	2,53	2,40	2,66	2,45	2,73	2,56	2,45	2,60	2,45	2,45	2,44	2,40	2,49	2,51		
5	2,22	2,19	2,49	2,31	2,22	2,24	2,32	2,21	2,30	2,22	2,40	2,19	2,42	2,22	2,23	2,18	2,21	2,31	2,16	2,35	2,28	2,40	2,28	2,19	2,31	2,23	2,21	2,27	2,17	2,29	2,27		
6	3,20	3,27	3,36	3,24	3,24	3,22	3,24	3,22	3,26	3,26	3,28	3,24	3,31	3,23	3,25	3,26	3,22	3,28	3,25	3,27	3,23	3,29	3,35	3,19	3,26	3,20	3,22	3,27	3,25	3,25	3,25		
7	4,63	4,60	4,42	4,42	4,39	4,47	4,47	4,48	4,53	4,39	4,42	4,42	4,42	4,49	4,51	4,39	4,49	4,33	4,64	4,65	4,47	4,42	4,38	4,75	4,51	4,65	4,50	4,40	4,48	4,49	4,49		
8	3,39	3,36	3,23	3,23	3,21	3,27	3,27	3,28	3,31	3,21	3,23	3,24	3,23	3,28	3,28	3,21	3,29	3,17	3,40	3,40	3,27	3,24	3,35	3,47	3,29	3,40	3,29	3,22	3,27	3,29	3,29		
9	6,10	6,11	5,99	6,11	6,13	6,27	6,27	6,31	6,31	6,14	6,15	6,21	6,04	6,30	6,37	6,17	6,33	6,00	6,11	6,17	6,28	6,06	5,99	6,15	6,29	6,07	6,34	6,18	6,32	6,30	6,18		
10	5,59	5,65	5,52	5,77	5,88	5,73	5,73	5,76	5,77	5,89	5,90	5,98	5,55	5,76	5,81	5,93	5,78	5,52	5,67	5,65	5,74	5,57	5,63	5,62	5,75	5,57	5,76	5,95	5,77	5,76	5,73		
11	4,41	4,61	4,46	4,53	4,58	4,50	4,51	4,52	4,53	4,60	4,54	4,57	4,45	4,52	4,56	4,62	4,52	4,42	4,67	4,48	4,50	4,45	4,83	4,43	4,52	4,43	4,51	4,63	4,53	4,53	4,53		
12	3,42	3,51	3,64	3,47	3,47	3,46	3,47	3,47	3,50	3,51	3,50	3,48	3,57	3,48	3,50	3,50	3,45	3,54	3,48	3,50	3,44	3,56	3,56	3,44	3,49	3,45	3,46	3,50	3,55	3,49	3,50		
13	3,67	3,71	3,86	3,65	3,66	3,65	3,66	3,66	3,68	3,70	3,68	3,67	3,78	3,67	3,69	3,70	3,66	3,81	3,67	3,73	3,65	3,78	3,73	3,64	3,68	3,65	3,66	3,69	3,71	3,68	3,69		
14	5,32	5,24	5,16	5,17	5,10	5,13	5,13	5,15	5,16	5,20	5,07	5,21	5,41	5,18	5,20	5,20	5,16	5,65	5,08	5,32	5,14	5,49	5,04	5,19	5,15	5,20	5,17	5,12	5,18	5,16	5,20		
Distorção Individual de Tensão de 7ª Ordem Harmônica (%)																																	
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média		
1	0,16	0,16	0,20	0,15	0,15	0,15	0,15	0,13	0,16	0,16	0,24	0,15	0,16	0,15	0,21	0,15	0,15	0,15	0,24	0,16	0,16	0,16	0,15	0,15	0,22	0,15	0,16	0,15	0,17	0,16	0,17		
2	0,34	0,32	0,61	0,31	0,31	0,31	0,32	0,28	0,34	0,32	0,31	0,29	0,33	0,31	0,43	0,32	0,32	0,31	0,30	0,30	0,33	0,32	0,32	0,30	0,47	0,31	0,34	0,31	0,33	0,33	0,33		
3	0,78	0,70	0,35	0,67	0,70	0,69	0,63	0,69	0,67	0,70	0,32	0,60	0,68	0,67	0,40	0,68	0,73	0,71	0,28	0,64	0,70	0,69	0,67	0,67	0,32	0,77	0,66	0,62	0,69	0,71	0,63		
4	0,47	0,37	0,33	0,46	0,43	0,37	0,49	0,40	0,36	0,39	0,49	0,47	0,34	0,45	0,60	0,47	0,45	0,48	0,43	0,36	0,49	0,38	0,36	0,37	0,36	0,42	0,40	0,51	0,49	0,47	0,43		
5	0,39	0,39	0,34	0,36	0,35	0,40	0,38	0,32	0,31	0,43	0,38	0,38	0,35	0,36	0,47	0,37	0,37	0,38	0,39	0,39	0,39	0,42	0,38	0,37	0,43	0,35	0,33	0,40	0,38	0,38	0,38		
6	0,18	0,16	0,17	0,16	0,16	0,17	0,18	0,17	0,14	0,16	0,15	0,16	0,10	0,17	0,19	0,17	0,18	0,16	0,15	0,15	0,16	0,14	0,14	0,16	0,13	0,19	0,16	0,16	0,17	0,15	0,16		
7	0,25	0,25	0,25	0,26	0,25	0,27	0,23	0,22	0,24	0,25	0,26	0,22	0,27	0,20	0,21	0,24	0,20	0,26	0,23	0,23	0,20	0,26	0,24	0,26	0,23	0,24	0,25	0,19	0,29	0,20	0,24		
8	0,18	0,16	0,18	0,19	0,13	0,20	0,17	0,13	0,18	0,13	0,19	0,16	0,20	0,15	0,15	0,18	0,14	0,19	0,17	0,17	0,15	0,11	0,09	0,19	0,10	0,17	0,18	0,14	0,21	0,15	0,16		
9	0,42	0,46	0,43	0,48	0,49	0,48	0,46	0,47	0,48	0,49	0,47	0,48	0,49	0,51	0,47	0,47	0,52	0,49	0,47	0,47	0,47	0,50	0,49	0,49	0,47	0,42	0,47	0,46	0,51	0,49	0,48		
10	0,39	0,40	0,38	0,41	0,43	0,41	0,40	0,42	0,42	0,42	0,41	0,42	0,42	0,47	0,42	0,41	0,45	0,43	0,41	0,41	0,43	0,43	0,43	0,42	0,41	0,40	0,41	0,41	0,43	0,43	0,42		
11	0,28	0,28	0,27	0,28	0,30	0,26	0,29	0,30	0,28	0,29	0,33	0,28	0,27	0,32	0,31	0,29	0,32	0,30	0,29	0,28	0,33	0,28	0,29	0,28	0,27	0,30	0,30	0,28	0,30	0,29	0,29		
12	0,21	0,19	0,20	0,20	0,21	0,21	0,20	0,21	0,18	0,21	0,21	0,20	0,14	0,20	0,23	0,20	0,21	0,22	0,24	0,23	0,20	0,23	0,24	0,21	0,20	0,24	0,24	0,21	0,21	0,19	0,21		
13	0,24	0,23	0,23	0,23	0,25	0,24	0,25	0,25	0,23	0,25	0,25	0,24	0,19	0,24	0,28	0,24	0,24	0,26	0,26	0,25	0,23	0,23	0,24	0,26	0,27	0,29	0,25	0,27	0,26	0,24	0,25		
14	0,58	0,58	0,56	0,56	0,57	0,53	0,56	0,60	0,61	0,55	0,62	0,57	0,58	0,54	0,54	0,57	0,59	0,63	0,68	0,59	0,50	0,54	0,56	0,54	0,54	0,53	0,56	0,56	0,50	0,57	0,57		
Distorção Individual de Tensão de 11ª Ordem Harmônica (%)																																	
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média		
1	0,34	0,37	0,34	0,35	0,37	0,34	0,39	0,34	0,35	0,35	0,33	0,34	0,35	0,35	0,37	0,34	0,35	0,37	0,35	0,34	0,37	0,33	0,35	0,35	0,34	0,37	0,34	0,36	0,34	0,34	0,35		
2	0,65	0,67	0,66	0,66	0,67	0,66	0,71	0,66	0,68	0,67	0,64	0,65	0,67	0,67	0,72	0,66	0,68	0,69	0,66	0,66	0,67	0,73	0,66	0,67	0,67	0,68	0,66	0,67	0,66	0,65	0,67		
3	0,88	0,86	0,87	0,88	0,89	0,87	0,90	0,87	0,87	0,89	0,86	0,88	0,83	0,88	0,90	0,89	0,93	0,87	0,89	0,88	0,89	0,68	0,87	0,88	0,89	0,86	0,86	0,92	0,88	0,88	0,87		
4	0,72	0,69	0,73	0,69	0,70	0,71	0,65	0,70	0,71	0,74	0,72	0,72	0,69	0,70	0,66	0,69	0,75	0,73	0,71	0,66	0,84	0,77	0,72	0,68	0,70	0,73	0,74	0,70	0,72	0,71	0,71		
5	0,70	0,75	0,73	0,75	0,70	0,71	0,67	0,72	0,71	0,72	0,70	0,71	0,73	0,72	0,67	0,74	0,73	0,72	0,70	0,72	0,73	0,75	0,70	0,75	0,69	0,71	0,72	0,75	0,71	0,72	0,72		
6	0,17	0,19	0,20	0,16	0,18	0,18	0,18	0,17	0,16	0,15	0,20	0,20	0,18	0,17	0,17	0,17	0,19	0,19	0,19	0,20	0,17	0,21	0,19	0,18	0,17	0,15	0,20	0,18	0,18	0,19	0,18		
7	0,07	0,11	0,13	0,11	0,15	0,11	0,11	0,08	0,14	0,13	0,11	0,13	0,09	0,08	0,12	0,14	0,13	0,10	0,08	0,09	0,14	0,13	0,07	0,07	0,07	0,15	0,13	0,15	0,12	0,11	0,11		
8	0,10	0,08	0,09	0,08	0,11	0,08	0,10	0,05	0,10	0,09	0,08	0,09	0,11																				

