

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

DIORGE DE SOUZA LIMA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR DE REDES ELÉTRICAS PARA
ESTUDOS DA PROPAGAÇÃO DE HARMÔNICOS**

DM 21 /2016

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2016

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

DIORGE DE SOUZA LIMA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR DE REDES ELÉTRICAS PARA
ESTUDOS DA PROPAGAÇÃO DE HARMÔNICOS**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador: Ubiratan Holanda Bezerra

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Lima, Diorge de Souza, 1992-
Desenvolvimento de um simulador de redes elétricas
para estudos da propagação de harmônicos / Diorge de Souza
Lima. - 2016.

Orientador: Ubiratan Holanda Bezerra.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
do Pará, Instituto de Tecnologia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica, Belém, 2016.

1. Sistemas de energia elétrica -
estabilidade. 2. Harmônicos (ondas elétricas).
I. Título.

CDD 23. ed. 621.3191

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

**TÍTULO DO TRABALHO: DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR DE
REDES ELÉTRICAS PARA ESTUDOS DA PROPAGAÇÃO DE HARMÔNICOS**

AUTOR: DIORGE DE SOUZA LIMA

Dissertação de Mestrado submetida à avaliação da banca examinadora aprovada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará e julgada adequada para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na Área de Sistemas de Energia Elétrica.

APROVADA EM: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra
(ORIENTADOR – UFPA)

Prof. Dr. João Paulo Abreu Vieira
(MEMBRO – UFPA)

Profa. Dra. Maria Emília de Lima Tostes
(MEMBRO – UFPA)

Prof. Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes
(MEMBRO – UFPA)

Profa. Dra. Carminda Célia Moura de Moura Carvalho
(MEMBRO EXTERNO – UFPA)

VISTO:

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelas
(COORDENADOR DO PPGEE/ITEC/UFPA)

EPÍGRAFO

Primeiro, lembrem-se de olhar para as estrelas lá no alto e não para seus pés lá embaixo. Segundo, nunca desistam do seu trabalho. O trabalho lhe dá sentido e propósito, a vida é vazia sem isso. Terceiro, se você for afortunado a ponto de encontrar amor, lembre-se de que ele está ali e nunca o jogue fora.

Stephen Hawking

DEDICATÓRIA

Aos meus pais que sempre estiveram ao meu lado, fornecendo amor e apoio sempre quando precisei.

Ao meu irmão e sua família que sempre estiveram na torcida. A toda minha Família.

In memoriam ao meu amado tio, Pedro Edinaelson.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar sempre presente em todos os momentos e por me permitir a continuar lutando para alcançar meus objetivos. A Ele também agradeço por manter minha família sempre ao meu lado.

Aos meus pais, Elza Maria e Francisco de Assis, que sempre estiveram presentes. Ao meu amado irmão Diego Lima juntamente a sua Família. A minha namorada Ariele Castro, por toda dedicação e amor demonstrado.

Ao meu primo Marcelo Silva e aos seus pais Ivonete e João Silva, obrigado por me aceitar em seu lar e pelo companheirismo e parceria durante toda essa jornada. Agradeço também aos meus familiares: primos, tios e tias que sempre estiveram na torcida.

Ao meu orientador e mestre, Professor Titular Dr. Ubiratan Holanda Bezerra, agradeço por aceitar a tarefa de me conduzir no âmbito da pesquisa, assim como aos ensinamentos compartilhados e pelo profícuo aprendizado.

Aos professores do CEAMAZON, agradeço pela disponibilidade e compreensão. Logo, meus agradecimentos aos professores: Dr. João Paulo Abreu Vieira, Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes, Dra. Maria Emília de Lima Tostes e Dra. Carmina Célia Moura de Moura Carvalho.

Ao meu amigo, Professor Dr. Wellington da Silva Fonseca, pela amizade e os diversos conselhos repassados durante a longa e verdadeira amizade. Agradeço também por disponibilizar computadores de alta performance do Campus de Ananindeua que estão sob sua responsabilidade.

Agradeço aos demais amigos do CEAMAZON, Allan Manito, Thiago Soares e Werbeston Douglas. Também deixo os meus sinceros agradecimentos ao Rodrigo Carvalho e Gabriel Vianna que não mediram esforços para me ajudar nos momentos que mais precisei.

Agradeço a CAPES e ao PPGEE pelo apoio e incentivo a pesquisa.

Por fim, a todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa.

