



**UMA AVALIAÇÃO COMPARATIVA DAS TÉCNICAS DE
CARACTERIZAÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS**

**JEFFERSON DOS SANTOS DE CARVALHO ROSA
NATÁLIA CARDOSO DE MELO SILVA**

**TRABALHO DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

UMA AVALIAÇÃO COMPARATIVA DAS TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Jefferson dos Santos de Carvalho Rosa
Natália Cardoso de Melo Silva

Trabalho final de graduação submetida ao Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

APROVADA POR:

Prof. Anésio de Leles Ferreira Filho, DSc. (ENE-UnB)
(Orientador)

Prof. Jorge Andrés Cormane Angarita, DSc. (FGA-UnB)
(Examinador Externo)

Prof. Lélío Ribeiro Soares Júnior, MSc. (ENE-UnB)
(Examinador Interno)

Brasília/DF, Fevereiro de 2014.

FICHA CATALOGRÁFICA

ROSA, JEFFERSON DOS SANTOS DE C.; SILVA, NATÁLIA CARDOSO DE M.
Uma avaliação comparativa das técnicas de caracterização das distorções
harmônicas. Distrito Federal, 2013.

xix, 83p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Engenheiro eletricista, 2013)
Trabalho de Graduação - Universidade de Brasília. Faculdade de
Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica.

- | | |
|--------------------------------------|----------------------------|
| 1. Qualidade da Energia Elétrica | 2. Transformada de Fourier |
| 3. Método de Goertzel | 4. Transformada de Hartley |
| 4. Mínimos quadrados para harmônicas | 5. Levenberg-Marquard |
| I. ENE/FT/UnB | |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ROSA, J. S. C.; SILVA, N. C. M., (2013). Uma avaliação comparativa das técnicas de caracterização das distorções harmônicas. Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Distrito Federal, 83p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORES: Jefferson dos Santos de Carvalho Rosa

Natália Cardoso de Melo Silva.

ORIENTADOR: Anésio de Leles Ferreira Filho

TÍTULO: Uma avaliação comparativa das técnicas de caracterização das distorções harmônicas

GRAU / ANO: Engenheiro Eletricista / 2013

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Os autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte desta Trabalho de Graduação pode ser reproduzida sem a autorização por escrito dos autores.

Jefferson dos Santos de Carvalho Rosa
Qn 05 Conjunto 18 Casa 05
71805-418 Riacho Fundo I -DF, Brasil

Natália Cardoso de Melo Silva
Rua 08 Chácara 227 casa 18
72007-075 Vicente Pires-DF, Brasil

*Dedico esse trabalho aos meus filhos
João Victor e Pedro, à minha esposa
Priscilla e à minha família, pelo apoio
incondicional.*

Jefferson dos Santos de C. Rosa

*Dedico este trabalho a minha família
pelo suporte nesta minha jornada.*

Natália Cardoso de Melo Silva

Agradecimentos

Agradeço à Deus, por sempre estar presente na minha vida. Aos meus pais, pelo apoio e por tudo que sempre fizeram por mim. Ao meu irmão Anderson, por ser um ponto de apoio nas horas difíceis e pela ajuda com o projeto. À minha esposa Priscilla, por ser paciente quando eu passava dias estudando ao invés de ajudar a cuidar dos nossos filhos. À minha dupla Natália, pelo companherismo na realização desse trabalho. Aos meus companheiros de curso, por tornarem essa jornada menos cansativa. Aos professores, pela vontade, persistência e dedicação de quererem nos fazer pessoas melhores.

Jefferson dos Santos de C. Rosa

Agradeço à Deus, por ter me dado forças durante esses anos e por participar inteiramente na minha vida. Aos meus pais, Jânio e Ivani, que sempre me apoiaram nas minhas decisões, que tanto me ajudaram nos momentos difíceis e por toda a dedicação depositada para que eu tivesse a melhor formação. Às minhas irmãs, Bárbara, Bruna e Marina, pelo companherismo incondicional e paciência quando eu não a tinha. À minha tia Gloria Maria, por disponibilizar sua casa, tantas vezes utilizada como ponto de apoio nas horas de cansaço. Aos demais familiares, que não foram citados os nomes, que de alguma maneira contribuíram para que eu chegasse até aqui. Ao Jefferson, pelo apoio no decorrer do curso e pelo companherismo durante a confecção desse trabalho. Ao professor Anésio Leles Ferreira Filho, por acreditar em nós e ter nos dado a oportunidade de executar este trabalho e nos agraciar com seu conhecimento. Aos meus colegas de curso, pelos ensinamentos e amizade, que fizeram com que a minha estada na universidade fosse menos ardua. Aos professores, que compartilharam de bom grado seus conhecimentos tanto acadêmicos quanto de vida, para que eu me tornasse um ser humano melhor.

Natália Cardoso de Melo Silva

Resumo

Este trabalho apresenta uma avaliação comparativa de cinco técnicas de caracterização das distorções harmônicas de tensão. Inicialmente, são apresentadas as definições, as causas, os efeitos e as normas deste fenômeno. Apresenta-se os fundamentos teóricos das técnicas empregadas na análise, sendo elas: Algoritmo de Goertzel, Transformada de Fourier, Transformada de Hartley, Mínimos Quadrados para Harmônicas e Levenberg-Marquard. Para situar o leitor com relação aos estudos desenvolvidos sobre este tema, é apresentado o Estado da Arte. Empregando-se sinais com distorções harmônicas conhecidas e fazendo-se uso da variação de parâmetros característicos da rede elétrica e dos instrumentos de medição em simulações computacionais, foi possível classificar os métodos através dos erros na caracterização das distorções harmônicas, além de identificar como os parâmetros influenciam os métodos. O método de Levenberg-Marquard obteve os melhores resultados nas avaliações realizadas. Porém, ele apresentou o pior tempo computacional.

Palavras-chave: Algoritmo de Goertzel, Distorções harmônicas, Transformada de Fourier, Transformada de Hartley, Mínimos Quadrados para Harmônicas, Levenberg-Marquard e Qualidade de energia

Abstract

This paper presents a comparative evaluation of five techniques for characterization of harmonic voltage distortion. Initially, are presented definitions, causes, effects and rules of this phenomenon. It are exposed the theoretical fundamentals of techniques employed in the analysis, these being: Goertzel algorithm, Fourier Transform, Hartley Transform, Least Squares for Harmonicas and Levenberg-Marquard. To situate the reader in relation to the studies conducted on this topic, it is presented the State of the Art by using signals with known harmonic distortions and making use of the variation of characteristic parameters of the grid and measuring instruments in computer simulations, it was possible to classify the methods for accuracy in the characterization of the harmonic distortions, as well as identifying the parameters influence methods. The Levenberg-Marquard method achieved the best results in the assessments. However, it had the worst computational time.

Keywords: Goertzel algorithm, harmonic distortion, Fourier Transform, Hartley Transform, Least squares for Harmonicas, Levenberg - Marquard and Power Quality

Sumário

Resumo	v
Abstract	vii
Sumário	xi
Lista de Tabelas	xiv
Lista de Figuras	xvii
Lista de Siglas e Símbolos	xix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	1
1.2 OBJETIVOS E METAS DO TRABALHO	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	3
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	5
2.2 DISTORÇÕES HARMÔNICAS	5
2.2.1 Harmônicas	5
2.2.2 Tipos de distorções de forma de onda	6
2.2.2.1 Distorções inter-harmônicas	6
2.2.2.2 Distorções não-periódicas	7
2.2.2.3 Distorções harmônicas	7
2.3 NORMAS	8
2.3.1 Prodist Modulo 8	8
2.3.2 NBR IEC 61000-4-30	9
2.3.3 IEC 61000-4-7	11
2.3.4 IEC 61000-2-2	12
2.3.5 IEEE Std.519 (1992)	13

2.4	TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER (DFT)	14
2.5	ALGORITMO DE GOERTZEL (AG)	16
2.6	TRANSFORMADA DISCRETA DE HARTLEY (DHT)	18
2.7	MÉTODO ITERATIVO DE LEVENBERG MARQUARD (LM)	20
2.8	MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS PARA HARMÔNICAS (LSH)	22
2.9	ESTADO DA ARTE	24
3	MÉTODOS E METODOLOGIAS	27
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	27
3.2	SINAL DE REFERÊNCIA	27
3.2.1	Cálculo das componentes h_n	28
3.3	CÁLCULO DA THD DOS MÉTODOS	30
3.3.1	Parâmetros do método LM	31
3.4	AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE CADA PARÂMETRO	31
3.4.1	Avaliação do truncamento do sinal	33
3.4.2	Avaliação da influência da sub-amostragem no sinal	34
3.5	AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE TODOS OS PARÂMETROS	34
3.5.1	Simulações dos parâmetros sem restrição do parâmetro duração	35
3.5.2	Simulações dos parâmetros com restrição do parâmetro duração	36
3.6	AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS	36
3.6.1	Teste Chi-quadrado	37
3.6.2	Teste ANOVA	38
3.6.3	Teste de Tukey	39
3.7	AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO TEMPO COMPUTACIONAL	40
4	RESULTADOS E ANÁLISES	41
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	41
4.2	AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE CADA PARÂMETRO	41
4.2.1	Simulação do parâmetro duração	41
4.2.1.1	Análise do truncamento do sinal	43
4.2.2	Simulação do parâmetro taxa de amostragem	46
4.2.2.1	Avaliação da influência da sub-amostragem no sinal	47
4.2.3	Simulação do parâmetro frequência	50
4.3	AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE TODOS OS PARÂMETROS	52
4.3.1	Simulações dos parâmetros sem restrição do parâmetro duração	52
4.3.1.1	Média dos erros para a frequência	52
4.3.1.2	Média dos erros para a duração	54
4.3.1.3	Média dos erros para a taxa de amostragem	56

4.3.2	Simulações dos parâmetros com restrição do parâmetro duração	58
4.3.2.1	Média dos erros para a frequência	59
4.3.2.2	Média dos erros para a duração	61
4.3.2.3	Média dos erros para a taxa de amostragem	63
4.4	AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS	64
4.4.1	Comparação dos métodos com o parâmetro duração sem restrição	65
4.4.1.1	Teste Chi-quadrado	65
4.4.1.2	Teste ANOVA	66
4.4.1.3	Teste de Tukey	68
4.4.2	Comparação dos métodos para durações inteiras	70
4.5	AVALIAÇÃO DO TEMPO COMPUTACIONAL	75
5	CONCLUSÃO	77
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

Lista de Tabelas

2.1	Terminologia do PRODIST	8
2.2	Valores de referência globais das distorções harmônicas totais	9
2.3	Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão	10
2.4	Sensibilidade para as medidas de corrente, tensão e potência ativa	12
2.5	Valores de referência globais das distorções harmônicas totais	13
3.1	Valores das componentes harmônicas para as THDs de 1%, 7%, 11% e 19%	29
3.2	Valores das componentes α_k e β_k	32
3.3	Valores dos parâmetro para a simulação 1	33
3.4	Valores dos parâmetro para o truncamento do sinal	33
3.5	Valores dos parâmetro para a sub-amostragem	34
3.6	Valores dos parâmetro dos sinais sem restrição da duração	35
3.7	Valores dos parâmetro dos sinais com restrição da duração	36
3.8	Quadro modelo da Anova para uma dada THD.	39
4.1	Valores de Chi-quadrado para cada THD	66
4.2	Valores dos parâmetros do sinal superiores e igual a 1 ciclo	66
4.3	Valores de Chi-quadrado e resultados para cada THD	66
4.4	Resultados de \bar{X}_i e \bar{X} para os métodos	67
4.5	Resultados de SST, SSE e SSD para cada THD	67
4.6	Resultados de MS_E , MS_D e F para cada THD	67
4.7	Valores dos limites de decisão	68
4.8	Comparações entre os métodos – THD 1%	68
4.9	Comparações entre os métodos – THD 7%	69
4.10	Comparações entre os métodos – THD 11%	69
4.11	Comparações entre os métodos – THD 19%	70
4.12	Valores de Chi-quadrado e resultados para cada THD	71
4.13	Quadro dos resultados da Anova para THD de 1%.	71
4.14	Quadro dos resultados da Anova para THD de 7%.	71

4.15	Quadro dos resultados da Anova para THD de 11%	72
4.16	Quadro dos resultados da Anova para THD de 19%	72
4.17	Valores do desvio padrão das médias e limites de decisão	72
4.18	Comparações entre os métodos – THD 1%	73
4.19	Comparações entre os métodos – THD 7%	73
4.20	Comparações entre os métodos – THD 11%	74
4.21	Comparações entre os métodos – THD 19%	75
4.22	Avaliação do tempo computacional em segundos	76

Lista de Figuras

2.1	Onda Senoidal fundamental de 60 Hz e algumas harmônicas do sinal original	6
2.2	Filtro de Goertzel de segunda ordem IIR	17
4.1	Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da duração. THD fixa em 1%	42
4.2	Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da duração. THD fixa em 7%	42
4.3	Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da duração. THD fixa em 11%	43
4.4	Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da duração. THD fixa em 19%	43
4.5	Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da duração. THD fixa em 1%	44
4.6	Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da duração. THD fixa em 7%	44
4.7	Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da duração. THD fixa em 11%	45
4.8	Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da duração. THD fixa em 19%	45
4.9	Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da taxa de amostragem. THD fixa em 1%	46
4.10	Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da taxa de amostragem. THD fixa em 7%	46
4.11	Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da taxa de amostragem. THD fixa em 11%	47
4.12	Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da taxa de amostragem. THD fixa em 19%	47

4.13	Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da taxa de amostragem. THD fixa em 1%	48
4.14	Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da taxa de amostragem. THD fixa em 7%	48
4.15	Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da taxa de amostragem. THD fixa em 11%	49
4.16	Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da taxa de amostragem. THD fixa em 19%	49
4.17	Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da frequência. THD fixa em 1%	50
4.18	Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da frequência. THD fixa em 7%	50
4.19	Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da frequência. THD fixa em 11%	51
4.20	Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da frequência. THD fixa em 19%	51
4.21	RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 1% fixando-se as frequências e variando-se a taxa de amostragem e a duração	53
4.22	RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 7% fixando-se as frequências e variando-se a taxa de amostragem e a duração	53
4.23	RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 11% fixando-se as frequências e variando-se a taxa de amostragem e a duração	54
4.24	RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 19% fixando-se as frequências e variando-se a taxa de amostragem e a duração	54
4.25	RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 1% fixando as durações dos ciclos, variando a taxa de amostragem e a frequência	55
4.26	RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 7% fixando as durações dos ciclos, variando a taxa de amostragem e a frequência	55
4.27	RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 11% fixando as durações dos ciclos, variando a taxa de amostragem e a frequência	56
4.28	RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 19% fixando as durações dos ciclos, variando a taxa de amostragem e a frequência	56
4.29	RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 1% fixando a taxa de amostragem, variando a duração dos ciclos e a frequência	57

4.30	RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 7% fixando a taxa de amostragem, variando a duração dos ciclos e a frequência	57
4.31	RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 11% fixando a taxa de amostragem, variando a duração dos ciclos e a frequência	58
4.32	RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 19% fixando a taxa de amostragem, variando a duração dos ciclos e a frequência	58
4.33	RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 1% fixando as frequências, variando a taxa de amostragem e a duração dos ciclos	59
4.34	RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 7% fixando as frequências, variando a taxa de amostragem e a duração dos ciclos	59
4.35	RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 11% fixando as frequências, variando a taxa de amostragem e a duração dos ciclos	60
4.36	RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 19% fixando as frequências, variando a taxa de amostragem e a duração dos ciclos	60
4.37	RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 1% fixando as durações dos ciclos, variando a taxa de amostragem e a frequência	62
4.38	RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 7% fixando as durações dos ciclos, variando a taxa de amostragem e a frequência	62
4.39	RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 11% fixando as durações dos ciclos, variando a taxa de amostragem e a frequência	62
4.40	RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 19% fixando as durações dos ciclos, variando a taxa de amostragem e a frequência	62
4.41	RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 1% fixando a taxa de amostragem, variando a duração dos ciclos e a frequência	63
4.42	RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 7% fixando a taxa de amostragem, variando a duração dos ciclos e a frequência	63
4.43	RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 11% fixando a taxa de amostragem, variando a duração dos ciclos e a frequência	64
4.44	RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 19% fixando a taxa de amostragem, variando a duração dos ciclos e a frequência	64

Lista de Siglas e Símbolos

Siglas

X^2	Chi-quadrado
AG	Algoritmo de Goertzel
ANOVA	Análise de Variância
DFT	Discrete Fourier Transform
DHT	Discrete Hartley Transform
DSP	Digital Signal Processing
FFT	Fast Fourier Transform
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
IDHT	Inverse Discrete Hartley Transform
IIR	Infinite Impulse Response
LM	Levenberg-Marquard
LSH	Least Square for Harmonic
MSE	Mean Square Error
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
QFT	Quantum Fourier Transform
RMS	Valor eficaz
RMSE	Root Mean Square Error
SEP	Sistema Elétrico de Potência

STFT	Short Fourier Transform
THD	Total Harmonic Distortion

Símbolos

$\angle \theta_k$	Fase da k-ésima ordem de X_k
α	Parâmetro do sinal modelo de LM
β	Parâmetro do sinal modelo de LM
Δ	Desvio padrão das médias
Δf	Espaçamento entre as raias espectrais
μ	Parâmetro de amortecimento
$\bar{t}_{método}$	Tempo médio computacional de um método
D	Vetor contendo registro das N amostras e k ordens harmônica do método LSH
I	Matriz identidade
J	Matriz Jacobiana
A_k	Parâmetro da k-ésima ordem de LSH senoidal
B_k	Parâmetro da k-ésima ordem de LSH cossenoidal
C	Parâmetro de LSH para a componente contínua
$DIT_h\%$	Distorção harmônica individual de tensão de ordem h
$DTT\%$	Distorção harmônica total de tensão (PRODIST)
$f(n)$	Modelo de função discretizada
f_1	Frequência fundamental da rede
f_k	Frequência múltipla inteira da fundamental
f_s	Frequência de amostragem
f_{no}	Frequência nominal da rede

$g.l$	grau de liberdade do Chi-quadrado
H	Ordem harmônica (PRODIST)
$H(k)$	Sequência de coeficientes de Hartley
h_n	Valor eficaz da n-ésima harmônica ímpar do sinal em pu
h_1	Componente de tensão ou corrente eficaz da frequência fundamental
h_{max}	Ordem harmônica máxima
h_{min}	Ordem harmônica mínima
he_n	Valor estimado da n-ésima harmônica do sinal em pu
I_m	Corrente da componente espectral (IEC 61000-4-7)
I_{nom}	Corrente nominal (IEC 61000-4-7)
$Im\{X\}$	Parte imaginária das componentes de X
k	Ordem hamônica
L_d	Limite de decisão do teste de Tukey
MS_D	Média da soma dos quadrados dentro dos métodos
MS_E	Média da soma dos quadrado entre os métodos
P_m	Potência ativa
$r(n, \alpha, \beta)$	Função residual do sinal modelo de LM
$Re\{X\}$	Parte real das componentes de X
$S(\alpha, \beta)$	Soma dos quadrados residuais de LM
$T_{amostragem}$	Taxa de amostragem
$t_{método}(i)$	Tempo do método para caracterizar o i-ésimo sinal
THD_{medido}	THD encontrada na aplicação de um dado método
$THD_{referência}$	Valor de referência da THD
U_m	Tensão da componente espectral (IEC 61000-4-7)
U_{nom}	Tensão nominal

V_n	Tensão nominal do barramento
V_1	Tensão fundamental medida
V_h	Tensão harmônica de ordem h
$x(n)$	Sinal discretizado
$x(t)$	Sinal contínuo no tempo
$X^*(k)$	Conjugado de X(k)
\mathbf{J}^T	Matriz Jacobiana transposta
DP	Desvio padrão amostral
g	Grupos de análise para ANOVA
p-valor	Valor tabelado pela distribuição Fisher
SSD	Variabilidade dentro dos grupos
SSE	Variabilidade das observações entre grupos
SST	Variabilidade total dos erros

1 - INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Com o passar dos anos, as cargas inseridas no Sistema Elétrico de Potência (SEP) estão deixando de ser predominantemente eletromecânicas e se transformando em eletroeletrônicas. Segundo a norma IEEE 1159 [1], o aumento crescente de equipamentos eletrônicos que podem causar perturbações eletromagnéticas, ou serem sensível a tais fenômenos, tem aumentado o interesse do estudo deste segmento da Qualidade da Energia Elétrica (QEE).

A QEE pode ser definida como as características da eletricidade em um ponto do sistema elétrico, avaliadas em comparação a um conjunto de parâmetros técnicos de referência [2].

As distorções harmônicas são fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental [4]. Com isso tem-se que cargas não lineares, com um fator de potência baixo, podem acarretar na distorção da forma de onda pela injeção de componentes harmônicas. Tal distorção pode ser sentida pela concessionária de energia e, em muitos casos, pelos próprios consumidores [27] [31].

Grande parte dos equipamentos responsáveis por tais distúrbios no SEP são sensíveis aos mesmos, podendo atuar de forma indesejada, ou não funcionarem, caso a energia elétrica fornecida não seja de boa qualidade. Alguns dos principais equipamentos que são afetados pelo aparecimento de distorções harmônicas são [31]:

- **Motores e geradores** – O maior efeito das harmônicas em máquinas rotativas de indução e síncronas é a elevação da temperatura devido ao aumento das perdas no ferro e no cobre, além de uma possível intensificação do ruído audível.
- **Transformadores** – Harmônicas na tensão aumentam as perdas no ferro, enquanto que na corrente elevam as perdas no cobre, além de ampliar o efeito das reatâncias de dispersão, uma vez que seu valor aumenta com a frequência.

- **Cabos de alimentação** – Caso os cabos sejam longos, podem aparecer elevadas sobretensões ao longo da linha, devido ao efeito de ressonâncias, podendo danificar o cabo.
- **Capacitores** – O maior problema é a possibilidade de ocorrência de ressonâncias excitadas pelas harmônicas, podendo produzir níveis excessivos de corrente ou de tensão. Além disso, a reatância capacitiva diminui com o aumento da frequência. Dessa forma, ocorrerá um aumento nas correntes relativas às harmônicas presentes na tensão.
- **Relés de proteção e fusíveis** – Um aumento da corrente eficaz devido às harmônicas sempre provocará um maior aquecimento dos dispositivos pelos quais circula a corrente, podendo ocasionar uma redução em sua vida útil.
- **Aparelhos de medição** – Geralmente são afetados por harmônicas, especialmente, se ocorrerem ressonâncias que afetam a grandeza medida.
- **Equipamentos eletrônicos** – Alguns equipamentos podem ser muito sensíveis às distorções na forma de onda de tensão, tais como equipamentos de comunicação e processamento de dados.

De forma geral, o primeiro passo na solução de problemas causados pelas distorções harmônicas é o monitoramento da QEE. A norma Brasileira, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional PRODIST [4], estabelece procedimentos relativos à QEE, abordando a qualidade do serviço prestado e a qualidade do produto.

Para a qualidade dos serviços, a norma estabelece a metodologia para a apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades.

Sobre a qualidade do produto, a norma caracteriza os fenômenos, parâmetros e valores de referências relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão, estabelecendo assim mecanismos que possibilitem à ANEEL fixar padrões para os indicadores de qualidade da energia.

Embora exista um padrão de indicadores de QEE adotado pela ANEEL, fica vago a questão de como serão realizadas as medições e os ensaios afim de se obter os padrões adotados no PRODIST.

Em um monitoramento de grandezas da QEE, os sinais de tensão e corrente obtidos das redes de energia elétrica são digitalizados para então serem analisados pelo instrumento. O avanço tecnológico possibilitou que essa análise fosse cada vez mais

completa. Para se evitar resultados muito discrepantes na medição de um mesmo sinal, é importante que se tenha claro as consequências da escolha de um determinado algoritmo, bem como a influência que aspectos como a taxa de amostragem podem provocar [22].

1.2 OBJETIVOS E METAS DO TRABALHO

Este trabalho tem como principal objetivo avaliar comparativamente algumas das diversas técnicas expostas na literatura para a caracterização das distorções harmônicas. Busca ainda, identificar a influência dos parâmetros das distorções harmônicas na caracterização efetuada por cada método. Dessa forma o trabalho consiste em:

- Levantar o estado da arte dos conceitos e definições da caracterização das distorções harmônicas;
- Identificar os métodos a serem avaliados;
- Apontar os parâmetros que influenciam na quantificação das distorções harmônicas;
- Realizar simulações computacionais com intuito de comparar os métodos entre si e
- Verificar a eficiência dos métodos utilizados.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Afim de alcançar o que foi descrito na seção 1.2, este trabalho é organizado da seguinte forma:

- No capítulo 2, inicialmente, é feita a definição da distorção harmônica, sua caracterização e a apresentação de diversas normas sobre o assunto. Em seguida, expõe-se cinco métodos de caracterização das distorções harmônicas, por meio de uma explicação teórica, destacando suas definições e métodos de cálculo. Ao final do capítulo, apresenta-se o estado da arte referente à comparação entre os métodos abordados.
- No capítulo 3, apresentam-se os procedimentos e materiais necessários para a análise do desempenho dos métodos quanto à caracterização da distorção harmônica.

- No capítulo 4, apresentam-se os principais resultados das simulações descritas no capítulo 3, com vista à classificação dos métodos quanto à precisão na caracterização das distorções harmônicas. Além disso, procura-se identificar como os parâmetros influenciam os métodos.
- No capítulo 5, apresentam-se as principais conclusões deste trabalho. Avalia-se o desempenho dos métodos frente aos tipos de sinais aplicados. Por fim, são feitas propostas para futuros estudos.

2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo, serão apresentadas as informações necessárias para a compreensão do fenômeno distorção harmônica de tensão e corrente. Primeiramente, será definido o fenômeno. Em seguida, são introduzidas as normas referentes ao assunto. E por fim, apresenta-se de forma detalhada os principais métodos de caracterização do fenômeno encontrado na literatura e o estado da arte referente à caracterização do fenômeno.

2.2 DISTORÇÕES HARMÔNICAS

2.2.1 Harmônicas

Para o SEP presume-se geralmente, que as tensões alternadas são senoidais e periódicas com apenas uma frequência, entretanto, se a onda não for senoidal, qualquer que seja sua forma, ela pode ser dividida matematicamente em componentes que são a onda fundamental e uma série de harmônicas. Esse processo é conhecido como análise harmônica. A fundamental (ou primeira harmônica) é senoidal e tem a mesma frequência da fonte, que no SEP pode ser de 60 Hz ou 50 Hz, dependendo do país. As outras harmônicas são também senoidais e suas frequências são múltiplas inteiras da frequência da fonte [14].

As harmônicas sempre estiveram presentes no sistema. Este tipo de perturbação pode ser considerada uma poluição que, caso exceda certos limites, acarreta em danos. Elas são provenientes, principalmente, de equipamentos com características não-lineares. A inserção de harmônicas no sistema pode prejudicar o bom funcionamento de motores, geradores, transformadores, cabos de alimentação, entre outros.

A Figura 2.1 apresenta a decomposição de um sinal em componentes harmônicas.

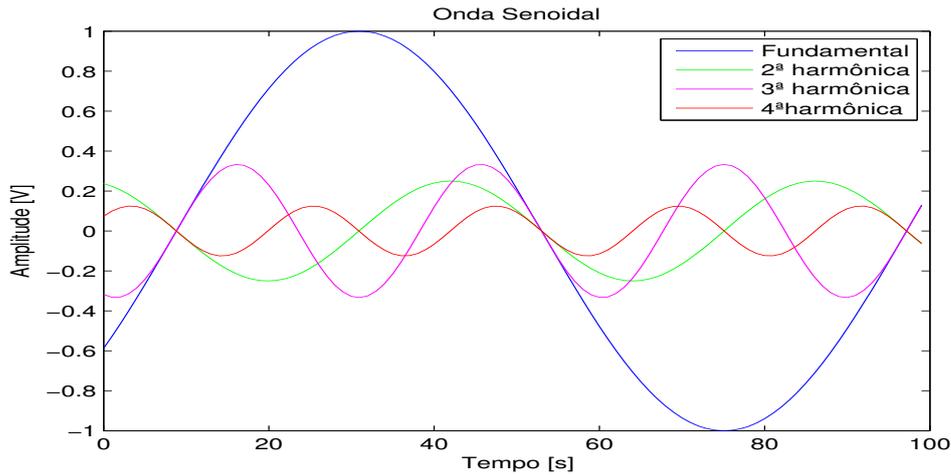


Figura 2.1: Onda Senoidal fundamental de 60 Hz e algumas harmônicas do sinal original

Na Figura 2.1, o número da harmônica, h_k , indica a k -ésima ordem harmônica da frequência fundamental. Por exemplo, a primeira harmônica, h_1 , é a componente na frequência fundamental que pode ser 50 Hz ou 60 Hz para o SEP. A segunda harmônica, h_2 , é a componente de 100 Hz ou 120 Hz, o da terceira harmônica, h_3 , é a componente de 150 Hz ou 180 Hz, e por consequência, a componente da k -ésima harmônica será $k \cdot 50$ Hz ou $k \cdot 60$ Hz [7].