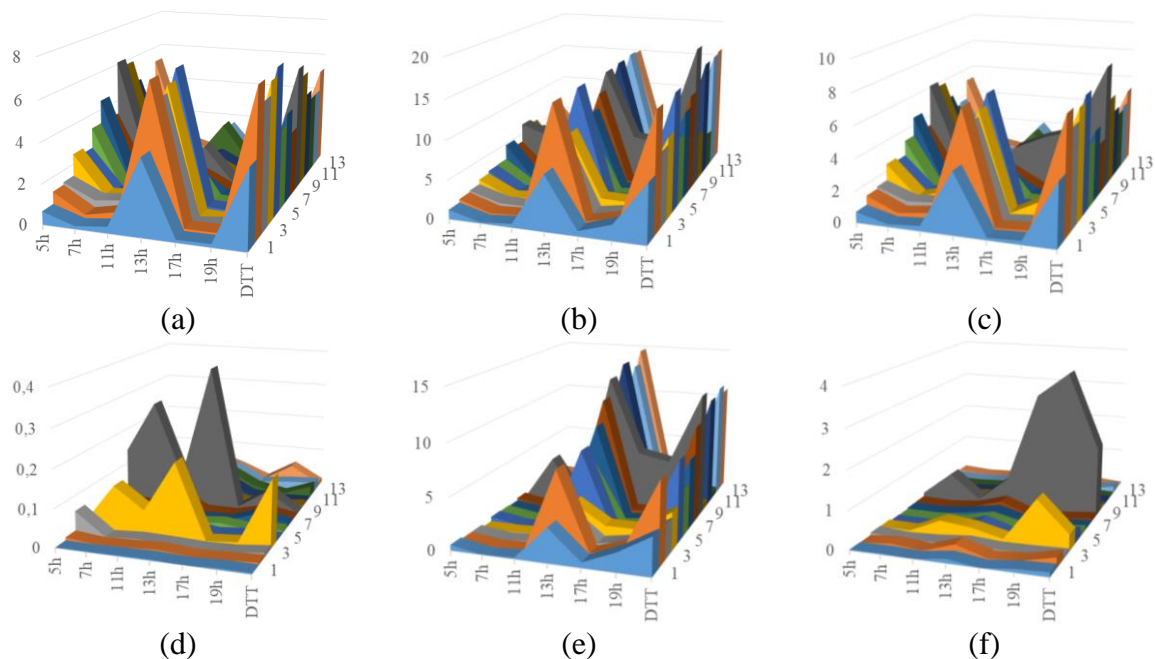


**Tabela A.IV - Resultados de EEH do algoritmo de SOA**

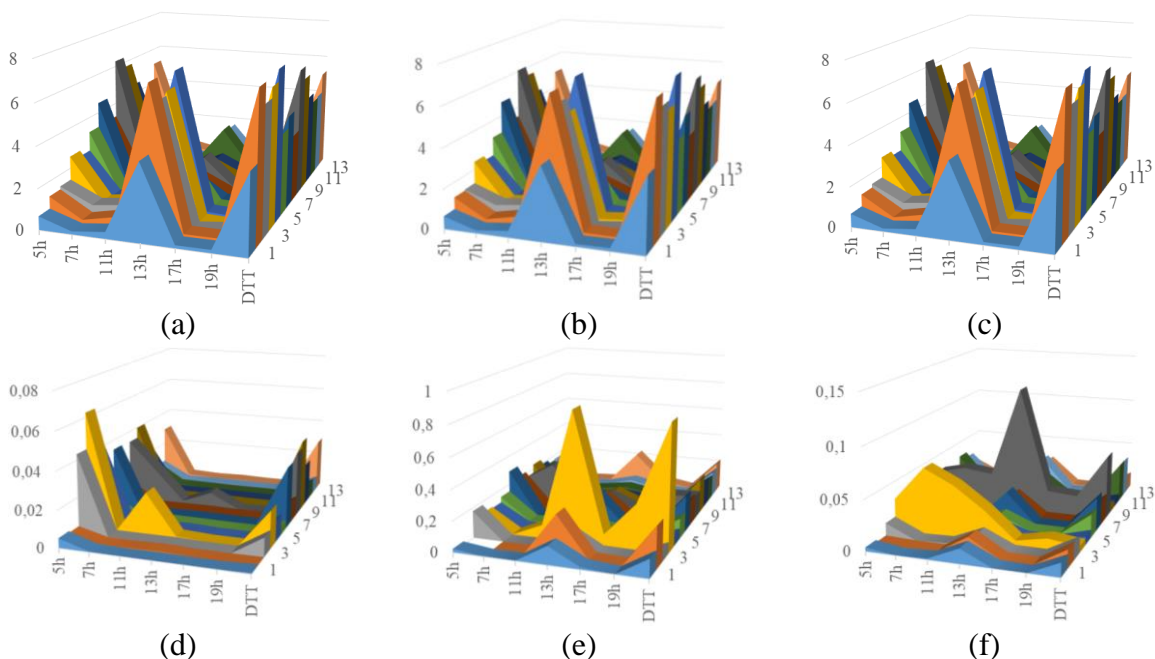
Barra	Distorção Individual de Tensão de 5ª Ordem Harmônica (%)																														Média	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
1	1,03	0,61	0,62	0,00	0,00	0,98	0,00	0,62	0,22	0,00	0,32	0,00	0,32	0,00	0,02	0,00	0,62	1,65	0,39	0,87	0,61	0,71	0,00	0,23	0,00	0,62	0,64	0,00	0,03	0,00	0,00	0,35
2	1,22	1,12	1,16	0,00	0,00	0,56	0,00	1,17	0,44	0,00	0,00	0,63	0,00	0,00	0,04	0,00	1,17	1,95	0,31	1,73	1,18	1,54	0,00	0,00	1,17	1,21	0,00	0,05	0,00	0,00	0,56	
3	1,27	1,27	1,30	0,00	0,00	0,03	0,00	1,26	0,79	0,00	0,00	1,15	0,00	0,00	0,03	0,00	1,29	1,56	0,37	3,12	1,29	1,22	0,00	0,00	1,27	1,35	0,00	0,06	0,00	0,00	0,62	
4	2,22	2,25	2,28	0,00	0,00	0,49	0,00	2,31	0,76	0,00	0,00	1,07	0,00	0,00	0,05	0,00	2,27	2,48	0,73	2,94	2,41	1,77	0,00	0,00	2,33	2,40	0,00	0,10	0,00	0,00	0,96	
5	2,02	2,13	2,06	0,00	0,00	0,25	0,00	2,10	0,68	0,00	0,00	1,05	0,00	0,00	0,05	0,00	2,11	2,52	0,58	2,61	2,14	1,66	0,00	0,00	2,10	2,14	0,00	0,09	0,00	0,00	0,87	
6	3,19	4,09	3,13	0,00	0,00	1,30	0,00	3,26	0,96	0,00	0,00	1,17	0,00	0,00	0,06	0,00	3,66	3,27	0,75	3,22	3,09	1,87	0,00	0,00	3,15	3,11	0,00	0,15	0,00	0,00	1,31	
7	4,26	3,93	4,23	0,00	0,00	2,29	0,00	4,31	1,19	0,00	0,00	1,58	0,00	0,00	0,08	0,00	4,00	4,68	1,05	4,35	4,96	2,51	0,00	0,00	4,36	4,41	0,00	0,18	0,00	0,00	1,75	
8	3,12	2,87	3,10	0,00	0,00	1,67	0,00	3,05	0,87	0,00	0,00	1,16	0,00	0,00	0,06	0,00	2,93	3,47	0,77	3,18	3,34	1,83	0,00	0,00	3,16	3,20	0,00	0,14	0,00	0,00	1,27	
9	6,12	5,47	5,97	0,00	0,00	3,61	0,00	6,18	1,62	0,00	0,00	2,12	0,00	0,00	0,10	0,00	5,59	7,02	1,41	5,83	6,18	3,31	0,00	0,00	6,33	6,83	0,00	0,26	0,00	0,00	2,46	
10	6,17	5,15	5,81	0,00	0,00	3,20	0,00	6,10	1,50	0,00	0,00	1,95	0,00	0,00	0,09	0,00	5,25	7,44	1,29	5,36	5,63	3,06	0,00	0,00	5,76	5,49	0,00	0,25	0,00	0,00	2,32	
11	6,50	4,43	4,49	0,00	0,00	2,27	0,00	6,02	1,23	0,00	0,00	1,56	0,00	0,00	0,08	0,00	4,46	8,76	1,03	4,31	4,38	2,47	0,00	0,00	4,48	4,31	0,00	0,23	0,00	0,00	2,03	
12	3,33	4,03	3,35	0,00	0,00	1,41	0,00	3,48	1,14	0,00	0,00	1,24	0,00	0,00	0,06	0,00	4,89	3,51	0,81	3,42	3,31	1,96	0,00	0,00	3,40	3,34	0,00	0,16	0,00	0,00	1,43	
13	3,48	3,97	3,53	0,00	0,00	1,51	0,00	3,66	1,10	0,00	0,00	1,30	0,00	0,00	0,06	0,00	4,30	3,73	0,85	3,58	3,48	2,03	0,00	0,00	3,59	3,54	0,00	0,17	0,00	0,00	1,46	
14	4,85	4,81	4,90	0,00	0,00	2,30	0,00	5,07	1,39	0,00	0,00	1,76	0,00	0,00	0,09	0,00	5,03	5,52	1,16	4,85	4,82	2,61	0,00	0,00	5,07	5,01	0,00	0,22	0,00	0,00	1,98	
Distorção Individual de Tensão de 7ª Ordem Harmônica (%)																																
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média	
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,26	0,03	0,00	0,00	0,00	0,12	0,09	0,00	0,00	0,00	0,17	0,03	0,03	
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	0,00	0,17	0,05	0,00	0,00	0,00	0,30	0,20	0,00	0,00	0,00	0,41	0,05	0,05	
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,84	0,00	0,09	0,06	0,00	0,00	0,00	0,15	0,70	0,00	0,00	0,00	0,20	0,06	0,07	
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	0,00	0,06	0,10	0,00	0,00	0,00	0,09	0,18	0,00	0,00	0,00	0,12	0,10	0,03	
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	0,00	0,09	0,07	0,00	0,00	0,00	0,11	0,15	0,00	0,00	0,00	0,15	0,07	0,03	
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	0,00	0,06	0,11	0,00	0,00	0,00	0,09	0,14	0,00	0,00	0,00	0,12	0,11	0,03	
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,32	0,00	0,14	0,18	0,00	0,00	0,00	0,19	0,27	0,00	0,00	0,00	0,26	0,26	0,05	
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	0,00	0,10	0,13	0,00	0,00	0,00	0,14	0,20	0,00	0,00	0,00	0,19	0,19	0,04	
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,63	0,00	0,27	0,37	0,00	0,00	0,00	0,37	0,51	0,00	0,00	0,00	0,50	0,39	0,10	
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,55	0,00	0,23	0,32	0,00	0,00	0,00	0,32	0,44	0,00	0,00	0,00	0,43	0,30	0,09	
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,36	0,00	0,15	0,21	0,00	0,00	0,00	0,21	0,33	0,00	0,00	0,00	0,28	0,10	0,06	
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,21	0,00	0,08	0,13	0,00	0,00	0,00	0,11	0,17	0,00	0,00	0,00	0,15	0,47	0,04	
13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24	0,00	0,09	0,14	0,00	0,00	0,00	0,13	0,19	0,00	0,00	0,00	0,17	0,18	0,04	
14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,46	0,00	0,19	0,27	0,00	0,00	0,00	0,27	0,37	0,00	0,00	0,00	0,36	0,14	0,07	
Distorção Individual de Tensão de 11ª Ordem Harmônica (%)																																
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média	
1	0,32	0,32	0,31	0,31	0,32	0,31	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,31	0,32	0,32	0,32	0,30	0,30	0,31	0,32	0,32	0,31	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,31	0,32	0,32	
2	0,60	0,59	0,59	0,59	0,59	0,60	0,59	0,59	0,59	0,60	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,58	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	
3	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,71	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,83	
4	0,59	0,60	0,62	0,62	0,60	0,61	0,60	0,60	0,61	0,59	0,60	0,61	0,60	0,60	0,61	0,60	0,67	0,62	0,60	0,60	0,62	0,61	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,65	0,59	0,61	
5	0,63	0,63	0,62	0,62	0,63	0,62	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,64	0,62	0,63	0,63	0,62	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	
6	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	
7	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
8	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	
9	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,24	0,25	0,26	0,25	0,25	0,25	0,25	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	
10	0,18	0,18	0,17	0,17	0,18	0,17	0,18	0,18	0,17	0,18	0,18	0,17	0,18	0,18	0,17	0,18	0,19	0,17	0,18	0,18	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	
11	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	
12	0,14	0,14	0,13	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,13	0,14	0,14	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	
13	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11																											

# APÊNDICE B

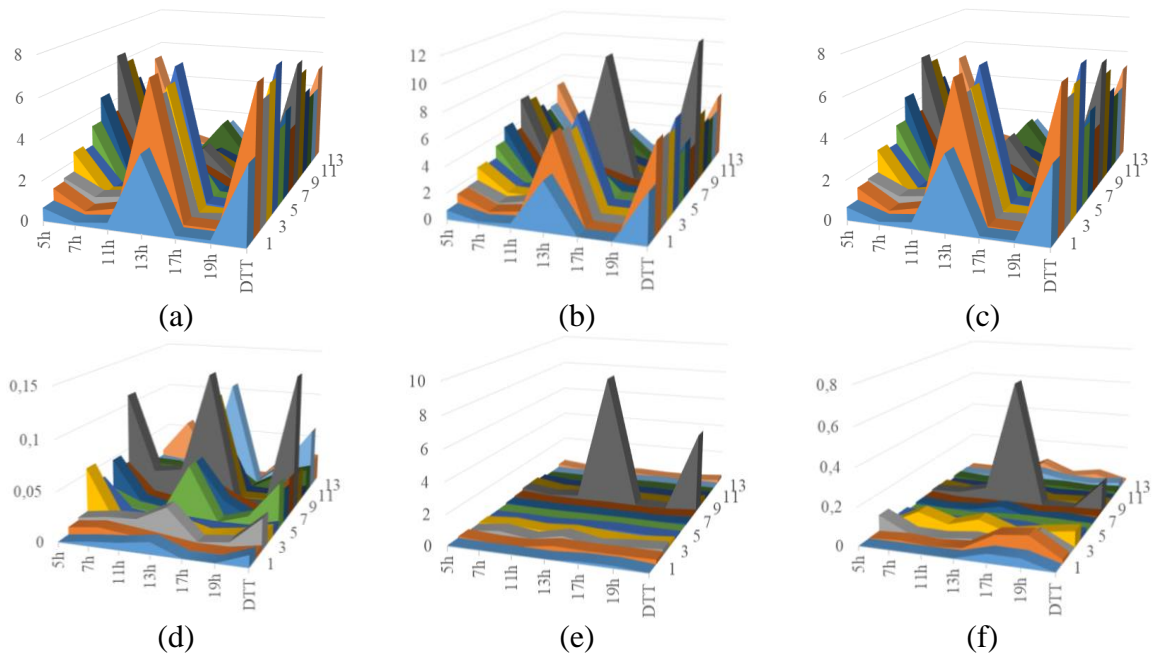
## Resultados de Simulações Usando 6 Medidores



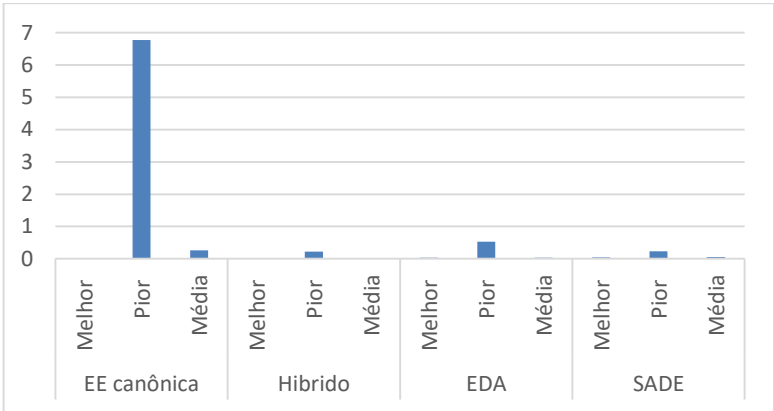
**Figura B.1 - Resultados do algoritmo com estratégia evolutiva canônica (6 medidores) para as tensões harmônicas para:**  
**Magnitudes: (a) melhor, (b) pior e (c) médio**  
**Erros: (d) melhor, (e) pior e (f) médio**



**Figura B.2 - Resultados do algoritmo híbrido (6 medidores) para as tensões harmônicas para:**  
**Magnitudes: (a) melhor, (b) pior e (c) médio**  
**Erros: (d) melhor, (e) pior e (f) médio**



**Figura B.3 - Resultados do algoritmo EDA (6 medidores) para as tensões harmônicas para:**  
**Magnitudes: (a) melhor, (b) pior e (c) médio**  
**Erros: (d) melhor, (e) pior e (f) médio**



**Figura B.4 - Síntese da análise comparativa (usando 3 medidores) dos desempenhos dos algoritmos através da média dos resultados de EEH para todos os barramentos do sistema**



	Distorção Individual de Tensão de 6º Ordem Harmônica (%)																														Média
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	0,69	0,67	0,65	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	1,23	0,67	0,67	0,66	0,67	0,65	0,67	0,84	0,65	0,67	0,67	0,66	0,67	0,68	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,62	0,69
2	1,34	1,28	1,23	1,27	1,26	1,28	1,28	1,27	1,28	1,27	1,67	1,25	1,27	1,25	1,27	1,23	1,27	0,81	1,23	1,26	1,28	1,28	1,28	1,28	1,27	1,27	1,27	1,27	1,28	1,13	1,26
3	1,46	1,40	1,36	1,40	1,39	1,40	1,39	1,40	1,39	1,40	1,84	1,41	1,39	1,37	1,39	1,36	1,41	1,06	1,37	1,39	1,38	1,40	1,40	1,41	1,39	1,40	1,39	1,40	1,31	1,40	
4	2,68	2,47	2,43	2,48	2,45	2,46	2,49	2,46	2,45	2,46	2,44	2,49	2,45	2,43	2,45	2,43	2,48	2,45	2,43	2,44	2,45	2,46	2,44	2,51	2,47	2,49	2,46	2,46	2,47	2,39	2,46
5	2,25	2,24	2,25	2,24	2,24	2,24	2,23	2,23	2,24	2,24	2,76	2,24	2,24	2,24	2,24	2,25	2,24	2,39	2,24	2,24	2,25	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24	2,26	2,26	
6	3,29	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,43	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,25
7	4,69	4,48	4,49	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,51	4,48	4,48	4,80	4,48	4,49	4,50	4,48	4,48	4,35	4,49	4,48	4,49	4,48	4,48	4,49	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,50
8	3,44	3,28	3,29	3,28	3,28	3,27	3,27	3,27	3,27	3,28	3,28	3,48	3,27	3,28	3,29	3,28	3,28	3,28	3,26	3,29	3,27	3,29	3,29	3,27	3,27	3,28	3,27	3,28	3,28	3,28	3,30
9	6,10	6,11	6,11	6,11	6,11	6,11	6,10	6,29	6,11	6,11	6,33	6,11	6,12	6,12	6,11	6,11	6,11	5,75	6,11	6,11	6,11	6,10	6,10	6,11	6,11	6,11	6,11	6,11	6,10	6,11	6,10
10	5,60	5,77	5,80	5,78	5,77	5,77	5,77	5,75	5,77	5,77	5,77	5,77	5,79	5,81	5,77	5,80	5,77	5,53	5,80	5,77	5,79	5,79	5,77	5,77	5,79	5,77	5,77	5,78	5,77	5,80	5,76
11	4,47	4,53	4,55	4,54	4,54	4,53	4,54	4,53	4,53	4,53	4,53	4,53	4,53	4,55	4,54	4,55	4,53	4,57	4,55	4,53	4,52	4,54	4,53	4,53	4,54	4,52	4,53	4,54	4,53	4,55	4,52
12	3,51	3,50	3,48	3,47	3,50	3,50	3,51	3,46	3,50	3,53	3,50	3,21	3,47	3,48	3,48	3,50	3,48	3,47	3,69	3,48	3,50	3,48	3,48	3,50	3,46	3,50	3,46	3,50	3,50	3,48	3,49
13	3,69	3,69	3,66	3,68	3,69	3,69	3,69	3,70	3,70	3,69	3,69	3,50	3,71	3,66	3,66	3,69	3,66	3,68	3,64	3,66	3,69	3,66	3,66	3,69	3,69	3,67	3,69	3,69	3,69	3,66	3,67
14	5,04	5,16	5,04	5,16	5,16	5,16	5,15	5,17	5,16	5,16																					