SUMÁRIO

EPÍGRAFO	VI
DEDICATÓRIA.....	VII
AGRADECIMENTOS	VIII
SUMÁRIO.....	IX
LISTA DE FIGURAS	XIII
LISTA DE TABELAS	XVII
LISTA DE SÍMBOLOS	XVIII
LISTA DE ABREVIACÕES	XX
RESUMO	XXI
ABSTRACT	XXII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
1.3 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA	5
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	6
2 HARMÔNICOS NO SISTEMA ELÉTRICO	7
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	7
2.2 MÉTODOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DE HARMÔNICOS.....	8
2.3 INDICADORES DE DISTORÇÃO HARMÔNICA	10
2.3.1 Componentes Simétricas	10
2.3.2 Valor Eficaz (<i>RMS</i>)	11
2.3.3 Valor Eficaz Verdadeiro (<i>True RMS</i>).....	13
2.3.4 Medidas de Distorção Harmônica.....	13
2.4 NORMAS E REGULAMENTAÇÕES	14
2.4.1 Norma IEC	15

	X
2.4.2 Norma IEEE	15
2.4.3 Regulamentação ANEEL	16
2.5 CAUSAS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS	18
2.5.1 Cargas Lineares	18
2.5.2 Cargas Não Lineares	19
2.6 FONTES GERADORAS DE HARMÔNICOS	20
2.6.1 Fornos Elétricos a Arco.....	20
2.6.2 Lâmpadas Fluorescentes	24
2.6.3 Transformadores.....	25
2.6.4 Conversores Estáticos	27
2.7 EFEITO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS	29
2.7.1 Efeito Pelicular.....	29
2.7.2 Ressonância Harmônica	31
2.8 ELIMINAÇÃO DE HARMÔNICOS.....	32
2.8.1 Filtros Passivos.....	33
2.8.2 Filtros Ativos.....	34
2.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
3 TÉCNICAS DE MODELAGEM E ANÁLISE DE PROPAGAÇÃO DE HARMÔNICOS	36
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	36
3.2 FLUXO DE CARGA HARMÔNICO TRIFÁSICO	36
3.2.1 Modelos de Linhas e Cabos	36
3.2.2 Modelos de Transformadores.....	40
3.2.3 Modelos de Bancos de Capacitores.....	42
3.2.4 Modelos de Cargas	42
3.2.5 Modelo de Fonte de Corrente Harmônica	46
3.3 TÉCNICAS DE MODELAGEM	47

3.3.1	Varredura em Frequência (<i>Frequency Scan</i>)	48
3.3.2	Varredura em Frequência Harmônica (<i>Harmonic Frequency Scan</i>)	49
3.3.3	Método de Injeção de Corrente	49
3.3.4	Método de Fluxo de Carga de Interação Harmônica.....	50
3.3.5	Fluxo de Potência Harmônico utilizando o Método de Newton	50
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
4	SIMULADOR PARA ANÁLISE DE PROPAGAÇÃO DE HARMÔNICOS	52
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	52
4.2	ATP (<i>Alternative Transient Program</i>)	52
4.3	ATPDraw	53
4.3.1	Definição dos Componentes.....	53
4.3.2	ATP Setting	54
4.4	MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO NO ATP.....	55
4.4.1	Fontes de Tensão	56
4.4.2	Fontes Harmônicas de Corrente	57
4.4.3	Cabos e Condutores.....	58
4.4.4	Equipamentos de Manobras	59
4.4.5	Cargas Elétricas.....	60
4.4.6	Transformador	62
4.4.7	Banco de Capacitores	63
4.5	MODELAGEM DO SISTEMA	64
4.6	SIMULADOR	66
4.7	INTERFACE GRÁFICA.....	67
4.8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
5	RESULTADOS	70
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	70
5.2	ANÁLISES DOS RESULTADOS	71