As harmônicas são divididas nas classes par e ímpar. Como o próprio nome sugere, as da primeira classe possuem frequências múltiplas pares da fundamental e as da segunda classe possuem frequências múltiplas ímpares da fundamental. As harmônicas ímpares são dominantes nos sinais do SEP[28].

2.2.2 Tipos de distorções de forma de onda

As distorções de forma de onda incluem todos os desvios de tensão ou corrente em relação ao sinal senoidal ideal tido como referência, sendo classificadas em três grupos: distorção harmônica, distorção inter-harmônica e distorção não-periódica. Na maioria dos estudos, somente a distorção harmônica é considerada, até porque as demais são menos comuns. Entretanto, normas recentes, como a IEC 61000-4-7[3], incluem metodologias para quantificação das distorções não-harmônicas (inter-harmônica e não periódica)[18].

2.2.2.1 Distorções inter-harmônicas

Quando o sinal de tensão ou corrente contém componentes com frequências não múltiplas da frequência fundamental, f_1 , tem-se a distorção inter-harmônica. Inter-harmônicas com frequência inferior à frequência do SEP são denominadas sub-harmônicas.

Estas últimas são geralmente tratadas separadamente, já que suas presenças causam problemas específicos [18].

2.2.2.2 Distorções não-periódicas

Quando o sinal de tensão ou corrente exibe não-periodicidade é caracterizada a distorção não-periódica. Um exemplo é a tensão durante ferro-ressonância e a corrente de um forno a arco. O ruído é uma distorção não-periódica[18].

2.2.2.3 Distorções harmônicas

Uma distorção de forma de onda é considerada harmônica quando a deformação se apresenta de forma similar em cada ciclo da frequência fundamental. Neste caso, seu espectro contém apenas frequências múltiplas inteiras da fundamental. Esse tipo de deformação periódica geralmente é imposta pela relação não-linear tensão/corrente característica de determinados componentes da rede, como por exemplo, transformadores e motores, cujos núcleos ferromagnéticos estão sujeitos à saturação[31].

O nível de distorção harmônica pode ser caracterizado de forma sucinta pelo chamado índice de distorção harmônica total THD (*Total Harmonic Distortion*). Expresso em percentual, ele representa a razão entre o conteúdo harmônico que compõe o sinal analisado (tensão ou corrente RMS) e o valor RMS do sinal puramente senoidal de frequência fundamental. Matematicamente, THD% é definida conforme a equação 2.1, em termos percentuais em que k é a ordem harmônica, h_k é a tensão ou corrente eficaz de ordem harmônica k e h_1 é a componente de tensão ou corrente eficaz da frequência fundamental.

$$THD\% = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} h_k^2}}{h_1} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

Por meio da equação 2.1, é possível observar que a THD é uma aproximação ao valor eficaz normalizado da tensão distorcida. Isto nos leva a estabelecer uma maneira de estimar o valor de THD no domínio do tempo através do cálculo do valor eficaz do resíduo da tensão após filtrar a fundamental. A THD definida para a tensão é geralmente uma boa indicação do valor das harmônicas, uma vez que o valor da componente fundamental é relativamente constante. O mesmo não vale para a corrente, uma vez que a alteração da componente fundamental, associado a variações da carga, pode ser muito significativa. Para a análise do efeito das distorções da corrente, é mais significativo considerar os valores absolutos das harmônicas do que a THD [31].

2.3 NORMAS

Para a caracterização das distorções harmônicas foram considerados parâmetros e limites estabelecidos por diferentes normas descritas a seguir.

2.3.1 Prodist Modulo 8

O PRODIST (ANEEL, 2010) [4] é um conjunto de regras que auxiliam consumidores e agentes do sistema elétrico nacional em relação a identificação e classificação de suas necessidades para sua inserção nos sistemas de distribuição, além de estabelecer critérios e indicadores de qualidade. O módulo 8 deste documento refere-se aos fenômenos que caracterizam a QEE, estabelece os valores de referência e os procedimentos relativos à qualidade do serviço e do produto.

Em relação às harmônicas, esta norma estabelece a terminologia, a metodologia de medição, a instrumentação e os valores de referência para as distorções harmônicas.

A Tabela 2.1 exhibe a terminologia aplicável as formulações do cálculo de referência para as distorções harmônicas.

Tabela 2.1: Terminologia do PRODIST

Identificação da Grandeza	Símbolo	Formulação
Tensão harmônica de ordem h	V_h	
Ordem harmônica	H	
Ordem harmônica máxima	h_{max}	
Ordem harmônica mínima	h_{min}	
Tensão fundamental medida	V_1	
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DIT_h\%$	$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100$
Distorção harmônica total de tensão	$DDT\%$	$DDT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1}$

Com relação aos métodos de medição, o PRODIST recomenda:

- Os sinais a serem monitorados devem utilizar sistemas de medição no qual as informações coletadas possam ser processadas através de recursos computacionais.
- A capacidade de armazenamento dos dados deve ser de 37 (trinta e sete) dias, além de ter a capacidade de armazenar em intervalos programáveis de 5 (cinco) a 60 (sessenta) minutos.

- Para os sistemas elétricos trifásicos, as medições de distorção harmônica devem ser feitas através das tensões fase-neutro para sistemas estrela aterrada e fase-fase para as demais configurações.

A Tabela 2.2 apresenta os valores de referência para as distorções harmônicas totais.

Tabela 2.2: Valores de referência globais das distorções harmônicas totais

Tensão nominal do barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão DTT[%]
$V_n \leq 1kV$	10
$1kV < V_n < 13,8kV$	8
$13,8kV < V_n < 69kV$	6
$69kV < V_n < 230kV$	3

Em relação a instrumentação o espectro harmônico a ser considerado, para fins de cálculo da distorção total, deve compreender uma faixa de frequência que considere desde a componente fundamental até, no mínimo, a 25^a ordem harmônica ($h_{min} = 25$)

A Tabela 2.3 apresenta os níveis de referência do PRODIST para as distorções individuais.

Em relação a variação da frequência, o procedimento diz que sistema em condições normais de operação e em regime permanente, deve operar na faixa de 59,9 Hz e 60,1 Hz. Quando há distúrbios no sistema, deve-se garantir que a frequência retorne a faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz no prazo de 30 (trinta) segundos, após sair desta faixa. Caso haja corte de geração ou de carga, para permitir a recuperação do equilíbrio geração-carga, durante os distúrbios no sistema de distribuição, a frequência não pode exceder a 66 Hz e nem ser inferior a 56,5 Hz, em condições extremas.

2.3.2 NBR IEC 61000-4-30

A NBR IEC 61000-4-30 (2008) [2] é a tradução da norma internacional IEC 61000-4-30 para o português. Ela define os métodos para medição e interpretação dos resultados de parâmetros da QEE em sistemas de alimentação em corrente alternada (50/60 Hz). Estes métodos são descritos para cada tipo relevante de parâmetro de forma a fornecer resultados confiáveis, independentemente do método de implementação, além de contemplar métodos de medição sem interromper o estado normal do sistema.

A norma define três classes (A,S,B) para cada parâmetro medido:

- Classe A: é usada onde medições precisas são necessárias, como verificação de conformidade com padrões, por exemplo. Para qualquer medição de um parâmetro efetuada por dois instrumentos que obedeçam as exigências da classe A, ao

Tabela 2.3: Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão

	Ordem harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]			
		$V_n \leq 1kV$	$1KV < V_n \leq 13,8kV$	$13,8kV < V_n \leq 69kV$	$69kV < V_n < 230kV$
Ímpares não múltiplos de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	> 25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplos de 3	3	6,5	5	4,0	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	> 21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	≥ 12	1	0,5	0,5	0,5

medir os mesmos sinais, deve-se produzir resultados iguais dentro da incerteza especificada para o parâmetro.

- Classe S: é usada para aplicações estatísticas tais como avaliações de QEE, normalmente com um subconjunto limitado de parâmetros. Seus intervalos de medição são equivalentes aos da classe A, porém seus requisitos de processamento são menores.
- Classe B: é definida com a finalidade de se evitar a continuidade da fabricação de projetos obsoletos de muitos instrumentos existentes. Sendo assim, não se recomenda utilizá-lo para novos projetos.

Neste trabalho, devido a necessidade da precisão dos resultados, são considerados, para todos os fins, apenas os métodos de medição da classe A.

O intervalo de tempo de medição básico para magnitudes de parâmetros (inclusive harmônicos) deverá ser de 10 ciclos para sistema de alimentação em 50 Hz ou de 12 ciclos para sistemas de 60 Hz. Sendo que a variação da frequência não deve exceder $\pm 0,01$ Hz do seu valor nominal.

O algoritimo de agregação deve ser realizado utilizando a raiz quadrada da média aritmética dos quadrados dos valores de entrada. Para harmônicas, os dados relativos ao intervalo de tempo de 150/180 ciclos devem ser agregados sem lacuna em quinze intervalos de tempo de 10/12 ciclos.

Com base no anexo desta norma, é possível determinar a taxa de amostragem que deve ser pelo menos o dobro da máxima componente da forma de onda.

Para métodos de medição de tensões harmônicas, a norma toma como base a IEC 61000-4-7(2002)[3], que deve ser utilizada para determinar a medição de um subgrupo de harmônicas de 10/12 ciclos contínuos. Suas medições devem ser feitas, pelo menos, até a 50^a ordem harmônica.

2.3.3 IEC 61000-4-7

A IEC 61000-4-7 [3] é uma norma internacional aplicada em instrumentos para medição da componente espectral de até 9 kHz para frequências fundamentais de 50 Hz ou 60 Hz.

Nesta norma se encontram algumas definições relacionadas às harmônicas e distorções harmônicas, tais como:

- **Frequência harmônica (f_k):** frequência múltipla inteira da fundamental ($f_k = k \cdot f_1$).
- **Ordem harmônica (k):** razão entre a frequência harmônica e a frequência fundamental.
- **Valor R.M.S da componente harmônica (h_k):** Valor r.m.s. de uma componente harmônica na análise de uma forma de onda não senoidal. A componente harmônica é idêntica a componente espectral.
- **Valor r.m.s. do grupo harmônico($h_{g,k}$):** raiz quadrada da soma dos quadrados r.m.s. do valor de uma harmônica e a componente espectral adjacente a ele dentro da janela de tempo, somando assim os componentes de energia das linhas limítrofes com a da harmônica adequada.

$$h_{g,k}^2 = \frac{C_{k-6}^2}{2} + \sum_{i=-4}^4 C_{k+i}^2 + \frac{C_{k+6}^2}{2} \quad \{ \text{sistema de 60 Hz} \}$$

- **Valor r.m.s. do subgrupo harmônico ($h_{sg,k}$):** raiz quadrada da soma dos quadrados r.m.s. do valor de uma harmônica e duas componentes espectrais adjacentes a ele.

$$h_{sg,k}^2 = \sum_{i=-1}^1 C_{k+i}^2$$

- **Distorção harmônica total (THD):**

$$THD = \sqrt{\sum_{k=2}^K \left(\frac{h_k}{h_1}\right)^2}$$

- **Grupo de distorção harmônica (THDG):**

$$THDG = \sqrt{\sum_{k=2}^K \left(\frac{h_{gk}}{h_{g1}}\right)^2}$$

- **Subgrupo de distorção harmônica (THDS):**

$$THDS = \sqrt{\sum_{k=2}^K \left(\frac{h_{sgk}}{h_{sg1}}\right)^2}$$

- **Distorção harmônica ponderada parcial (PWHd):**

$$PWHd = \sqrt{\sum_{k=2}^K k \left(\frac{h_k}{h_1}\right)^2}$$

A Tabela 2.4 apresenta a sensibilidade que os equipamentos da classe I devem possuir.

Tabela 2.4: Sensibilidade para as medidas de corrente, tensão e potência ativa

Classe	Medida	Condições	Erro máximo
I	Tensão	$U_m \geq 1\%U_{nom}$	$\pm 5\%U_m$
		$U_m < 1\%U_{nom}$	$\pm 0,05\% U_{nom}$
	Corrente	$I_m \geq 3\%I_{nom}$	$\pm 5\%I_m$
		$I_m < 3\% I_{nom}$	$\pm 0,15\%I_{nom}$
	Potência ativa	$P_m \geq 150W$	$\pm 1\%P_m$
		$P_m < 150$	$\pm 1,5W$

2.3.4 IEC 61000-2-2

A IEC 61000-2-2[21] classifica os fenômenos em longo e curto prazo. Os fenômenos de longo prazo possuem níveis de harmônicas que se sustentam por 10 minutos ou mais. Já os fenômenos de curto prazo são aqueles que ocorrem em 3 segundos ou menos.

Para fenômenos de longo prazo a THD máxima será de 8%. Para fenômenos de curto prazo, o valor da THD sobe para 11%.

A Tabela 2.5 relaciona a ordem harmônica com a razão da tensão harmônica individual com a tensão da fundamental, para sistemas de baixas tensões.

Tabela 2.5: Valores de referência globais das distorções harmônicas totais

	Ordem harmônica [h]	Tensão harmônica[%]
Ímpares não múltiplas de 3	5	6
	7	5
	11	3,5
	13	3
	$17 \leq h \leq 49$	$2,27 \left(\frac{17}{h}\right) - 0,27$
Ímpares múltiplas de 3	3	5
	9	1,5
	15	0,4
	21	0,3
	$21 \leq h \leq 45$	0,2
Pares	2	2
	4	1
	6	0,5
	8	0,5
	$10 \leq h \leq 50$	$0,25 \left(\frac{10}{h}\right) - 0,25$

2.3.5 IEEE Std.519 (1992)

A norma IEEE Std.519 (1992) [1] é usada como guia para projetos de sistemas de potência com sinais não lineares. Os limites considerados são para operações em regime estacionário e recomendado para as piores condições. Esta norma define harmônicas, sua geração, seus efeitos, como compensá-los e formas de medição deste efeito. Medir a corrente e a tensão harmônica é essencial para uma distribuição de energia elétrica mais confiável. Alguma das razões para tal medição, são:

- Monitorar a existência de componentes harmônicas e quais valores são admissíveis no SEP;
- Testar equipamentos que geram harmônicas;
- Diagnosticar e solucionar situações em que o desempenho do equipamento é inaceitável para seu propósito.

- Observar a existência de níveis não toleráveis e acompanhar as tendências da corrente e da tensão no domínio do tempo.

A acurácia dos equipamentos de medição não devem exceder 5% do limite permitido.

2.4 TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER (DFT)

A transformada de Fourier, ou espectro de um sinal contínuo, $x(t)$, é definido por:

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.2)$$

onde, $x(t)$ e $X(j\omega)$ pode ser função complexa de uma variável real. A propriedade básica da transformada de Fourier é a sua capacidade para distinguir as ondas de frequências diferentes que foram combinadas de forma aditiva em um sinal. Na terminologia de processamento de sinais, a transformada de Fourier é dita para representar um sinal no domínio da frequência, e ω , o argumento da transformada de Fourier, é referente a frequência angular [25] [30].

A DFT (*Discrete Fourier Transform*) é uma das operações básicas utilizadas em diversas aplicações de processamento de sinais. Ela é utilizada para aproximar a transformada de Fourier de um sinal discreto.

Para aplicar o método da DFT em um sinal contínuo $x(t)$, deve-se representá-lo como uma sequência de N amostras $x(nT)$, onde $0 \leq n \leq N - 1$ e T é o período entre as amostras, que pode ser descrita pela equação 2.3

$$x_s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} x(nT)\delta(t - nT), \quad (2.3)$$

onde $\delta(t)$ é a função delta de Kronecker, que representa um trem de impulso $x_s(t)$, cuja amplitude é modulada por $x(t)$ com intervalos de T .

Para um dado sinal de entrada discretizado, $x(n)$, real de tamanho N , sua DFT normalizada é definida por 2.4

$$X(k) = \sqrt{\frac{1}{N}} \sum_{n=0}^{N-1} x_s(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, 0 \leq k \leq N - 1, \quad (2.4)$$

onde, o resultado X_k corresponde normalmente a um número complexo da k -ésima ordem harmônica. Pode-se traçar a contribuição de $X(k)$ como uma função do índice k ou da frequência. Esse gráfico, chamado de espectro de Fourier de $x(n)$, nos fornece,

em uma rápida análise, um quadro gráfico das contribuições das várias harmônicas de $x(n)$.

Em geral, os resultados X_k podem ser representados na forma polar por 2.5

$$X_k = |X_k| e^{j\theta_k} \quad (2.5)$$

Nessa notação, $|X_k|$ é a amplitude de X_k , e θ_k sua fase. O gráfico de $|X_k|$ em função da frequência é chamado de espectro de amplitude e o de θ_k em função da frequência é chamado de espectro de fase[6]. Com o espectro de amplitude é possível caracterizar as magnitudes das ordens harmônicas e por fim calcular a THD do sinal utilizando a equação 2.1.

Para a DFT apresentar bom comportamento, o tamanho da janela N deve compreender períodos inteiros da fundamental. Caso N seja escolhido de forma inadequada, os resultados obtidos com a DFT não serão plausíveis, pois poderá haver espalhamento da energia para outras ordens harmônicas [18].

O método DFT também tem seu comportamento comprometido quando a frequência fundamental do sinal sofre pequenas variações. Como a taxa de amostragem está fixa e sincronizada com a frequência nominal, $f_{no} = 60$ Hz, pequenos desvios causam a perda de sincronia com a frequência de amostragem, ocorrendo espalhamento da potência do sinal por raias espectrais, também conhecido como *leakage*. Isso ocorre quando a componente harmônica se encontra entre duas raias espectrais [18].

Por fim, o método deve respeitar o teorema de Nyquist, onde o sinal deve ser discretizado com frequência de amostragem igual ou superior a duas vezes o valor da frequência de maior ordem harmônica. Aqui, caso seja desobedecido o teorema de Nyquist, poderá ocorrer o fenômeno *aliasing* [6].

A forma inversa da transformada discreta de Fourier IDFT (*Inverse Discrete Fourier Transform*), transforma sequências no domínio da frequência para sequências no domínio do tempo.

Dessa forma, para um dado sinal $X(k)$ de tamanho N, sua IDFT é definida por 2.6

$$x(n) = \sqrt{\frac{1}{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j\frac{2\pi}{N}kn}, 0 \leq n \leq N - 1, \quad (2.6)$$

onde $x(n)$ $0 \leq n \leq N - 1$, representa a sequência real que corresponde ao sinal discretizado no tempo.

Existe ainda a forma rápida da transformada discreta de Fourier FFT (*Fast Fourier Transform*), que reduz a complexidade do algoritmo da DFT de $O(N^2)$, para $O(N \log(N))$. A FFT foi relatada em sua forma primordial por Cooley e Tukey (1965).

Atualmente, o algoritmo FFT possui muitas implementações com vários níveis de desempenho e eficiência[25].

A FFT é baseada no conceito de sub-divisão de um grande problema computacional para um grande número de sub-problemas que podem ser resolvidos mais facilmente. Com esta abordagem é possível que o cálculo da DFT seja feito em computadores relativamente baratos. Em geral, a vantagem da velocidade da FFT é tal que, em muitos casos, é mais eficiente para executar um cálculo no domínio de tempo, transformando a análise para o domínio da frequência, solucionando-a e por fim transformando seu resultado de volta para o domínio do tempo através da transformada inversa[25] [13].

A FFT torna o procedimento bastante atrativo. Entretanto, a implementação do cálculo dos coeficientes de Fourier utiliza aritmética complexa. Isso significa que as operações de adição e de multiplicação deverão proceder ao tratamento da parte real e da parte imaginária das variáveis. Também é necessário ter para os N coeficientes resultantes do vetor de saída FFT um total de 2N posições de memória necessárias para armazenar as partes real e imaginária de cada coeficiente[13].

2.5 ALGORITMO DE GOERTZEL (AG)

O algoritmo de Goertzel AG , publicado pelo Dr. Gerald Goertzel em 1958, é uma técnica de processamento digital de sinais DSP (*Digital Signal Processing*) para calcular os coeficientes da DFT e o espectro do sinal, utilizando um método de filtragem digital. Sua forma modificada tem a vantagem de poder ser utilizada para computação de espectros de sinal sem envolver álgebra complexa diferente do algoritmo da DFT[20].

De acordo com Tan e Jiang [20], supondo um sinal $x(n)$ real, de tamanho N, inicia-se a ilustração do AG usando um filtro digital de segunda ordem IIR , cuja função de transferência é dada pela equação 2.7

$$Z_k(z) = \frac{Y_k(z)}{X(z)} = \frac{1 - e^{-\frac{2\pi k}{N}} z^{-1}}{1 - 2\cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) z^{-1} + z^{-2}}, \quad (2.7)$$

onde k é a frequência de interesse.

Dessa forma, deve-se processar N+1 vezes a sequência de dados com a saída do filtro. O último nó do filtro de Goertzel representa o coeficiente da DFT $X(k)$, isto é, $X(k) = y_k(N)$.

A Figura 2.2 apresenta o filtro de Goertzel de segunda ordem a ser implementado.

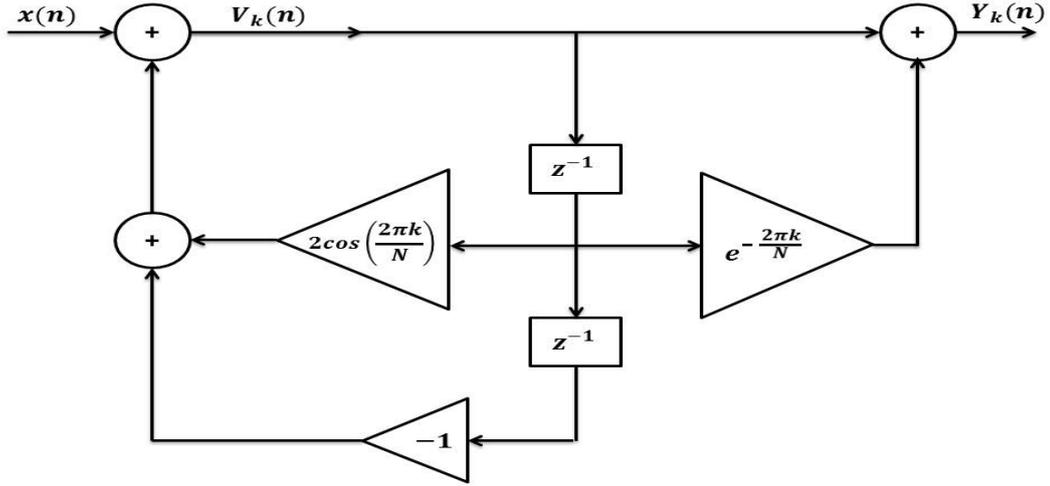


Figura 2.2: Filtro de Goertzel de segunda ordem IIR

De acordo com a realizaço da forma direta do AG obtem-se que $x(N) = 0$, e para $n = 0, 1, \dots, N$ o valor da saida pode ser encontrada pelas equaoes 2.8 e 2.9

$$v_k(n) = 2\cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right)v_k(n-1) - v_k(n-2) + x(n) \quad (2.8)$$

$$y_k(n) = v_k(n) - e^{-\frac{2\pi k}{N}}v_k(n-1) \quad (2.9)$$

com condioes iniciais $v_k(-2) = v_k(-1) = 0$

Como o objetivo  obter a magnitude do espectro, pode-se substituir $n=N$ para se obter $X(k)$ e multiplicando por seu conjugado $X^*(k)$ encontram-se as magnitudes dos coeficientes da DFT ao quadrado. Dessa forma calculam-se as equaoes de 2.10 a 2.13

$$|X(k)|^2 = X(k)X^*(k) \quad (2.10)$$

Onde

$$X(k) = v_k(N) - e^{-\frac{2\pi k}{N}}v_k(N-1) \quad (2.11)$$

$$X^*(k) = v_k(N) - e^{\frac{2\pi k}{N}}v_k(N-1) \quad (2.12)$$

entao

$$|X(k)|^2 = v_k^2(N) + v_k^2(N-1) - \left(e^{-\frac{2\pi k}{N}} + e^{\frac{2\pi k}{N}}\right)v_k(N)v_k(N-1) \quad (2.13)$$

Utilizando a identidade de Euler encontra-se a seguinte igualdade dada pela equaao 2.14.

$$e^{-\frac{2\pi k}{N}} + e^{\frac{2\pi k}{N}} = \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) - j\sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right) + \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) + j\sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right) = 2\cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \quad (2.14)$$

Assim, a magnitude dos coeficientes da DFT é encontrada com a raiz quadrada de $|X(k)|^2$, equação 2.15.

$$\begin{aligned} |X(k)|^2 &= v_k^2(N) + v_k^2(N-1) - 2\cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right)v_k(N)v_k(N-1) \\ |X(k)| &= \sqrt{v_k^2(N) + v_k^2(N-1) - 2\cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right)v_k(N)v_k(N-1)} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Verifica-se que diferente da DFT, o método de Goertzel não apresenta algebra complexa reduzindo com isso sua complexidade computacional. Porém quando comparado com o algoritmo da FFT, seu desempenho é atraente somente quando se deseja obter um pequeno número de componentes do espectro [17].

Assim como a DFT, o método de Goertzel para apresentar bom comportamento na obtenção das harmônicas, deve possuir números inteiros de períodos, frequência fundamental invariante e obedecer o critério de Nyquist, para frequência de amostragem.

2.6 TRANSFORMADA DISCRETA DE HARTLEY (DHT)

A transformada de Hartley foi proposta originalmente por Ralph V. L Hartley para tempo contínuo. Ela possui propriedades que a torna útil para processamento de sinais em tempo discreto. A DHT (*Discrete Hartley Transform*) tem como propriedade transformar uma sequência de valores reais em outra sequência de valores reais. Dessa forma se evita a necessidade de se trabalhar com números complexos, tal como é feito na DFT. Além disso, em face da simetria das funções de base, a transformada direta e inversa são idênticas. Isto significa dizer que, se for aplicado duas vezes a DHT em uma sequência, o resultado será a própria sequência [13].

Supondo um sinal $x(n)$ real, de tamanho N , inicia-se o uso da DHT pela equação 2.16

$$H(k) = \sqrt{\frac{1}{N}} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \text{cas}\left(\frac{2\pi}{N}kn\right), 0 \leq k \leq N-1, \quad (2.16)$$

onde $x(n)$ com $0 \leq n \leq N-1$, representa a sequência que corresponde ao sinal de entrada, $H(k)$ corresponde à sequência de coeficientes de Hartley. A expres-

são $\text{cas}\left(\frac{2\pi}{N}kn\right) = \cos\left(\frac{2\pi}{N}kn\right) + \sin\left(\frac{2\pi}{N}kn\right)$ contrastando-se com a expressão $e^{j\frac{2\pi}{N}kn} = \cos\left(\frac{2\pi}{N}kn\right) - j\sin\left(\frac{2\pi}{N}kn\right)$ que está presente na definição da DFT.