Tabela B.II - Resultados de EEH do algoritmo híbrido

Distorção Individual de Tensão de 5ª Ordem Harmônica (%)																																	
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média		
1	0,68	0,68	0,68	0,71	0,69	0,70	0,68	0,62	0,90	0,65	0,68	0,70	0,66	0,65	0,65	0,63	0,67	0,68	0,68	0,66	0,67	0,70	0,63	0,67	0,71	0,66	0,68	0,65	0,65	0,66	0,68		
2	1,29	1,30	1,27	1,32	1,32	1,33	1,29	1,20	1,38	1,24	1,29	1,26	1,25	1,25	1,22	1,22	1,26	1,27	1,29	1,24	1,26	1,32	1,19	1,26	1,36	1,28	1,28	1,14	1,22	1,24	1,27		
3	1,50	1,53	1,33	1,39	1,47	1,45	1,57	1,43	1,58	1,29	1,44	1,48	1,40	1,53	1,43	1,43	1,48	1,42	1,61	1,47	1,49	1,54	1,34	1,40	1,54	1,45	1,47	1,25	1,37	1,44	1,45		
4	2,47	2,54	2,58	2,66	2,46	2,51	2,51	2,41	2,49	2,40	2,53	2,58	2,47	2,51	2,43	2,42	2,46	2,58	2,49	2,51	2,50	2,61	2,38	2,44	2,52	2,48	2,45	2,43	2,39	2,45	2,49		
5	2,24	2,34	2,28	2,36	2,24	2,30	2,26	2,18	2,26	2,14	2,35	2,29	2,22	2,24	2,21	2,20	2,24	2,29	2,22	2,23	2,24	2,34	2,14	2,20	2,30	2,26	2,23	2,29	2,15	2,21	2,25		
6	3,27	3,27	3,22	3,27	3,20	3,24	3,30	3,26	3,21	3,11	3,29	3,26	3,27	3,24	3,19	3,23	3,23	3,25	3,11	3,28	3,25	3,29	3,20	3,21	3,25	3,25	3,27	3,25	3,20	3,20	3,24		
7	4,50	4,55	4,54	4,49	4,46	4,50	4,61	4,51	4,42	4,76	4,56	4,51	4,43	4,51	4,48	4,49	4,49	4,49	4,50	4,45	4,44	4,51	4,48	4,54	4,52	4,51	4,46	4,44	4,46	4,48	4,51		
8	3,29	3,41	3,32	3,29	3,26	3,27	3,37	3,31	3,23	3,48	3,32	3,30	3,24	3,31	3,28	3,28	3,28	3,28	3,40	3,29	3,25	3,30	3,28	3,32	3,30	3,30	3,32	3,25	3,25	3,26	3,28	3,30	
9	6,33	6,35	6,24	6,21	6,22	6,31	6,49	6,33	6,17	6,07	6,39	6,28	6,20	6,32	6,33	6,29	6,31	6,28	5,99	6,30	6,12	6,16	6,34	6,41	6,32	6,33	6,27	6,25	6,30	6,35	6,27		
10	5,77	5,80	5,74	5,77	5,76	5,76	5,92	5,78	5,65	5,55	5,86	5,79	5,98	5,77	5,77	5,78	5,76	5,74	5,48	5,75	5,83	5,79	5,78	5,87	5,76	5,77	5,71	5,86	5,77	5,79	5,77		
11	4,54	4,56	4,50	4,60	4,54	4,51	4,63	4,54	4,45	4,35	4,60	4,56	4,65	4,53	4,51	4,50	4,51	4,52	4,31	4,56	4,57	4,56	4,51	4,66	4,51	4,57	4,47	4,57	4,57	4,52	4,53		
12	3,55	3,48	3,40	3,44	3,34	3,45	3,55	3,53	3,45	3,34	3,51	3,47	3,50	3,47	3,44	3,49	3,49	3,49	3,33	3,55	3,53	3,53	3,45	3,46	3,47	3,48	3,53	3,49	3,45	3,42	3,47		
13	3,72	3,71	3,64	3,68	3,64	3,67	3,75	3,74	3,63	3,52	3,68	3,67	3,68	3,66	3,63	3,68	3,66	3,69	3,51	3,74	3,66	3,72	3,64	3,66	3,67	3,66	3,72	3,67	3,64	3,64	3,67		
14	5,13	5,16	5,19	5,17	5,09	5,27	5,29	5,29	5,06	4,96	5,16	5,14	5,10	5,10	5,18	5,14	5,11	5,13	4,91	5,21	5,04	5,25	5,16	5,21	5,14	5,16	5,19	5,12	5,13	5,19	5,15		
Distorção Individual de Tensão de 7ª Ordem Harmônica (%)																																	
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média		
1	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,19		
2	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,32	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,32	0,33	0,33	0,32	0,33	0,33	0,33	0,33	0,41		
3	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,67	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68		
4	0,39	0,49	0,48	0,48	0,37	0,37	0,48	0,37	0,37	0,40	0,49	0,37	0,37	0,48	0,47	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,45	0,45	0,48	0,48	0,43	0,37	0,37	0,43	0,48	0,53		
5	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39		
6	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16		
7	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24		
8	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17		
9	0,49	0,47	0,48	0,48	0,49	0,48	0,49	0,47	0,48	0,50	0,48	0,49	0,51	0,49	0,48	0,47	0,48	0,45	0,49	0,51	0,49	0,49	0,47	0,74	0,49	0,47	0,43	0,51	0,50	0,49	1,21		
10	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43		
11	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30		
12	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21		
13	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26		
14	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,52	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,52		
Distorção Individual de Tensão de 11ª Ordem Harmônica (%)																																	
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média		
1	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,35	0,34	0,34	0,34	0,35	0,34	0,34	0,34	0,34		
2	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66		
3	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,88	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,88	0,88	0,87	0,87	0,87	0,87		
4	0,65	0,68	0,71	0,70	0,67	0,71	0,66	0,71	0,71	0,66	0,70	0,66	0,75	0,72	0,72	0,73	0,69	0,71	0,66	0,67	0,66	0,71	0,69	0,75	0,71	0,69	0,71	0,72	0,66	0,69	0,70		
5	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72		
6	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18		
7	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13		
8	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,0,																	



Tabela B.III - Resultados de EEH do algoritmo de EDA

Distorção Individual de Tensão de 5º Ordem Harmônica (%)																																	
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média		
1	0,68	0,65	0,72	0,69	0,60	0,66	0,67	0,70	0,68	0,66	0,67	0,67	0,74	0,69	0,72	0,68	0,67	0,63	0,66	0,69	0,67	0,67	0,72	0,63	0,73	0,60	0,66	0,65	0,67	0,65	0,67		
2	1,26	1,22	1,31	1,28	1,31	1,23	1,25	1,35	1,30	1,24	1,22	1,26	1,38	1,35	1,24	1,29	1,28	1,19	1,23	1,28	1,27	1,26	1,40	1,18	1,30	1,32	1,24	1,22	1,29	1,26	1,27		
3	1,46	1,29	1,37	1,45	1,46	1,30	1,31	1,32	1,46	1,30	1,37	1,32	1,47	1,33	1,29	1,44	1,45	1,28	1,40	1,34	1,41	1,43	1,44	1,24	1,42	1,47	1,42	1,30	1,36	1,40	1,38		
4	2,45	2,41	2,63	2,94	2,92	2,47	2,47	2,52	2,58	2,46	2,42	2,56	2,87	2,45	2,41	2,45	2,47	2,37	2,50	2,52	2,49	2,45	2,44	2,36	2,48	2,92	2,45	2,41	2,65	2,47	2,53		
5	2,27	2,26	2,34	2,53	2,35	2,21	2,27	2,28	2,29	2,27	2,17	2,27	2,50	2,22	2,18	2,21	2,22	2,13	2,23	2,36	2,34	2,27	2,22	2,13	2,28	2,51	2,20	2,18	2,33	2,29	2,28		
6	3,25	3,23	3,27	3,30	3,24	3,23	3,26	3,19	3,25	3,25	3,22	3,25	3,27	3,22	3,22	3,23	3,24	3,21	3,24	3,23	3,28	3,26	3,22	3,26	3,27	3,31	3,22	3,34	3,24	3,27	3,25		
7	4,37	4,41	4,53	4,50	4,47	4,53	4,54	4,53	4,42	4,56	4,52	4,56	4,42	4,51	4,50	4,52	4,52	4,48	4,42	4,48	4,38	4,37	4,34	4,59	4,43	4,48	4,73	4,57	4,46	4,39	4,49		
8	3,20	3,39	3,31	3,29	3,27	3,32	3,32	3,32	3,24	3,34	3,31	3,31	3,24	3,30	3,29	3,31	3,30	3,28	3,23	3,28	3,21	3,19	3,45	3,36	3,24	3,26	3,25	3,35	3,26	3,21	3,29		
9	6,12	6,10	6,30	6,06	6,05	6,37	6,41	6,38	6,14	6,43	6,46	6,39	5,99	6,42	6,36	6,38	6,35	6,34	6,17	6,27	6,11	6,11	5,91	6,08	6,13	6,06	6,14	6,22	6,10	6,14	6,22		
10	5,90	5,81	5,76	5,59	5,55	5,75	5,78	5,80	5,82	5,78	5,78	5,83	5,53	5,85	5,80	5,79	5,80	5,52	5,58	5,73	5,87	5,87	5,43	5,67	5,85	5,57	5,66	5,71	5,76	5,91	5,75		
11	4,59	4,54	4,54	4,50	4,41	4,51	4,54	4,49	4,51	4,54	4,51	4,56	4,51	4,56	4,53	4,52	4,54	4,52	4,58	4,50	4,60	4,59	4,34	4,73	4,58	4,46	4,58	4,54	4,53	4,61	4,54		
12	3,47	3,43	3,51	3,51	3,48	3,48	3,47	3,45	3,49	3,50	3,47	3,49	3,45	3,44	3,47	3,48	3,48	3,48	3,49	3,47	3,51	3,49	3,54	3,49	3,50	3,55	3,45	3,56	3,47	3,50	3,49		
13	3,65	3,66	3,69	3,69	3,69	3,67	3,70	3,65	3,68	3,70	3,66	3,69	3,66	3,63	3,66	3,68	3,68	3,69	3,68	3,69	3,67	3,73	3,67	3,69	3,75	3,63	3,74	3,65	3,68	3,68	3,68		
14	5,04	5,18	5,16	5,16	5,16	5,25	5,19	5,27	5,20	5,22	5,23	5,21	5,09	5,16	5,17	5,20	5,18	5,24	5,24	5,08	5,09	5,39	5,06	5,14	5,25	5,03	5,14	5,02	5,08	5,17	5,17		
Distorção Individual de Tensão de 7º Ordem Harmônica (%)																																	
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média		
1	0,13	0,15	0,16	0,16	0,17	0,16	0,17	0,16	0,16	0,23	0,16	0,16	0,14	0,15	0,14	0,15	0,14	0,15	0,15	0,18	0,16	0,17	0,15	0,14	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,15	0,16		
2	0,27	0,31	0,34	0,33	0,35	0,31	0,34	0,32	0,32	0,31	0,36	0,31	0,28	0,30	0,30	0,31	0,29	0,31	0,30	0,33	0,33	0,34	0,30	0,30	0,30	0,31	0,31	0,31	0,32	0,31	0,31		
3	0,63	0,68	0,65	0,65	0,72	0,68	0,65	0,67	0,72	0,69	0,68	0,69	0,70	0,68	0,66	0,66	0,64	0,70	0,65	0,74	0,71	0,41	0,68	0,67	0,69	0,66	0,69	0,68	0,69	0,66	0,67		
4	0,32	0,37	0,38	0,38	0,37	0,38	0,54	0,37	0,43	0,31	0,32	0,38	0,31	0,32	0,38	0,31	0,36	0,43	0,45	0,27	0,39	0,38	0,45	0,39	0,71	0,37	0,45	0,36	0,48	0,37	0,38	0,45	0,40
5	0,34	0,40	0,41	0,41	0,37	0,42	0,43	0,39	0,38	0,28	0,29	0,41	0,40	0,38	0,35	0,36	0,37	0,38	0,41	0,37	0,41	0,44	0,39	0,36	0,38	0,39	0,40	0,41	0,40	0,36	0,38		
6	0,14	0,19	0,17	0,13	0,16	0,16	0,18	0,16	0,16	0,16	0,17	0,20	0,17	0,16	0,17	0,16	0,14	0,16	0,14	0,17	0,18	0,15	0,17	0,16	0,18	0,16	0,16	0,16	0,19	0,17	0,20		
7	0,21	0,25	0,27	0,18	0,21	0,22	0,23	0,20	0,26	0,24	0,22	0,26	0,24	0,29	0,25	0,25	0,24	0,22	0,28	0,21	0,26	0,20	0,29	0,26	0,26	0,24	0,21	0,28	0,27	0,30	0,24		
8	0,16	0,18	0,20	0,13	0,15	0,16	0,17	0,15	0,19	0,18	0,17	0,19	0,18	0,22	0,19	0,19	0,18	0,16	0,14	0,15	0,19	0,14	0,21	0,19	0,19	0,18	0,15	0,21	0,20	0,22	0,18		
9	0,50	0,44	0,47	0,49	0,37	0,51	0,43	0,51	0,51	0,39	0,50	0,44	0,50	0,48	0,52	0,50	0,49	0,52	0,51	0,50	0,45	0,52	0,49	0,47	0,45	0,48	0,52	0,48	0,47	0,53	0,48		
10	0,43	0,39	0,42	0,42	0,37	0,45	0,42	0,45	0,45	0,37	0,44	0,40	0,44	0,42	0,43	0,42	0,43	0,45	0,42	0,44	0,39	0,45	0,39	0,42	0,40	0,42	0,45	0,39	0,43	0,47	0,42		
11	0,28	0,29	0,32	0,28	0,31	0,31	0,30	0,31	0,31	0,28	0,29	0,30	0,31	0,29	0,30	0,26	0,30	0,29	0,30	0,32	0,28	0,31	0,27	0,30	0,28	0,29	0,31	0,29	0,34	0,33	0,30		
12	0,18	0,21	0,21	0,23	0,25	0,22	0,23	0,21	0,21	0,20	0,21	0,25	0,21	0,20	0,20	0,18	0,23	0,19	0,22	0,25	0,19	0,24	0,20	0,21	0,23	0,23	0,21	0,21	0,21	0,23	0,22		
13	0,22	0,24	0,25	0,24	0,25	0,27	0,28	0,27	0,26	0,24	0,25	0,27	0,24	0,24	0,26	0,22	0,19	0,23	0,28	0,29	0,24	0,27	0,25	0,24	0,29	0,25	0,25	0,25	0,25	0,27	0,25		
14	0,54	0,55	0,54	0,57	0,52	0,54	0,46	0,55	0,53	0,53	0,53	0,51	0,53	0,54	0,53	0,55	0,50	0,56	0,53	0,51	0,55	0,55	0,51	0,51	0,52	0,59	0,56	0,52	0,59	0,56	0,54		
Distorção Individual de Tensão de 11º Ordem Harmônica (%)																																	
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média		
1	0,35	0,36	0,35	0,35	0,34	0,35	0,35	0,34	0,34	0,35	0,34	0,34	0,34	0,35	0,36	0,34	0,34	0,33	0,34	0,35	0,35	0,34	0,35	0,35	0,35	0,34	0,35	0,34	0,37	0,34	0,35		
2	0,66	0,67	0,67	0,66	0,66	0,64	0,64	0,66	0,66	0,65	0,66	0,67	0,64	0,67	0,67	0,65	0,65	0,65	0,66	0,67	0,68	0,66	0,66	0,64	0,66	0,67	0,66	0,74	0,65	0,66	0,66		
3	0,85	0,88	0,89	0,91	0,88	0,88	0,88	0,86	0,88	0,87	0,87	0,85	0,87	0,87	0,88	0,87	0,89	0,86	0,86	0,86	0,89	0,87	0,88	0,88	0,87	0,88	0,89	0,88	0,87	0,86	0,87		
4	0,72	0,67	0,72	0,68	0,66	0,66	0,64	0,65	0,77	0,71	0,74	0,80	0,67	0,75	0,70	0,72	0,72	0,74	0,75	0,78	0,65	0,71	0,71	0,66	0,66	0,74	0,70	0,68	0,72	0,71	0,71		
5	0,75	0,73	0,74	0,74	0,70	0,71	0,72	0,72	0,70	0,69	0,72	0,69	0,72	0,73	0,71	0,73	0,70	0,70	0,71	0,72	0,72	0,70	0,70	0,73	0,72	0,70	0,72	0,69	0,70	0,70	0,71		
6	0,18	0,19	0,19	0,17	0,20	0,19	0,16	0,20	0,19	0,19	0,19	0,19	0,17	0,18	0,17	0,20	0,18	0,18	0,17	0,20	0,17	0,18	0,19	0,19	0,18	0,19	0,18	0,19	0,16	0,19	0,18		
7	0,08	0,11	0,12	0,09	0,11	0,12	0,13	0,13	0,13	0,14	0,11	0,12	0,13	0,11	0,11	0,13	0,09	0,09	0,11	0,10	0,10	0,10	0,12	0,11	0,08	0,13	0,13	0,13	0,10	0,10	0,11		
8	0,06	0,09	0,09	0,10	0,08	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,09	0,09	0,10	0,10	0,08																		