5.2.1	Cancelamento Harmônico	71
5.2.2	Filtragem de Harmônicos em Transformadores	73
5.2.3	Saturação de Transformadores	74
5.2.4	Medidas de Correntes Harmônicas	80
5.2.5	Resultados com o Simulador	83
5.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	88
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
6.1	CONCLUSÕES	89
6.2	PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	90
6.3	PUBLICAÇÕES EM CONGRESSOS	90
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Crescimento das cargas eletrônicas no Brasil	2
Figura 2. Composição harmônica de um sinal distorcido.	9
Figura 3. Sinal distorcido com o seu espectro harmônico.....	9
Figura 4. Representação das componentes simétricas.....	11
Figura 5. Fonte alternada ideal alimentando uma impedância constante.....	12
Figura 6. Características de uma carga linear.....	18
Figura 7. Características de uma carga não linear.....	19
Figura 8. Representação de uma carga não linear provocando distorção na tensão.....	20
Figura 9. Partes constituintes de um forno elétrico a arco.....	21
Figura 10. Gráfico de tensão e corrente de um forno a arco.	22
Figura 11. Característica não linear da tensão versus a corrente do arco em função do tempo.	22
Figura 12. Formas de ondas da tensão de um forno elétrico a arco para as fases A, B e C.	23
Figura 13. Corrente no secundário do transformador do forno para as fases A, B e C.....	23
Figura 14. Conteúdo harmônico gerado por um forno durante a etapa de (a) fusão e de (b) refinamento.....	24
Figura 15. Forma de onda e espectro harmônico de uma lâmpada fluorescente com reator eletromagnético.	25
Figura 16. Forma de onda e espectro harmônico de uma lâmpada fluorescente com reator eletrônico.	25
Figura 17. Corrente distorcida com o transformador em condição de saturação.	26
Figura 18. Diagrama esquemático e curva de magnetização de um transformador.....	27
Figura 19. Formas de ondas e espectro harmônico de corrente de magnetização de um transformador.	27
Figura 20. Componentes de um conversor de frequência.	28
Figura 21. Formas de onda e espectro harmônicos de corrente em conversor trifásico.....	29
Figura 22. Distribuição de corrente em um condutor de seção circular.	30
Figura 23. Circuito ressonante em série.	31
Figura 24. Circuito ressonante em paralelo.	32
Figura 25. Filtros passivos com as disposições de conexões (a) em <i>shunt</i> e (b) em série com o circuito.	33

Figura 26. Filtros passivos <i>shunt</i> sintonizado.....	34
Figura 27. Representação esquemática do modelo π trifásico para linhas e cabos.	37
Figura 28. Representação esquemática do modelo 1 para linhas e cabos.	37
Figura 29. Representação esquemática do modelo 2 para linhas e cabos.	38
Figura 30. Representação esquemática do modelo 3 para linhas e cabos.	39
Figura 31. Representação esquemática do modelo 4 para linhas e cabos.	39
Figura 32. Representação do circuito de um transformador com dois enrolamentos.....	40
Figura 33. Representação esquemática do modelo 1 para transformadores.....	41
Figura 34. Representação esquemática do modelo 2 para transformadores.....	41
Figura 35. Modelo de capacitor em (a) compensação paralela e (b) compensação série.....	42
Figura 36. Modelo A para representação de cargas.....	43
Figura 37. Modelo B para representação de cargas.....	43
Figura 38. Modelo C para cargas.	44
Figura 39. Modelo D para representação de cargas.....	45
Figura 40. Modelo E para representação de cargas.....	46
Figura 41. Modelos de elementos de redes elétricas disponíveis no ATP Draw.	53
Figura 42. Seleção das opções disponíveis no <i>ATPDraw</i>	54
Figura 43. Janela disponível no ATP Settings.....	55
Figura 44. Forma de onda gerada pela fonte senoidal do tipo 14.....	56
Figura 45. Modelo de fonte de tensão no ATP Draw.....	57
Figura 46. Representação da geração trifásica no ATP Draw.....	57
Figura 47. Modelo de fonte harmônica monofásica no <i>ATPDraw</i>	58
Figura 48. Representação dos harmônicos como fonte de corrente no <i>ATPDraw</i>	58
Figura 49. Modelo RLC3 no <i>ATPDraw</i>	59
Figura 50. Representação das redes de distribuição no <i>ATPDraw</i>	59
Figura 51. Modelo de chaves seccionadoras no <i>ATPDraw</i>	60
Figura 52. Representação dos equipamentos de manobra no <i>ATPDraw</i>	60
Figura 53. Modelo de carga elétrica no <i>ATPDraw</i>	61
Figura 54. Representação das cargas elétricas trifásicas no <i>ATPDraw</i>	62
Figura 55. Modelo de transformadores no ATP Draw.	62
Figura 56. Representação dos transformadores trifásicos no ATP Draw.....	63
Figura 57. Modelo de capacitores no ATP Draw.	63
Figura 58. Sistema de distribuição industrial balanceado de 13 barras.....	64
Figura 59. Fluxograma da funcionalidade do simulador de redes elétricas.	66