A forma inversa da transformada discreta de Hartley IDHT (*Inverse Discrete Hartley Transform*), pode ser descrita pela equação 2.17.

$$x(n) = \sqrt{\frac{1}{N}} \sum_{k=0}^{N-1} H(k) \text{cas}\left(\frac{2\pi}{N}kn\right), 0 \leq n \leq N-1, \quad (2.17)$$

Existe uma grande similaridade entre Fourier e Hartley de tal forma que os coeficientes da DFT podem ser obtidos a partir da DHT. Supondo o caso especial em que o sinal de entrada seja digitalizado a uma taxa que apresente uma quantidade inteira de amostras por período da fundamental e que esta quantidade seja ainda uma potência inteira de dois, respeitando o critério de Nyquist, pode-se encontrar a parte real da DFT, $\text{Re}\{X\}$, e em seguida sua parte imaginária, $\text{Im}\{X\}$ por meio das fórmulas 2.18 e 2.19 [13].

$$\text{Re}\{X(0)\} = H(0)$$

$$\text{Re}\{X(k)\} = \frac{H(k) + H(N-k)}{2}, k = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1 \quad (2.18)$$

$$\text{Re}\left\{X\left(\frac{N}{2}\right)\right\} = H\left(\frac{N}{2}\right)$$

$$\text{Im}\{X(0)\} = 0$$

$$\text{Im}\{X(k)\} = \frac{H(N-k) - H(k)}{2}, k = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1 \quad (2.19)$$

$$\text{Im}\left\{X\left(\frac{N}{2}\right)\right\} = 0$$

Dessa forma, o espectro de amplitude da DFT pode ser obtido utilizando somente coeficientes da DHT como mostrado na equação 2.20 .

$$|X(k)|^2 = \text{Re}\{X(k)\}^2 + \text{Im}\{X(k)\}^2 = \frac{H(k)^2 + H(N-k)^2}{2} \quad (2.20)$$

$$|X(k)| = \sqrt{\frac{H(k)^2 + H(N-k)^2}{2}}$$

O cálculo da THD pode ser também feito de forma direta utilizando os coeficientes da DHT pela equação 2.21.

$$THD_{DHT\%} = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{\frac{N}{2}-1} H(k)^2 + H(N-k)^2}{H(1)^2 + H(N-1)^2}} 100\% \quad (2.21)$$

A DHT assim como a DFT possui complexidade $O(N^2)$ e de forma igual, também possui algoritmos rápidos que computam o resultado com complexidade $O(N \log N)$. A grande maioria dos algoritmos rápidos que se aplica a DFT como algoritmo de Cooley-Tukey, o algoritmo dos fatores primos entre outros se aplicam a DHT, salvo algumas exceções como o algoritmo QFT (*Quantum Fourier Transform*), que ainda não foi investigados no contexto da DHT [12].

Como descrito para os métodos DFT e AG, a DHT também necessita de algumas ressalvas para apresentar bom comportamento na obtenção das harmônicas, tais como possuir número inteiro de períodos da frequência fundamental, obedecer o critério de Nyquist e frequência fundamental invariante.

2.7 MÉTODO ITERATIVO DE LEVENBERG MARQUARD (LM)

O método LM é o aprimoramento do método de Gauss-Newton. Ele foi desenvolvido em 1944 por Levenberg e posteriormente em 1963 melhorado por Marquard. Esse método é utilizado para buscar mínimo de função com mais de uma variável, expressa pela soma dos quadrados de funções reais não-lineares. Por ser um método iterativo, ele depende de uma estimativa da solução inicial para funcionar. Caso essa esteja longe da solução real, sua convergência é lenta, porém garantida. Se a proposição inicial for próxima da solução desejada, sua convergência é rápida e o método se comporta como o método de Gauss-Newton [5] [19].

Supondo uma amostra $x(n)$ de tamanho N , retirada de um SEP, inicia-se a utilização do método de LM estimando um modelo de função $f(n)$ com parâmetros α e β , da seguinte forma e função 2.22

$$f(n, \alpha_k, \beta_k) = \alpha_k \sin(2\pi f_{no}nk) + \beta_k \cos(2\pi f_{no}nk), n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (2.22)$$

onde f_{no} é o valor da frequência nominal da rede, α_k e β_k representam os valores dos k -ésimos parâmetros α e β . Os valores destes parâmetros e o valor de f_1 devem ser inicialmente estimados para que seja gerado a primeira iteração do método, sendo que se for estimado de forma inadequada, ele aumentará o número de iterações, aumentando assim sua complexidade computacional.

A partir da função $f(n, \alpha, \beta)$, é definida uma função residual, $r(n, \alpha, \beta)$ dada pela função 2.23

$$r(n, \alpha, \beta) = x_n - f(n, \alpha, \beta) \quad (2.23)$$

onde x_n é a n-ésima amostra de x e $f(n, \alpha, \beta)$ é o valor da função $f(n)$ usando os parâmetros escolhidos α e β . Após definir a função residual, é calculado a soma dos quadrados residuais, $S(\alpha, \beta)$, equação 2.24

$$S(\alpha, \beta) = \sum_{n=0}^{N-1} r(n, \alpha, \beta)^2, \quad (2.24)$$

quando o valor de $S(\alpha, \beta)$ é próximo de zero a curva modelo estará ajustada aos dados[5]. Caso o valor determinado ainda não seja mínimo, os valores dos parâmetros α e β são atualizados com uma nova estimativa $\alpha + \delta$ e $\beta + \delta$ [19]. Pelo método de Gauss-Newton, as atualizações dos parâmetros, δ , são encontradas com base na equação 2.25

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J})\delta = \mathbf{J}^T[\mathbf{x} - \mathbf{f}(\alpha, \beta)] \quad (2.25)$$

onde \mathbf{x} e \mathbf{f} são vetores, cuja a n-ésima linha apresenta valores x_n e $f(n, \alpha, \beta)$ respectivamente, e \mathbf{J} é a matriz Jacobiana em que cada linha representa o gradiente de $r(n, \alpha, \beta)$ com relação aos parâmetros α e β , como visto a seguir

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial r(1, \alpha_1, \beta_1)}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial r(1, \alpha_1, \beta_1)}{\partial \beta_1} & \dots & \frac{\partial r(1, \alpha_k, \beta_k)}{\partial \alpha_k} & \frac{\partial r(1, \alpha_k, \beta_k)}{\partial \beta_k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial r(N, \alpha_1, \beta_1)}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial r(N, \alpha_1, \beta_1)}{\partial \beta_1} & \dots & \frac{\partial r(N, \alpha_K, \beta_K)}{\partial \alpha_K} & \frac{\partial r(N, \alpha_K, \beta_K)}{\partial \beta_K} \end{bmatrix}$$

onde, K representa a última ordem dos parâmetros α e β . N corresponde a última amostra da sequência $x(n)$.

A contribuição de Levenberg no método de Gauss-Newton, foi a adição do parâmetro de amortecimento μ na equação 2.25 como visto na função 2.26

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \mu \mathbf{I})\delta = \mathbf{J}^T[\mathbf{x} - \mathbf{f}(\alpha, \beta)] \quad (2.26)$$

onde, \mathbf{I} representa uma matriz identidade e \mathbf{J}^T equivale a matriz Jacobiana transposta. O parâmetro de amortecimento μ têm varios efeitos:

- Para todo $\mu > 0$ a matriz dos coeficientes é definida positiva, e isso faz com que δ diminua;
- Para grandes valores de μ tem-se a equação 2.27

$$\delta \approx -\frac{1}{\mu}(\mathbf{J}^T[\mathbf{x} - \mathbf{f}(\alpha, \beta)]) \quad (2.27)$$

ou seja, pequenos passos causam grandes variações. Isso é bom se a iteração atual está distante da solução.

- Se μ é muito pequeno, então $\delta_{last} \approx \delta$, que é um bom passo nas fases finais da iteração, quando x é próximo de f [19].

Inicialmente, o valor típico μ é igual a 10^{-4} . Contudo, a cada iteração o valor de μ é alterado. Se a solução da equação 2.26 conduzir a uma redução do resíduo $r(n, \alpha, \beta)$, μ é dividido por 10, caso contrário este é multiplicado por 10 [15].

O método de Levenberg possui instabilidades numéricas quando μ cresce. Com isso, Marquardt em 1963 propôs uma alteração no algoritmo de Levenberg, ou seja, ele propôs que cada componente do gradiente é ponderada de acordo com sua curvatura. Dessa forma, há uma grande tendência de convergência na direção na qual o gradiente é menor. Em resumo, a alteração é implementada substituindo a equação 2.26 pela 2.28.

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \text{diag}(\mathbf{J}^T \mathbf{J})\mu)\delta = \mathbf{J}^T[\mathbf{x} - \mathbf{f}(\alpha, \beta)] \quad (2.28)$$

Dessa forma finaliza-se todos os passos da iteração utilizando o método. Após as iterações de LM, pode-se calcular a THD utilizando a fórmula 2.29

$$THD_{LM\%} = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^K \alpha_k^2 + \beta_k^2}{\alpha_1^2 + \beta_1^2}} 100\% \quad (2.29)$$

onde $k = 1, 2, 3, \dots, K$ representa as ordens harmônicas desejadas.

O método de LM, diferente da DFT, AG e DHT, não necessita possuir durações dos ciclos inteiros, e nem que a frequência fundamental da rede seja invariante. Porém, se o sinal não for adequadamente amostrado, o método de LM poderá estimar falsos picos e falso vales do sinal de origem comprometendo assim o valor das harmônicas.

2.8 MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS PARA HARMÔNICAS (LSH)

O método LSH (*Least Square for Harmonic*) proposto por Murthy, serve para analisar as componentes harmônicas de um sinal utilizando um modelo matemático composto por uma soma de funções senoidais [10].

Assim como foi apresentado para LM, supondo uma amostra $x(n)$ de tamanho N , retirada de um SEP, o método LSH inicia-se com um modelo de função $f(n)$ que descreve de forma geral um determinado sinal elétrico, função 2.30

$$f(n, A_k, B_k) = C + A_k \sin(2\pi f_{no}nk) + B_k \cos(2\pi f_{no}nk), n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (2.30)$$

onde C representa a componente DC do sinal e f_{no} representando o valor da frequência nominal da rede. A_k e B_k correspondem aos valores dos k -ésimos parâmetros A e B que se deseja obter. Dessa forma, um vetor \mathbf{D} contendo os registros das N amostras e das K ordens harmônicas é criado

$$\mathbf{D} \mathbf{u} = \begin{bmatrix} 1 & \cos(2\pi f_{no}) & \sin(2\pi f_{no}) & \cdots & \cos(2\pi f_{no}K) & \sin(2\pi f_{no}K) \\ 1 & \cos(2\pi f_{no}2) & \sin(2\pi f_{no}2) & \cdots & \cos(2\pi f_{no}2K) & \sin(2\pi f_{no}2K) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos(2\pi f_{no}N) & \sin(2\pi f_{no}N) & \cdots & \cos(2\pi f_{no}NK) & \sin(2\pi f_{no}NK) \end{bmatrix}$$

Assim, a solução dos parâmetros A_k e B_k , utilizando o método LSH, pode ser encontrado realizando a operação 2.31

$$\mathbf{u} = [\mathbf{D}^T \mathbf{D}]^{-1} \mathbf{D}^T \mathbf{x}^T \quad (2.31)$$

onde, $\mathbf{u}^T = [C \ A_1 \ B_1 \ \cdots \ A_k \ B_k]$ correspondendo ao vetor solução e \mathbf{x} representa o vetor linha contendo as N amostras de $x(n)$ [26].

As amplitudes das harmônicas são obtidas utilizando-se a equação 2.32.

$$h_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2} \quad (2.32)$$

A THD, utilizando o método LSH, pode ser calculada de forma similar ao do método de LM, equação 2.33

$$THD_{LSH\%} = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^K A_k^2 + B_k^2}{A_1^2 + B_1^2}} \cdot 100\% \quad (2.33)$$

onde $k = 1, 2, 3, \dots, K$ representa as ordens harmônicas desejada.

Existem métodos iterativos que são utilizados nos mínimos quadrados para obter a frequência fundamental da rede, porém sua vantagem termina com o aumento significativo da sua complexidade computacional, pois a cada iteração do método em busca da frequência ideal todos os passos do algoritmo são repetidos. Em um desses métodos é calculado o erro quadrático médio MSE (*Mean Square Error*) das amostras do sinal em relação ao valor estimado pelo método como visto na equação 2.34

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x(n) - \sum_{k=1}^K A_k \cos(2\pi f_i n k) + B_k \sin(2\pi f_i n k)]^2 \quad (2.34)$$

onde $f_i = f_{no} + \delta$ representa as iterações da frequência cujo os valores são limitados pela faixa de valores de $f_{min} \leq f_i \leq f_{max}$ e δ corresponde aos incrementos de frequência de f_i . Dessa forma, o parâmetro f_i que apresentar o menor MSE será considerado a melhor aproximação do sinal, e seu valor f_i será o valor ideal da frequência [24].

Caso não seja utilizado um método iterativo para obter a frequência ideal, o método LSH se comportará de forma semelhante a DFT, AG e DHT, em relação a pequenas variações na frequência da rede ou na taxa de amostragem do sinal causando distúrbios na obtenção das componentes harmônicas do sinal. Diferente desses métodos, quanto maior for a quantidade de ciclos não inteiros, menor será sua suscetibilidade a erros nas ordens harmônicas. Sua vantagem quanto ao método de LM além de apresentar, menor complexidade computacional é o fato de não necessitar de uma estimativa para a obtenção dos parâmetros.

2.9 ESTADO DA ARTE

Com o aumento do uso de equipamentos sensíveis às harmônicas no SEP, a importância de estudos para caracterização deste fenômeno se torna cada vez maior. Muito explorado em livros e artigos relacionados à QEE, no que tange as comparações de métodos de caracterização de harmônicas os artigos são escassos, sendo necessários estudos mais aprofundados com relação às formas de aplicação desses métodos. Esta seção visa apresentar alguns dos principais trabalhos relacionados ao tema.

Em seu artigo, J. F. Araújo et. al[16] apresenta um estudo comparativo entre AG, LSH, LM e FFT para extração do conteúdo harmônico do SEP. Conclui-se que a FFT possui o menor esforço computacional, o LSH possibilita a estimação das componentes independente do número de ciclos, mas não consegue estimar todas componentes. G é mais adequado quando aplicado a sistemas com recursos escassos. Já LM forneceu, na maioria dos casos, os melhores resultados em termos de precisão, mas foi o que apresentou o maior esforço computacional.

Com o objetivo de aumentar a eficiência computacional para obtenção da THD, F. A. Nascimento et. al[13] propõe o uso da DHT. Este trabalho expõe os equacionamentos necessários para se utilizar a DHT e a DFT para o cálculo de distorções harmônicas, além de comparar as duas transformadas, ele também mostra que computacionalmente a DHT é mais vantajosa em detrimento a DFT.

O uso de LSH como forma de se caracterizar harmônicas é levada em consideração

em P. M. Ramos et. al[26], no qual, obtêm-se 3 algoritmos diferentes e os compara com os resultados encontrados para DFT. Os dois primeiros algoritmos utilizam *four-parameter sine-fitting* sendo que para o resíduo do primeiro utiliza *three-parameter sine-fitting* (sem a componente DC) para se obter as harmônicas pares e o segundo utiliza *non-iterative multi-harmonic fitting* para seus resíduos, este obtém os parâmetros de todas componentes harmônicas, o que reduz o esforço computacional, sua desvantagem é o acúmulo de erro nas componentes harmônicas sucessivas. O terceiro usa *iterative multi-harmonic fitting*, dentre os três ele possui uma maior precisão, mas o esforço computacional e o uso de memória é maior que os demais. Ao comparar estes algoritmos com a DFT P. M. Ramos et. al[26] consegue observar que a acurácia dos algoritmos são próximos da DFT de referência.

Quando se extrapola o que tange a QEE, B. C. Musolino[5] em seu trabalho de mestrado utiliza LM e a DFT para se estudar o amortecimento das ressonâncias de um material como forma de se avaliar os danos em concretos refratários através da análise espectral de tempo-frequência. A DFT, para determinação do espectro de potência de um sinal discreto, parte do pressuposto de que a composição do sinal será sempre a mesma, ou seja, as mesmas frequências e ruídos que compõem uma parte do sinal se encontrará presente uniformemente ao longo do sinal, por isso foi definido a STFT (*Short-Time Fourier Transform*), no qual, sua equação apresenta uma DFT deslocada. LM se comportará lentamente ao propor uma solução inicial longe da solução real, caso contrario, se comportará conforme o método de Gauss-Newton.

No intuito de estimar as componentes harmônicas em medições de erros radiais em eixos mecânicos em pequena escala, D. S. Ashok et. al[10], compara LSH com a DFT. Quando ocorre o efeito *leakage*, as amplitudes obtidas pela DFT serão menores que as amplitudes de LSH, diminuindo assim a acurácia em seus valores. LSH se destaca quando a análise é feita para sinais de curta duração com rotações incompletas do eixo em análise.

Com a análise de métodos de caracterização de harmônicas já bem difundida na literatura com as várias vertentes dos métodos de Fourier pela QEE, observa-se do estado da arte que a caracterização por outros métodos é pouco considerada. Além disso, existe a superficialidade quando se comparam os métodos.

3 - MÉTODOS E METODOLOGIAS

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo visa apresentar os procedimentos e materiais necessários para a análise do desempenho dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH quanto à caracterização da distorção harmônica. Para tanto, a análise é separada em quatro etapas: avaliação da influência de cada parâmetro; avaliação da influência de todos os parâmetros; avaliação comparativa entre os métodos; e avaliação comparativa do tempo computacional. Sendo todas as avaliações simuladas no programa MATLAB®.

Inicia-se o capítulo com a apresentação do sinal de referência.

3.2 SINAL DE REFERÊNCIA

O sinal de referência utilizado corresponde a uma onda complexa, formada por uma senoide com frequência, f_1 , somada com outras senoides cujas frequências são múltiplas inteiras de f_1 .

De forma geral, as harmônicas ímpares são encontradas nas instalações elétricas e as pares existem em casos de assimetria do sinal devido à presença de componente contínua [27]. O sinal considerado para análise tem apenas componentes ímpares como demonstrado na equação 3.1

$$x(t) = h_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) + h_3 \cdot \sin(3 \cdot \omega \cdot t) + h_5 \cdot \sin(5 \cdot \omega \cdot t) + \dots + h_{51} \cdot \sin(51 \cdot \omega \cdot t) \quad (3.1)$$

onde $\omega = 2\pi \cdot f_1$ e h_n representa a n-ésima ordem harmônica ímpar. Como os métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH devem ser capazes de caracterizar as harmônicas pelo menos até a 50ª ordem, de acordo com a NBR IEC 61000-4-30 (2008) [2], o sinal considerado possui ordem até 51ª ordem. Para a aplicação nas simulações, esse sinal analógico deve ser transformado em um sinal de tempo discreto. Para tal, é utilizado um amostrador que converte o sinal de tempo contínuo $x(t)$ em uma sequência de tempo discreto $x(n)$, extraindo os valores presentes em $x(t)$ em instantes que são múltiplos inteiros do período de amostragem T_s , equação 3.2 [23].

$$x(n) = x(nT_s)$$

$$x(n) = h_1 \cdot \sin\left(\frac{\omega}{f_s} \cdot n\right) + h_3 \cdot \sin\left(3 \cdot \frac{\omega}{f_s} \cdot n\right) + h_5 \cdot \sin\left(5 \cdot \frac{\omega}{f_s} \cdot n\right) + \dots + h_{51} \cdot \sin\left(51 \cdot \frac{\omega}{f_s} \cdot n\right) \quad (3.2)$$

sendo $f_s = \frac{1}{T_s}$ a frequência de amostragem em amostras por segundo. O tamanho da amostra pode ser definida com $n = 1, 2, 3, \dots, N$ onde o valor de N pode ser obtido pela função 3.3

$$N = \frac{f_s}{60} \cdot (n^\circ \text{ de ciclos}) = T_{amostragem} \cdot (n^\circ \text{ de ciclos}), \quad (3.3)$$

com $T_{amostragem}$ correspondendo a taxa de amostragem em amostras/ciclo, o $n^\circ \text{ de ciclos}$ equivale a duração da janela para a frequência nominal, e 60 Hz representa o valor nominal da frequência da rede. Com isso, o sinal é controlado por meio da frequência, da duração e da taxa de amostragem, além das componentes h_n .

3.2.1 Cálculo das componentes h_n

As componentes h_n representam o valor eficaz das harmônicas de ordem 1, 3, 5, ..., 51 do sinal. Variar seus valores corresponde a variar a THD do sinal. Como o objetivo é caracterizar a THD do sinal para que se possa fazer a análise dos métodos, a equação 2.1 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$THD^2 = h_3^2 + h_5^2 + \dots + h_{51}^2 \quad (3.4)$$

onde h_n está representado em (p.u) e $h_1 = 1$ p.u. Considerando que cada componente harmônica deve apresentar valor superior a 0 e inferior ao dobro do valor de referência do PRODIST (Tabela 2.3) para tensões de rede $V_n \leq 1kV$, tem-se:

$$0 < h_n < 2 \cdot h_{ref}$$

onde h_{ref} corresponde ao valor de referência para a respectiva h_n . Por exemplo, para $n=3$:

$$0 < h_3 < 2 \cdot 6, 5p.u$$

Com base na equação 3.4 e nos limites impostos a h_n , utiliza-se um algoritmo que reduz ou incrementa de forma aleatória cada componente harmônica h_n . Assim, quando as componentes estimadas $he_3^2 + he_5^2 + \dots + he_{51}^2$ resultam em um valor próximo da THD^2 desejada, com erro máximo de 10^{-5} , o algoritmo finaliza suas iterações.

Verifica-se da Tabela 2.2 do PRODIST [4], apresentada no capítulo anterior, que para o valor nominal do barramento das distorções harmônicas globais $V_n \leq 1kV$ a THD máxima aceita é de 10%. Com isso é definido o cálculo de 4 THDs de referência

para o sinal, sendo 2 inferiores e 2 superiores a 10%. As inferiores são iguais a 1% e 7%, e as superiores são iguais a 11% e 19%.

A Tabela 3.1 apresenta os valores das componentes harmônicas para as THDs de 1%, 7%, 11% e 19%.

Tabela 3.1: Valores das componentes harmônicas para as THDs de 1%, 7%, 11% e 19%

Componente harmônica	THD			
	1%	7%	11%	19%
he_3	0,00755	0,06488	0,06475	0,09721
he_5	0,00611	0,00939	0,06333	0,08955
he_7	0,00013	0,00900	0,02422	0,09715
he_9	0,00017	0,00467	0,01462	0,01672
he_{11}	0,00019	0,00176	0,02013	0,05527
he_{13}	0,00023	0,00945	0,03925	0,04679
he_{15}	0,00029	0,00906	0,00270	0,00682
he_{17}	0,00031	0,00443	0,01476	0,02233
he_{19}	0,00037	0,00416	0,00838	0,00326
he_{21}	0,00041	0,00288	0,00457	0,00530
he_{23}	0,00043	0,00829	0,01777	0,02621
he_{25}	0,00047	0,00962	0,00148	0,02125
he_{27}	0,00053	0,00649	0,00342	0,00379
he_{29}	0,00059	0,00353	0,00161	0,00511
he_{31}	0,00061	0,00191	0,00421	0,02005
he_{33}	0,00067	0,00153	0,00869	0,00977
he_{35}	0,00071	0,00232	0,00838	0,01239
he_{37}	0,00073	0,00144	0,01059	0,01965
he_{39}	0,00079	0,00034	0,00535	0,01156
he_{41}	0,00083	0,00367	0,00865	0,01213
he_{43}	0,00089	0,00256	0,00086	0,01695
he_{45}	0,00002	0,00275	0,00530	0,01376
he_{47}	0,00003	0,00376	0,00067	0,00323
he_{49}	0,00005	0,00262	0,00761	0,00998
he_{51}	0,00007	0,00145	0,00600	0,00142

Substituindo os valores de he_n na equação 3.2, e assumindo, de acordo com a NBR IEC 61000-4-30 (2008) [2], frequência fundamental de 60 Hz, duração da janela de 12 ciclos e taxa de amostragem igual a 128 amostras/ciclo, aplica-se a FFT. Os seus resultados para as THDs de 1%, 7%, 11% e 19%, correspondem aos valores das THDs

de referência, $THD_{referência}$.

3.3 CÁLCULO DA THD DOS MÉTODOS

Segundo a IEC 61000-4-7 [3], apresentada na seção 2.3.3, o cálculo da THD é dado pela equação 3.5

$$THD = \sqrt{\sum_{k=2}^K \left(\frac{h_k}{h_1}\right)^2}, \quad (3.5)$$

onde h_k corresponde a k -ésima componente espectral múltipla inteira da fundamental. Com base nesta definição, para se calcular a THD dos métodos AG, DFT e DHT, após serem simulados e obtidas suas componentes espectrais, deve-se primeiramente aplicar o módulo nas k -ésimas ordens harmônicas, $|X_k|$ para AG e DFT e $|H_k|$ para DHT, afim de obter o valor absoluto das magnitudes.

Sabe-se que a componente espectral representa a magnitude de uma dada frequência, conhecida também como raia espectral. Com isso, o espaçamento entre as frequências, Δf , pode ser determinado pela equação 3.6.

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} = \frac{T_{amostragem} \cdot 60}{T_{amostragem} \cdot (n^\circ \text{ de ciclos})} = \frac{60}{n^\circ \text{ de ciclos}} \quad (3.6)$$

Com base no espaçamento entre as raias, são encontradas as componentes harmônicas desejadas. Tomando-se como exemplo as componentes espectrais $|X_k|$, as ordens harmônicas são obtidas da seguinte forma:

$$X_{2 \cdot k - 1} = X\left(\frac{(2 \cdot k - 1) \cdot f_1}{\Delta f}\right) = X\left(\frac{(2 \cdot k - 1) \cdot f_1 \cdot (n^\circ \text{ de ciclos})}{60}\right)$$

para $k = 1, 2, 3, \dots, \frac{N+1}{2}$ onde o valor de $\left(\frac{(2 \cdot k - 1) \cdot f_1}{\Delta f}\right)$ é um número real que sempre será arredondado a um número inteiro. Logo a $THD_{AG/DFT\%}$ pode ser encontrada pela equação 3.7

$$THD_{AG/DFT\%} = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{26} X\left((2 \cdot k - 1) \cdot \frac{f_1}{\Delta f}\right)^2}{X\left(\frac{f_1}{\Delta f}\right)^2}} \cdot 100\% \quad (3.7)$$

Utilizando o mesmo princípio adotado para $|X_k|$, obtém-se a equação 3.8 da $THD\%$ para as componentes espectrais do método de Hartley.

$$THD_{DHT\%} = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{26} H \left((2 \cdot k - 1) \cdot \frac{f_1}{\Delta f} \right)^2}{H \left(\frac{f_1}{\Delta f} \right)^2}} \cdot 100\% \quad (3.8)$$

Para o método LSH, o cálculo da THD_{LSH} será dada pela equação 2.33.

Antes de demonstrar a forma de cálculo da THD do método LM serão estimados os seus parâmetros iniciais.

3.3.1 Parâmetros do método LM

O método LM depende de uma estimativa inicial dos parâmetros f_{no} , α_k e β_k para sua primeira iteração. Caso essa estimativa esteja longe da solução real, sua convergência é lenta, porém garantida. Para f_{no} , é considerado o valor da frequência nominal da rede 60 Hz. Já os valores de α_k e β_k são obtidos da equação 3.9

$$h_k \approx \sqrt{\alpha_k^2 + \beta_k^2} \quad (3.9)$$

onde h_k corresponde a k-ésima ordem harmônica do nível de referência do PRODIST (Tabela 2.3) para tensão nominal $V_n \leq 1kV$. A solução da equação 3.9 é possível quando se estima, α_k ou β_k .

A Tabela 3.2 apresenta os valores de α_k e β_k utilizados como parâmetros iniciais do método. Após as iterações de LM serem finalizadas para uma dada simulação, o cálculo da sua THD_{LM} é dada pela equação 2.29.

3.4 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE CADA PARÂMETRO

A avaliação da influência de cada parâmetro para a caracterização da THD, consiste na identificação dos erros da THD de cada método em relação a variação em separado, de cada uma das seguintes grandezas do sinal analisado:

- Duração;
- Frequência e;
- Taxa de amostragem do sinal.

A THD também é um parâmetro do sinal, porém, ela é utilizada como variável de controle, pois é a partir dela que é calculado o erro dos métodos. O erro de cada uma das quatro THDs de referência é calculado pela equação 3.10

$$erro_{THD}(\%) = \frac{THD_{medido} - THD_{referência}}{THD_{referência}} \cdot 100 \quad (3.10)$$

onde THD_{medido} é o valor da THD encontrado na aplicação de um dado método.

Tabela 3.2: Valores das componentes α_k e β_k

	k	α_k	β_k	$\sqrt{\alpha_k^2 + \beta_k^2}$
Fundamental	1	0,091	0,996	1,000
Ímpares não múltiplos de 3	5	0,011	0,074	0,075
	7	0,065	0,005	0,065
	11	0,023	0,039	0,045
	13	0,008	0,039	0,040
	17	0,001	0,025	0,025
	19	0,020	0,003	0,020
	23	0,003	0,020	0,020
	25	0,020	0,002	0,020
	>25	0,008	0,013	0,015
Ímpares múltiplos de 3	3	0,022	0,061	0,065
	9	0,001	0,020	0,020
	15	0,001	0,010	0,010
	21	0,003	0,009	0,010
	>21	0,010	0,001	0,010
Pares	2	0,011	0,021	0,024
	4	0,015	0,003	0,015
	6	0,001	0,010	0,010
	8	0,001	0,010	0,010
	10	0,001	0,010	0,010
	12	0,003	0,009	0,010
	>12	0,003	0,009	0,010

A simulação dessa avaliação consiste em fixar dois dos parâmetros descritos acima, e variar aquele de interesse de forma a obter o erro para cada método. Em seguida, outro parâmetro é variado, e assim sucessivamente, até que todos os parâmetros tenham sido empregados.