# APÊNDICE C

## Resultados de Simulações Usando 5 Medidores

Tabela C.I - Resultados de EEH do algoritmo com estratégia evolutiva canônica

Distorção Individual de Tensão de 5º Ordem Harmônica (%)																																
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média	
1	0,67	0,67	0,67	0,68	0,67	0,67	0,69	0,68	0,65	0,67	0,67	0,66	0,67	0,66	0,68	0,67	0,69	0,67	0,67	0,70	0,67	0,69	0,67	0,67	0,65	0,69	0,69	0,67	0,65	0,67		
2	1,28	1,28	1,29	1,31	1,30	1,28	1,33	1,31	1,24	1,28	1,29	1,25	1,29	1,26	1,31	1,28	1,34	1,30	1,30	1,29	1,35	1,28	1,33	1,29	1,29	1,22	1,33	1,33	1,28	1,23	1,29	
3	1,37	1,37	1,39	1,38	1,38	1,42	1,40	1,41	1,34	1,37	1,38	1,36	1,39	1,37	1,38	1,46	1,41	1,39	1,38	1,38	1,42	1,37	1,42	1,40	1,38	1,31	1,42	1,41	1,39	1,38	1,39	
4	2,39	2,39	2,42	2,39	2,40	2,51	2,42	2,47	2,34	2,39	2,42	2,38	2,43	2,40	2,39	2,44	2,43	2,41	2,40	2,41	2,45	2,39	2,46	2,46	2,39	2,31	2,45	2,43	2,44	2,44	2,41	
5	2,16	2,22	2,19	2,17	2,20	2,26	2,20	2,21	2,20	2,20	2,18	2,20	2,19	2,20	2,18	2,20	2,20	2,18	2,18	2,21	2,19	2,22	2,21	2,21	2,27	2,21	2,20	2,25	2,22	2,20		
6	3,27	3,26	3,28	3,27	3,26	3,22	3,28	3,27	3,26	3,26	3,28	3,26	3,27	3,26	3,27	3,24	3,27	3,27	3,26	3,28	3,27	3,26	3,27	3,23	3,26	3,25	3,27	3,27	3,26	3,25	3,26	
7	4,55	4,52	4,49	4,52	4,53	4,47	4,49	4,48	4,53	4,53	4,49	4,53	4,49	4,53	4,52	4,50	4,49	4,50	4,54	4,50	4,48	4,53	4,48	4,48	4,53	4,49	4,48	4,49	4,46	4,51	4,50	
8	3,33	3,31	3,29	3,31	3,31	3,27	3,28	3,28	3,32	3,31	3,29	3,31	3,28	3,31	3,30	3,28	3,29	3,32	3,29	3,28	3,32	3,28	3,32	3,28	3,31	3,28	3,28	3,27	3,30	3,29		
9	6,39	6,40	7,15	6,39	6,41	9,46	6,98	8,25	6,44	6,42	7,29	6,42	7,03	6,41	6,37	6,34	7,09	6,51	6,43	6,72	6,58	6,39	7,58	7,73	6,41	6,30	6,94	6,83	6,41	6,36	6,82	
10	6,25	6,30	8,28	6,27	6,30	9,27	7,95	10,58	7,23	6,32	8,57	6,33	8,10	7,04	6,25	9,63	8,70	6,56	6,34	7,16	6,66	6,27	9,28	9,64	6,31	6,15	7,49	7,48	6,36	1,77	7,23	
11	7,28	6,72	3,50	6,70	6,87	4,37	3,17	2,27	11,55	8,38	2,56	8,29	3,11	6,25	7,17	4,50	4,65	5,59	8,70	5,02	5,01	6,92	3,42	2,68	6,96	5,90	4,04	4,50	4,34	8,54	5,62	
12	3,50	3,49	3,51	3,51	3,49	3,47	3,51	3,50	3,49	3,52	3,49	3,51	3,49	3,51	3,49	3,49	3,51	3,49	3,51	3,50	3,49	3,50	3,46	3,49	3,49	3,50	3,51	3,49	3,48	3,50		
13	3,69	3,67	3,70	3,70	3,68	3,73	3,70	3,70	3,70	3,68	3,67	3,71	3,67	3,70	3,68	3,69	3,71	3,70	3,70	3,68	3,71	3,70	3,68	3,71	3,70	3,73	3,67	3,68	3,70	3,70	3,68	3,69
14	5,11	5,09	5,17	5,14	5,11	5,19	5,17	5,17	5,17	5,17	5,17	5,17	5,17	5,14	5,15	5,17	5,17	5,17	5,17	5,16	5,11	5,16	5,19	5,09	5,13	5,17	5,17	5,17	5,16	5,11	5,14	
Distorção Individual de Tensão de 7º Ordem Harmônica (%)																																
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média	
1	0,18	0,20	0,17	0,18	0,17	0,22	0,16	0,16	0,18	0,19	0,19	0,25	1,05	0,20	0,19	0,19	0,22	0,33	0,20	0,18	0,19	0,19	0,17	0,17	0,18	0,19	0,46	0,19	0,17	0,20	0,23	
2	0,37	0,45	0,32	0,29	0,36	0,50	0,33	0,33	0,38	0,40	0,42	0,60	1,60	0,43	0,41	0,42	0,47	1,70	0,46	0,38	0,44	0,39	0,36	0,37	0,40	0,44	0,41	0,42	0,36	0,46	0,49	
3	0,70	0,76	0,68	0,66	0,70	0,71	0,68	0,68	0,71	0,70	0,74	0,35	1,04	0,72	0,73	0,74	0,36	1,23	0,76	0,71	0,75	0,70	0,70	0,70	0,72	0,75	0,46	0,74	0,69	0,76	0,71	
4	0,48	0,37	0,51	0,39	0,64	1,28	0,51	0,49	0,46	0,85	0,36	0,35	0,90	0,98	0,43	0,36	0,48	1,27	0,36	0,49	0,35	0,78	0,49	0,49	0,44	0,35	0,72	0,36	0,51	0,36	0,56	
5	0,40	0,34	0,41	0,41	0,40	0,40	0,39	0,39	0,39	0,39	0,33	0,36	0,83	0,40	0,37	0,33	0,42	0,46	0,33	0,40	0,32	0,39	0,40	0,40	0,38	0,32	0,53	0,33	0,41	0,33	0,40	
6	0,16	0,17	0,18	0,15	0,18	0,16	0,15	0,15	0,16	0,13	0,11	0,18	0,16	0,16	0,15	0,15	0,43	0,17	0,17	0,15	0,18	0,18	0,17	0,16	0,15	0,03	0,16	0,17	0,15	0,16		
7	0,21	0,22	0,22	0,24	0,27	0,23	0,24	0,23	0,22	0,23	0,23	0,23	0,26	0,24	0,21	0,23	0,21	0,39	0,25	0,23	0,22	0,23	0,21	0,22	0,21	0,23	0,33	0,23	0,24	0,27	0,24	
8	0,15	0,15	0,16	0,17	0,19	0,17	0,17	0,17	0,16	0,17	0,17	0,17	0,23	0,17	0,15	0,17	0,15	0,21	0,17	0,16	0,16	0,17	0,15	0,15	0,15	0,17	0,32	0,17	0,17	0,18	0,17	
9	0,70	0,59	0,73	7,26	0,59	0,79	0,74	0,74	0,73	0,73	0,38	0,57	0,76	0,55	0,71	0,37	2,40	1,60	0,51	0,60	0,72	0,46	0,68	0,67	0,71	0,71	0,61	0,37	0,61	0,49	0,94	
10	8,46	7,08	7,18	10,37	7,62	8,23	7,50	4,25	5,85	6,68	9,29	6,09	0,79	9,39	5,67	8,91	4,69	1,70	8,38	7,87	7,19	8,78	8,13	8,29	7,96	8,09	0,51	8,92	7,52	7,95	6,98	
11	9,61	13,47	13,47	0,25	0,30	4,98	0,27	8,88	7,07	4,91	0,97	7,49	2,66	3,17	12,45	0,23	3,49	3,63	14,09	12,99	0,20	2,48	14,36	14,68	11,28	0,22	0,67	0,53	10,12	0,25	5,97	
12	0,20	0,18	0,21	0,20	0,19	0,22	0,21	0,21	0,20	0,20	0,21	0,17	0,34	0,21	0,20	0,20	0,20	0,14	0,17	0,19	0,19	0,22	0,20	0,20	0,20	0,20	0,19	0,07	0,20	0,17	0,20	
13	0,25	0,20	0,24	0,24	0,24	0,24	0,27	0,27	0,26	0,27	0,25	0,23	0,52	0,24	0,24	0,25	0,23	0,35	0,19	0,21	0,26	0,25	0,23	0,22	0,24	0,26	0,08	0,25	0,21	0,25	0,25	
14	0,50	0,42	0,52	0,54	0,44	0,55	0,53	0,54	0,52	0,53	0,52	0,42	0,79	0,50	0,50	0,52	0,50	0,68	0,37	0,43	0,52	0,52	0,48	0,47	0,50	0,51	0,38	0,52	0,43	0,37	0,50	
Distorção Individual de Tensão de 11º Ordem Harmônica (%)																																
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média	
1	0,33	0,34	0,33	0,35	0,34	0,33	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,33	0,34	0,33	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34	0,34	
2	0,61	0,65	0,61	0,67	0,66	0,61	0,62	0,66	0,62	0,62	0,66	0,65	0,66	0,66	0,61	0,62	0,61	0,66	0,62	0,62	0,66	0,66	0,66	0,65	0,66	0,62	0,61	0,63	0,62	0,65	0,64	
3	0,69	0,85	0,69	0,85	0,86	0,69	0,69	0,87	0,69	0,69	0,87	0,85	0,86	0,87	0,69	0,69	0,69	0,87	0,69	0,69	0,86	0,87	0,85	0,86	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,85	0,77	
4	0,90	1,19	0,90	1,20	1,22	0,90	0,90	1,24	0,90	0,90	1,23	1,20	1,22	1,23	0,90	0,90	0,90	1,23	0,90	0,90	1,22	1,23	1,20	1,22	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	1,20	1,05	
5	0,82	0,73	0,82	0,74	0,73	0,82	0,82	0,73	0,82	0,82	0,72	0,73	0,72	0,72	0,82	0,82	0,82	0,72	0,82	0,82	0,73	0,72	0,73	0,73	0,82	0,82	0,82	0,82	0,73	0,78		
6	0,15	0,16	0,15	0,11	0,16	0,15	0,15	0,17	0,15	0,16	0,17	0,15	0,16	0,17	0,15	0,15	0,16	0,17	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15	0,16	0,15	0,16	0,15	0,16		
7	0,14	0,15	0,14	0,09	0,14	0,14	0,14	0,13	0,14	0,13	0,14	0,13	0,17	0,15	0,13	0,14	0,14	0,13	0,14	0,14	0,13	0,13	0,16	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,12	0,15	0,14	
8	0,10	0,11	0,10	0,06	0,10	0,10	0,10	0,09	0,10	0,10	0,09	0,12	0,11	0,09	0,10	0,10	0,09	0,09	0,10	0,10	0,10	0,09	0,12	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,09	0,11	0,10	
9	0,28	0,30	0,28	0,35	0,29	0,27	0,28	0,29	0,27	0,27	0,30	0,36	0,31	0,29	0,28	0,28	1,46	0,30	0,28	0,28	0,28	0,30	0,24	0,29								