A Tabela 3.3 apresenta os valores atribuídos aos parâmetros quando estes devem variar ou permanecer fixos.

Para exemplificar o procedimento adotado, toma-se por base a Tabela 3.3. Na análise da influência da duração, fixa-se todos os parâmetros nos valores exibidos na segunda coluna da tabela, com exceção da duração. Para ela, emprega-se os valores

da terceira coluna para a variação do parâmetro. Esse processo é repetido para os demais. Quando todos os parâmetros forem analisados para uma dada THD, muda-se a $THD_{referência}$ do sinal, e repete-se todo o procedimento até que os parâmetros em avaliação tenham sido simulados para as THDs de referência de 1%, 7%, 11% e 19%.

Tabela 3.3: Valores dos parâmetro para a simulação 1

Parâmetro	Valor fixo	Variação	Total
Duração (ciclos)	12	1, 2, 3, ..., 16	16
Frequência (Hz)	60	59,2, 59,4, 59,6, ..., 60,8	9
Taxa de amostragem (amostras/ciclo)	128	128, 144, 160, ..., 512	25

Complementando a avaliação da influência de cada parâmetro, soma-se a essa simulação dois casos particulares. O primeiro é a análise do truncamento do sinal. O segundo é a avaliação da influência da sub-amostragem no sinal.

3.4.1 Avaliação do truncamento do sinal

Esse fenômeno ocorre quando o janelamento amostral não possui números inteiros de ciclos. A norma (NBR IEC 61000-4-30) [2] estabelece 12 ciclos de duração para a frequência nominal de 60 Hz. Logo, o espectro estabelecido pela norma apresenta $\Delta f = 5$ Hz. Com isso, além das componentes múltiplas inteiras da frequência, será possível obter as não múltiplas da frequência fundamental. Para efeito de análise, serão realizados sinais de até 3 ciclos para as simulações seguintes.

O procedimento adotado nessa simulação consiste em fixar os parâmetros frequência e taxa de amostragem, variando apenas a duração de 0,1 a 2,5 ciclos de forma a obter o erro para cada método.

A Tabela 3.4 apresenta os valores fixos atribuídos aos parâmetros taxa de amostragem e frequência quando a duração variar.

Tabela 3.4: Valores dos parâmetro para o truncamento do sinal

Parâmetro	Valor fixo	Variação	Total
Duração (ciclos)		0,1, 0,2, 0,3, ..., 2,5	25
Frequência (Hz)	60		1
Taxa de amostragem (amostras/ciclo)	128		1

Assim como na avaliação da influência de cada parâmetro, após todos os valores do parâmetro duração serem analisados para uma dada THD, muda-se a $THD_{referência}$ do sinal, e repete todo o procedimento até que o parâmetro em avaliação tenha sido simulado para as THDs de referência de 1%, 7%, 11% e 19%.

3.4.2 Avaliação da influência da sub-amostragem no sinal

A avaliação da influência da sub-amostragem no sinal está correlacionada a possibilidade de ocorrer problemas no conversor A/D, de forma que o amostrador não discretize o sinal com número mínimo de amostras por ciclo. Dessa forma, o sinal discretizado não segue o teorema de Nyquist, que estabelece a frequência mínima de amostragem que deve ser igual a $f_N = 2 \cdot 51 \cdot f_1$ para o sinal, o que equivale a uma taxa de 102 amostras/ciclo para a frequência de 60 Hz.

O procedimento adotado nessa simulação consiste em fixar os parâmetros frequência e duração, variando apenas a taxa de amostragem de 32 a 128 amostras/ciclo, de forma a obter o erro para cada método.

A Tabela 3.5 apresenta valores fixos atribuídos aos parâmetros duração e frequência quando a taxa de amostragem variar.

Tabela 3.5: Valores dos parâmetro para a sub-amostragem

Parâmetro	Valor fixo	Variação	Total
Duração (ciclos)	1		1
Frequência (Hz)	60		1
Taxa de amostragem (amostras/ciclo)		32, 36, 40, ..., 128	25

Semelhante a simulação do truncamento do sinal, após simular os valores da taxa de amostragem para uma dada THD, substitui-se a THD do sinal de referência e todo o procedimento é realizado novamente até que o parâmetro em avaliação tenha sido simulado para as THDs de referência de 1%, 7%, 11% e 19%.

3.5 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE TODOS OS PARÂMETROS

A avaliação da influência de todos os parâmetros para a caracterização da THD consiste na identificação dos erros da THD quando os parâmetros duração, frequência e taxa de amostragem são variados simultaneamente.

Assim, a simulação consiste em ensaiar todos os parâmetros, conjuntamente, gerando um banco de sinais formados pela combinação de todas as suas variações. A partir desse banco, obtém-se a caracterização das THDs para cada método. Em seguida, são calculados os erros pela equação 3.10 para cada método e $THD_{referência}$.

Serão considerados dois grupos para as simulações. O primeiro grupo compreende em variar todos os parâmetros sem restrição ao parâmetro duração dos ciclos, ou seja, os ciclos são números inteiros e não inteiros. O segundo grupo equivale a simular todos

os parâmetros restringindo o parâmetro duração, para esse caso, os ciclos são apenas números inteiros.

3.5.1 Simulações dos parâmetros sem restrição do parâmetro duração

A Tabela 3.6 apresenta os valores atribuídos para cada parâmetro duração, frequência e taxa de amostragem, quando esses variam.

Tabela 3.6: Valores dos parâmetro dos sinais sem restrição da duração

Parâmetro	Variação	Total
Duração (ciclos)	0,6, 0,8, ..., 3	13
Frequência (Hz)	59,4, 59,6, ..., 60,6	7
Taxa de amostragem (amostras/ciclo)	110, 118, ..., 294	25
Total de sinais gerados para cada THD		2.275

A composição de todas as combinações dos parâmetros gera um total de 2.275 sinais para cada $THD_{referência}$. Estes sinais são aplicados para cada método caracterizando assim as respectivas THDs. Por fim, obtém-se os erros calculados pela equação 3.10 formando um banco de dados com os erros de cada método para cada $THD_{referência}$.

Para examinar a influência dos parâmetros, é feito o cálculo do erro médio quadrático RMSE (*Root Mean Square Error*) de todas as amostras referentes àquele valor do parâmetro que se deseja visualizar, gerando-se gráficos da variação de cada parâmetro.

A equação 3.11 é utilizada no cálculo do RMSE

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (Error_n)^2}{N}} \quad (3.11)$$

onde N equivale a quantidade de amostras que possuem em comum o valor do parâmetro do sinal que se deseja visualizar e mesma $THD_{referência}$. O $Error_n$, calculado pela equação 3.10, representa o n-ésimo erro dessa amostra.

Para entender melhor a forma como serão montados os gráficos, tome como exemplo uma duração que tenha 13 valores. Inicialmente, fixa-se este parâmetro em 0,6 ciclos. Dessa forma, combinando os parâmetros taxa de amostragem e frequência com todas as formas possíveis, são gerados 175 sinais para cada $THD_{referência}$, cujo o valor da duração corresponde a 0,6 ciclos. Realiza-se o cálculo do RMSE e tem-se o primeiro ponto do gráfico de erro para a duração. Para o segundo ponto desse gráfico, fixa-se a duração em 0,8 ciclos. Combinam-se os parâmetros taxa de amostragem e frequência com todas as formas possíveis. Efetua-se o cálculo do RMSE e tem-se o segundo ponto

do gráfico. Assim é feito até o último valor deste parâmetro. Da mesma forma, são criados os gráfico dos erros para os parâmetros frequência e taxa de amostragem.

3.5.2 Simulações dos parâmetros com restrição do parâmetro duração

A Tabela 3.7 apresenta os valores atribuídos para cada parâmetro, duração, frequência e taxa de amostragem, quando estes variam. O parâmetro duração é restrito, tendo somente valores inteiros de ciclos.

Tabela 3.7: Valores dos parâmetro dos sinais com restrição da duração

Parâmetro	Variação	Total
Duração (ciclos)	1, 2, 3	3
Frequência (Hz)	59,4, 59,6, ..., 60,6	7
Taxa de amostragem (amostras/ciclo)	110, 118, ..., 294	25
Total de sinais gerados para cada THD		525

Para cada $THD_{referência}$, a simulação gera um total de 525 sinais, resultado das composições de todas as combinações passíveis dos parâmetros. A análise da influência dos parâmetros é a mesma utilizada nas simulações em 3.5.1.

3.6 AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS

A avaliação comparativa entre os métodos consiste em confrontar os métodos de uma forma geral. Com base no banco de sinais gerados pela Tabela 3.6, é calculado o erro absoluto, equação 3.12, dos métodos AG, DFT, DHT, LSH e LM, para todos os sinais em relação a uma dada $THD_{referencia}$. Assim é formado um banco de dados para cada método com 2.275 erros em relação a uma $THD_{referência}$.

$$ER_{método}(n) = \frac{|THD_{método}(n) - THD_{referência}|}{THD_{referência}} \cdot 100 \quad (3.12)$$

onde n representa o n-ésimo sinal.

Os métodos podem ser comparados, de forma geral, utilizando-se o teste de Tukey ou teste-t. Para utilizar o teste de Tukey, deve-se antes validar estatisticamente os dados dos erros obtidos na simulação, e para isso, se utiliza a Análise de Variância (ANOVA). Porém, para aplicar essa análise, deve ser garantido que os dados tenham distribuição normal dentro de uma população, e que a variância das populações sejam

iguais. População corresponde ao conjunto de erros para um método e para uma dada THD, sendo assim, 2.275 valores.

Essa avaliação comparativa será separada em dois grupos. O primeiro compreende em utilizar todos os sinais. O segundo considera que o parâmetro duração tenha apenas componentes inteiras, gerando nesse caso 525 valores para cada método e para cada $THD_{referência}$.

Como as populações são relativamente grandes, a normalidade dos dados pode ser garantida pelo Teorema do Limite Central[29]

Teorema 1 *Quando o tamanho da amostra aumenta, a distribuição amostral da sua média aproxima-se cada vez mais de uma distribuição normal.*

Para garantir que as amostras tenham as mesmas variações, é aplicado o teste de variância Chi-quadrado.

3.6.1 Teste Chi-quadrado

O teste Chi-quadrado (X^2) [11] trabalha com duas hipóteses:

- H_0 : As variâncias observadas não são diferentes das variâncias esperadas;
- H_1 : As variâncias observadas são diferentes das variâncias esperadas.

Para se calcular X^2 é necessário obter duas estatísticas denominadas $X^2_{calculado}$ e $X^2_{tabelado}$.

O $X^2_{calculado}$ para uma dada THD, é obtido pela equação 3.13.

$$X^2_{calculado} = \sum_{n=1}^N (ER_{AG}(n) + ER_{DFT}(n) + ER_{DHT}(n) + ER_{LSH}(n) + ER_{LM}(n)) \quad (3.13)$$

O valor $X^2_{tabelado}$ é obtido da tabela X^2 a partir do seu grau de liberdade, $g.l$, e do intervalo de confiança, γ . O intervalo de confiança utilizado é igual a $\gamma = 0,995$ e $g.l$ é dado pela equação 3.14

$$g.l = (N_{métodos} - 1) \cdot (N_{erros} - 1) \quad (3.14)$$

onde N_{erros} é o número de amostras de um dado método e $N_{métodos}$ é o número de métodos, no caso igual a cinco. O valor de $X^2_{tabelado}$ é igual para todas as THDs de referência. A tomada de decisão é feita comparando os dois valores de X^2 , onde:

- Se $X^2_{calculado} \geq X^2_{tabelado}$: Rejeita-se H_0

- Se $X^2_{calculado} < X^2_{tabelado}$: Aceita \mathbf{H}_0

Se as variâncias das populações observadas não são diferentes, a ANOVA pode ser aplicada.

3.6.2 Teste ANOVA

Para a análise do teste ANOVA [8], define-se para uma dada THD:

- $g = 5$ (cada método é considerado como um grupo. Sendo assim, há cinco grupos para análise)
- $N = \sum_{i=1}^g ni$ (número de amostras de cada grupo)
- $\bar{X}_i = \frac{1}{ni} \sum_{j=1}^{ni} X_{ij}$ (média das observações de um determinado grupo)
- $\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^g \sum_{j=1}^{ni} X_{ij}$ (média de todas as amostras de todos os grupos)

Com os valores acima definidos, é feito o cálculo da variabilidade total dos erros, SST, variabilidade das observações entre grupos, SSE, e da variabilidade dos erros dentro dos grupos, SSD, pela equação 3.15.

$$\underbrace{\sum_{i=1}^g \sum_{j=1}^{ni} (X_{ij} - \bar{X})^2}_{SST} = \underbrace{\sum_{i=1}^g ni(\bar{X}_i - \bar{X})^2}_{SSE} + \underbrace{\sum_{i=1}^g \sum_{j=1}^{ni} (X_{ij} - \bar{X}_i)^2}_{SSD} \quad (3.15)$$

Em seguida, é definido o valor da média da soma dos quadrados entre os métodos, MS_E , equação 3.16, e a média da soma dos quadrados dentro dos métodos, MS_D , equação 3.17.

$$MS_E = \frac{SSE}{g - 1} \quad (3.16)$$

$$MS_D = \frac{SSD}{N - g} \quad (3.17)$$

Os valores de MS_E e MS_D servem para estimar as hipóteses do teste fundamental da ANOVA. Essas hipóteses são especificadas da seguinte forma:

- $\mathbf{H}_{ANOVA-0}$: $m_{AG} = m_{DFT} = m_{DHT} = m_{LSH} = m_{LM} = m$, ou seja, as médias são iguais;
- $\mathbf{H}_{ANOVA-1}$: os valores dos m_g não são todos iguais.

A ideia base para testar essas hipóteses é estimar por dois métodos diferentes, um que não dependa da veracidade de $\mathbf{H}_{ANOVA-0}$, sendo ele o MS_D , e outra que dependa da veracidade de $\mathbf{H}_{ANOVA-0}$, sendo para esse o MS_E . Se $\mathbf{H}_{ANOVA-0}$ é verdadeira, então as duas estimativas devem ser próximas. Caso contrário, eles devem diferir significativamente. Assim definiu-se $F = \frac{MS_E}{MS_D}$. Se esse valor for próximo de p-valor, a hipótese $\mathbf{H}_{ANOVA-0}$ é verdadeira.

O p-valor, que é tabelado, corresponde ao valor da distribuição Fisher com $g - 1$ e $N - g$ graus de liberdade no intervalo de confiança $\gamma = 95\%$.

A Tabela 3.8 apresenta um modelo possível para os resultados ANOVA de uma dada THD.

Tabela 3.8: Quadro modelo da Anova para uma dada THD.

Fonte	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	$F = \frac{MS_E}{MS_D}$	p-valores
Entre grupos	SSE	$g - 1$	MS_E	F	tabelado
Erro	SSD	$n - 1$	MS_D		
Total	SST	$g \cdot n - 1$			

Se a hipótese $\mathbf{H}_{ANOVA-0}$ for rejeitada, o teste de Tukey pode ser aplicado, pois os valores das médias não serão todos iguais, existindo uma diferença significativa entre os métodos.

3.6.3 Teste de Tukey

Para aplicar o teste de Tukey [9], deve-se calcular o desvio padrão das médias utilizando-se a equação 3.18

$$\Delta = q \cdot \sqrt{\frac{MS_D}{n}} \quad (3.18)$$

em seguida, calcula-se o limite de decisão como sendo $L_d = 3 \cdot \Delta$.

Dessa forma, escrevem-se as médias dos grupos de forma a compará-las uma a uma. Se a diferença entre dois métodos for inferior a L_d , caracteriza-se que as médias não apresentam diferenças significativas, dessa forma não é possível estimar qual o melhor método dentre eles.

3.7 AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO TEMPO COMPUTACIONAL

A avaliação do tempo computacional consiste na aquisição do tempo necessário para se realizar uma determinada rotina, que neste trabalho será o tempo gasto pelo método para caracterizar a THD de um determinado sinal. Presume-se que este tempo esteja ligado ao esforço computacional, ou seja, quanto maior o tempo, maior o esforço. Porém, essa avaliação só é válida em critério comparativo, pois o tempo de processamento é relativo, ou seja, depende de critérios externos como processador utilizado, sistema operacional, forma de programação, etc.

Para essa avaliação, foram assumidos os 2.275 sinais gerados para cada THD pela Tabela 3.6. Esses sinais são aplicados a cada método, com os quais se obtém o tempo utilizado para caracterizar uma dada THD. Para diminuir os efeitos dos agentes externos, todos os métodos são processados utilizando a mesma máquina. A partir desse banco de tempos para cada $THD_{referencia}$ e para cada método, é calculado o tempo mínimo, máximo, médio e o desvio padrão amostral.

A média dos tempos $\bar{t}_{método}$ é obtida pela Equação 3.19

$$\bar{t}_{método} = \frac{1}{2.275} \sum_{i=1}^{2.275} t_{método}(i) \quad (3.19)$$

onde $t_{método}(i)$ representa o tempo que o método utilizou para caracterizar a THD do i -ésimo sinal. O desvio padrão amostral, ou simplesmente desvio padrão, DP, pode ser encontrado para cada método pela Equação 3.20

$$DP = \sqrt{\frac{1}{2.275 - 1} \sum_{i=1}^{2.275} (t_{método}(i) - \bar{t}_{método})^2} \quad (3.20)$$

Dessa forma, comparam-se os métodos quanto ao tempo mínimo, máximo e média. O desvio padrão é utilizado para averiguar se os tempos adquiridos estão próximos ou afastados da média.

4 - RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo, serão apresentados os principais resultados das simulações computacionais com vistas à classificação dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH quanto à precisão na caracterização das THDs. Além disso, procura-se identificar como os parâmetros duração dos ciclos, taxa de amostragem, THD e frequência influenciam os métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH em sua caracterização.

4.2 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE CADA PARÂMETRO

Nesta seção, serão apresentados os resultados da avaliação da influência dos parâmetros duração dos ciclos, taxa de amostragem, frequência e THD, na caracterização dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH.

4.2.1 Simulação do parâmetro duração

Essa primeira simulação compreende em manter os parâmetros frequência e taxa de amostragem fixos variando apenas a duração dos ciclos em uma faixa de 1 a 16 ciclos.

As Figuras 4.1 a 4.4 apresentam os gráficos dos erros em função do número de ciclos, quando as THDs são iguais a 1%, 7%, 11% e 19%, respectivamente. Os parâmetros frequência e taxa de amostragem estão fixos em 60 Hz e 128 amostras/ciclo, nessa ordem.

Da Figura 4.1, observa-se que o erro do AG inicia-se negativo em -2%. Este comportamento sempre será observado quando o método apresentar resultado com magnitude superior ao valor esperado. Para AG entre 2 e 3 ciclos, a imprecisão fica próxima a 2,5%, alcançando seu valor máximo. Após 3 ciclos, o valor desse erro tende a decrescer quando se aumenta a duração dos ciclos. Para a Figura 4.2, a inexatidão do AG em 1 ciclo de duração fica próximo de 3% decaindo com o aumento da duração dos ciclos.

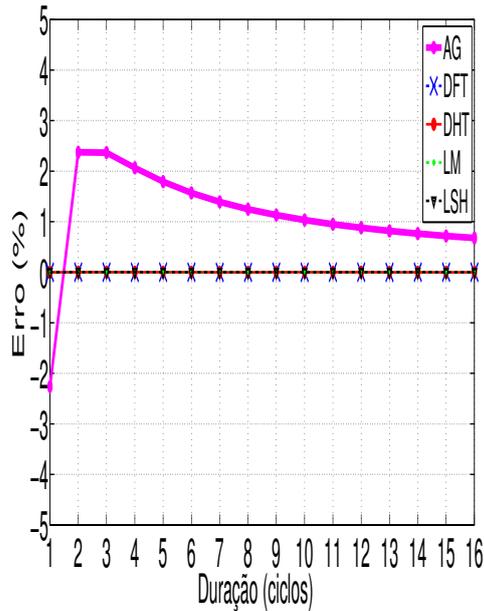


Figura 4.1: Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da duração. THD fixa em 1%

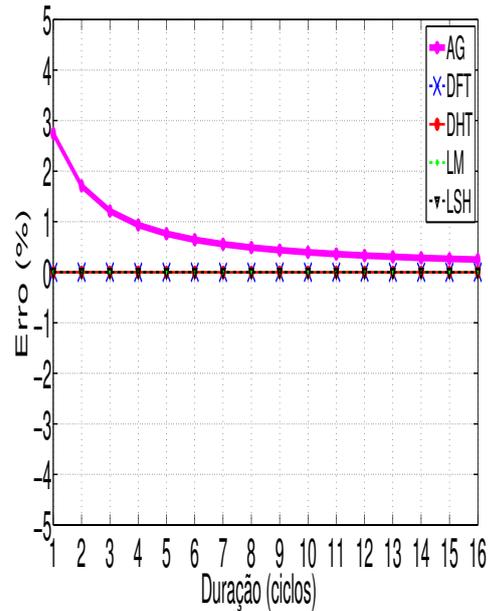


Figura 4.2: Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da duração. THD fixa em 7%

Para as Figuras 4.1 e 4.2, os métodos DFT, DHT, LM e LSH não apresentam erro.

Das Figuras 4.3 e 4.4, nota-se que o erro do método AG para 1 ciclo de duração tem magnitude máxima de 4% e 4,5%, respectivamente. Em 16 ciclos de duração, o erro tende a 0,5%, alcançando seu valor mínimo para essas duas figuras.

Da análise das Figuras 4.1 a 4.4, observa-se que a imprecisão para DFT, DHT, LM e LSH é praticamente nula, e os erros para AG decrescem com o aumento da duração dos ciclos. AG apresenta inexatidão máxima de 4,5%, conforme observado na Figura 4.4 para a THD de 19%.

Para o método AG, quanto maior o tamanho da amostra do sinal, melhores serão as estimativas das componentes harmônicas, fato que pode ser observado das Figuras 4.1 a 4.4. Nessas figuras, quanto maior for a duração da janela menor será a magnitude do erro da THD para AG. Essa característica não é restrita ao AG. Ela está presente nos outros métodos, porém, em menor escala.

Pode-se perceber que o erro percentil é pequeno para todos os métodos. Para o AG, DFT e DHT, que utilizam análise espectral, seria suficiente a utilização de uma janela amostral com duração de um ciclo, pois o seu espectro possui apenas componentes múltiplas inteiras da frequência fundamental. Em relação aos métodos LM e LSH, a duração de um ciclo também é suficiente para se obter bons resultados, por se tratar de métodos que se ajustam com a forma de onda do sinal analisado.

Existe ainda a possibilidade do janelamento amostral não possuir número inteiro

de ciclos. Esta hipótese será investigada na próxima seção.

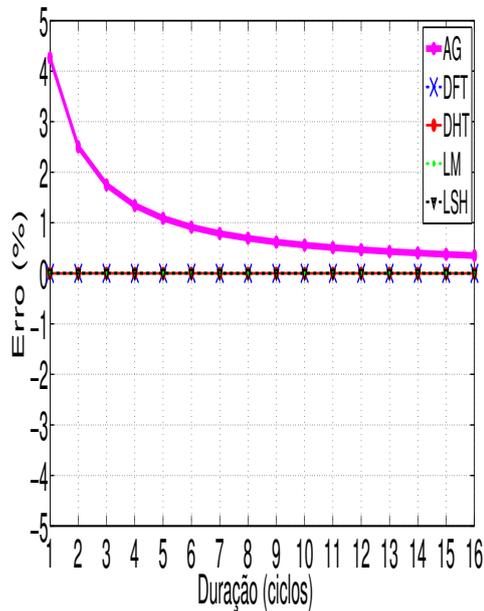


Figura 4.3: Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da duração. THD fixa em 11%

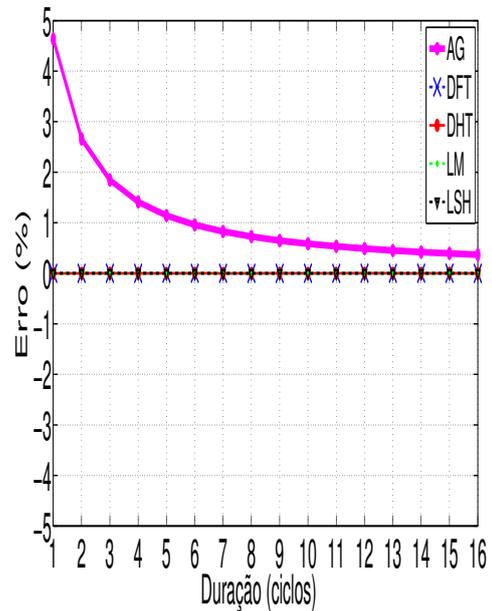


Figura 4.4: Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da duração. THD fixa em 19%

4.2.1.1 Análise do truncamento do sinal

Aqui será levantado o que ocorre em cada método quando o janelamento amostral não possui número inteiro de ciclos. Essa simulação consiste em manter os parâmetros frequência e taxa de amostragem fixos variando apenas a duração dos ciclos em uma faixa entre 1 e 2,5 ciclos.

As Figuras 4.5 a 4.8 apresentam os gráficos dos erros em função do número de ciclos, quando as THDs são iguais a 1%, 7%, 11% e 19%, nessa ordem. Os parâmetros frequência e taxa de amostragem estão fixos em 60 Hz e 128 amostras/ciclo, respectivamente.

Observa-se da Figura 4.5, para ciclos não inteiros, que o método LM apresenta erro percentil nulo para a faixa entre 0,5 a 2,5 ciclos. Os métodos AG, DFT, DHT e LSH convergem a erro nulo para as durações de 1 e 2 ciclos. Para os demais valores, esses métodos apresentam erros superiores a -100%.

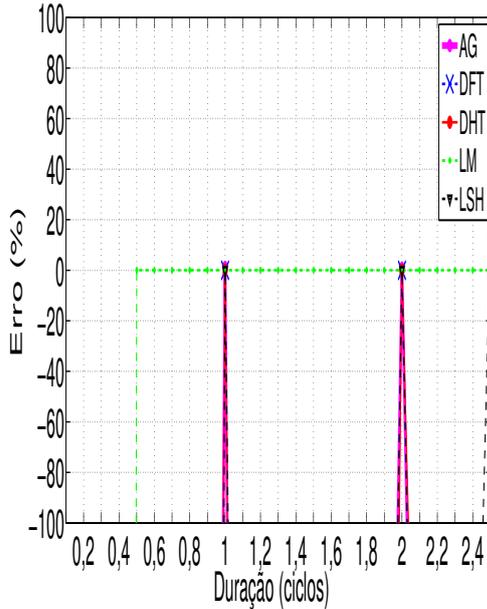


Figura 4.5: Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da duração. THD fixa em 1%

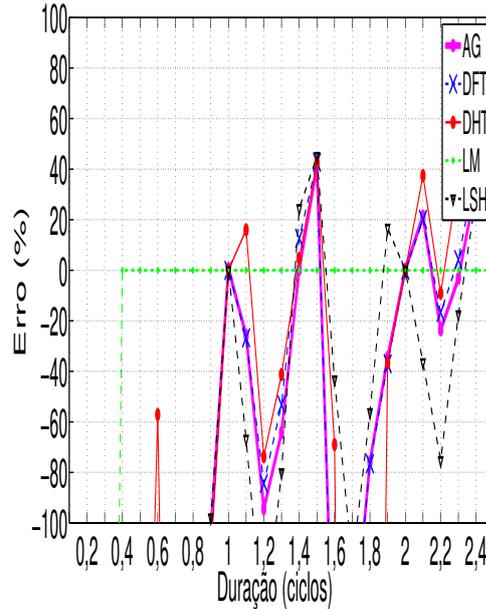


Figura 4.6: Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da duração. THD fixa em 7%

Da Figura 4.6 nota-se que LM converge ao erro nulo para a faixa entre 0,4 a 2,5 ciclos. Já os métodos AG, DFT, DHT e LSH possuem nulidade nas durações de 1 e 2 ciclos. Verifica-se que AG e DFT apresentam aproximadamente os mesmos erros, exceto para as durações de 1,2, 1,3, 2,2 e 2,3 ciclos. Para esses valores, o AG apresenta erro na ordem de -90%, 0%, -20% e -1%, respectivamente. O método DHT assim como o AG, apresenta erro nulo em 1,3 ciclos. Seus erros são inferiores aos dos métodos AG e DFT, com exceção das durações de 1,8 e 2,1 ciclos. Nesses pontos a magnitude da discrepância chega a ordem superior de -100% para 1,8 ciclos e 40% para 2,1 ciclos. Os erros de LSH são superiores aos da DFT, com ressalvas às durações de 1,6, 1,8 e 1,9 ciclos. Para esses valores, o erro de LSH é da ordem de -40%, -59% e 19%, respectivamente.

Das Figuras 4.5 e 4.6, observa-se que os erros da THD de 7% começam a se concentrar dentro da faixa de -100% a 100%. Esse fato está relacionado com a precisão das ordens harmônicas. Em outras palavras, quanto maior for a magnitude das ordens harmônicas, menor será sua sujeição ao ruído.

Da Figura 4.7 verifica-se que o método LM possui erro nulo para durações superiores a 0,4 ciclos. Os métodos AG e DFT são semelhantes com exceção das durações de 1,2, 1,3, 1,4 e 2,1 ciclos. Nesses pontos, o AG possui discrepância de -15%, 0%, 30% e -30%. As imprecisões da DHT são em maior parte superiores às do AG e da DFT, excluindo as durações de 0,6, 1,2 e 1,5 ciclos. Para esses valores, a DHT exibe erros

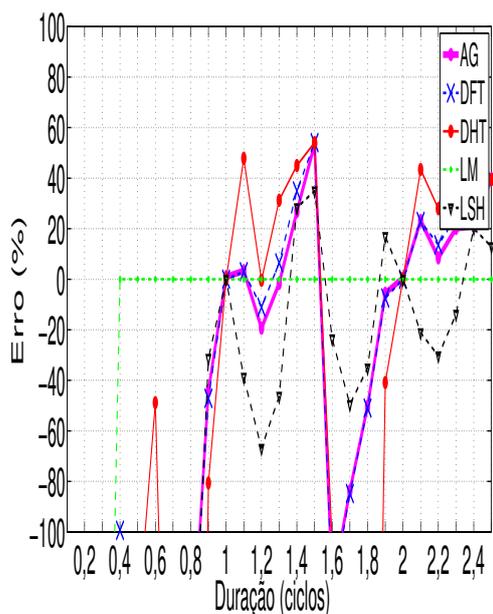


Figura 4.7: Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da duração. THD fixa em 11%

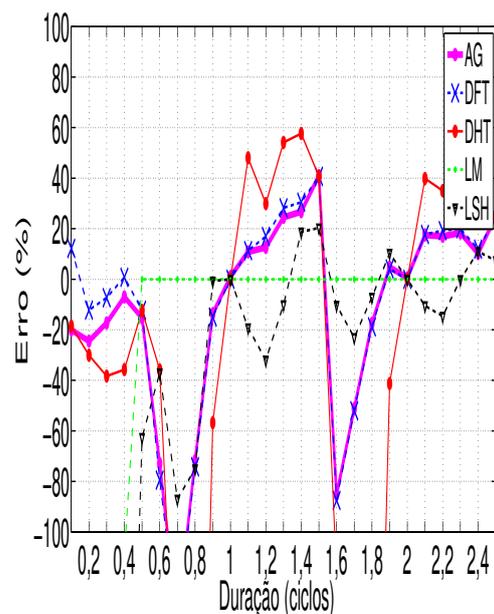


Figura 4.8: Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da duração. THD fixa em 19%

de 45%, 0% e 55% respectivamente. O método LSH, para durações superiores a 0,8 ciclos, apresentam seus erros dentro da faixa de -70% a 40%. Além disso, sua variação tende a ficar próximo de 0% com o aumento da duração do ciclo, sendo essa uma das características dos métodos recursivos. Para as durações inteiras, as discrepâncias de todos os métodos são nulas.

A Figura 4.8 possui uma densidade de pontos superior aos apresentados nas Figuras 4.5 a 4.7 para a faixa de -100% a 100%. Essa característica, como foi citado na análise da Figura 4.6, deve-se ao aumento das amplitudes das ordens harmônicas. Com isso, as harmônicas ficam menos suscetíveis ao ruído melhorando assim a acurácia do método. Divergente ao exposto nas três figuras anteriores, LM possui discrepância nula a partir de 0,5 ciclos. Os métodos AG e DFT apresentam as mesmas divergências na maioria dos pontos. Contudo, nos pontos 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 1,2 e 1,3, eles possuem resultados distintos. Para a DHT, observa-se que seu erro apresenta limite superior na ordem de 60% para duração de 1,4 ciclos, e limite inferior maiores que -100% sendo estes para a faixa de valores de 0,6 a 0,8 ciclos e 1,6 a 1,8 ciclos.

Das Figuras 4.5 a 4.8, LM é o método que possui melhores resultados. Os resultados desse método mostram que ele acompanha o sinal original a partir de 0,4 ciclos, com exceção da Figura 4.8. Nessa figura, o método LM acompanha o sinal em 0,5 ciclos. Os métodos AG e DFT foram semelhantes entre si na maioria dos pontos. Todos os métodos obtiveram erros nulos para as durações inteiras dos ciclos. Para LSH, quanto

maior a duração do ciclo menor será a faixa de variação do erro. De todos os métodos em estudo, a DHT foi a que apresentou a maior sensibilidade na variação da duração dos ciclos.

4.2.2 Simulação do parâmetro taxa de amostragem

Nessa simulação, mantém-se os parâmetros frequência e duração dos ciclos fixos variando apenas a taxa de amostragem em uma faixa de 128 a 512 amostras/ciclos.

As Figuras 4.9 a 4.12 apresentam os gráficos dos erros em função da taxa de amostragem, quando as THDs são iguais a 1%, 7%, 11% e 19%, respectivamente. Os parâmetros frequência e duração estão fixos em 60 Hz e 12 ciclos, nessa ordem.

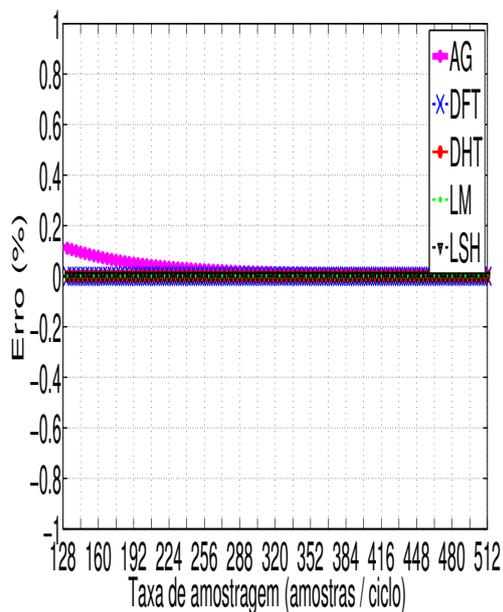


Figura 4.9: Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da taxa de amostragem. THD fixa em 1%

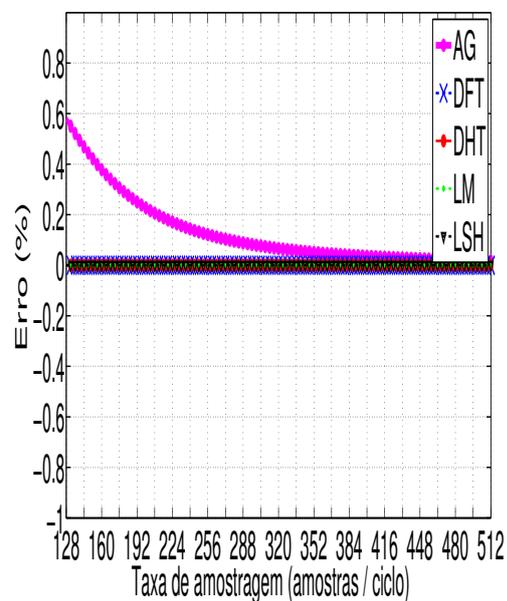


Figura 4.10: Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da taxa de amostragem. THD fixa em 7%

Da Figura 4.9, observa-se que para AG em 128 amostras/ciclo, ocorre a maior amplitude do erro com 0,2%. Os métodos DFT, DHT, LM e LSH apresentam erro nulo para todos os valores simulados da taxa de amostragem. Para a Figura 4.10, o erro do AG apresenta magnitude máxima de 0,6% na taxa de 128 amostras/ciclo.

As Figuras 4.11 e 4.12 são praticamente semelhantes. AG apresenta erro superior a 0,8% em 128 amostras/ciclo. Não são observados erros nos métodos DFT, DHT, LM e LSH.

Das Figuras 4.9 a 4.12, observa-se que o erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH é insignificante, pois são menores que 1%. O erro referente ao AG decresce com o

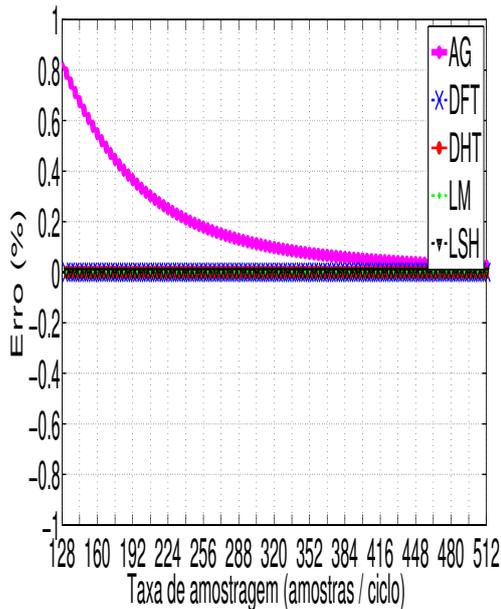


Figura 4.11: Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da taxa de amostragem. THD fixa em 11%

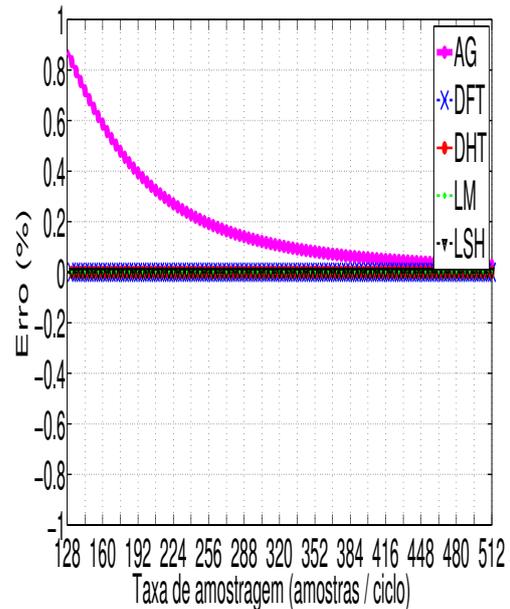


Figura 4.12: Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da taxa de amostragem. THD fixa em 19%

aumento da taxa de amostragem. Sua magnitude máxima de 0,85% ocorre nas THDs de 11% e 19%, para uma taxa de 128 amostras/ciclo.

Existe ainda a possibilidade de ocorrer problemas no conversor A/D de forma que o sinal discretizado não possua número mínimo de amostras por ciclo. Esta hipótese será investigada na próxima seção.

4.2.2.1 Avaliação da influência da sub-amostragem no sinal

Aqui será levantado o que ocorre em cada método AG, DFT, DHT, LM e LSH quando o sinal discretizado não segue o teorema de Nyquist, ou seja, um sinal sub-amostrado. Essa simulação depreende em manter os parâmetros frequência e duração fixos variando apenas a taxa de amostragem em uma faixa entre 32 a 128 amostras/ciclo.

As Figuras 4.13 a 4.16 apresentam os gráficos dos erros em função da taxa de amostragem, quando as THDs são iguais a 1%, 7%, 11% e 19%, respectivamente. Os parâmetros frequência e duração estão fixos em 60 Hz e 1 ciclo, nessa ordem.

Da Figura 4.13 verifica-se que o erro para DHT é aproximadamente nulo para faixa de 32 a 36 amostras/ciclo e para faixa de 48 a 128 amostras/ciclo. Entre 32 e 48 amostras/ciclo, a DHT exhibe erro máximo de 15%. A DFT não apresenta discrepância com o sinal na faixa de 60 a 128 amostras/ciclo. Próximo a 56 amostras/ciclo, a DFT apresenta erro de -20%, e para taxas inferiores, seu erro é superior a -100%. O método do AG só começa a convergir ao sinal de referência após 60 amostras/ciclo, quando

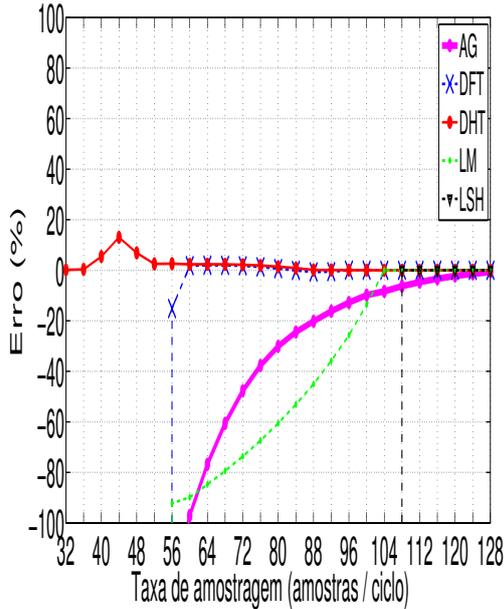


Figura 4.13: Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da taxa de amostragem. THD fixa em 1%

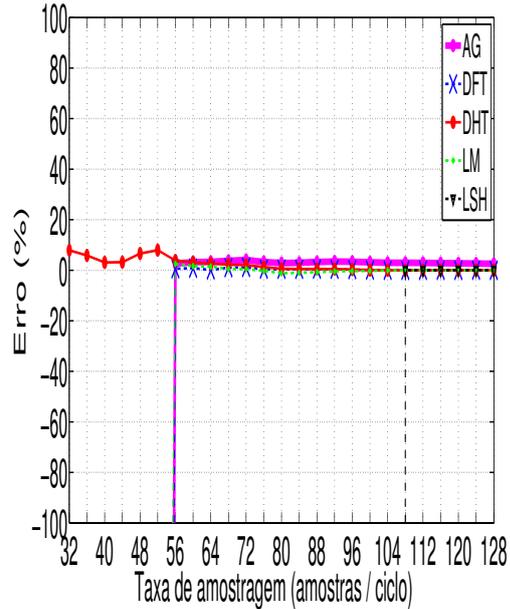


Figura 4.14: Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da taxa de amostragem. THD fixa em 7%

seu erro fica inferior a -100%. O Erro do AG se torna nulo para taxas de amostragem superiores a 116 amostras/ciclo. Já o LM começa a convergir ao valor de referência para magnitudes superiores a 56 amostras/ciclo, e alcança erro nulo a partir de 104 amostras/ciclo. O método de LSH apresenta nulidade do seu erro para valores a partir de 108 amostras/ciclo.

Da Figura 4.14 nota-se que o erro da DFT, DHT, AG e LM é aproximadamente nulo para taxa de amostragem superior a 56 amostras/ciclo. O método de LSH converge ao sinal de referência a partir de 108 amostras/ciclo. A DHT para a faixa de 32 a 56 amostras/ciclo apresenta imprecisão máxima de 15%.

Da Figura 4.15 verifica-se que os métodos AG, DFT, DHT e LM apresentam erros próximos de zero para valores superiores a 56 amostras/ciclo. O método LSH manteve-se com imprecisão próximo a zero para valores superior a 108 amostras/ciclo. Para a taxa de amostragem de 56 amostras/ciclo, a DFT apresenta erro de -15% enquanto que DHT, AG, e LM exibem erros de 15%, -5% e 20%, respectivamente. Já na faixa de 32 a 56 amostras/ciclo, somente DHT apresenta erros inferiores a 100%, com magnitude máxima de 15% para 40 amostras/ciclo.

Para a Figura 4.16, os erros de todos os métodos se mantêm aproximadamente iguais aos da Figura 4.15, com exceção da faixa de 32 a 56 amostras/ciclo para a DHT, e 56 amostras/ciclo para o LM. Para a DHT, seu erro apresenta magnitude máxima de 20% em 48 amostras/ciclo. Já para o LM, a magnitude do seu erro alcança 25% na

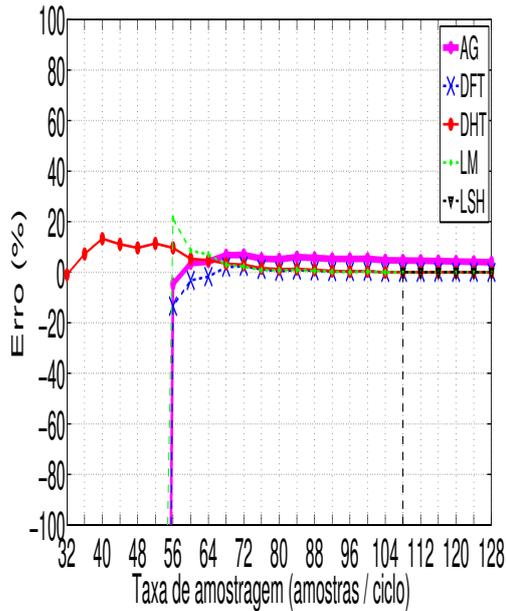


Figura 4.15: Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da taxa de amostragem. THD fixa em 11%

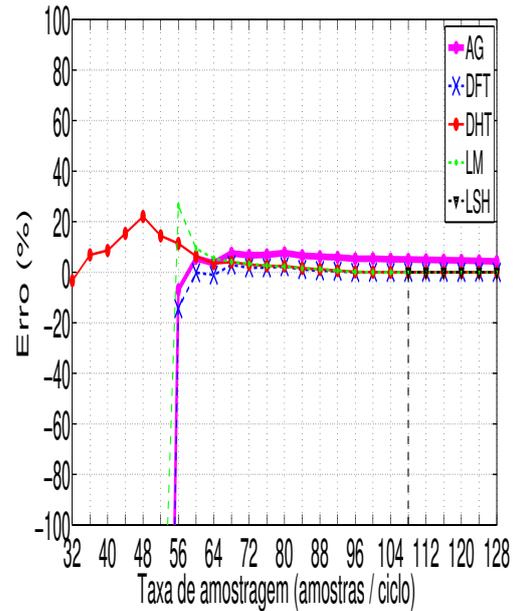


Figura 4.16: Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da taxa de amostragem. THD fixa em 19%

taxa de 56 amostras/ciclo em contraste aos 20% exibido na Figura 4.15 para a mesma taxa de 56 amostras/ciclo.

Verifica-se dessa simulação, que a DHT apresentou os melhores resultados de convergência do sinal. O método LSH só apresenta convergência para taxas de amostragem a partir de 108 amostras/ciclo. Já AG, DFT e LM começam a convergir para valores superiores a 56 amostras/ciclo.

Pelo teorema de Nyquist, para que um sinal seja reconstituído com o mínimo de perda de informação, sua frequência de amostragem deve ser igual ou maior a duas vezes a maior frequência do sinal. Nesse caso, a maior frequência do sinal é de 3.060 Hz, e por Nyquist, o sinal deve ter frequência de amostragem mínima de 6.120 Hz, que corresponde a uma taxa de 102 amostras/ciclo. Das Figuras 4.13 a 4.16, conclui-se que os métodos DFT e DHT apresentaram resultados satisfatórios para todas as THDs, pois eles apresentam erros nulos para valores bem abaixo da frequência de Nyquist. Os métodos AG e LM também exibem bons resultados, pois para as THDs de 7%, 11% e 19%, eles apresentam discrepâncias praticamente nulas para a frequência de amostragem desejada. Para THD de 1%, o AG e o LM apresentam erros próximos a 10% na taxa de 102 amostras/ciclo. O método LSH foi o único que necessitou de mais de 102 amostras/ciclo para convergir ao sinal de referência.

Dos métodos que utilizam análise espectral, a DHT foi a que apresentou melhores resultados. Seu menor erro ocorreu para a THD fixa em 7%. O método AG foi o que

mais demorou a convergir ao erro nulo.

Para os métodos que se ajustam com a forma de onda do sinal, o LSH é o que apresenta pior convergência ao erro nulo, com taxa de amostragem superior a 108 amostras/ciclo.

4.2.3 Simulação do parâmetro frequência

Essa simulação compreende em manter os parâmetros taxa de amostragem e número de ciclos fixos, variando-se apenas a frequência em uma faixa de 59,2 Hz a 60,8 Hz.

As Figuras 4.17 a 4.20 apresentam os gráficos dos erros em função da frequência, quando as THDs são iguais a 1%, 7%, 11% e 19%, respectivamente. Os parâmetros duração e taxa de amostragem estão fixos em 12 ciclos e 128 amostras/ciclo, nessa ordem.

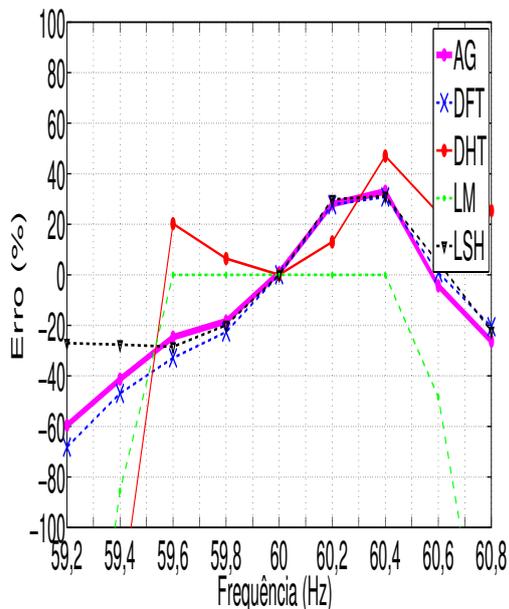


Figura 4.17: Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da frequência. THD fixa em 1%

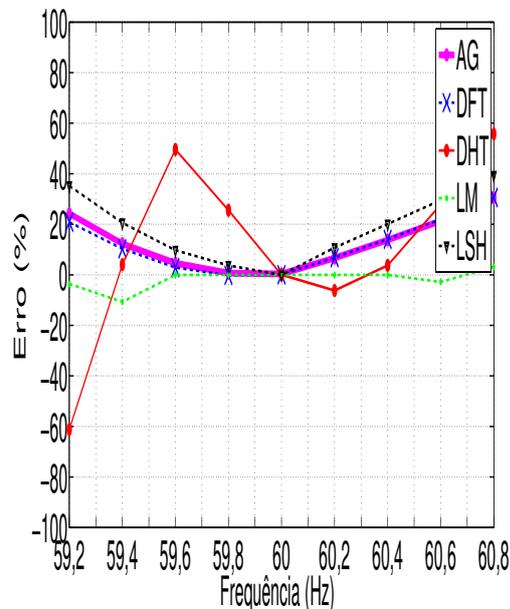


Figura 4.18: Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da frequência. THD fixa em 7%

Da Figura 4.17, verifica-se que LM para a faixa de 59,6 Hz a 60,4 Hz apresenta semelhança com o sinal de referência. Os métodos AG, DFT, DHT e LSH expõem erro nulo para a frequência de 60Hz. Observa-se entre 59,8Hz e 60,4Hz, que os métodos AG, DFT e LSH são semelhantes entre si. Nesta mesma faixa de valores, a DHT é o método que exhibe maior erro, superior a 40%, na frequência de 60,4Hz.

Da Figura 4.18, observa-se que o método LM é o que apresenta menor discrepância com o sinal de referência. Seu erro máximo é igual a -10% para a frequência de 59,4 Hz. AG e DFT possuem erros próximos de zero na faixa de 59,8 Hz a 60 Hz. Para

AG e DFT, o erro máximo é da ordem de 30%, ocorrendo em 60,4 Hz. LSH e DHT apresentam inexatidão semelhante aos métodos AG, DFT e LM em 60 Hz. Os picos de imprecisão de LSH e DHT estão em 40% e -60%, respectivamente.

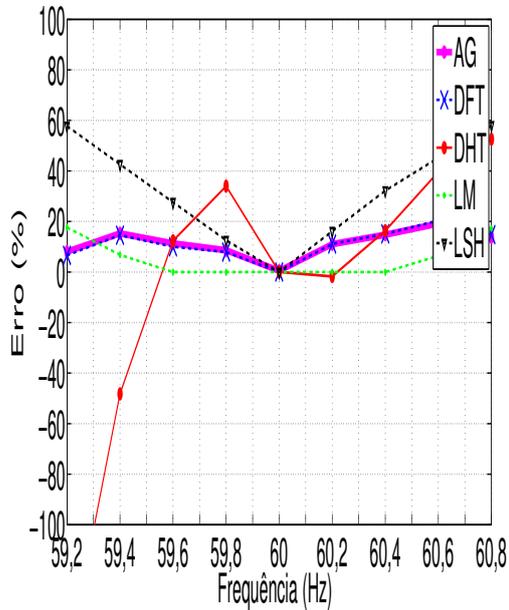


Figura 4.19: Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da frequência. THD fixa em 11%

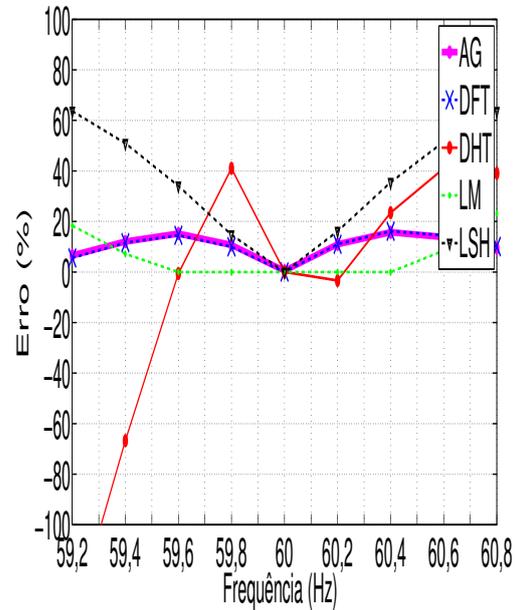


Figura 4.20: Erro dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para a variação da frequência. THD fixa em 19%

Da Figura 4.19 observa-se que AG, DFT e LM apresentam erros com magnitude máxima de 20%. Dentre esses métodos, LM é o que está mais próximo do sinal de referência para a faixa de 59,3 Hz a 60,7 Hz. DHT possui discrepância nula para a faixa de 60 Hz a 60,2 Hz. AG, DFT e LSH também são nulos em 60 Hz.

Da Figura 4.20 para 60 Hz, como visto nas três últimas figuras, nota-se que todos os métodos convergem ao sinal de referência. LM corresponde ao sinal analisado na faixa de 59,6 Hz a 60,4 Hz. AG e DFT são semelhantes entre si apresentando erro máximo na ordem de 15%. A DHT em 59,6 Hz e entre 60 Hz e 60,2 Hz se aproxima LM.

Para as Figuras 4.17 a 4.20, observa-se que o erro é praticamente nulo para todos os métodos na frequência de 60 Hz. Dos métodos que utilizam análise espectral, AG e DFT se comportam de forma semelhante, enquanto que a DHT apresenta maior sensibilidade à variação da frequência. Já nos métodos que se ajustam com a forma de onda do sinal, LM possui erro nulo na faixa de 59,6 Hz à 60,4 Hz em todas as THDs. O método LSH possui erro nulo apenas na frequência de 60 Hz. Seu melhor desempenho ocorre na THD de 7% com erro máximo para frequência de 59,2 Hz próximo a 40%.

4.3 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE TODOS OS PARÂMETROS

Nesta seção, serão apresentados os resultados da influência dos parâmetros duração dos ciclos, taxa de amostragem, frequência e THD na caracterização dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH.

Diferente da seção 4.2, nesta seção todos os parâmetros são variados simultaneamente. Para efeito de análise, efetua-se o cálculo da média dos erros das THDs quando tem-se um parâmetro constante com todas as demais combinações possíveis dos outros 2 parâmetros em avaliação.

4.3.1 Simulações dos parâmetros sem restrição do parâmetro duração

As simulações para cada sinal, método e $THD_{referência}$ foram realizados com base nos valores dos parâmetros duração, frequência e taxa de amostragem, encontrados na tabela 3.6.