Tabela C.II- Resultados de EEH do algoritmo híbrido

Distorção Individual de Tensão de 5º Ordem Harmônica (%)																																	
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média		
1	0,68	0,65	0,63	0,68	0,68	0,67	0,71	0,69	0,75	0,67	0,67	0,81	0,66	0,68	0,69	0,66	0,67	0,68	0,59	0,67	0,63	0,70	0,67	0,76	0,68	0,66	0,67	0,66	0,67	0,66	0,68		
2	1,28	1,27	1,23	1,28	1,28	1,26	1,34	1,33	1,31	1,26	1,29	1,41	1,24	1,28	1,31	1,24	1,27	1,26	1,21	1,28	1,23	1,32	1,26	1,43	1,27	1,25	1,26	1,26	1,28	1,24	1,28		
3	1,49	1,44	1,46	1,47	1,52	1,47	1,44	1,49	1,51	1,47	1,47	1,53	1,41	1,44	1,54	1,41	1,43	1,42	1,47	1,48	1,40	1,51	1,43	1,46	1,51	1,46	1,45	1,49	1,51	1,44	1,47		
4	2,55	2,48	2,43	2,51	2,50	2,48	2,68	2,49	2,67	2,45	2,46	2,52	2,47	2,49	2,45	2,42	2,44	2,50	2,45	2,52	2,44	2,62	2,43	2,89	2,47	2,44	2,42	2,51	2,47	2,50	2,51		
5	2,27	2,25	2,20	2,27	2,25	2,23	2,34	2,28	2,39	2,25	2,24	2,36	2,21	2,28	2,22	2,23	2,23	2,26	2,16	2,26	2,21	2,33	2,24	2,51	2,25	2,23	2,28	2,22	2,23	2,25	2,26		
6	3,30	3,25	3,29	3,22	3,30	3,28	3,21	3,23	3,25	3,26	3,26	3,26	3,27	3,26	3,23	3,25	3,35	3,28	3,27	3,23	3,27	3,24	3,29	3,09	3,26	3,24	3,28	3,28	3,20	3,31	3,26		
7	4,51	4,47	4,50	4,50	4,49	4,45	4,49	4,49	4,41	4,44	4,49	4,41	4,46	4,50	4,39	4,51	4,40	4,46	4,48	4,44	4,49	4,42	4,48	4,24	4,46	4,44	4,42	4,49	4,47	4,47	4,46		
8	3,30	3,27	3,28	3,30	3,29	3,25	3,28	3,31	3,21	3,25	3,28	3,22	3,26	3,29	3,20	3,32	3,22	3,26	3,27	3,25	3,29	3,23	3,28	3,10	3,24	3,27	3,23	3,27	3,27	3,24	3,26		
9	6,35	6,28	6,40	6,30	6,31	6,25	6,17	6,28	6,08	6,28	6,32	6,14	6,27	6,35	6,16	6,38	6,23	6,26	6,29	6,27	6,32	6,14	6,34	5,66	6,26	6,25	6,24	6,30	6,28	6,30	6,25		
10	6,11	5,73	5,87	5,74	5,92	6,05	5,60	5,77	5,75	5,76	6,12	5,90	6,05	5,75	5,92	5,84	6,22	6,05	5,83	5,72	6,15	5,66	5,83	5,21	5,89	5,70	6,08	6,11	5,78	6,13	5,87		
11	4,77	4,51	4,64	4,45	4,61	4,69	4,35	4,49	4,54	4,53	4,69	4,61	4,74	4,44	4,62	4,57	4,88	4,67	4,52	4,51	4,74	4,47	4,58	4,17	4,60	4,48	4,71	4,71	4,47	4,72	4,58		
12	3,52	3,50	3,54	3,47	3,49	3,49	3,47	3,46	3,46	3,51	3,50	3,47	3,49	3,51	3,53	3,51	3,57	3,51	3,55	3,46	3,47	3,47	3,53	3,28	3,52	3,49	3,50	3,53	3,41	3,54	3,49		
13	3,68	3,70	3,71	3,67	3,71	3,68	3,65	3,65	3,62	3,70	3,68	3,63	3,66	3,70	3,69	3,73	3,74	3,68	3,77	3,64	3,65	3,66	3,74	3,43	3,66	3,69	3,67	3,65	3,64	3,73	3,67		
14	5,19	5,19	5,23	5,15	5,17	5,14	5,14	5,10	5,09	5,16	5,16	5,04	5,15	5,23	5,16	5,18	5,15	5,17	5,22	5,12	5,15	5,11	5,23	4,69	5,12	5,16	5,12	5,10	5,21	5,14	5,14		
Distorção Individual de Tensão de 7º Ordem Harmônica (%)																																	
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média		
1	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,23		
2	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,32	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,32	0,32	0,49		
3	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,67	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,67	0,68	0,71		
4	0,49	0,49	0,37	0,37	0,48	0,44	0,49	0,49	0,49	0,37	0,37	0,37	0,37	0,48	0,47	0,37	0,37	0,37	0,48	0,37	0,46	0,49	0,47	0,44	0,48	0,48	0,48	0,48	0,47	0,48	0,56		
5	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,40	0,46		
6	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16		
7	0,24	0,24	0,23	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24		
8	0,17	0,17	0,17	0,17	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17		
9	0,48	0,45	0,40	0,41	0,46	0,46	0,46	0,45	0,49	0,41	0,52	0,53	0,45	0,45	0,41	0,41	0,53	0,41	0,51	0,41	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,46	0,94		
10	0,43	0,40	0,36	0,31	0,43	0,39	0,41	0,40	0,43	0,31	0,46	0,45	0,41	0,40	0,31	0,36	0,46	0,36	0,45	0,36	0,40	0,39	0,40	0,40	0,46	0,41	0,45	0,37	0,41	6,98			
11	0,30	0,29	0,29	0,23	0,30	0,27	0,28	0,30	0,29	0,23	0,31	0,29	0,28	0,28	0,25	0,26	0,30	0,26	0,30	0,27	0,28	0,28	0,28	0,27	0,30	0,31	0,28	0,30	0,26	0,28	5,97		
12	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,20		
13	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,25		
14	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,50		
Distorção Individual de Tensão de 11º Ordem Harmônica (%)																																	
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média		
1	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,35	0,34	0,35	0,34	0,35	0,34	0,35	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34		
2	0,66	0,66	0,66	0,65	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,64		
3	0,87	0,88	0,88	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,88	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,77		
4	0,74	0,72	0,71	0,68	0,71	0,69	0,72	0,69	0,71	0,72	0,70	0,73	0,67	0,67	0,70	0,72	0,67	0,68	0,67	0,72	0,71	0,75	0,70	0,72	0,71	0,70	0,71	0,70	0,71	0,75	1,05		
5	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,78		
6	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,16		
7	0,13	0,12	0,13	0,13	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12	0,13	0,13	0,14		
8	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,09		
9	0,19	0,28	0,28	0,14	0,27	0,28	0, <																										

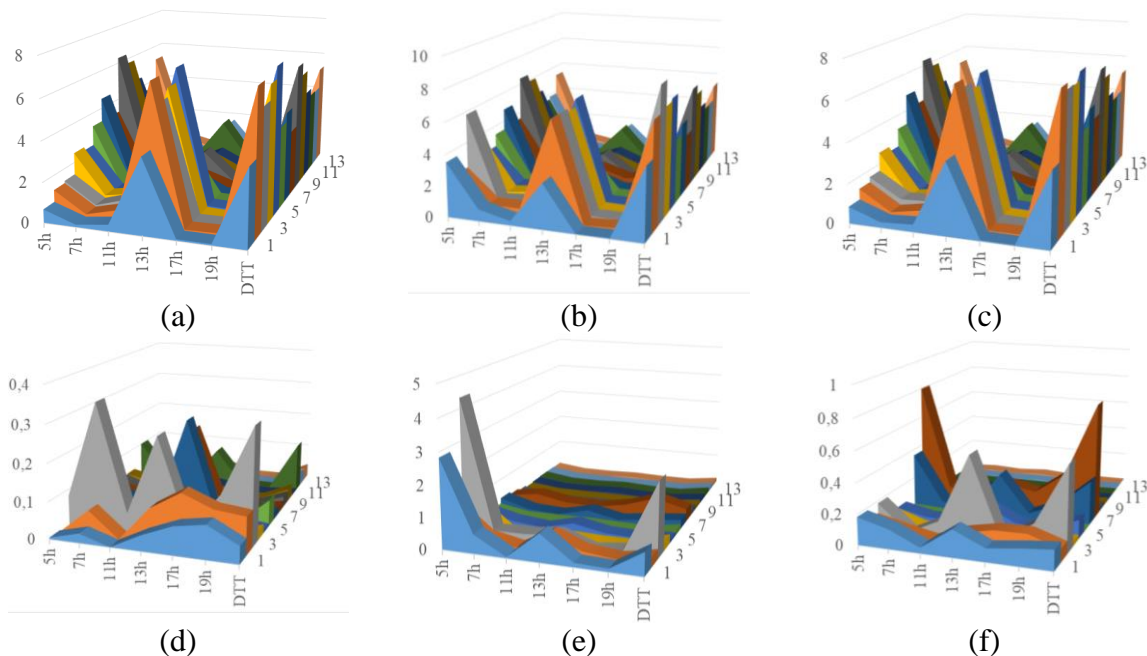


Tabela C.III - Resultados de EEH do algoritmo de EDA

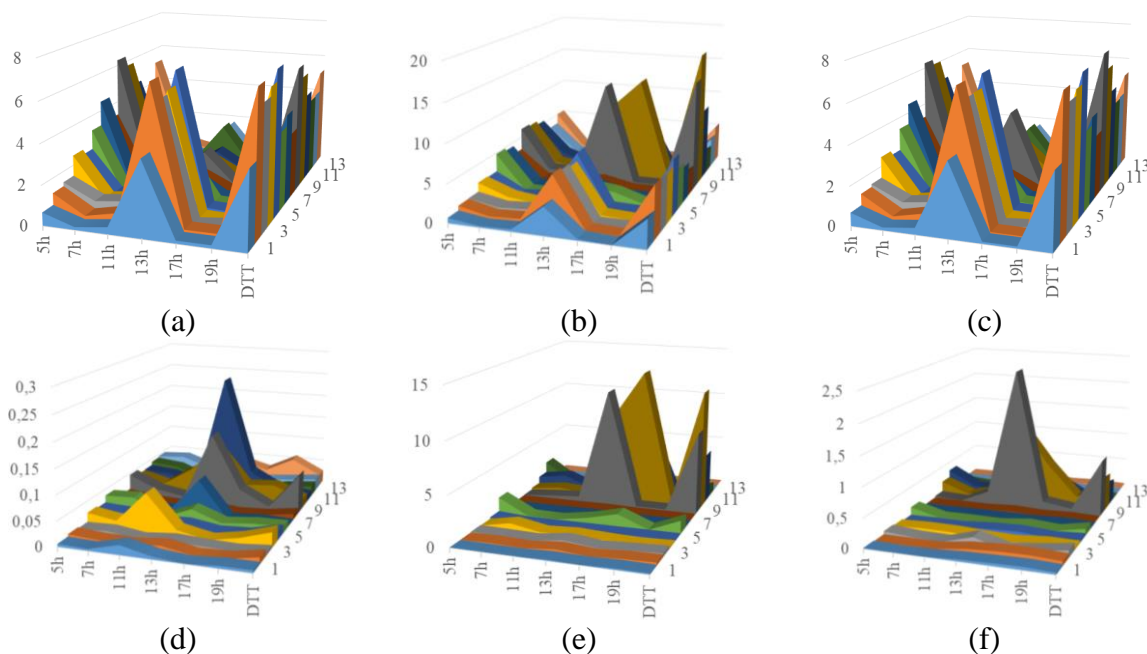
Distorção Individual de Tensão de 5ª Ordem Harmônica (%)																																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média	
1	0,69	0,70	0,67	0,68	0,67	0,69	0,70	0,67	0,68	0,67	0,64	0,69	0,72	0,72	0,67	0,71	0,66	0,68	0,74	0,75	0,68	0,71	0,76	0,68	0,68	0,66	0,62	0,68	0,72	0,72	0,69	
2	1,29	1,27	1,24	1,29	1,27	1,29	1,27	1,24	1,29	1,27	1,23	1,32	1,23	1,28	1,27	1,31	1,23	1,28	1,30	1,40	1,28	1,34	1,27	1,28	1,22	1,27	1,27	1,27	1,36	1,36	1,28	
3	1,32	1,32	1,30	1,41	1,45	1,32	1,32	1,30	1,41	1,45	1,37	1,31	1,37	1,47	1,33	1,41	1,39	1,50	1,32	1,48	1,43	1,41	1,37	1,34	1,45	1,50	1,57	1,36	1,42	1,43	1,39	
4	2,51	2,50	2,47	2,46	2,52	2,51	2,50	2,47	2,46	2,52	2,40	2,40	2,41	2,45	2,56	2,45	2,83	2,49	2,44	2,91	2,51	2,71	2,37	2,52	3,00	2,48	2,53	2,56	2,78	2,78	2,55	
5	2,35	2,25	2,29	2,22	2,25	2,35	2,25	2,29	2,22	2,25	2,25	2,21	2,19	2,22	2,28	2,21	2,44	2,28	2,21	2,49	2,26	2,38	2,17	2,34	2,47	2,23	2,24	2,28	2,44	2,44	2,29	
6	3,27	3,31	3,24	3,24	3,28	3,27	3,31	3,24	3,24	3,28	3,20	3,23	3,29	3,27	3,26	3,23	3,27	3,24	3,23	3,22	3,35	3,22	3,26	3,27	3,24	3,27	3,20	3,24	3,21	3,23	3,25	
7	4,55	4,51	4,52	4,53	4,46	4,55	4,51	4,52	4,53	4,46	4,47	4,44	4,46	4,48	4,49	4,49	4,40	4,49	4,54	4,42	4,40	4,38	4,48	4,54	4,49	4,50	4,45	4,55	4,34	4,39	4,48	
8	3,30	3,30	3,31	3,29	3,23	3,30	3,30	3,31	3,29	3,23	3,27	3,25	3,26	3,27	3,24	3,29	3,22	3,28	3,32	3,23	3,22	3,33	3,28	3,32	3,28	3,29	3,26	3,29	3,18	3,21	3,27	
9	6,40	6,47	6,36	6,39	6,25	6,40	6,47	6,36	6,39	6,25	6,31	6,32	6,28	6,31	6,30	6,32	5,96	6,30	6,42	5,95	6,15	5,92	6,35	6,37	6,02	6,32	5,88	6,39	5,89	5,98	6,25	
10	5,84	6,39	5,81	5,82	5,72	5,84	6,39	5,81	5,82	5,72	5,75	6,30	6,11	5,80	6,08	5,77	5,50	5,75	5,85	5,47	5,92	5,44	6,22	5,82	5,53	5,78	5,40	5,83	5,40	5,49	5,81	
11	4,58	4,88	4,55	4,55	4,52	4,58	4,88	4,55	4,55	4,52	4,50	4,79	4,73	4,63	4,70	4,52	4,46	4,52	4,56	4,36	5,45	4,35	4,65	4,57	4,40	4,55	4,32	4,56	4,29	4,38	4,58	
12	3,50	3,51	3,43	3,49	3,51	3,50	3,51	3,43	3,49	3,51	3,44	3,47	3,52	3,51	3,49	3,47	3,50	3,48	3,45	3,44	3,56	3,47	3,50	3,50	3,46	3,56	3,57	3,47	3,46	3,46	3,49	
13	3,68	3,65	3,66	3,68	3,70	3,68	3,65	3,66	3,68	3,70	3,63	3,66	3,71	3,70	3,68	3,67	3,69	3,67	3,67	3,62	3,74	3,67	3,70	3,68	3,64	3,72	3,64	3,65	3,66	3,66	3,67	
14	5,20	5,24	5,18	5,20	5,14	5,20	5,24	5,18	5,20	5,14	5,14	5,14	5,17	5,15	5,17	5,13	5,15	5,18	4,98	5,10	5,21	5,19	5,19	4,98	5,18	4,98	5,19	5,21	5,31	5,31	5,16	
Distorção Individual de Tensão de 7ª Ordem Harmônica (%)																																
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média	
1	0,15	0,15	0,15	0,15	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,15	0,16	0,17	0,16	0,18	0,16	0,15	0,15	0,17	0,16	0,16	0,19	0,15	0,17	0,17	0,16	0,13	0,17	0,16	
2	0,31	0,30	0,31	0,31	0,32	0,31	0,30	0,31	0,32	0,31	0,32	0,32	0,33	0,31	0,32	0,33	0,36	0,33	0,30	0,32	0,30	0,33	0,33	0,43	0,31	0,35	0,37	0,35	0,29	0,35	0,32	
3	0,67	0,67	0,67	0,67	0,69	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,68	0,67	0,71	0,70	0,71	0,73	0,69	0,68	0,69	0,68	0,69	0,67	0,67	0,31	0,66	0,68	0,64	0,68	0,64	0,71	0,67	
4	0,38	0,37	0,42	0,44	0,37	0,38	0,37	0,42	0,44	0,37	0,37	0,53	0,37	0,47	0,39	0,40	0,32	0,35	0,37	0,37	0,34	0,51	0,49	0,38	0,48	0,54	1,22	0,45	0,43	0,54	0,44	
5	0,40	0,40	0,39	0,36	0,39	0,40	0,40	0,39	0,36	0,39	0,40	0,40	0,39	0,38	0,32	0,42	0,29	0,36	0,38	0,39	0,35	0,41	0,39	0,48	0,36	0,43	0,36	0,36	0,41	0,43	0,39	
6	0,16	0,15	0,15	0,16	0,16	0,15	0,15	0,16	0,15	0,16	0,15	0,16	0,15	0,16	0,17	0,16	0,15	0,14	0,16	0,16	0,15	0,15	0,19	0,18	0,18	0,19	0,18	0,19	0,14	0,16	0,16	
7	0,23	0,24	0,25	0,21	0,24	0,23	0,24	0,25	0,21	0,24	0,23	0,29	0,22	0,24	0,27	0,20	0,24	0,25	0,25	0,24	0,23	0,26	0,24	0,27	0,25	0,23	0,22	0,26	0,22	0,26	0,24	
8	0,17	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17	0,18	0,17	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,18	0,21	0,17	0,18	0,21	0,17	0,18	0,19	0,18	0,17	0,16	0,19	0,16	0,19	0,18	0,18	
9	0,55	0,39	0,45	0,39	0,41	0,55	0,39	0,45	0,39	0,41	0,36	0,57	0,38	0,45	0,46	0,32	0,40	0,43	0,56	0,40	0,42	0,52	0,45	0,46	0,49	0,45	0,80	0,49	0,45	0,53	0,46	
10	0,49	0,28	0,40	0,35	0,36	0,49	0,28	0,40	0,35	0,36	0,25	0,55	0,34	0,41	0,43	0,29	0,27	0,32	0,49	0,29	0,37	0,49	0,39	0,37	0,43	0,44	0,69	0,42	0,41	0,51	0,40	
11	0,37	0,25	0,33	0,24	0,27	0,37	0,25	0,33	0,24	0,27	0,28	0,39	0,25	0,30	0,31	0,23	0,20	0,22	0,33	0,26	0,26	0,31	0,27	0,53	0,31	0,40	0,43	0,38	0,36	0,33	0,31	
12	0,21	0,21	0,20	0,20	0,22	0,21	0,21	0,20	0,20	0,22	0,22	0,23	0,21	0,21	0,21	0,23	0,19	0,18	0,21	0,21	0,19	0,19	0,24	0,27	0,27	0,24	0,22	0,24	0,19	0,21	0,21	
13	0,25	0,25	0,25	0,22	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,22	0,25	0,26	0,25	0,27	0,26	0,29	0,24	0,22	0,22	0,27	0,25	0,23	0,23	0,24	0,26	0,25	0,26	0,26	0,25	0,23	0,22	0,25
14	0,54	0,53	0,57	0,51	0,54	0,54	0,53	0,57	0,51	0,54	0,55	0,51	0,57	0,50	0,50	0,50	0,55	0,56	0,55	0,54	0,57	0,56	0,54	0,51	0,49	0,53	0,54	0,55	0,54	0,52	0,54	
Distorção Individual de Tensão de 11ª Ordem Harmônica (%)																																
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média	
1	0,34	0,34	0,34	0,33	0,35	0,34	0,34	0,34	0,33	0,35	0,35	0,35	0,34	0,36	0,34	0,35	0,34	0,36	0,33	0,35	0,34	0,33	0,35	0,34	0,33	0,34	0,36	0,35	0,34	0,35	0,34	
2	0,66	0,65	0,65	0,63	0,66	0,66	0,65	0,66	0,65	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,65	0,66	0,67	0,65	0,64	0,69	0,67	0,66	0,64	0,66	0,72	0,67	0,65	0,66	0,66	0,66	
3	0,88	0,87	0,87	0,89	0,85	0,88	0,87	0,87	0,89	0,85	0,88	0,89	0,87	0,87	0,88	0,88	0,86	0,87	0,89	0,89	0,88	0,84	0,88	0,87	0,86	0,85	0,82	0,88	0,86	0,87	0,87	
4	0,70	0,70	0,70	0,72	0,70	0,70	0,70	0,72	0,70	0,70	0,67	0,72	0,73	0,69	0,67	0,66	0,69	0,69	0,78	0,65	0,70	0,70	0,76	1,14	0,74	0,66	0,68	0,75	1,07	0,72	0,65	0,72
5	0,73	0,72	0,70	0,69	0,73	0,73	0,72	0,70	0,69	0,73	0,71	0,73	0,70	0,72	0,73	0,70	0,71	0,71	0,68	0,69	0,70	0,71	0,72	0,72	0,70	0,72	0,71	0,71	0,72	0,74	0,71	
6	0,17	0,16	0,19	0,18	0,19	0,17	0,16	0,19	0,18	0,19	0,16	0,16	0,16	0,17	0,18	0,17	0,17	0,16	0,18	0,19	0,15	0,16	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	
7	0,13	0,13	0,11	0,13	0,14	0,13	0,13	0,11	0,13	0,14	0,15	0,13	0,13	0,11	0,13	0,12	0,12	0,13	0,12	0,11	0,13	0,13	0,11	0,12	0,09	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	
8	0,11	0,09	0,09	0,10	0,10	0,11	0,09	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,08	0,10	0,09	0,09	0,07	0,09	0,11	0,10	0,10	0,10	0,09	0,07	0,09	0,09	0,10	0,09	0,09	
9	0,18																															