4.3.1.1 Média dos erros para a frequência

Da Tabela 3.6, a frequência possui valores entre 59,4 Hz e 60,6 Hz. Dessa forma, para cada valor de frequência, combinando os parâmetros duração dos ciclos e taxa de amostragem com todas as formas possíveis, são gerados 175 sinais. Com esses sinais obtidos, calcula-se o erro da THD para os métodos AG, DFT, DHT, LSH e LM, obtendo assim 175 erros para cada método. A partir desses erros, efetua-se o RMSE para cada método pela equação 3.11.

As Figuras 4.21 a 4.24 apresentam os gráficos das médias dos erros em função da frequência, quando as THDs são iguais a 1%, 7%, 11% e 19%, respectivamente.

Da Figura 4.21, observa-se que a DHT possui erro médio superior a 100% na faixa de 59,4 Hz a 60,4 Hz. Para a frequência de 60,6 Hz, a DHT possui discrepância próximo a 95%. O método LSH exibe erro médio constante de 65%. Os métodos AG e DFT possui imprecisão média de aproximadamente 60% em todos os valores de frequência. LM tem erro constante e muito próximo de 0%.

Para a Figura 4.22, nota-se que a discrepância média para a DHT fica próximo de 25% na frequência de 59,4 Hz. O valor do seu erro médio decai com o aumento da frequência chegando a magnitude de 15% para a frequência de 60,6 Hz. Já os métodos AG, DFT e LSH exibem valor constante de erro próximo a 5% para toda faixa de

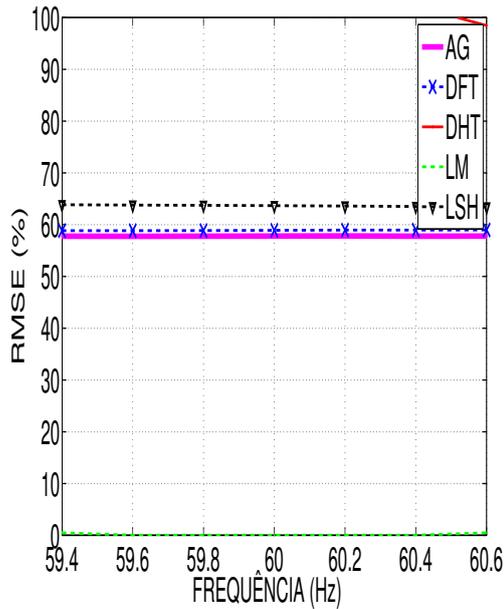


Figura 4.21: RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 1% fixando-se as frequências e variando-se a taxa de amostragem e a duração

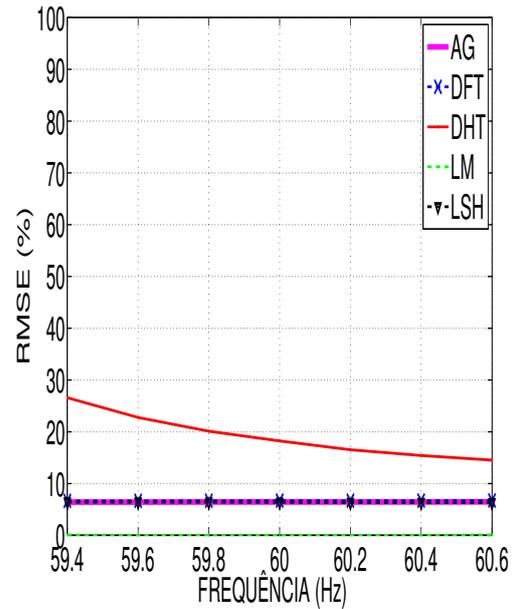


Figura 4.22: RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 7% fixando-se as frequências e variando-se a taxa de amostragem e a duração

frequência. Assim como observado na Figura 4.21, LM possui erro médio constante limitrofe a 0%.

Da Figura 4.23, verifica-se que a DHT possui erro médio máximo de 20% em 59,4 Hz. Seu erro decaiu para 10% na frequência de 60,6 Hz. Os métodos AG, DFT e LSH possui erro de 5% para todas as frequências. O erro médio LM não varia, ficando próximo de 0%.

Para a Figura 4.24, observa-se que o método da DHT possui erro médio máximo de 15% em 59,4 Hz, e mínimo próximo de 10% na frequência de 60,6 Hz. Os métodos AG, DFT, LSH e LM possuem erros pequenos, próximos de 0%, sendo LM o método mais próximo de 0%.

Das Figuras 4.21 a 4.24, nota-se que os métodos AG, DFT, LM e LSH não apresentam variações em relação a frequência. O método da DHT exibe variações em todos os gráficos. Quanto maior for a frequência menor o seu valor. O método LM é o que apresenta menor erro médio nos gráficos com valores próximos de 0%. Para os métodos AG, DFT, DHT e LSH, aumentando-se o nível da THD reduz-se o valor do RMSE para uma dada frequência. Isso deve-se ao fato de quanto maior o nível da THD, menor a influência do ruído nos métodos.

Não se pode inferir que os métodos AG, DFT, LSH e LM não variam com a mudança da frequência. Como exposto no início da seção, o erro médio dos métodos provém do

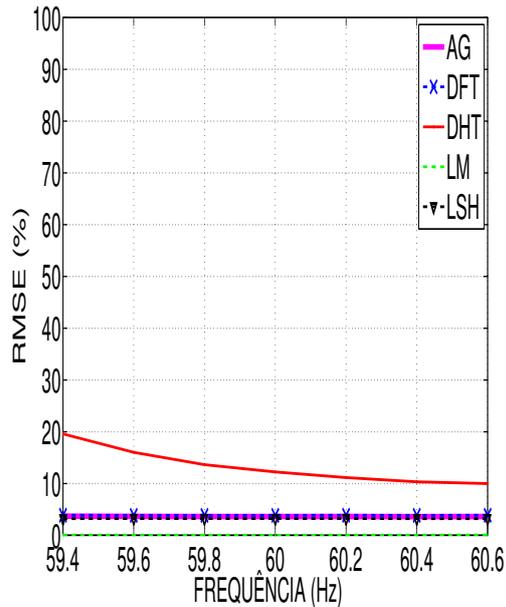


Figura 4.23: RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 11% fixando-se as frequências e variando-se a taxa de amostragem e a duração

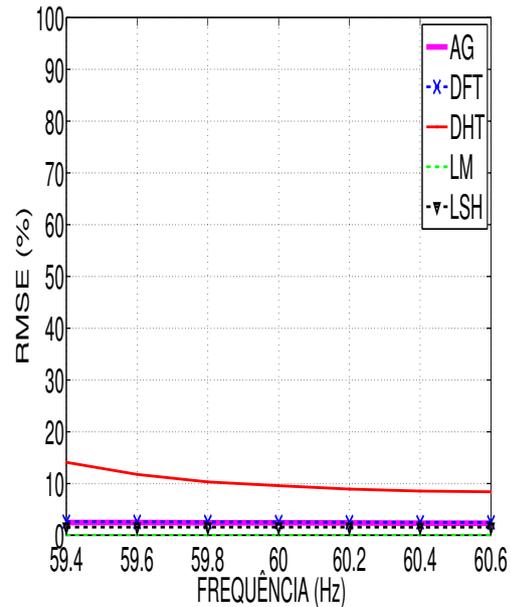


Figura 4.24: RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 19% fixando-se as frequências e variando-se a taxa de amostragem e a duração

arranjo de todas as combinações possíveis entre 2 parâmetros, sendo no caso a taxa de amostragem e a duração dos ciclos, em relação a uma determinada frequência. Dessa forma, conclui-se que se as contribuições dos erros provenientes dos outros dois parâmetros, a saber, taxa de amostragem e duração dos ciclos for muito superior a contribuição do erro da frequência, o RMSE dos métodos para cada ponto de frequência não apresentará variação significativa. Isso pode ser visto nas Figuras 4.21 a 4.24.

4.3.1.2 Média dos erros para a duração

Da Tabela 3.6, verifica-se que o parâmetro duração possui faixa de valores de 0,6 a 3 ciclos. Assim como feito para a frequência, são gerados 175 erros para cada método em uma dada duração. O valor do erro médio provindo dos 175 erros para cada método é representado pelo RMSE no gráfico para uma dada duração.

As Figuras 4.25 a 4.28 apresentam os gráficos das médias dos erros em função da duração dos ciclos, quando as THDs são iguais a 1%, 7%, 11% e 19%, respectivamente.

Da Figura 4.25, verifica-se que os métodos AG e DFT apresentam os mesmos erros médios na maioria dos ciclos. Contudo, nas durações de 1,4, 1,6, 2,4 e 2,6 ciclos, eles possuem resultados distintos. Para as durações dos ciclos com valores inteiros, o erro de todos os métodos é próximo de zero. O método LM apresenta erro médio muito próximo de zero para todos os números de ciclos. O método LSH sobressai a DFT,

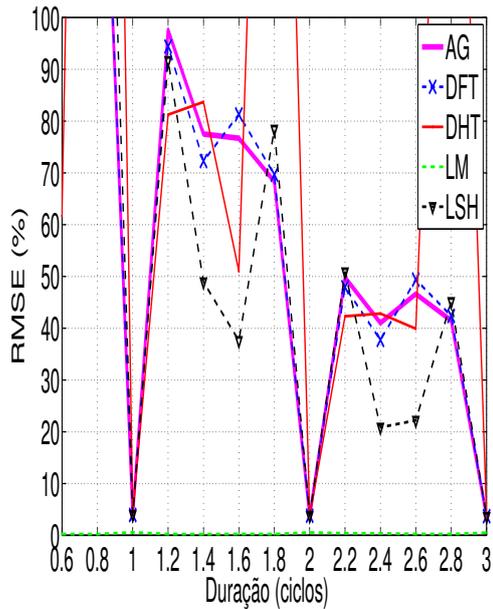


Figura 4.25: RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 1% fixando as durações dos ciclos, variando a taxa de amostragem e a frequência

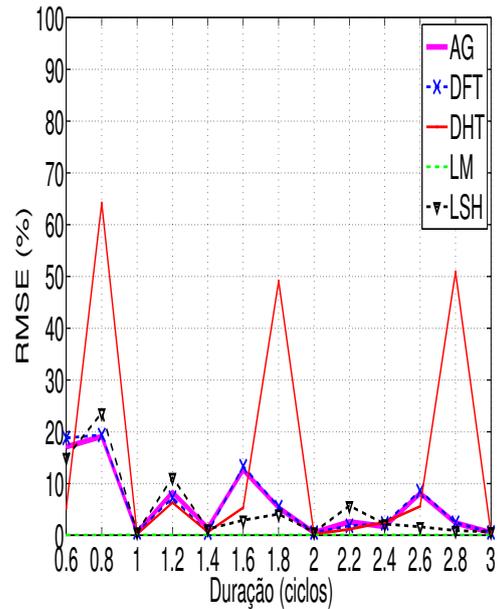


Figura 4.26: RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 7% fixando as durações dos ciclos, variando a taxa de amostragem e a frequência

com valores de RMSE semelhantes ou inferiores para as durações dos ciclos, exceto para 1,8 ciclos. Nesse ponto, LSH exibe erro médio próximo de 80% em contraste ao erro de 70% da DFT. A DHT apresenta as maiores variações de RMSE como visto nas durações 1,6 a 2 ciclos e de 2,6 a 3 ciclos, com erros médios superiores a 100%.

Para a Figura 4.26, todos os métodos apresentam erros médios inferiores a 100% e para as durações 1, 2, 2,4 e 3 ciclos, o erro é praticamente 0% para todos os métodos. LM não apresenta erro médio significativo. Os métodos AG e DFT são semelhantes em todos os ciclos. O valor máximo do erro médio é de 20% ocorrendo para 0,6 e 0,8 ciclos. O método LSH possui RMSE superior ao da DFT nos pontos 0,8, 1,2 e 2,2 ciclos, cujo o valor do erro médio equivale a 25%, 10% e 5%, respectivamente. O método DHT apresenta pico de 65% para a duração de 0,8 ciclos e 50% para durações de 1,8 e 2,8 ciclos. Para os demais valores a DHT possui erro inferior a DFT.

Da Figura 4.27, nota-se que todos os erros médios são inferiores ou semelhantes a 40%. Os métodos AG, DFT, DHT e LSH apresentam erro médio nulo para os ciclos inteiros. O método de LSH possui erro próximo de 0% para a faixa de 1,4 a 3 ciclos. Já LM possui erro médio praticamente nulo para todas as durações. Os métodos AG e DFT são semelhantes em todos os pontos. O erro máximo para esses métodos ocorre em 0,8 e 1,6 ciclos com magnitude de 10%. A DHT apresenta picos de 35% para a duração de 0,8 ciclos e picos de 40% para os ciclos de 1,8 e 2,8.

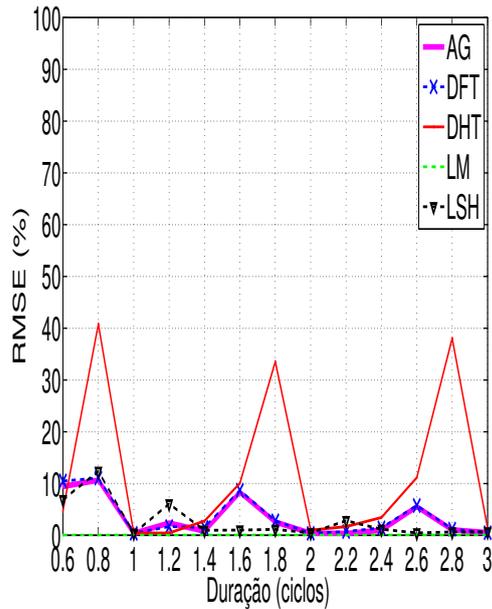


Figura 4.27: RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 11% fixando as durações dos ciclos, variando a taxa de amostragem e a frequência

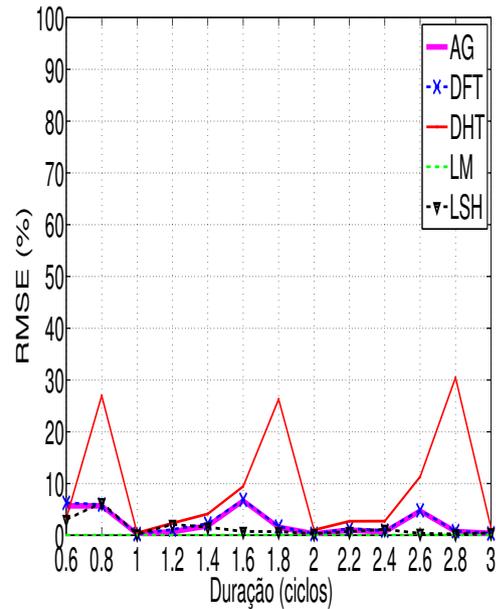


Figura 4.28: RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 19% fixando as durações dos ciclos, variando a taxa de amostragem e a frequência

Para a Figura 4.28 todos os métodos apresentam RMSE próximo de 0% para os pontos 0,6, 1, 1,2, 2, 2,2, 2,4 e 3 ciclos. O método LM possui erro próximo de 0% para todas as durações dos ciclos. LSH, a partir da duração de 1 ciclo, apresenta erro semelhante a LM. Em 0,6 e 0,8 ciclos, o erro médio de LSH possui seu pico próximo de 5%. Os métodos AG e DFT compartilham os mesmos erros. O valor máximo do erro para eles equivale a aproximadamente 10% para 1,6 ciclos de duração.

Das Figuras 4.25 a 4.28, nota-se que o erro LM é praticamente nulo para todas as durações. Os métodos apresentam erro próximo de 0% em todas as figuras para as durações com ciclos completos, como observado em 4.2.1.1. Observa-se que quanto maior o nível da THD menor será a escala dos erros. Quanto maior o nível da THD menor a influência do ruído nos métodos.

Como o RMSE dos métodos apresentam valor muito próximo a 0% para algumas durações, e grandes variações com a mudança da duração, pode-se inferir que as contribuições dos erros da frequência e da taxa de amostragem são praticamente insignificantes em relação ao erro médio que foi atribuído a variação da duração.

4.3.1.3 Média dos erros para a taxa de amostragem

Da Tabela 3.6, verifica-se que o parâmetro taxa de amostragem possui faixa de valores de 110 a 294 amostras/ciclo. Assim como feito para a frequência e para a duração, são

gerados 91 erros para cada método em uma dada duração. O valor do erro médio é representado pelo RMSE no gráfico para uma taxa de amostragem.

As Figuras 4.29 a 4.32 apresentam os gráficos das médias dos erros em função da taxa de amostragem, quando as THDs são iguais a 1%, 7%, 11% e 19%, respectivamente.

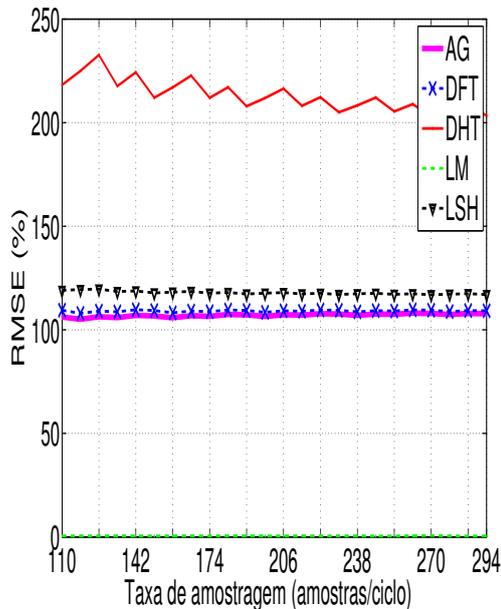


Figura 4.29: RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 1% fixando a taxa de amostragem, variando a duração dos ciclos e a frequência

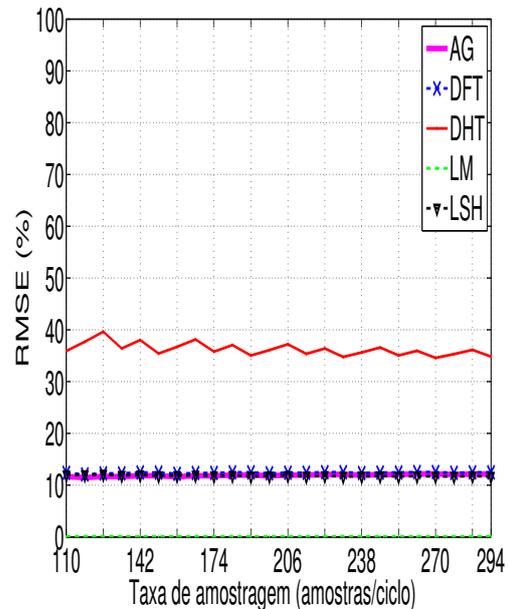


Figura 4.30: RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 7% fixando a taxa de amostragem, variando a duração dos ciclos e a frequência

Da Figura 4.29, observa-se que todos os erros são superiores a 100%, exceto LM que apresenta erro próximo de 0%. Os métodos AG e DFT possuem erros constantes e semelhantes para todas as taxas de amostragem. Esses erros médios estão próximos de 110%. Já LSH também apresenta erro médio constante de valor próximo a 120%. O método da DHT apresenta erro máximo de 240% para 118 amostras/ciclo e mínimo de 200% para a taxa de 294 amostras/ciclo.

Para a Figura 4.30, verifica-se que os erros dos métodos AG, DFT, DHT e LSH são inferiores a 100%. O erro para AG, DFT, LSH equivale aproximadamente a 10%, para todas as taxas de amostragem. O método da DHT possui erro médio máximo de 40% em 126 amostras/ciclo e mínimo de 35% para a taxa de 294 amostras/ciclo. O método LM apresenta erro praticamente nulo.

Da Figura 4.31, observa-se que os métodos AG, DFT e LSH apresentam erro médio próximo a 7% para todas as taxas de amostragens. Já LM possui RMSE próximo a 0%. A DHT possui erro oscilando em torno de 25% para todos os valores da taxa.

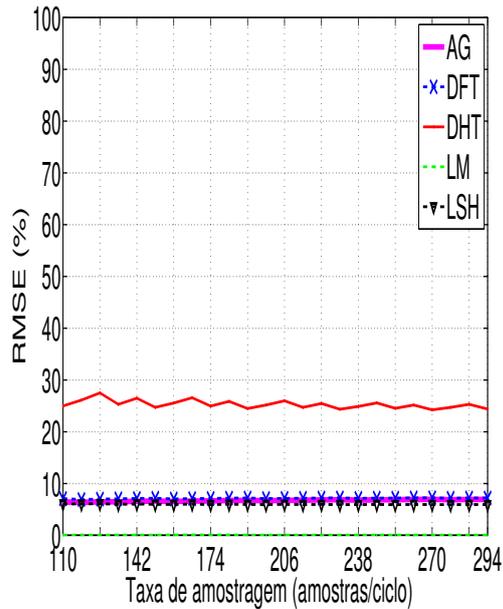


Figura 4.31: RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 11% fixando a taxa de amostragem, variando a duração dos ciclos e a frequência

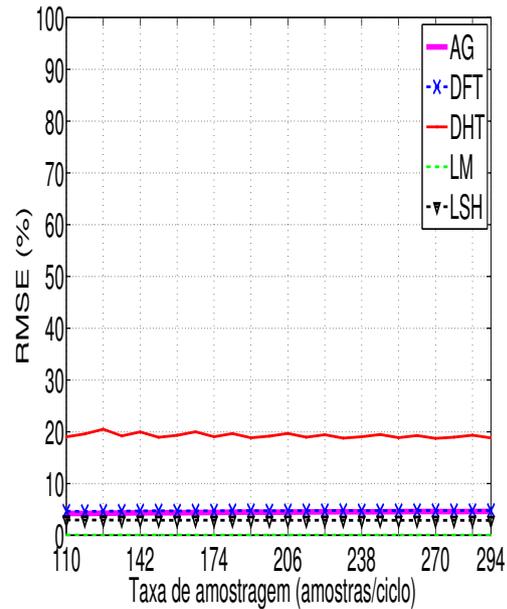


Figura 4.32: RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 19% fixando a taxa de amostragem, variando a duração dos ciclos e a frequência

Da Figura 4.32, nota-se que todos os métodos são aproximadamente constantes. Os métodos AG, DFT, LSH possuem erro próximo a 5%. DHT e LM têm RMSE da ordem de 20% e 0%, respectivamente.

Das Figuras 4.29 a 4.32, verifica-se que o método LM não têm erro significativo. Quanto maior o nível da THD, menor será a escala de erro do RMSE. Todos os métodos variam pouco em torno de um determinado RMSE.

Como os valores dos RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH são constantes ou variam pouco com a mudança da taxa de amostragem as contribuições dos erros da taxa de amostragem são praticamente insignificantes no cálculo do RMSE. Como foi verificado que a frequência também não varia muito o RMSE na sua faixa de valores, conclui-se que a contribuição do parâmetro duração é significativa e dominante em relação aos parâmetros taxa de amostragem e frequência.

4.3.2 Simulações dos parâmetros com restrição do parâmetro duração

Aqui, o parâmetro duração dos ciclos apresenta somente valores inteiros de ciclos. Tomando-se como referência a Tabela 3.7 para os valores dos parâmetros, segue as simulações para cada sinal, método e $THD_{referência}$.

O cálculo da média dos erros para os parâmetros frequência, duração dos ciclos e

taxa de amostragem é semelhante ao apresentado na secção anterior 4.3.1.

4.3.2.1 Média dos erros para a frequência

As Figuras 4.33 a 4.36 apresentam os gráficos das médias dos erros em função da frequência, quando as THDs são iguais a 1%, 7%, 11% e 19%, respectivamente.

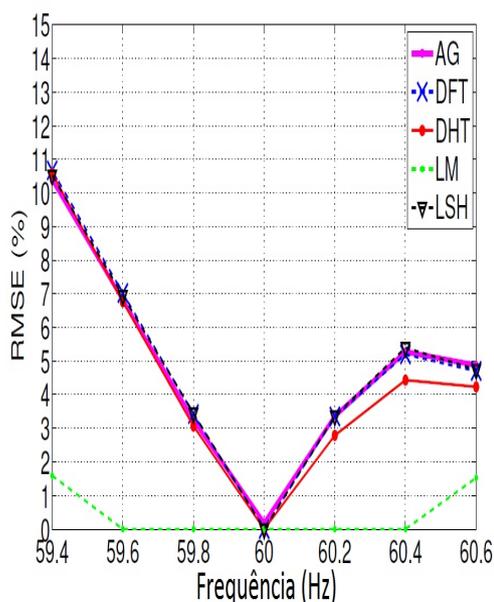


Figura 4.33: RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 1% fixando as frequências, variando a taxa de amostragem e a duração dos ciclos

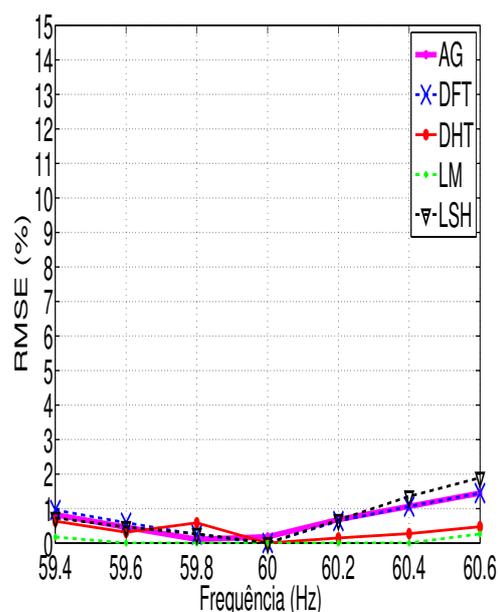


Figura 4.34: RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 7% fixando as frequências, variando a taxa de amostragem e a duração dos ciclos

Da figura 4.33, os métodos AG, DFT, DHT e LSH apresentam o mesmo RMSE para faixa de 59,4 Hz a 60 Hz. O RMSE para esses métodos varia de forma aproximadamente linear, sendo seu valor máximo 11% para frequência de 59,4 Hz e mínimo próximo de 0%. Para a faixa de 60 Hz a 60,6 Hz os métodos AG, DFT e LSH são semelhantes cujo maior RMSE equivale a 5% na frequência de 60,4 Hz. Já para DHT na faixa de 60 Hz a 60,6 Hz, apresenta erros inferiores ao da DFT, com máximo de 4,5% para 60,4 Hz. O método LM apresenta maior erro médio de 1,5% para as frequências 59,4 Hz e 60,6 Hz. Para a faixa de 59,6 Hz a 60,4 Hz o método apresenta erro praticamente nulo. Todos os métodos apresentam erro próximo de 0% para 60 Hz.

Para a figura 4.34, observa-se que LM fica próximo de 0% para a faixa de 59,4 Hz a 60,4 Hz. Na frequência de 60,6 Hz o método apresenta erro de 0,5%. Os métodos AG, DFT e LSH são semelhantes para a faixa de 59,4 Hz a 60,2 Hz, sendo que o erro máximo para essa faixa é de 1% em 59,4 Hz e 60,2 Hz, e mínimo próximo de 0% para

59,8 Hz e 60 Hz. Para a frequência de 60,4 Hz AG e DFT possui erro de 1% enquanto que LSH tem erro próximo de 1,5%. O método DHT possui erros inferiores aos do AG, DFT e LSH, exceto para a frequência de 59,8 Hz onde a DHT tem erro médio de 0,5%. O RMSE máximo da DHT também ocorre em 59,8 Hz e mínimo perto de 0% para as frequências 60 Hz e 60,2 Hz.

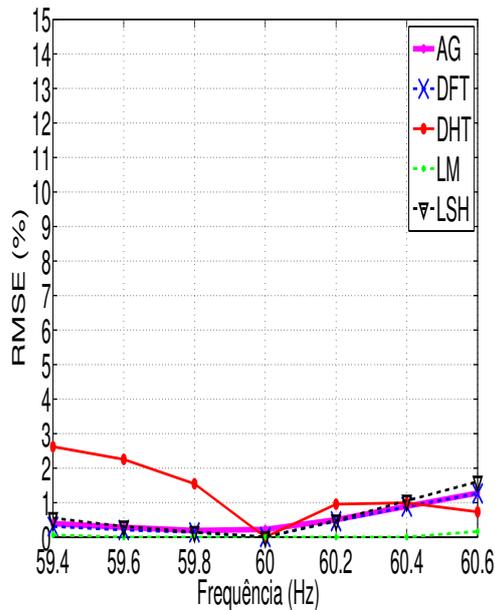


Figura 4.35: RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 11% fixando as frequências, variando a taxa de amostragem e a duração dos ciclos

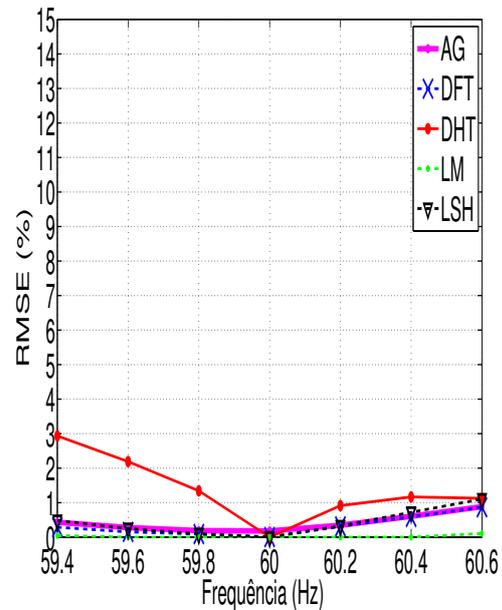


Figura 4.36: RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 19% fixando as frequências, variando a taxa de amostragem e a duração dos ciclos

Da Figura 4.35, verifica-se que os métodos AG, DFT e LSH são semelhantes quanto ao RMSE para as frequências de 59,4 Hz a 60,4 Hz. O máximo do RMSE ocorre em 60,4 Hz com valor de 1%, e mínimo de 59,8 Hz e 60 Hz com valor próximo de 0%. Para o método LM seu erro médio é praticamente nulo para todas as frequências. O método DHT apresenta RMSE máximo de 3% para a frequência de 59,4 Hz e mínimo de 0% para a frequência de 60 Hz, respectivamente. Seus erros são superiores ao da DFT, exceto para as frequências de 60 Hz, 60,4 Hz e 60,6 Hz. Para essas frequências o RMSE da DHT vale aproximadamente 0%, 1% e 0,5%.

Para a Figura 4.36, nota-se que LM exhibe, para todas as frequências, RMSE próximo de 0%. Os métodos AG, DFT e LSH são praticamente semelhantes para todas as frequências. Para eles o RMSE máximo equivale a 1% na frequência de 60,6 Hz e mínimo perto de 0% na faixa de 59,8 Hz a 60 Hz. Já a DHT, observa-se que seu erro médio apresenta máximo de 3% para a frequência de 59,4 Hz, mínimo próximo de 0% para frequência de 60Hz. A DHT apresenta erros superiores aos da DFT, exceto

para 60 Hz e 60,6 Hz onde apresenta semelhanças cujo o RMSE equivale a 0% e 1%, respectivamente.

Das Figuras 4.33 a 4.36, observa-se que para os métodos AG, DFT, DHT e LM que aumentando o nível da THD seus erros médios tendem a diminuir com as variações de frequência. Já para o método DHT, os menores erros apresentados se encontram na Figura 4.34, que se refere a THD de 7%, o gráfico da THD de 1% Figura 4.33, é onde se encontram os maiores valores de RMSE, mas em todos os casos o erro é nulo para frequência de 60Hz.

O fenômeno observado na DHT para a variação da THD de 1% para 7%, e para todas as THDs dos demais métodos se deve ao fato da redução da suscetibilidade ao ruído. Para a variação crescente do RMSE quando a se eleva o nível da THD de 7% para 11% e em seguida para 19% para DHT, não foi encontrado uma explicação razoável para esse fenômeno.

Diferente do que ocorria para as simulações com o parâmetro duração dos ciclos sem restrição 4.3.1, a frequência é um parâmetro dominante pois o RMSE dos métodos sofrem variações quando a frequência varia e todos os métodos são muito próximos do RMSE 0% para uma dada frequência, por exemplo 60Hz, caracterizando assim que as contribuições do RMSE para a taxa de amostragem e duração dos ciclos são muito pequenos.

4.3.2.2 Média dos erros para a duração

As Figuras 4.37 a 4.40, apresentam os gráficos do RMSE em função da duração dos ciclos, quando as THDs são iguais a 1%, 7%, 11% e 19%, respectivamente.

Da Figura 4.37, o valor de RMSE para LM é constante e igual a 0,5% para todos os ciclos. Os métodos AG, DFT, DHT e LSH são praticamente semelhantes com RMSE variando de 4% a 3,5%.

Para a figura 4.38, observa-se que os métodos AG, DFT e LSH são constantes e erro médio igual a 0,5%. A DHT apresenta uma leve variação do RMSE sendo praticamente 0% para 1 ciclo de duração e 0,5% para 3 ciclos. O método LM possui RMSE próximo de 0% para todas as durações.

Das Figuras 4.39 e 4.40, o método LM possui RMSE praticamente nulo para todos os ciclos. Os métodos AG, DFT e LSH possuem erro médio constante de 0,5%. A DHT apresenta uma variação do RMSE de 0,5% a 1,5% para 1 e 3 ciclos, respectivamente.

Para as Figuras 4.37 a 4.40, todos os métodos reduziram o erro médio significativamente quando o nível da THD foi elevado de 1% para 7%, já para elevação do nível da THD de 7% para 11% e em seguida para 19% os métodos AG, DFT, LM e LSH mantiveram seus valores de RMSE aproximadamente constante. Para DHT ocorreu uma

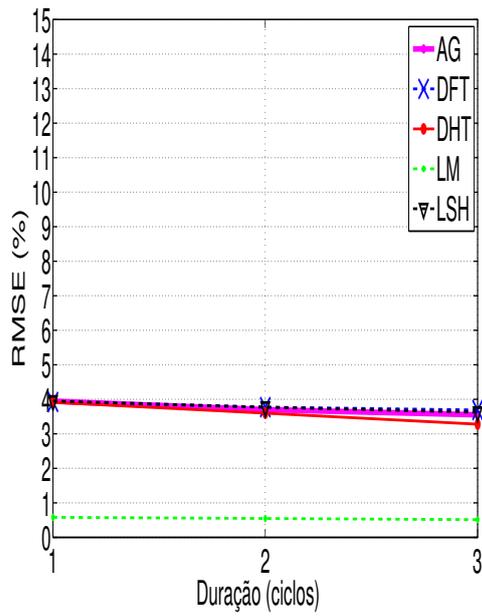


Figura 4.37: RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 1% fixando as durações dos ciclos, variando a taxa de amostragem e a frequência

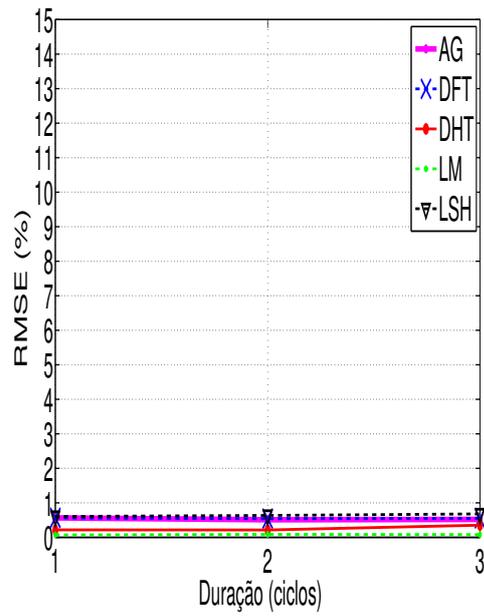


Figura 4.38: RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 7% fixando as durações dos ciclos, variando a taxa de amostragem e a frequência

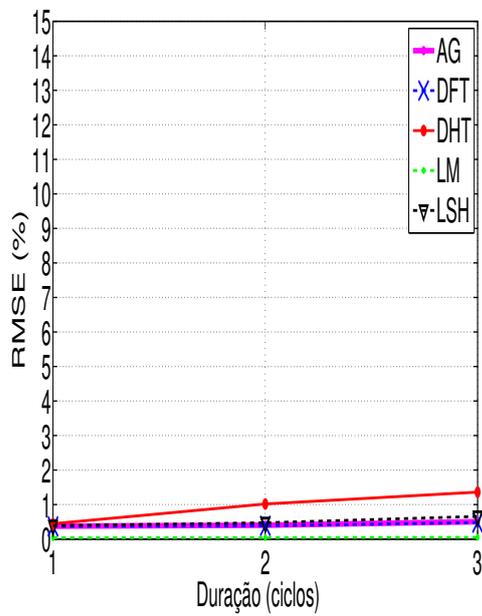


Figura 4.39: RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 11% fixando as durações dos ciclos, variando a taxa de amostragem e a frequência

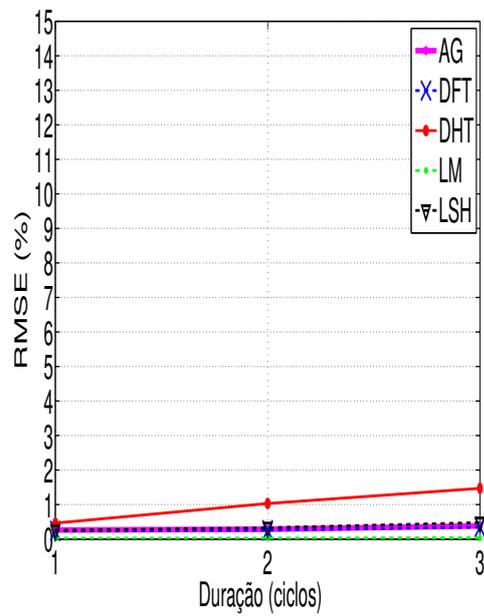


Figura 4.40: RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 19% fixando as durações dos ciclos, variando a taxa de amostragem e a frequência

elevação do RMSE quando a THD sofreu elevação de 7% para 11%. O RMSE da DHT manteve-se aproximadamente constante quando a THD variou de 7% para 19%.

Para o parâmetro duração dos ciclos, observa-se que o RMSE dos métodos sofreram pouca variação, o único método que apresentou RMSE praticamente nulo para todas durações e para todas as THDs foi LM. Dessa forma pode-se concluir que a influência da duração nas simulações é relativamente pequena.

4.3.2.3 Média dos erros para a taxa de amostragem

As Figuras 4.41 a 4.44, apresentam os gráficos das médias dos erros em função da taxa de amostragem, quando as THDs são iguais a 1%, 7%, 11% e 19%, respectivamente.

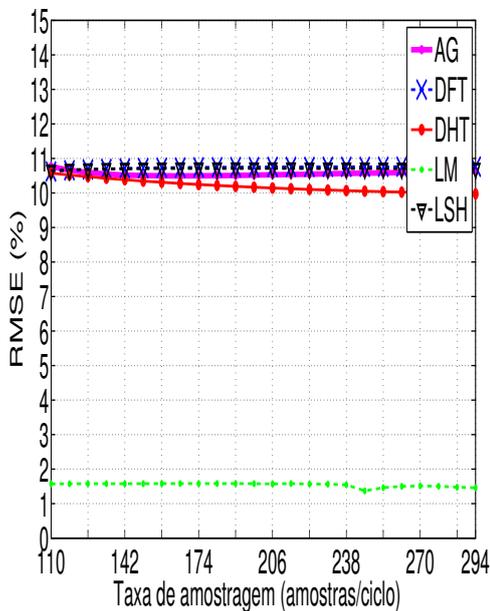


Figura 4.41: RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 1% fixando a taxa de amostragem, variando a duração dos ciclos e a frequência

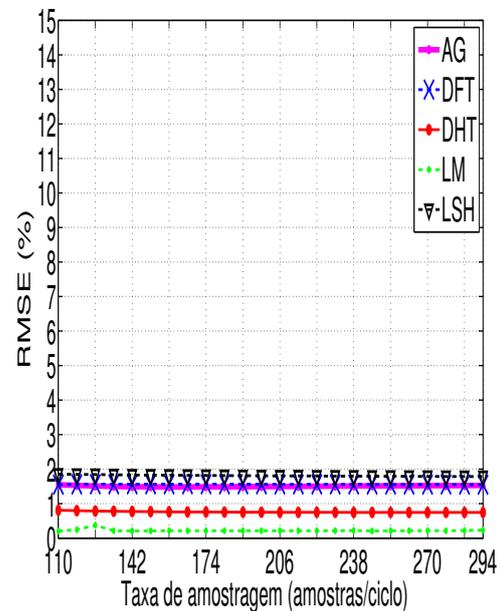


Figura 4.42: RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 7% fixando a taxa de amostragem, variando a duração dos ciclos e a frequência

Da Figura 4.41, os métodos AG, DFT e LSH possuem erro médio constante de 11%. LM tem RMSE próximo de 1,5% para todas as taxas. A DHT apresenta uma pequena variação de 1%, seu erro médio máximo de 11% ocorre para a taxa de 110 amostras/ciclo.

Para a Figura 4.42, os métodos AG e DFT possuem erro médio de 2% para os valores da taxa de amostragem. Para DHT, LM e LSH seus RMSE são constantes e próximos a 1%, 0% e 2,2%, respectivamente.

Das Figuras 4.43 e 4.44, os métodos DHT, LM e LSH exibem valores para o erro médio perto de 3%, 0% e 1%, respectivamente. Os métodos AG e DFT, compartilham

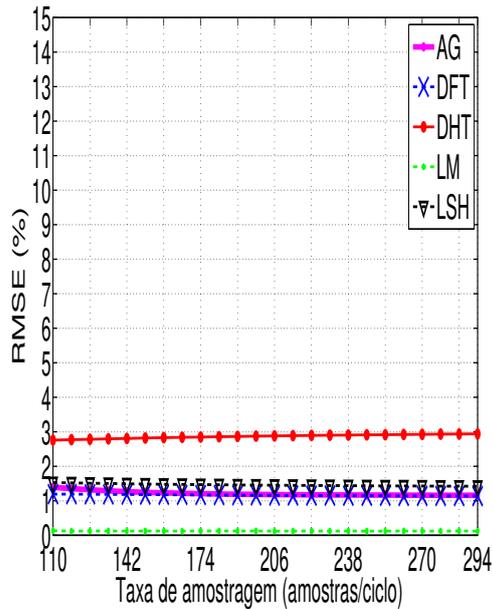


Figura 4.43: RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 11% fixando a taxa de amostragem, variando a duração dos ciclos e a frequência

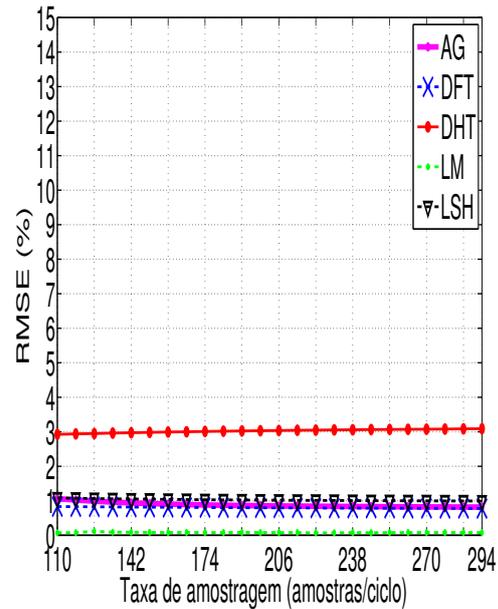


Figura 4.44: RMSE dos métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH para THD de 19% fixando a taxa de amostragem, variando a duração dos ciclos e a frequência

aproximadamente os mesmos erros do método LSH.

Para as Figuras 4.41 a 4.44, quando se eleva o nível da THD de 1% para 7%, todos os métodos apresentam redução do RMSE. Quando a THD aumenta de 7% para 11% todos os métodos, exceto DHT, reduzem o valor do RMSE. A DHT tem um acréscimo no RMSE de 1% para 3%. Para a elevação da THD de 11% para 19%, todos os métodos mantêm os valores do RMSE constante.

Em relação ao parâmetro taxa de amostragem, assim como foi analisado para o parâmetro duração, verifica-se que o RMSE dos métodos sofreram variações praticamente insignificante, e nenhum método apresentou RMSE praticamente nulo para todas as taxas de amostragem e para todas as THDs. Assim, pode-se concluir que a taxa de amostragem influencia muito pouco na aquisição do RMSE.

4.4 AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS

Como descrito na seção 3.6, deseja-se avaliar os métodos comparativamente por meio do teste de Tukey. Porém, para aplicar o método de Tukey, deve-se validar estatisticamente os dados dos métodos. Utiliza-se para isso o teste ANOVA. Entretanto, deve-se garantir que os dados tenham distribuição normal dentro de uma população, e que a

variância das populações sejam iguais entre si.

Serão realizados 4 testes de Tukey, para as THDs de 1%, 7%, 11% e 19%. Além disso, a análise é dividida em dois grupos, onde o primeiro utiliza todos os sinais e o segundo considera que o parâmetro duração tenha apenas números inteiros.

4.4.1 Comparação dos métodos com o parâmetro duração sem restrição

Para se aplicar o teste Tukey, deve-se primeiro validar o teste da ANOVA. Dessa forma, a normalidade dos dados pode ser garantida pelo teorema do limite central.

Agora, para validar que as amostras das populações têm as mesmas variações, deve-se aplicar o teste de variância Chi-quadrado.

4.4.1.1 Teste Chi-quadrado

Como foi explorado na seção 3.6.1, o teste Chi-quadrado (X^2) trabalha com duas hipóteses:

- H_0 : As variâncias observadas não são diferentes das variâncias esperadas;
- H_1 : As variâncias observadas são diferentes das variâncias esperadas.

Para se calcular X^2 , é necessário obter duas estatísticas denominadas $X^2_{calculado}$ e $X^2_{tabelado}$. O cálculo de $X^2_{calculado}$ para uma dada $THD_{referência}$, é dado pela equação 3.13.

O valor de $X^2_{tabelado}$, considerando-se o intervalo de confiança $\alpha = 0,995$ e $g.l = (5 - 1) \cdot (2.275 - 1) = 9.096$ obtidos da tabela 3.6, é igual a $X^2_{tabelado} = 8.395,36$. O valor de $X^2_{tabelado}$ é o mesmo para todas as THDs.

A tomada de decisão é feita comparando os dois valores de X^2 , onde:

- Se $X^2_{calculado} \geq X^2_{tabelado}$: Rejeita-se H_0
- Se $X^2_{calculado} < X^2_{tabelado}$: Aceita H_0

A Tabela 4.1 apresenta os resultados do cálculo de $X^2_{calculado}$ para as THDs de 1%, 7%, 11% e 19%.

Como o valor de $X^2_{calculado}$ é maior que $X^2_{tabelado}$ para todas as THDs, as variâncias observadas são diferentes das esperadas, não validando o teste ANOVA. Para durações inferiores a 1 ciclo, os erros dos métodos são geralmente muito grandes, principalmente, para o método LSH. Dessa forma, serão considerado apenas as durações superiores e igual a 1 ciclo.

Tabela 4.1: Valores de Chi-quadrado para cada THD

THD	$X^2_{calculado}$
1%	164.337,46
7%	24.307,58
11%	16.866,55
19%	15.931,05

A Tabela 4.2, apresenta os valores utilizados para cada parâmetro na formação dos sinais.

Tabela 4.2: Valores dos parâmetros do sinal superiores e igual a 1 ciclo

Parâmetro	Varição	Total
Duração (ciclos)	1, 1,2, ..., 3	11
Frequência (Hz)	59,4, 59,6, ..., 60,6	7
Taxa de amostragem (amostras/ciclo)	110, 118, ..., 294	24
Total de sinais gerados para cada THD		1.848

Assim como feito anteriormente, calcula-se os valores de $X^2_{calculado}$ e $X^2_{tabelado}$ afim de identificar a hipótese para cada THD.

A Tabela 4.3 apresenta os valores e os resultados do teste Chi-quadrado para as THDs de 1%, 7%, 11% e 19%.

Tabela 4.3: Valores de Chi-quadrado e resultados para cada THD

THD	$X^2_{calculado}$	$X^2_{tabelado}$	Hipótese
1%	6.342,30	7.078,65	H_0
7%	1.183,50	7.078,65	H_0
11%	966,59	7.078,65	H_0
19%	1.096,60	7.078,65	H_0

Como todas as hipóteses são válidas para todas as THDs, ou seja, a variância será a mesma para todas as amostras das populações, pode-se aplicar o teste ANOVA para essas amostras.

4.4.1.2 Teste ANOVA

Para essa etapa, como descrito na seção 3.6.2, define-se para uma dada THD

$g=5$ (grupos que representam os métodos).

A Tabela 4.4 apresenta os valores de \bar{X}_i e \bar{X} para cada método e nível de THD.

Com os valores definidos, é feito o cálculo da SST, SSE e SSD. Para isso, utiliza-se a equação 3.15.

Tabela 4.4: Resultados de \bar{X}_i e \bar{X} para os métodos

THD	AG \bar{X}_i	DFT \bar{X}_i	DHT \bar{X}_i	LSH \bar{X}_i	LM \bar{X}_i	\bar{X}
1%	598,49	594,05	939,41	476,66	2,31	522,18
7%	50,94	50,29	133,86	36,53	0,30	54,39
11%	26,64	28,92	113,98	17,69	0,19	37,49
19%	21,79	23,91	103,65	9,72	0,13	31,84

A Tabela 4.5 apresenta os resultados de SST, SSE e SSD para as THDs de 1%, 7%, 11% e 19%.

Tabela 4.5: Resultados de SST, SSE e SSD para cada THD

THD	SST	SSE	SSD
1%	$3,825 \cdot 10^9$	$8,453 \cdot 10^8$	$2,980 \cdot 10^9$
7%	$1,417 \cdot 10^8$	$1,772 \cdot 10^7$	$1,240 \cdot 10^8$
11%	$7,489 \cdot 10^7$	$1,446 \cdot 10^7$	$6,043 \cdot 10^7$
19%	$4,835 \cdot 10^7$	$1,260 \cdot 10^7$	$3,575 \cdot 10^7$

São definidos os valores da MS_E e MS_D utilizando-se as equações 3.16 e 3.17, respectivamente

A Tabela 4.6 apresenta os resultados para MS_E , MS_D e F para as THDs de 1%, 7%, 11% e 19%.

Tabela 4.6: Resultados de MS_E , MS_D e F para cada THD

THD	MS_E	MS_D	$F = \frac{MS_E}{MS_D}$
1%	$2,113 \cdot 10^8$	$3,226 \cdot 10^5$	$6,550 \cdot 10^2$
7%	$4,430 \cdot 10^6$	$1,342 \cdot 10^4$	$3,299 \cdot 10^2$
11%	$3,615 \cdot 10^6$	$6,543 \cdot 10^3$	$5,525 \cdot 10^2$
19%	$3,149 \cdot 10^6$	$3,872 \cdot 10^3$	$8,133 \cdot 10^2$

O p-valor calculado corresponde ao valor da distribuição Fisher com $g - 1 = 4$ e $N - g = 9.235$ graus de liberdade no intervalo de confiança de 95%. Esse valor corresponde a $p - valor = 0.178$

Como pode-se perceber da Tabela 4.6, nenhum valor de $F = \frac{MS_E}{MS_D}$ é próximo de 0,178. Dessa forma, $\mathbf{H}_{ANOVA-0}$ é rejeitada. Assim, conclui-se que existe diferença significativa entre as médias, validando estatisticamente os dados dos erros. Com isso, pode-se aplicar o método de Tukey.

4.4.1.3 Teste de Tukey

Para aplicar o teste de Tukey, deve-se calcular o desvio padrão das médias utilizando a equação 3.18. Em seguida, calcula-se o limite de decisão como sendo $L_d = 3 \cdot \Delta$. Dessa forma, escreve-se as médias dos grupos de forma a compará-las uma a uma.

A Tabela 4.7 apresenta os valores encontrados de Δ e L_d para as THDs de 1%, 7%, 11% e 19%.

Tabela 4.7: Valores dos limites de decisão

THD	Δ	$L_d(\%)$
1%	13,213	39,639
7%	2,695	8,087
11%	1,881	5,645
19%	1,447	4,342

As Tabelas 4.8 a 4.11, apresetam para as THDs de 1%, 7%, 11% e 19%, as comparações entre os métodos e o resultado quanto a significância das médias em relação a L_d .

Tabela 4.8: Comparações entre os métodos – THD 1%

Média dos erros entre os métodos	Valores (%)	Resultado (%)	L_d (%)	Significância da média
média _{AG} – média _{DFT}	598,49 – 594,05	4,44	39,64	não significativa
média _{AG} – média _{DHT}	598,49 – 939,41	-340,92	39,64	significativa
média _{AG} – média _{LSH}	598,49 – 476,66	121,83	39,64	significativa
média _{AG} – média _{LM}	598,49 – 2,31	596,18	39,64	significativa
média _{DFT} – média _{DHT}	594,05 – 939,41	-345,36	39,64	significativa
média _{DFT} – média _{LSH}	594,05 – 476,66	117,39	39,64	significativa
média _{DFT} – média _{LM}	594,05 – 2,31	591,74	39,64	significativa
média _{DHT} – média _{LSH}	939,41 – 476,66	462,75	39,64	significativa
média _{DHT} – média _{LM}	939,41 – 2,31	937,10	39,64	significativa
média _{LSH} – média _{LM}	476,66 – 2,31	474,35	39,64	significativa

Da Tabela 4.8, observa-se que não existe diferença significativa entre os métodos AG e DFT. Com isso, não tem como inferir qual deles se sobressai em relação ao outro. O método LM apresentou o melhor desempenho com valor de erro médio igual a 2,31%. A DHT apresentou o pior desempenho com erro médio de 939,41%. LSH é o segundo melhor método.

Da Tabela 4.9, nota-se que para a THD de 7%, a média dos erros entre AG e DFT não é significativa, pois o resultado da diferença ficou abaixo do especificado por L_d .

Tabela 4.9: Comparações entre os métodos – THD 7%

Média dos erros entre os métodos	Valores (%)	Resultado (%)	L_d (%)	Significância da média
média _{AG} – média _{DFT}	50,94 – 50,29	0,65	8,087	não significativa
média _{AG} – média _{DHT}	50,94 – 133,86	-82,92	8,087	significativa
média _{AG} – média _{LSH}	50,94 – 36,53	14,41	8,087	significativa
média _{AG} – média _{LM}	50,94 – 0,30	50,64	8,087	significativa
média _{DFT} – média _{DHT}	50,29 – 133,86	-83,57	8,087	significativa
média _{DFT} – média _{LSH}	50,29 – 36,53	13,76	8,087	significativa
média _{DFT} – média _{LM}	50,29 – 0,30	49,99	8,087	significativa
média _{DHT} – média _{LSH}	133,86 – 36,53	97,33	8,087	significativa
média _{DHT} – média _{LM}	133,86 – 0,30	133,56	8,087	significativa
média _{LSH} – média _{LM}	36,53 – 0,30	36,23	8,087	significativa

Como as demais médias são significativas, pode-se observar que o método LM seguido do método LSH apresentaram os melhores desempenhos, pois o valor médio do erro para esses métodos equivale a 0,30% e 36,53%, respectivamente, sendo eles os menores do grupo. O método DHT apresentou o pior desempenho com erro médio de 133,86%.

Tabela 4.10: Comparações entre os métodos – THD 11%

Média dos erros entre os métodos	Valores (%)	Resultado (%)	L_d (%)	Significância da média
média _{AG} – média _{DFT}	26,64 – 28,92	-2,28	5,65	não significativa
média _{AG} – média _{DHT}	26,64 – 113,98	-87,34	5,65	significativa
média _{AG} – média _{LSH}	26,64 – 17,69	8,95	5,65	significativa
média _{AG} – média _{LM}	26,64 – 0,19	26,45	5,65	significativa
média _{DFT} – média _{DHT}	28,92 – 113,98	-85,06	5,65	significativa
média _{DFT} – média _{LSH}	28,92 – 17,69	11,23	5,65	significativa
média _{DFT} – média _{LM}	28,92 – 0,19	28,73	5,65	significativa
média _{DHT} – média _{LSH}	113,98 – 17,69	96,29	5,65	significativa
média _{DHT} – média _{LM}	113,98 – 0,19	113,79	5,65	significativa
média _{LSH} – média _{LM}	17,69 – 0,19	17,50	5,65	significativa

Da Tabela 4.10, para THD de 11%, nota-se que a média dos erros para LM é de 0,19% enquanto as médias dos demais métodos é maior que 17,5%. Com isso, seu comportamento se destaca em relação aos outros métodos. Os métodos DFT e AG exibem médias dos erros distintas, entre si, mas como a diferença entre esses métodos apresentou valor inferior ao limite de decisão, não é possível inferir qual método se

destaca em relação ao outro. LSH, nesse caso, se comporta melhor que a DFT e que o AG por apresentar média dos erros de 17,69%, inferior a encontrada pela DFT, 28,92%, e por AG, 26,64%. DHT é o que possui a pior média dentre os métodos, com 113,98%.