# APÊNDICE D

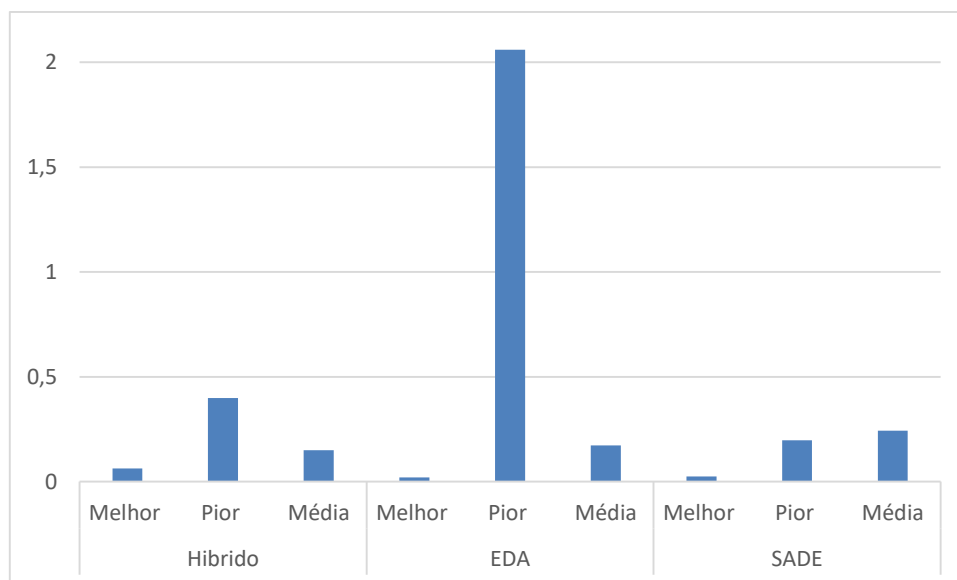
## Resultados de Simulações Usando 4 Medidores



**Figura D.1 - Resultados do algoritmo híbrido (4 medidores) para as tensões harmônicas para:**  
**Magnitudes: (a) melhor, (b) pior e (c) médio**  
**Erros: (d) melhor, (e) pior e (f) médio**



**Figura D.2 - Resultados do algoritmo EDA (4 medidores) para as tensões harmônicas para:**  
**Magnitudes: (a) melhor, (b) pior e (c) médio**  
**Erros: (d) melhor, (e) pior e (f) médio**



**Figura D.3 - Síntese da análise comparativa (usando 4 medidores) dos desempenhos dos algoritmos através da média dos resultados de EEH para todos os barramentos do sistema**

Barra	Distorção Individual de Tensão de 5º Ordem Harmônica (%)																														Média
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	0,70	0,69	1,04	0,71	0,67	0,87	0,68	<b>3,51</b>	0,78	0,65	0,63	0,82	0,75	0,72	0,67	0,80	0,68	0,69	0,73	0,68	0,74	0,70	<b>0,68</b>	0,68	0,61	0,97	0,66	1,14	1,14	0,86	
2	1,33	1,30	1,25	1,33	1,27	1,40	1,29	<b>2,37</b>	1,26	1,30	1,51	1,42	1,31	1,23	1,30	1,60	1,55	1,27	1,32	1,40	1,30	1,41	1,31	<b>1,27</b>	1,29	1,24	1,52	1,28	1,51	1,54	1,39
3	1,48	1,46	1,51	1,52	1,46	1,49	1,46	<b>5,80</b>	1,44	1,45	1,53	1,56	1,45	1,42	1,44	1,29	1,54	1,41	1,81	1,94	1,55	1,49	<b>1,50</b>	<b>1,38</b>	1,42	1,50	1,50	1,46	1,54	1,43	1,65
4	2,61	2,58	2,72	2,69	2,51	2,58	2,59	<b>3,31</b>	2,51	2,55	2,58	2,74	2,54	2,54	2,53	2,58	2,57	2,48	2,59	2,61	2,54	2,56	<b>2,54</b>	<b>2,48</b>	2,52	2,49	2,49	2,58	2,61	2,66	2,59
5	2,33	2,30	2,29	2,27	2,24	2,21	2,30	<b>2,60</b>	2,23	2,27	2,30	2,54	2,27	2,28	2,35	2,35	2,35	2,22	2,30	2,33	2,28	2,44	2,33	<b>2,30</b>	2,31	2,21	2,16	2,23	2,37	2,44	2,32
6	3,30	3,27	3,26	3,25	3,22	3,26	3,25	<b>4,42</b>	3,23	3,27	3,26	3,30	3,21	3,20	3,27	3,34	3,24	3,18	3,24	3,28	3,26	3,35	<b>3,25</b>	<b>3,30</b>	3,30	3,23	3,23	3,21	3,30	3,29	3,27
7	4,90	5,11	4,58	5,00	4,88	4,90	4,85	<b>4,81</b>	4,77	4,75	4,97	4,82	4,99	4,93	4,81	4,84	4,62	4,83	4,91	4,75	4,84	4,52	<b>5,00</b>	4,69	4,90	4,86	4,77	4,77	4,86	4,83	
8	3,70	3,84	3,66	4,98	4,69	4,02	3,55	<b>3,52</b>	3,49	3,61	4,78	1,18	5,04	3,60	4,45	4,52	3,39	4,46	3,94	4,06	4,56	3,31	5,07	<b>4,50</b>	3,76	3,75	4,68	4,29	4,19	3,56	4,07
9	6,32	6,33	6,24	6,30	6,27	6,29	6,23	<b>6,41</b>	6,21	6,30	6,35	6,33	6,31	6,29	6,24	6,27	6,18	6,19	6,27	6,32	6,26	6,32	<b>6,32</b>	<b>6,27</b>	6,22	6,27	6,25	6,19	6,28	6,30	6,28
10	5,78	5,79	5,69	5,75	5,75	5,78	5,69	<b>5,89</b>	5,73	5,75	5,81	5,81	5,73	5,73	5,72	5,74	5,68	5,65	5,73	5,81	5,73	5,84	<b>5,79</b>	<b>5,74</b>	5,77	5,72	5,77	5,77	5,77	5,76	
11	4,55	4,55	4,50	4,50	4,52	4,54	4,49	<b>4,68</b>	4,50	4,49	4,56	4,57	4,49	4,53	4,54	4,53	4,44	4,51	4,57	4,52	4,50	4,54	<b>4,54</b>	<b>4,50</b>	4,57	4,50	4,50	4,51	4,56	4,55	4,53
12	3,54	3,51	3,50	3,50	3,45	3,48	3,48	<b>3,65</b>	3,43	3,53	3,57	3,52	3,41	3,44	3,55	3,63	3,44	3,42	3,44	3,52	3,51	3,57	<b>3,48</b>	<b>3,60</b>	3,55	3,52	3,47	3,44	3,51	3,52	3,51
13	3,73	3,70	3,73	3,66	3,63	3,66	3,64	<b>3,84</b>	3,58	3,75	3,71	3,68	3,63	3,63	3,66	3,82	3,66	3,61	3,66	3,70	3,70	3,76	3,66	<b>3,73</b>	3,74	3,68	3,66	3,64	3,		