Tabela 4.11: Comparações entre os métodos – THD 19%

Média dos erros entre os métodos	Valores (%)	Resultado (%)	L_d (%)	Significância da média
média _{AG} – média _{DFT}	21,79 – 23,91	-2,12	4,32	não significativa
média _{AG} – média _{DHT}	21,79 – 103,65	-81,86	4,32	significativa
média _{AG} – média _{LSH}	21,79 – 9,72	12,07	4,32	significativa
média _{AG} – média _{LM}	21,79 – 0,13	21,66	4,32	significativa
média _{DFT} – média _{DHT}	23,91 – 103,65	79,74	4,32	significativa
média _{DFT} – média _{LSH}	23,91 – 9,72	14,19	4,32	significativa
média _{DFT} – média _{LM}	23,91 – 0,13	23,78	4,32	significativa
média _{DHT} – média _{LSH}	103,65 – 9,72	93,93	4,32	significativa
média _{DHT} – média _{LM}	103,65 – 0,13	103,49	4,32	significativa
média _{LSH} – média _{LM}	9,72 – 0,13	9,59	4,32	significativa

A tabela 4.11, para THD de 19%, observa-se que a média dos erros para o método LM é menor que os dos outros métodos, com média de 0,13%. Entre AG e DFT não é possível inferir qual se destaca em relação ao outro pois o valor absoluto da diferença entre os métodos é inferior ao limite de decisão, comprovando que não há diferença significativa entre suas médias. LSH se destaca em relação a DFT e ao AG devido a uma média de 9,72%, enquanto que DFT possui 23,91%, e AG possui 21,79%. DHT possui a maior média dos erros com 103,65%.

Das Tabelas 4.8 a 4.11, de forma geral, nota-se que o método LM apresentou o melhor desempenho para todas as THDs. A média entre o AG e a DFT não apresentaram diferenças significativas entre suas médias. O método de LSH foi o segundo melhor método. Já DHT apresentou os piores resultados. Tal como foi observado nos gráficos das simulações da seção 4.3.1, quanto maior o nível da THD menor é o erro médio dos métodos.

4.4.2 Comparação dos métodos para durações inteiras

Com base no banco de sinais gerados pela Tabela 3.7, é calculado o erro absoluto, equação 3.12, dos métodos AG, DFT, DHT, LSH e LM, para todos os sinais em relação a uma dada THD. Assim é formado um banco de erros para cada método. Como feito na seção anterior, 4.4.1, aplica-se o teorema do limite central para garantir a distribuição

normal da ANOVA pois quando uma amostra aumenta, a distribuição amostral da sua média aproxima cada vez mais de uma distribuição normal. Com teste Chi-quadrado, é possível determinar se as amostras das populações têm as mesmas variações, e com isso garantir o 2º critério da ANOVA.

A Tabela 4.12, apresenta os valores calculados da $X^2_{calculada}$ e $X^2_{tabelada}$ além do resultado do teste de Hipótese para cada THD.

Tabela 4.12: Valores de Chi-quadrado e resultados para cada THD

THD	$X^2_{calculado}$	$X^2_{tabelado}$	Hipótese
1%	4,74	1.852,36	H_0
7%	0,64	1.852,36	H_0
11%	1,53	1.852,36	H_0
19%	2,34	1.852,36	H_0

Dessa forma, as variâncias observadas não são diferentes das variâncias esperadas. Como as duas condições para aplicar o teste ANOVA foram atendidas, realiza-se o teste.

As Tabela 4.13 a 4.16, apresentam para as THDs de 1%, 7%, 11% e 19% os resultados do teste ANOVA como descrito no modelo apresentado na Tabela 3.8.

Tabela 4.13: Quadro dos resultados da Anova para THD de 1%.

Fonte	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	$F = \frac{MS_E}{MS_D}$	p-valores
Entre grupos	$5,557 \cdot 10^5$	4	$1,389 \cdot 10^5$	$2,533 \cdot 10^2$	0,178
Erro	$1,379 \cdot 10^6$	524	$5,483 \cdot 10^2$		
Total	$1,935 \cdot 10^6$	2.624			

Tabela 4.14: Quadro dos resultados da Anova para THD de 7%.

Fonte	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	$F = \frac{MS_E}{MS_D}$	p-valores
Entre grupos	$1,320 \cdot 10^4$	4	$3,3 \cdot 10^3$	$2,503 \cdot 10^2$	0,178
Erro	$3,315 \cdot 10^4$	524	13,183		
Total	$4,636 \cdot 10^4$	2.624			

Das Tabela 4.13 a 4.16, nenhum valor de $F = \frac{MS_E}{MS_D}$ fica próximo de 0,178, dessa forma $H_{ANOVA-0}$ é rejeitada, ou seja, as médias não são todas iguais, validando assim estatisticamente os dados dos erros. Com isso, pode-se aplicar o método de Tukey.

Tabela 4.15: Quadro dos resultados da Anova para THD de 11%.

Fonte	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	$F = \frac{MSE}{MSD}$	p-valores
Entre grupos	$2,541 \cdot 10^4$	4	$6,353 \cdot 10^3$	$2,694 \cdot 10^2$	0,178
Erro	$5,930 \cdot 10^4$	524	23,581		
Total	$8,472 \cdot 10^4$	2.624			

Tabela 4.16: Quadro dos resultados da Anova para THD de 19%.

Fonte	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	$F = \frac{MSE}{MSD}$	p-valores
Entre grupos	$3,197 \cdot 10^4$	4	$7,992 \cdot 10^3$	$4,072 \cdot 10^2$	0,178
Erro	$4,936 \cdot 10^4$	524	19,626		
Total	$8,133 \cdot 10^4$	2.624			

A Tabela 4.17, apresenta os valores encontrados no cálculo do desvio padrão das médias, equação 3.18, e os valores dos limites de decisão para as THDs de 1%, 7%, 11% e 19%.

Tabela 4.17: Valores do desvio padrão das médias e limites de decisão

THD	Δ	$L_d(\%)$
1%	1,043	3,129
7%	0,162	0,485
11%	0,216	0,649
19%	0,197	0,592

As Tabelas 4.18 a 4.21, apresetam para as THDs de 1%, 7%, 11% e 19% as comparações entre os métodos, e o resultado quanto a significância das médias em relação a L_d .

Da Tabela 4.18, o método LM apresentou desempenho médio significativamente superior aos demais métodos, pois a média do seu erro é a menor. O método DHT se destaca em relação a DFT e a LSH. As médias dos erros entre a DHT e AG não são significativas, uma vez que a diferença da média desses métodos é inferior ao valor do limite de divergência. De forma semelhante, as médias dos erros entre os métodos AG, DFT e LSH não são significativas, porém o método DHT se destaca em relação aos métodos DFT e LSH, além disso sua média não é significativa em relação a AG, infere-se que o método AG se destaca em relação a DFT e LSH. De forma semelhante, pode-se deduzir que o método DHT se sobressai em relação ao AG. Assim, conclui-se que os métodos podem ser ordenados da forma LM, DHT, AG, (DFT e LSH). O

parêntese indica que não há diferença significativa entre a DFT e LSH.

Tabela 4.18: Comparações entre os métodos – THD 1%

Média dos erros entre os métodos	Valores (%)	Resultado (%)	L_d (%)	Significância da média
média _{AG} – média _{DFT}	41,26 – 41,61	–0,35	3,13	não significativa
média _{AG} – média _{DHT}	41,26 – 38,46	2,80	3,13	não significativa
média _{AG} – média _{LSH}	41,26 – 41,67	–0,41	3,13	não significativa
média _{AG} – média _{LM}	41,26 – 3,74	37,52	3,13	significativa
média _{DFT} – média _{DHT}	41,61 – 38,46	3,15	3,13	significativa
média _{DFT} – média _{LSH}	41,61 – 41,67	–0,06	3,13	não significativa
média _{DFT} – média _{LM}	41,61 – 3,74	37,87	3,13	significativa
média _{DHT} – média _{LSH}	38,46 – 41,67	–3,21	3,13	significativa
média _{DHT} – média _{LM}	38,46 – 3,74	34,72	3,13	significativa
média _{LSH} – média _{LM}	41,67 – 3,74	37,93	3,13	significativa

Tabela 4.19: Comparações entre os métodos – THD 7%

Média dos erros entre os métodos	Valores (%)	Resultado (%)	L_d (%)	Significância da média
média _{AG} – média _{DFT}	5,69 – 5,93	–0,24	0,49	não significativa
média _{AG} – média _{DHT}	5,69 – 2,54	3,15	0,49	significativa
média _{AG} – média _{LSH}	5,69 – 6,34	–0,65	0,49	significativa
média _{AG} – média _{LM}	5,69 – 0,50	5,19	0,49	significativa
média _{DFT} – média _{DHT}	5,93 – 2,54	3,39	0,49	significativa
média _{DFT} – média _{LSH}	5,93 – 6,34	–0,41	0,49	não significativa
média _{DFT} – média _{LM}	5,93 – 0,50	5,43	0,49	significativa
média _{DHT} – média _{LSH}	2,54 – 6,34	–3,80	0,49	significativa
média _{DHT} – média _{LM}	2,54 – 0,50	2,04	0,49	significativa
média _{LSH} – média _{LM}	6,34 – 0,50	5,84	0,49	significativa

Para a Tabela 4.19, o método LM se destaca seguido da DHT. O método AG sobressai comparado a LSH e sua média não é significativa em relação a DFT. Os métodos DFT e LSH não apresentam diferenças significativas entre suas médias, porém, como AG tem melhor desempenho que LSH e apresenta média semelhante a da DFT, conclui-se que DFT é melhor que LSH. De forma semelhante, pode-se deduzir que o método AG seja melhor que a DFT. Para a THD de 7% os métodos são arranjados por sua performance na seguinte ordem LM, DHT, AG, DFT e LSH.

Tabela 4.20: Comparações entre os métodos – THD 11%

Média dos erros entre os métodos	Valores (%)	Resultado (%)	L_d (%)	Significância da média
média _{AG} – média _{DFT}	4,30 – 3,81	0,49	0,65	não significativa
média _{AG} – média _{DHT}	4,30 – 10,15	-5,85	0,65	significativa
média _{AG} – média _{LSH}	4,30 – 4,77	-0,47	0,65	não significativa
média _{AG} – média _{LM}	4,30 – 0,26	4,04	0,65	significativa
média _{DFT} – média _{DHT}	3,81 – 10,15	-6,34	0,65	significativa
média _{DFT} – média _{LSH}	3,81 – 4,77	-0,96	0,65	significativa
média _{DFT} – média _{LM}	3,81 – 0,26	3,55	0,65	significativa
média _{DHT} – média _{LSH}	10,15 – 4,77	5,38	0,65	significativa
média _{DHT} – média _{LM}	10,15 – 0,26	9,8	0,65	significativa
média _{LSH} – média _{LM}	4,77 – 0,26	4,51	0,65	significativa

Da Tabela 4.20, o método AG não tem diferença significativa entre a média dos seus erros em relação aos métodos DFT e LSH. O método DFT se destaca em relação a LSH e DHT com erro médio de 3,81%. Assim, pode-se inferir que o método AG está entre a DFT e LSH, pois existe diferença significativa entre a DFT e LSH, o que não ocorre para DFT e AG bem como para AG e LSH. O método que mais destacado é LM, com erro médio de 0,26%. Em compensação, o pior desempenho é da DHT com a média do erro de 10,15%. Dessa maneira, os métodos são classificados da seguinte forma LM, DFT, AG, LSH e DHT.

Para a Tabela 4.21, o método LM apresenta o melhor desempenho, com erro médio de 0,17%, seguido da DFT que apresenta discrepância média de 2,66%. Os métodos AG e LSH exibem diferença média dos seus erros de 0,09% sendo inferior ao limite de divergência de 0,59%. Com isso suas médias não apresentam diferenças significativas. O método DHT obteve o pior desempenho com erro médio igual a 10,79%. Conclui-se que os métodos podem ser ordenados da seguinte forma: LM, DFT, (AG, LSH) e DHT. O (AG, LSH) indica que não há como estabelecer qual método se destaca em relação ao outro.

Das Tabelas 4.18 a 4.21, observa-se que o método LM apresentou o melhor desempenho. Os métodos AG e DFT apresentaram médias semelhantes exceto para a THD de 19% onde o resultado da diferença entre as médias de 0,64% superou o limite de divergência de 0,59%. A DHT teve bons resultados atrás LM para as THDs de 1% e 7%, porém para THDs de 11% e 19% obteve o pior desempenho. O método LSH apresentou o pior resultado para as THDs de 1% e 7% com média de erro de 41,67% e 6,34% para as respectivas THDs.

Tabela 4.21: Comparações entre os métodos – THD 19%

Média dos erros entre os métodos	Valores (%)	Resultado (%)	L_d (%)	Significância da média
média _{AG} – média _{DFT}	3,30 – 2,66	0,64	0,59	significativa
média _{AG} – média _{DHT}	3,30 – 10,79	-7,49	0,59	significativa
média _{AG} – média _{LSH}	3,30 – 3,39	0,09	0,59	não significativa
média _{AG} – média _{LM}	3,30 – 0,17	3,13	0,59	significativa
média _{DFT} – média _{DHT}	2,66 – 10,79	-8,13	0,59	significativa
média _{DFT} – média _{LSH}	2,66 – 3,39	-0,73	0,59	significativa
média _{DFT} – média _{LM}	2,66 – 0,17	2,49	0,59	significativa
média _{DHT} – média _{LSH}	10,79 – 3,39	7,40	0,59	significativa
média _{DHT} – média _{LM}	10,79 – 3,74	7,05	0,59	significativa
média _{LSH} – média _{LM}	3,39 – 0,17	3,22	0,59	significativa

4.5 AVALIAÇÃO DO TEMPO COMPUTACIONAL

Nesta seção, serão apresentados os resultados da avaliação do tempo computacional. O tempo computacional de cada método compreende ao período gasto para caracterizar a THD de um determinado sinal. Presume-se que este tempo esteja ligado ao esforço computacional, ou seja, quanto maior o tempo, maior o esforço.

Considerando-se os 2.275 sinais gerados (Tabela 3.6), identifica-se o tempo que cada método utilizou para calcular a THD. Com base no banco de tempos é obtido o tempo mínimo, máximo, médio.

A Tabelas 4.22 apresenta os tempos mínimos, máximos e médios em segundos, além do desvio padrão de cada método para as THDs de 1%, 7%, 11% e 19%.

Da Tabela 4.22, verifica-se que o método AG apresentou o menor tempo médio seguido do método DHT para todas as THDs. A DFT e o LSH apresentaram tempo médio próximo para as THDs de 1%, 11% e 19%. O método LM possui os maiores tempos computacionais, pois seu menor tempo, de 1,4106 s, encontrado para a THD de 19%, é superior aos tempos máximos dos demais métodos para todas as THDs. O método AG apresentou para todas as THDs o menor desvio padrão, demonstrando assim que os seus tempos estão mais próximos do tempo médio. Já o método LM apresentou os maiores desvios padrões. De forma geral, variar a ordem da THD, influência pouco o tempo médio e o desvio padrão dos métodos. Conclui-se dessa análise, que o AG apresenta os menores tempos médios e desvios. Com isso presume-se que esse método tenha o menor esforço computacional.

Tabela 4.22: Avaliação do tempo computacional em segundos

Método	THD	Tempo mínimo	Tempo máximo	$\bar{t}_{\text{método}}$	DP
AG	1%	0,0006	0,1493	0,0190	0,0184
	7%	0,0006	0,2020	0,0234	0,0233
	11%	0,0006	0,1243	0,0193	0,0190
	19%	0,0006	0,2013	0,0191	0,0187
DFT	1%	0,0030	0,6165	0,1003	0,0957
	7%	0,0030	0,5934	0,1137	0,1058
	11%	0,0029	0,4894	0,0980	0,0933
	19%	0,0030	0,5720	0,0970	0,0932
DHT	1%	0,0010	0,2389	0,0386	0,0373
	7%	0,0010	0,2815	0,0469	0,0444
	11%	0,0010	0,2588	0,0390	0,0380
	19%	0,0011	0,3480	0,0383	0,0378
LM	1%	1,6180	71,7721	15,7689	13,1325
	7%	1,4292	147,3659	18,4644	16,4442
	11%	1,6559	71,7990	15,2745	13,1147
	19%	1,4106	69,2983	14,9547	12,7500
LSH	1%	0,0096	0,7087	0,0912	0,0779
	7%	0,0101	1,1912	0,2333	0,1499
	11%	0,0107	0,4945	0,0989	0,0733
	19%	0,0101	0,3774	0,1017	0,0678

5 - CONCLUSÃO

O presente trabalho foi desenvolvido com o intuito de avaliar comparativamente os principais métodos de caracterização das THDs encontrados na literatura. Buscou-se analisar a influência dos principais parâmetros das THDs sobre a caracterização realizada por cada método. Primeiramente, definiu-se o que são harmônicas para posteriormente, se conceituar a THD e as normas vigentes. São também apresentados os fundamentos teóricos dos cinco métodos analisados, abordando em detalhes seu funcionamento. Por fim, realizou-se simulações para confirmar os objetivos propostos levando em consideração os métodos e as metodologias que se encontram no capítulo 3.

No primeiro conjunto de simulações, foram fixados parâmetros do sinal, alterando-se apenas um, de cada vez. Foram feitas simulações para THDs de 1%,7%,11% e 19%. Para a variação do número de ciclos constatou-se a existência de erros, mesmo que pequenos, para as THDs do método AG. Eles diminuem com o aumento do número de ciclos e das THDs. Nessa simulação, como o espectro é constituído por componentes múltiplas inteiras da fundamental, seria possível obter os mesmos resultados com a utilização de uma janela amostral de um ciclo de duração. Quando se analisa os ciclos não inteiros, LM apresentou erro nulo, o que é previsto devido a natureza do método de ajuste de curvas não-lineares. Os demais métodos convergem a zero apenas com ciclos inteiros. Com a variação da taxa de amostragem o erro é imperceptível para todos os métodos. Quando a taxa de amostragem não segue o critério de Nyquist, é possível concluir que o LSH é o que apresenta a pior performance. Para frequências variantes, conforme se aproximam da frequência fundamental todos os erros dos métodos convergem a zero. LM é o que melhor segue o sinal.

Na segunda simulação, para durações sem restrição de valores, foi executada a análise com todos os parâmetros variando simultaneamente. Ao se avaliar os ciclos, é possível concluir que quanto maior a THD menor será o RMSE. Para durações inteiras, o erro é nulo, o que nos indica que as contribuições da frequência e da taxa de amostragem são pequenas em relação ao número de ciclos. Como ocorreu no número de ciclos, quando se analisa a taxa de amostragem, quanto maior a THD, menor será o RMSE. Porém, mesmo com erros acima de 100%, como ocorreu com a THD de

1%, o erro é constante. Isto indica que as contribuições dos erros da taxa de amostragem são praticamente insignificantes no cálculo do RMSE. O mesmo ocorre com a frequência, confirmando assim, que o parâmetro duração tem contribuição significativa e predominante em relação aos demais parâmetros.

Quando há restrição do parâmetro duração para ciclos inteiros, a predominância da frequência é mais evidente. A variação brusca dos erros dos métodos que ocorre para a THD de 1% em relação a 7% é devido à susceptibilidade a ruídos.

Para avaliação comparativa entre os métodos, utiliza-se dois conjuntos de dados: um sem restrição nos sinais e o outro levando em consideração sinais com número de ciclos inteiros. Em ambos, primeiramente, garantiu-se a distribuição normal dentro da população, através do teorema do limite central, e igualdade da variância dessas populações, utilizando o teste Chi-quadrado. Posteriormente, validou-se estatisticamente os dados dos métodos com o teste ANOVA, e só assim aplicou-se o teste de Tukey.

No primeiro caso, para durações inferiores a 1 ciclo, $X_{Calculado}^2$ é superior ao $X_{Tabelado}^2$ sendo assim rejeita-se H_0 , o que invalida o teste para este intervalo de dados. Por tanto, é considerado valores a partir de 1 ciclo. Para tais valores, o índice do Chi-quadrado calculado foi inferior ao tabelado, validando-se assim o teste. Com 1.848 sinais gerados para cada THD, calcula-se as variáveis que compõem o teste ANOVA, e concluiu-se que os valores encontrados podem ser utilizados para aplicação do teste de Tukey. Ao aplicar o teste de Tukey, a classificação do melhor desempenho seguiu a seguinte ordem: LM, LSH, DFT, AG e DHT. Como a DFT e a AG possuem diferença entre suas médias insignificante, não é possível distinguir qual é melhor em relação a outra. Também é possível inferir que quanto maior o nível da THD, menor será o erro médio dos métodos.

A comparação dos métodos para durações inteiras foi feita a partir de 525 sinais gerados para cada THD. Calculou-se o erro absoluto de AG, DFT, DHT, LSH e LM, para todos os sinais para uma dada THD, e formou-se assim o banco de erros para cada método. Tal como realizado para o conjunto de dados sem restrições nos sinais, foi garantido a distribuição normal e a validação do teste Chi-quadrado. Os critérios ANOVA foram confirmados. Através do teste de Tukey foi possível depreender que LM é o método que possui a menor média de seu erro. Ele é o que possui o melhor desempenho para todas THD. Quanto maior a THD, maior será a relevância da média entre os métodos, alcançado o maior número de significância na THD de 19%, quando apenas a diferença entre as médias de AG e LSH é menor que L_d .

Com a avaliação do tempo computacional, comprovou-se que o método LM apresentou um maior tempo de processamento, enquanto o AG, em todas THDs, obteve menor desvio padrão, bem como tempos mínimos e máximos, seguido por DHT, DFT e

LSH. Sendo assim foi possível concluir que, no caso do esforço computacional, o AG é o melhor método. Neste tipo de avaliação deve-se levar em consideração as configurações do equipamento utilizado para efetuar as medições.

Em todas as simulações realizadas, LM se destacou por sua precisão, mas quando se levou em conta o esforço computacional, ele obteve o pior desempenho.

O método AG se destacou apenas no esforço computacional. Na avaliação da influência do parâmetro taxa de amostragem o erro associado ao método AG declinou inversamente à taxa de amostragem. Nas demais soluções, seus valores ficaram próximos aos valores da DFT.

A DHT segue o sinal da DFT para o primeiro conjunto de simulações, com exceção da variação da frequência. Para o segundo conjunto de simulações, seu erro será maior que o erro da DFT. Quando há restrição nos ciclos, ele volta a possuir valores próximos a DFT. Quando se aplicou Tukey a DHT, obteve o pior desempenho.

O LSH, em todas simulações, seguiu o sinal da DFT se destacando no teste de Tukey, no qual ele só não ultrapassou LM em melhor desempenho.

Dos casos estudados e com os resultados obtidos, é possível concluir que quando se deseja muita precisão, o melhor método é o LM. Em contra partida, o esforço computacional deste método é o maior. Se não há rigor na precisão, o AG será o melhor método a ser empregado, pois se obtém valores próximos dos valores desejados com uma maior rapidez, seguido pela DHT, DFT e LSH.

Considera-se que o estudo retratado permitiu um avanço na análise dos algoritmos utilizados na caracterização das THDs. Objetivando dar continuidade à análise da caracterização de tal distúrbio, propõe-se:

- Utilizar outros métodos na caracterização das distorções harmônicas;
- Realizar estudos afim de encontrar novos parâmetros para avaliar os métodos quanto as distorções harmônicas;
- Avaliar outros algoritmos empregados no método LSH, afim de obter melhores resultados;
- Realizar um trabalho com os mesmos objetivos deste, empregando-se experimentos realizados em laboratório; e
- Avançar os estudos utilizando os métodos AG, DFT, DHT, LM e LSH na caracterização das distorções inter-harmônicas;

Referências Bibliográficas

- [1] IEEE Std 519-1992. *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*. IEEE.
- [2] NBR IEC 61000-4-30. *Técnicas de Medição de Ensaio - Métodos de Medição*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [3] IEC 61000-4-7. *Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto*. Electromagnetic compatibility (EMC).
- [4] ANEEL. *PRODIST - Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional*, 2010.
- [5] MUSOLINO B. C. Algoritmo de determinação do coeficiente de amortecimento em materiais refratários de alta alumina. Master's thesis, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.
- [6] LATHI B. P. *Sinais e Sistemas Lineares*. Bookman Companhia ED, 2007.
- [7] SANKARAN C. *Power Quality*. Electric Power Engineering Series. Taylor & Francis, 2001.
- [8] MARTINS C. M. T. <http://www.mat.uc.pt/cmtm/ecwww/anova.pdf>.
- [9] DIA C. T. S. <http://www.esalq.usp.br/departamentos/lce/tadeu/aula6.pdf>.
- [10] ASHOK D. S. and SAMUEL G. L. Least square estimation of harmonic components in radial error measurement of a miniaturized machine tool spindle. In *Proceeding of 24th Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering (ASPE)*, pages 4–9, 2009.
- [11] Departamento de biometria da UFPA. <http://www.ufpa.br/dicas/biome/biopdf/bioqui.pdf>.
- [12] PICCININ F. The fast hartley transform as an alternative to the fast fourier transform. *Defence Science and Technology Organization Salisbury*, 1988.

- [13] NASCIMENTO F. A., BERGER P. A., and ROCHA A. F. Algoritmo para cálculo da distorção harmônica por meio da transformada rápida de hartley. *SBQEE*, 2007.
- [14] BIRD J., DE QUEIROZ L. C., and BARROSO J. L. *CIRCUITOS ELETRICOS: TEORIA E TECNOLOGIA*. CAMPUS - RJ.
- [15] FRANÇA J. A., FRANÇA M. B., KOYAMA M. H., and SILVA T. P. Uma implementação do algoritmo levenberg-marquardt dividido para aplicações em visão computacional. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, 30(1):51–62, jan./jun. 2009.
- [16] Araújo J. F., Lira G. R. S., and Ferreira T. V. Comparação de técnicas de estimação de harmônicos em sistemas de potência.
- [17] PROAKIS J. G. and MANOLAKIS D. G. *Digital signal processing: principles, algorithms, and applications*. Prentice-Hall International editions. Prentice Hall, 1996.
- [18] CARVALHO J. R. Estimação de harmônicos/interharmônicos: uma abordagem multitaxa., 2008.
- [19] MADESEN K., NIELSEN H. B., and TINGLEFF O. Methods for non-linear least squares problems. Informatics and Mathematical Modelling - Technical University of Denmark.
- [20] TAN L. and JIANG J. *Digital Signal Processing: Fundamentals and Applications*. Elsevier Science, 2013.
- [21] Environment-Compatibility levels for low frequency conducted disturbances and signaling in public power supply systems. *IEC 61000-2-2:2002*. Electromagnetic Compatibility (EMC).
- [22] DE SORDI M. A. Uma avaliação comparativa entre os métodos voltados à caracterização das variações de tensão de curta duração. *Trabalho de Graduação - Universidade de Brasília*, 2012.
- [23] Hayes M. H. *Teoria E Prob. de Processamento Digital de Sinais*. Coleção Schaum. BOOKMAN COMPANHIA ED, 2006.
- [24] ABU-SHIKHAH N. and DERICHE M. A robust technique for harmonic analysis of speech. In IEEE International, editor, *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2001. Proceedings. (ICASSP '01)*., 2001.

- [25] JONES N. B. and WATSON J. DMK. *Digital Signal Processing: Principles, Devices and Applications*. IEE control engineering series. Peregrinus, 1990.
- [26] RAMOS P. M., JANEIRO F. M., and RADIL T. On the use of multi-harmonic least-squares fitting for thd estimation in power quality analysis. *Metrology and Measurement Systems*, XIX(2):295–306, 2012.
- [27] Procobre - Instituto Brasileiro do Cobre. *Harmônicas nas instalações elétricas: causas, efeitos e soluções*.
- [28] MENEZES R. M. Desenvolvimento de um sistema distribuído de identificação em tempo real de parâmetros de qualidade de energia elétrica. Master's thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.
- [29] DA CUNHA S. B. and CARVAJAL S. *Estatística Basica - a Arte de Trabalhar com Dados*. Campus, 2009.
- [30] STEARNS S. D. and DAVID R. A. *Signal processing algorithms in MATLAB*. Prentice-Hall signal processing series. Prentice Hall, 1996.
- [31] DECKMANN S. M. and POMILIO J. A. Curso avaliação da qualidade da energia elétrica. DSCE-FEEC-UNICAMP.