Tabela D.II - Resultados de EEH do algoritmo de EDA

Distorção Individual de Tensão de 5ª Ordem Harmônica (%)																																	
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média		
1	0,69	0,63	0,67	0,69	0,71	0,69	0,71	0,67	0,73	0,67	0,67	0,67	0,67	0,69	0,63	0,69	0,74	0,75	0,67	0,73	0,67	0,67	0,68	0,73	0,71	0,69	0,67	0,69	0,74	0,67	0,69		
2	1,32	1,08	1,26	1,29	1,23	1,30	1,28	1,26	1,26	1,25	1,25	1,27	1,27	1,30	1,23	1,30	1,27	1,25	1,26	1,28	1,28	1,24	1,29	1,41	1,32	1,25	1,27	1,26	1,25	1,25	1,27		
3	1,47	1,53	1,31	1,40	1,37	1,36	1,45	1,46	1,38	1,41	1,39	1,39	1,46	1,53	1,38	1,41	1,38	1,39	1,46	1,40	1,39	1,35	1,52	1,36	1,36	1,43	1,45	1,42	1,39	1,30	1,41		
4	2,45	2,94	2,48	2,44	2,42	2,64	2,45	2,46	2,39	2,48	2,49	2,43	2,43	2,49	2,45	2,44	2,39	2,44	2,50	2,44	2,42	2,36	2,49	2,48	2,57	2,42	2,43	2,85	2,45	2,46	2,49		
5	2,21	2,48	2,31	2,20	2,18	2,34	2,21	2,22	2,18	2,24	2,25	2,19	2,19	2,34	2,22	2,20	2,18	2,20	2,23	2,21	2,21	2,29	2,30	2,26	2,45	2,19	2,20	2,46	2,25	2,29	2,26		
6	3,20	3,22	3,31	3,23	3,22	3,30	3,26	3,33	3,29	3,31	3,44	3,19	3,26	4,28	3,49	3,23	3,25	3,23	3,22	3,23	3,47	3,54	3,49	3,33	4,86	3,24	3,29	3,21	3,62	3,32	3,40		
7	4,47	4,46	4,51	4,48	4,50	4,47	4,49	4,47	4,48	4,48	4,40	4,52	4,47	4,27	4,52	4,47	4,46	4,51	4,49	4,49	4,49	4,34	4,42	4,51	4,46	4,46	4,46	4,39	4,44	4,49	4,46		
8	3,27	3,26	3,24	3,28	3,28	3,27	3,29	3,26	3,28	3,28	3,22	3,31	3,27	3,13	3,27	3,27	3,26	3,30	3,28	3,28	3,29	3,18	3,24	3,30	3,27	3,26	3,26	3,22	3,22	3,28	3,26		
9	6,29	6,00	6,37	6,36	6,36	6,19	6,33	6,60	6,33	6,29	6,07	6,38	6,29	5,93	6,39	6,35	6,40	6,41	6,29	6,33	6,34	6,14	6,18	6,33	6,21	6,28	6,27	5,95	6,25	6,31	6,27		
10	5,74	5,51	6,21	5,80	5,80	5,90	6,16	6,75	6,22	6,11	5,77	5,79	6,12	5,62	6,25	5,79	6,34	5,84	5,74	6,16	6,19	5,98	5,95	6,14	5,96	6,12	6,09	5,46	6,05	6,12	5,99		
11	4,49	4,38	4,79	4,54	4,53	4,63	4,60	5,06	4,78	4,73	5,08	4,45	4,72	4,94	5,92	4,53	4,80	4,53	4,50	4,72	5,86	5,82	5,42	4,74	5,41	4,70	4,72	4,35	5,91	4,74	4,88		
12	3,43	3,38	3,51	3,48	3,45	3,53	3,50	3,50	3,51	3,54	3,65	3,44	3,48	4,08	3,26	3,47	3,44	3,47	3,46	3,47	3,15	3,64	3,50	3,54	1,51	3,48	3,53	3,38	3,74	3,54	3,44		
13	3,61	3,63	3,66	3,67	3,66	3,71	3,69	3,62	3,69	3,73	3,81	3,64	3,65	3,95	3,64	3,67	3,68	3,67	3,65	3,67	3,69	3,70	3,80	3,71	3,68	3,67	3,71	3,63	3,82	3,72	3,69		
14	5,12	5,17	5,18	5,18	5,19	5,09	5,17	5,15	5,22	5,16	5,09	5,19	5,13	5,05	5,19	5,18	5,21	5,21	5,13	5,17	5,18	5,09	5,14	5,18	5,12	5,14	5,15	5,19	5,19	5,18	5,16		
Distorção Individual de Tensão de 7ª Ordem Harmônica (%)																																	
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média		
1	0,20	0,16	0,15	0,15	0,16	0,19	0,16	0,16	0,14	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,13	0,15	0,14	0,15	0,15	0,17	0,18	0,17	0,15	0,16	0,17	0,15	0,16	0,15	0,16	0,13	0,16		
2	0,43	0,31	0,31	0,30	0,32	0,44	0,33	0,33	0,29	0,37	0,33	0,30	0,31	0,31	0,26	0,31	0,29	0,32	0,32	0,37	0,35	0,31	0,30	0,33	0,29	0,31	0,31	0,32	0,28	0,32	0,33		
3	0,40	0,68	0,71	0,64	0,68	0,62	0,67	0,66	0,64	0,70	0,67	0,67	0,65	0,72	0,69	0,69	0,72	0,69	0,66	0,71	0,43	0,69	0,72	0,68	0,68	0,72	0,66	0,72	0,69	0,73	0,67		
4	0,61	0,38	0,32	0,37	0,49	1,12	0,37	0,51	0,41	0,32	0,51	0,36	0,49	0,37	0,29	0,37	0,35	0,47	0,48	0,31	0,74	0,37	0,31	0,53	0,30	0,38	0,38	0,37	0,39	0,36	0,43		
5	0,43	0,41	0,36	0,41	0,38	0,40	0,40	0,40	0,33	0,28	0,41	0,38	0,37	0,39	0,35	0,40	0,34	0,37	0,38	0,28	0,47	0,40	0,43	0,38	0,37	0,39	0,41	0,39	0,42	0,30	0,38		
6	0,23	0,12	0,18	0,18	0,20	0,21	0,16	0,14	0,18	0,12	0,19	0,18	0,22	0,52	0,18	0,10	0,06	0,12	0,16	0,15	0,19	0,07	0,18	0,24	0,17	0,11	0,18	0,09	0,16	0,23	0,17		
7	0,26	0,24	0,25	0,26	0,25	0,25	0,24	0,23	0,25	0,24	0,26	0,23	0,25	0,25	0,24	0,23	0,18	0,25	0,24	0,24	0,22	0,26	0,22	0,25	0,23	0,20	0,24	0,24	0,28	0,25	0,24		
8	0,18	0,18	0,18	0,19	0,18	0,18	0,17	0,17	0,18	0,17	0,19	0,17	0,18	0,20	0,18	0,17	0,13	0,18	0,18	0,18	0,20	0,19	0,16	0,19	0,16	0,19	0,17	0,18	0,17	0,18	0,21	0,19	
9	0,43	0,41	0,50	0,45	0,46	0,75	0,41	0,48	0,41	0,40	0,58	0,38	0,54	0,41	0,50	0,40	0,28	0,47	0,45	0,46	0,63	0,44	0,45	0,51	0,49	0,43	0,40	0,42	0,47	0,44	0,46		
10	0,37	0,31	0,44	0,36	0,41	0,98	0,36	0,42	0,33	0,28	0,50	0,31	0,55	0,31	0,44	0,32	0,19	0,41	0,40	0,43	0,74	0,34	0,40	0,50	0,43	0,23	0,30	0,30	0,41	0,35	0,40		
11	0,28	0,34	0,31	0,26	0,47	1,62	0,26	0,28	0,28	0,19	0,34	0,29	0,66	0,28	0,31	0,34	0,19	0,27	0,48	0,28	0,47	0,30	0,29	0,60	0,30	0,29	0,31	0,29	0,28	0,33	0,38		
12	0,28	0,17	0,32	0,20	0,24	0,25	0,32	0,30	0,37	0,20	0,22	0,22	0,25	0,28	0,23	0,18	0,15	0,17	0,25	0,20	0,39	0,13	0,22	0,24	0,20	0,20	0,22	0,22	0,22	0,26	0,24		
13	0,31	0,21	0,28	0,28	0,28	0,29	0,27	0,24	0,29	0,26	0,26	0,25	0,28	0,27	0,25	0,25	0,21	0,21	0,28	0,24	0,34	0,18	0,25	0,29	0,23	0,27	0,26	0,27	0,27	0,29	0,26		
14	0,58	0,54	0,53	0,50	0,53	0,55	0,52	0,52	0,50	0,53	0,59	0,46	0,47	0,52	0,53	0,50	0,51	0,52	0,53	0,53	0,50	0,53	0,50	0,47	0,55	0,51	0,52	0,58	0,52	0,54	0,52		
Distorção Individual de Tensão de 11ª Ordem Harmônica (%)																																	
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média		
1	0,35	0,40	0,34	0,35	0,36	0,37	0,34	0,33	0,35	0,33	0,36	0,34	0,33	0,34	0,34	0,35	0,34	0,35	0,35	0,34	0,35	0,34	0,35	0,34	0,35	0,34	0,37	0,37	0,37	0,36	0,35		
2	0,65	0,77	0,66	0,66	0,66	0,69	0,66	0,65	0,68	0,64	0,68	0,66	0,65	0,66	0,64	0,65	0,67	0,66	0,68	0,69	0,65	0,67	0,66	0,66	0,65	0,67	0,72	0,67	0,67	0,66	0,67		
3	0,89	0,67	0,87	0,86	0,88	0,88	0,88	0,87	0,89	0,88	0,84	0,92	0,91	0,89	0,83	0,87	0,89	0,88	0,89	0,87	0,87	0,83	0,87	0,86	0,86	0,86	0,88	0,88	0,91	0,87	0,87		
4	0,66	0,71	0,66	0,73	0,69	0,63	0,75	0,70	0,80	0,69	0,73	0,70	0,70	0,74	0,71	0,66	0,76	0,68	0,70	0,71	0,64	0,80	0,63	0,67	0,71	0,74	0,74	0,68	0,72	0,67	0,70		
5	0,72	0,80	0,73	0,71	0,70	0,65	0,72	0,71	0,70	0,69	0,73	0,71	0,68	0,72	0,73	0,74	0,70	0,70	0,71	0,72	0,67	0,74	0,71	0,72	0,67	0,74	0,72	0,70	0,72	0,71	0,71		
6	0,15	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18	0,17	0,17	0,15	0,11	0,17	0,18	0,16	0,17	0,18	0,15	0,17	0,16	0,17	0,17	0,15	0,17	0,16	0,17	0,15	0,17	0,16	0,19	0,18	0,17	0,17		
7	0,11	0,14	0,12	0,10	0,10	0,14	0,13	0,14	0,11	0,12	0,11	0,13	0,12	0,13	0,11	0,16	0,09	0,12	0,14	0,12	0,12	0,08	0,15	0,12	0,11	0,12	0,12	0,12	0,13	0,12	0,12		
8	0,08	0,10	0,09	0,09	0,11	0,09	0,10	0,10	0,08	0,09	0,08	0,10	0,08	0,09	0,08	0,12	0,07	0,09	0,10	0,11	0,10	0,10	0,11	0,09	0,08	0,09	0,11	0,11	0,09	0,09	0,09		
9	0,43	0,14	0,48	0,45	0,24	0,34	0,69	0,47	0,25	0,48	0,46	0,38	0,43	0,40	0,0																		

# APÊNDICE E

## Resultados de Simulações Usando 3 Medidores

Tabela E.I - Resultados de EEH do algoritmo híbrido

Distorção Individual de Tensão de 5ª Ordem Harmônica (%)																															
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média
1	0,66	0,64	0,83	0,67	0,87	0,67	0,68	0,65	0,67	0,87	0,93	0,67	0,64	0,83	0,65	0,68	0,57	0,77	1,53	0,74	0,85	0,69	0,73	0,68	0,68	0,81	0,70	0,71	0,66	0,76	0,75
2	1,25	1,19	1,32	1,27	1,37	1,31	1,27	1,24	1,32	1,31	1,36	1,26	1,21	1,40	1,26	1,27	1,32	1,38	1,18	1,26	1,31	1,32	1,29	1,28	1,32	1,36	1,31	1,33	1,32	1,29	1,30
3	1,51	1,27	1,41	1,46	1,54	1,48	1,48	1,49	1,49	1,46	1,41	1,44	1,58	1,52	1,48	1,42	1,52	1,52	1,64	1,32	1,53	1,51	1,48	1,49	1,48	1,53	1,47	1,52	1,48	1,48	1,48
4	2,44	2,37	2,43	2,53	2,48	2,58	2,46	2,41	2,43	2,44	2,62	2,46	2,41	2,50	2,41	2,48	2,72	2,90	2,47	2,44	2,56	2,47	2,48	2,58	2,48	2,50	2,53	2,85	2,43	2,42	2,51
5	2,18	2,17	2,19	2,21	2,26	2,43	2,26	2,17	2,18	2,23	2,56	2,22	2,15	2,28	2,17	2,30	2,59	2,51	2,25	2,21	2,30	2,26	2,27	2,30	2,26	2,27	2,36	2,48	2,19	2,19	2,28
6	3,12	3,59	3,34	3,24	3,23	3,24	3,26	3,18	3,27	3,24	3,24	3,23	3,01	3,28	3,20	3,33	3,30	3,25	3,18	3,27	3,24	3,29	3,34	3,29	3,28	3,33	3,31	3,28	3,21	3,24	3,26
7	4,59	4,38	4,62	4,46	4,41	4,48	4,48	4,44	4,50	4,52	4,44	4,50	4,53	4,42	4,41	4,44	4,43	4,48	4,42	4,62	4,43	4,46	4,44	4,50	4,48	4,51	4,51	4,52	4,41	4,41	4,47
8	3,35	3,21	3,38	3,27	3,22	3,28	3,28	3,24	3,29	3,31	3,27	3,29	3,31	3,23	3,21	3,25	3,24	3,30	3,23	3,38	3,23	3,26	3,25	3,30	3,28	3,30	3,30	3,31	3,22	3,23	3,27
9	6,16	6,18	6,61	6,39	6,20	6,21	6,31	6,25	6,35	6,38	6,14	6,34	5,82	6,17	6,26	6,24	6,15	6,04	6,19	6,28	6,15	6,26	6,27	6,34	6,23	6,34	6,31	6,19	6,20	6,17	6,24
10	5,81	5,97	6,56	5,86	5,98	5,65	6,10	5,74	5,86	5,88	5,67	5,96	5,32	5,94	5,71	6,04	5,65	5,54	5,66	5,97	5,87	5,95	5,98	5,80	5,70	6,14	6,07	5,81	5,67	5,73	5,85
11	4,35	5,51	4,97	4,63	4,63	4,46	4,70	4,48	4,73	4,58	4,48	4,58	4,19	4,70	4,47	4,71	4,49	4,44	4,44	4,64	4,58	4,65	4,81	4,58	4,52	4,76	4,70	4,57	4,38	4,50	4,61
12	3,36	3,79	3,59	3,48	3,42	3,49	3,47	3,40	3,59	3,55	3,45	3,42	3,24	3,30	3,45	3,59	3,53	3,48	3,42	3,50	3,42	3,50	3,56	3,52	3,66	3,58	3,46	3,48	3,55	3,56	3,50
13	3,55	3,95	3,80	3,67	3,62	3,64	3,69	3,65	3,72	3,70	3,64	3,64	3,41	3,69	3,66	3,77	3,70	3,68	3,61	3,69	3,64	3,67	3,74	3,71	3,77	3,73	3,72	3,68	3,68	3,71	3,69
14	5,02	5,20	5,38	5,17	5,07	5,15	5,24	5,05	5,20	5,22	5,05	5,16	4,77	5,12	5,14	5,20	5,08	5,18	5,06	5,15	5,10	5,14	5,13	5,17	5,26	5,19	5,21	5,13	5,25	5,16	5,14
Distorção Individual de Tensão de 7ª Ordem Harmônica (%)																															
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média
1	0,15	0,21	0,14	0,16	0,14	0,22	0,15	0,26	0,16	0,16	0,26	0,14	0,25	0,16	0,24	0,17	0,15	0,25	0,15	0,15	0,19	0,15	0,17	0,24	0,16	0,26	0,16	0,26	0,16	0,23	0,19
2	0,32	0,33	0,33	0,32	0,33	0,32	0,33	0,32	0,34	0,31	0,33	0,32	0,32	0,32	0,33	0,32	0,33	0,32	0,32	0,32	0,34	0,32	0,32	0,33	0,33	0,33	0,32	0,33	0,32	0,32	0,32
3	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,67	0,69	0,67	0,67	0,68	0,68	0,67	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,67	0,67	0,68
4	0,35	0,41	0,32	0,49	0,29	0,31	0,29	0,33	0,30	0,40	0,34	0,28	0,30	0,42	0,34	0,48	0,29	0,31	0,34	0,38	0,40	0,33	0,46	0,34	0,49	0,31	0,45	0,31	0,47	0,30	0,36
5	0,29	0,34	0,26	0,38	0,25	0,28	0,26	0,29	0,26	0,39	0,29	0,24	0,27	0,31	0,29	0,38	0,33	0,28	0,33	0,31	0,33	0,29	0,37	0,30	0,39	0,28	0,35	0,28	0,37	0,27	0,31
6	0,18	0,16	0,18	0,19	0,19	0,18	0,17	0,17	0,16	0,17	0,19	0,17	0,16	0,18	0,19	0,18	0,18	0,19	0,18	0,16	0,19	0,16	0,18	0,16	0,17	0,16	0,17	0,17	0,15	0,13	0,17
7	0,24	0,24	0,24	0,24	0,23	0,24	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,23	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
8	0,18	0,18	0,17	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,18	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18	0,17	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,17
9	0,53	0,43	0,49	0,49	0,38	0,36	0,49	0,49	0,47	0,45	0,40	0,40	0,37	0,48	0,47	0,54	0,70	0,56	0,42	0,45	0,46	0,39	0,45	0,40	0,55	0,39	0,47	0,40	0,46	0,42	0,46
10	0,48	0,35	0,43	0,48	0,35	0,32	0,42	0,44	0,37	0,38	0,28	0,35	0,25	0,43	0,42	0,55	0,74	0,51	0,32	0,38	0,41	0,28	0,42	0,35	0,48	0,26	0,41	0,33	0,40	0,32	0,40
11	0,43	0,34	0,30	0,44	0,30	0,25	0,29	0,38	0,21	0,29	0,24	0,27	0,29	0,31	0,33	0,49	0,46	0,41	0,19	0,27	0,30	0,22	0,31	0,26	0,33	0,21	0,41	0,26	0,26	0,22	0,31
12	0,23	0,27	0,23	0,23	0,23	0,25	0,25	0,21	0,22	0,29	0,24	0,22	0,26	0,24	0,23	0,23	0,22	0,22	0,26	0,27	0,21	0,29	0,25	0,25	0,28	0,22	0,22	0,22	0,25	0,18	0,24
13	0,26	0,26	0,26	0,27	0,26	0,27	0,26	0,26	0,26	0,27	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,26	0,26	0,26	0,27	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,26	0,25	0,26
14	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,52	0,52	0,54	0,53	0,53	0,53	0,53	0,52	0,53	0,54	0,52	0,53	0,53	0,53	0,53	0,52	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,51	0,53
Distorção Individual de Tensão de 11ª Ordem Harmônica (%)																															
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média
1	0,37	0,35	0,42	0,33	0,39	0,34	0,37	0,38	0,33	0,34	0,41	0,33	0,34	0,34	0,33	0,36	0,35	0,37	0,34	0,35	0,33	0,36	0,34	0,34	0,34	0,36	0,33	0,33	0,36	0,32	0,35
2	0,66	0,66	0,67	0,67	0,66	0,66	0,67	0,65	0,66	0,65	0,65	0,65	0,66	0,67	0,66	0,66	0,67	0,67	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,65	0,65	0,66
3	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,88	0,87	0,88	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87
4	0,59	0,60	0,59	0,61	0,66	0,65	0,64	0,61	0,59	0,62	0,60	0,62	0,60	0,61	0,61	0,59	0,60	0,70	0,60	0,59	0,66	0,71	0,70	0,69	0,72	0,62	0,59	0,62	0,69	0,78	0,64
5	0,60	0,61	0,62	0,61	0,66	0,65	0,64	0,62	0,60	0,63	0,61	0,63	0,61	0,62	0,62	0,61	0,61	0,68	0,61	0,60	0,65	0,70	0,68	0,66	0,70	0,63	0,60	0,62	0,68	0,74	0,64
6	0,14	0,14	0,14	0,16	0,15	0,15	0,15	0,14	0,13	0,14	0,14	0,16	0,14	0,14	0,16	0,15	0,13	0,16	0,14	0,13	0,15	0,16	0,16	0,15	0,16	0,15	0,14	0,15	0,14	0,16	0,15
7	0,12	0,13	0,12	0,12	0,12	0,13	0,12	0,13	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,12	0,13	0,12	0,13	0,12	0,13	0,13	0,13
8	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,09	0,10	0,09	0,09	0,09	0,10	0,09	0,10
9	0,25	0,32	0,38	0,28	0,14	0,25	0,37																								



Tabela E.II - Resultados de EEH do algoritmo de EDA

Distorção Individual de Tensão de 5º Ordem Harmônica (%)																																	
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média		
1	0,72	0,63	1,01	1,15	1,08	0,65	0,69	0,71	0,59	0,72	0,99	0,68	0,74	0,39	0,69	0,63	0,89	0,68	0,69	0,60	0,75	0,71	1,10	0,66	0,65	0,66	0,81	0,88	0,91	0,69	0,76		
2	1,39	1,27	1,33	1,34	1,37	1,22	1,36	1,33	1,25	1,36	1,33	1,29	1,37	1,30	1,33	1,18	1,35	1,29	1,36	1,18	1,40	1,33	1,42	1,25	1,21	1,24	1,45	1,27	1,35	1,31	1,31		
3	1,48	1,34	1,36	1,35	1,39	1,40	1,35	1,39	1,40	1,46	1,47	1,31	1,39	1,45	1,48	1,26	1,34	1,42	1,56	1,34	1,53	1,47	1,43	1,50	1,44	1,46	1,49	1,52	1,34	1,47	1,42		
4	2,88	2,30	2,32	2,31	2,34	2,41	2,37	2,57	2,62	2,84	2,40	2,42	2,65	2,97	2,48	2,36	2,45	2,50	2,78	2,37	3,06	2,93	2,41	2,42	2,62	2,43	2,90	2,33	2,46	2,45	2,54		
5	2,50	2,03	2,14	2,13	2,14	2,17	2,10	2,42	2,30	2,37	2,11	2,18	2,61	3,17	2,24	2,13	2,26	2,31	2,41	2,16	2,63	2,53	2,20	2,21	2,28	2,18	3,10	2,12	2,25	2,23	2,32		
6	3,24	3,07	3,24	3,31	3,17	3,27	3,17	3,35	3,23	3,20	3,16	3,20	3,48	3,48	3,31	3,22	3,40	3,27	3,22	3,56	3,27	3,25	3,50	3,45	3,19	3,18	3,36	3,16	3,19	3,45	3,29		
7	4,43	4,46	4,48	4,45	4,42	4,48	4,48	4,49	4,51	4,38	4,49	4,48	4,41	4,50	4,51	4,49	4,39	4,48	4,36	4,37	4,52	4,43	4,39	4,37	4,49	4,51	4,44	4,48	4,49	4,40	4,45		
8	3,24	3,26	3,28	3,25	3,23	3,28	3,28	3,28	3,29	3,21	3,27	3,28	3,22	3,29	3,30	3,28	3,21	3,26	3,19	3,19	3,30	3,24	3,21	3,29	3,28	3,29	3,25	3,28	3,29	3,22	3,26		
9	6,00	5,91	6,47	6,44	6,32	6,33	6,40	6,25	6,28	5,93	6,37	6,41	6,07	6,06	6,33	6,37	6,16	6,30	5,92	6,21	6,06	5,97	6,21	6,06	6,32	6,38	5,99	6,41	6,32	6,16	6,21		
10	5,51	5,40	6,53	6,51	6,28	6,17	5,83	6,01	5,74	5,44	5,80	5,84	5,74	5,60	6,31	5,74	6,01	6,14	5,44	6,05	5,55	5,48	6,09	5,78	5,77	5,62	5,52	5,84	5,76	5,92	5,85		
11	4,39	4,26	4,91	4,93	4,61	4,73	4,52	4,69	4,51	4,34	4,51	4,55	5,01	4,56	4,80	4,49	5,75	4,73	4,35	5,73	4,38	4,39	5,91	5,16	4,50	4,42	4,46	4,52	4,50	5,40	4,73		
12	3,49	3,35	3,33	3,54	3,38	3,47	3,42	3,58	3,47	3,45	3,41	3,43	3,59	3,66	3,47	3,49	3,62	3,51	3,44	3,71	3,51	3,48	3,63	3,66	3,43	3,43	3,58	3,41	3,44	3,46	3,49		
13	3,69	3,57	3,63	3,73	3,61	3,68	3,62	3,76	3,66	3,65	3,62	3,65	3,81	3,80	3,71	3,70	3,79	3,70	3,66	3,81	3,69	3,67	3,73	3,83	3,63	3,63	3,75	3,62	3,64	3,78	3,69		
14	5,22	5,29	5,17	5,17	5,14	5,17	5,19	5,16	5,11	5,18	5,17	5,20	5,08	5,06	5,19	5,20	5,10	5,16	5,23	5,16	5,15	5,09	5,13	5,11	5,14	5,18	5,10	5,19	5,20	5,18	5,16		
Distorção Individual de Tensão de 5º Ordem Harmônica (%)																																	
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média		
1	0,14	0,14	0,15	0,14	0,32	0,13	0,28	0,26	0,14	0,14	0,24	0,14	0,15	0,14	0,21	0,21	0,14	0,14	0,14	0,15	0,29	0,13	0,24	0,27	0,32	0,29	0,13	0,20	0,23	0,19	0,33		
2	0,32	0,28	0,33	0,31	0,35	0,33	0,34	0,35	0,34	0,30	0,30	0,32	0,30	0,30	0,31	0,30	0,33	0,32	0,31	0,34	0,30	0,33	0,47	0,32	0,32	0,35	0,28	0,35	0,41	0,26	0,33		
3	0,68	0,68	0,73	0,67	0,70	0,69	0,67	0,68	0,68	0,67	0,67	0,71	0,72	0,66	0,73	0,66	0,69	0,73	0,70	0,71	0,68	0,70	0,55	0,67	0,67	0,68	0,68	0,69	0,67	0,65	0,68		
4	0,29	0,33	0,31	0,29	0,26	0,29	0,31	0,31	0,30	0,31	0,29	0,40	0,48	0,39	0,31	0,30	0,30	0,31	0,33	0,35	0,24	0,32	0,19	0,30	0,31	0,33	0,28	0,31	1,27	0,36	0,37		
5	0,25	0,34	0,26	0,26	0,26	0,24	0,29	0,29	0,26	0,27	0,25	0,33	0,36	0,32	0,27	0,26	0,27	0,22	0,42	0,27	0,19	0,41	0,70	0,27	0,38	0,30	0,24	0,28	0,85	0,25	0,33		
6	0,20	0,04	0,23	0,10	0,19	0,16	0,09	0,18	0,19	0,19	0,16	0,14	0,20	0,14	0,06	0,20	0,12	0,16	0,19	0,20	0,27	0,20	0,19	0,20	0,13	0,11	0,16	0,15	0,17	0,17	0,16		
7	0,23	0,25	0,23	0,24	0,24	0,24	0,24	0,22	0,24	0,22	0,26	0,26	0,25	0,22	0,24	0,24	0,23	0,19	0,27	0,27	0,24	0,24	0,24	0,24	0,23	0,25	0,22	0,21	0,25	0,21	0,24		
8	0,17	0,18	0,17	0,19	0,18	0,19	0,17	0,16	0,19	0,16	0,19	0,19	0,18	0,16	0,18	0,17	0,17	0,14	0,19	0,20	0,17	0,17	0,17	0,18	0,17	0,17	0,17	0,15	0,18	0,15	0,17		
9	0,55	0,29	0,49	0,39	0,44	0,50	0,39	0,35	0,38	0,28	0,41	0,44	0,55	0,36	0,38	0,36	0,39	0,30	0,54	0,57	0,41	0,50	0,63	0,55	0,48	0,40	0,33	0,35	0,80	0,46	0,44		
10	0,48	0,12	0,44	0,25	0,40	0,44	0,27	0,32	0,35	0,27	0,36	0,35	0,54	0,27	0,25	0,33	0,26	0,19	0,48	0,53	0,30	0,44	0,55	0,49	0,41	0,26	0,19	0,23	1,08	0,40	0,37		
11	0,33	0,30	0,34	0,21	0,29	0,30	0,25	0,25	0,27	0,23	0,34	0,29	0,56	0,20	0,90	0,27	0,18	0,17	0,33	0,43	0,07	0,32	0,38	0,44	0,27	0,21	0,17	0,20	0,59	0,32	0,31		
12	0,24	0,34	0,24	0,22	0,33	0,28	0,17	0,22	0,34	0,22	0,21	0,21	0,24	0,25	0,18	0,24	0,25	0,28	0,24	0,30	0,86	0,24	0,23	0,24	0,31	0,33	0,21	0,20	0,20	0,21	0,27		
13	0,27	0,23	0,26	0,29	0,29	0,26	0,23	0,25	0,30	0,25	0,25	0,27	0,27	0,25	0,27	0,27	0,24	0,26	0,27	0,29	0,28	0,27	0,27	0,27	0,26	0,25	0,27	0,23	0,24	0,25	0,26		
14	0,54	0,52	0,52	0,56	0,50	0,51	0,52	0,53	0,52	0,53	0,53	0,53	0,51	0,54	0,53	0,52	0,53	0,51	0,56	0,55	0,53	0,53	0,53	0,51	0,53	0,51	0,54	0,53	0,54	0,54	0,53		
Distorção Individual de Tensão de 11º Ordem Harmônica (%)																																	
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Média		
1	1,41	0,38	0,40	0,33	0,35	0,29	0,36	0,38	0,43	0,36	0,42	0,37	0,35	0,35	0,40	0,65	0,35	0,36	1,06	0,34	0,33	0,35	0,41	0,35	0,37	0,50	0,34	0,35	0,31	0,39	0,43		
2	0,69	0,65	0,66	0,66	0,65	0,64	0,63	0,67	0,66	0,67	0,67	0,67	0,65	0,64	0,67	0,64	0,67	0,68	0,68	0,66	0,66	0,65	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,61	0,67	0,66		
3	0,85	0,86	0,86	0,88	0,89	0,89	0,85	0,88	0,87	0,88	0,88	0,87	0,86	0,88	0,85	0,86	0,87	0,89	0,89	0,86	0,88	0,89	0,86	0,89	0,87	0,85	0,87	0,87	0,85	0,86	0,87		
4	1,16	0,66	0,63	0,60	0,69	0,64	0,59	0,69	0,60	0,59	0,47	0,71	0,60	0,66	0,61	1,23	0,77	0,63	1,26	0,65	0,60	0,59	0,62	0,64	0,60	1,18	0,67	0,72	0,59	0,63	0,71		
5	0,84	0,66	0,67	0,61	0,78	0,68	0,60	0,69	0,62	0,61	0,52	0,65	0,61	0,68	0,63	1,13	0,74	0,65	1,72	0,65	0,62	0,60	0,63	0,67	0,62	1,14	0,66	0,81	0,57	0,64	0,72		
6	0,19	0,16	0,17	0,16	0,12	0,17	0,14	0,17	0,15	0,13	0,13	0,18	0,15	0,13	0,13	0,25	0,18	0,12	0,17	0,29	0,18	0,17	0,14	0,14	0,17	0,17	0,19	0,15	0,11	0,18	0,17		
7	0,11	0,13	0,12	0,14	0,13	0,11	0,12	0,12	0,13	0,07	0,10	0,15	0,13	0,11	0,15	0,14	0,12	0,12	0,08	0,12	0,13	0,14	0,12	0,13	0,17	0,11	0,13	0,11	0,13	0,14	0,12		
8	0,08	0,09	0,09	0,10	0,10	0,08	0,09	0,09	0,09	0,10	0,08	0,11	0,09	0,08	0,11	0,10	0,08	0,09	0,10	0,09	0,09	0,10	0,09	0,09	0,10	0,08	0,09	0,12	0,10	0,10	0,09		
9	0,46	0,53	0,45	0,32	0,86	0,41	0,34																										