Figura 60. Fluxograma do simulador de qualidade da energia.....	67
Figura 61. Opções disponíveis no simulador de redes elétricas na aba de simulação.....	68
Figura 62. Opções disponíveis no simulador de redes elétricas na aba de simulação.....	69
Figura 63. Amplitudes e ângulos das cargas harmônicas reproduzidas no sistema elétrico. ...	72
Figura 64. Tensões harmônicas no barramento (B03) para cargas com perfis semelhantes e diferentes.	72
Figura 65. Tensões harmônicas de 3ª ordem para diferentes conexões dos enrolamentos de transformadores.	73
Figura 66. Simulação transitória do transformador em estado de saturação conectado em (Δ -Y).....	74
Figura 67. Corrente de magnetização para as fases A, B e C do transformador T1 em saturação conectado em (Δ -Y).....	75
Figura 68. Espectro harmônico obtido com a saturação do transformador T1 para a fase A... 75	
Figura 69. Tensões harmônicas no barramento (B03) com os transformadores saturados e conectados em (Δ -Y).	77
Figura 70. Simulação transitória do transformador em estado de saturação conectado em (Y-Y).....	77
Figura 71. Corrente de magnetização para as fases A, B e C do transformador T1 em saturação conectado em (Y-Y).	78
Figura 72. Espectro harmônico para o transformador T3 conectado em (Y-Y).....	78
Figura 73. Tensões harmônicas no barramento (B03) com a saturação dos transformadores com conexão (Y-Y) dos enrolamentos.	80
Figura 74. Medidas de correntes harmônicas da carga não linear conectada no barramento (B11).....	81
Figura 75. Medidas de correntes harmônicas da carga não linear conectada no barramento (B29).....	81
Figura 76. Medidas de correntes harmônicas da carga não linear conectada no barramento (B49).....	82
Figura 77. Medidas de correntes harmônicas da carga não linear conectada no barramento (B51).....	83
Figura 78. Tensões harmônicas no barramento (B03) para uma carga não linear.	84
Figura 79. Tensões harmônicas no barramento (B03) para duas cargas não lineares.	85
Figura 80. Tensões harmônicas no barramento (B03) para três cargas não lineares.....	85
Figura 81. Tensões harmônicas no barramento (B03) para quatro cargas não lineares.	86

Figura 82. Tensões harmônicas no barramento (B03) com os transformadores conectados em (Y-Y) para quatro cargas não lineares.....	87
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Limites para distorção harmônica de tensão.....	16
Tabela 2. Limites para distorção harmônica total e individual de corrente.....	16
Tabela 3. Valores de referência globais para distorções harmônicas totais.	17
Tabela 4. Valores de referência globais para taxas de distorções harmônicas individuais.	17
Tabela 5. Características da fonte de tensão para as fases ABC.	56
Tabela 6. Valor de potência ativa e reativa consumida pela carga elétrica trifásica.	60
Tabela 7. Dados de impedância por unidade dos cabos de distribuição.....	64
Tabela 8. Dados por unidade das cargas elétricas.	65
Tabela 9. Dados dos transformadores.....	65
Tabela 10. Correntes harmônicas de transformadores em estado de saturação conectados em (Δ -Y).....	76
Tabela 11. Correntes harmônicas de transformadores em estado de saturação conectados em (Y-Y)..	79

LISTA DE SÍMBOLOS

$f_{(t)}$	Sinal senoidal distorcido
Hz	Hertz
ω	Frequência Angular
f	Frequência
δ	Grau de penetração harmônica
ρ	Resistividade do cabo
μ	Permeabilidade magnética
X_t	Reatância de curto-circuito do transformador
R	Resistência
L	Indutância
C	Capacitância
G	Condutância
Z	Impedância
P	Potência Ativa (MW)
Q	Potência Reativa (MVar)
S	Potência Aparente (MVA)
a_0, a_n, b_n	Coefficientes de Fourier
$i_{(t)}$	Corrente elétrica senoidal
$v_{(t)}$	Tensão elétrica senoidal
n_1, n_2	Enrolamentos do transformador
I_p	Valor de pico da corrente
T	Período
ϕ_i, ϕ_v	Fase arbitrária para a corrente e para a tensão
I_{RMS}	Corrente eficaz
V_{RMS}	Tensão eficaz
THD_I	Distorção harmônica total de corrente
THD_V	Distorção harmônica total de tensão
V_h	Valor eficaz da componente harmônica de tensão
I_h	Valor eficaz da componente harmônica de corrente
V_1	Valor eficaz da tensão fundamental

I_1	Valor eficaz da corrente fundamental
DTD	Taxa de distorção de demanda
I_L	Corrente de demanda máxima da carga
h	Ordem harmônica
I_h (espectro)	Espectro típico da corrente harmônica da carga
I_1 (espectro)	Espectro da corrente fundamental da carga
θ_1 (espectro)	Ângulo fundamenta da carga
θ_h	Ângulo harmônico real
I_1	Valor eficaz da corrente fundamental
I_a^1, I_b^1, I_c^1	Correntes de Sequência Positiva
I_a^2, I_b^2, I_c^2	Correntes de Sequência Negativa
I_a^0, I_b^0, I_c^0	Correntes de Sequência Zero
R_m	Resistência de Magnetização
R_p	Resistência do enrolamento primário
R_s	Resistência do enrolamento secundário
V_1	Valor eficaz da tensão fundamental
V_h	Valor eficaz da componente harmônica de tensão
V_p	Valor de pico da tensão
V_{RMS}	Tensão eficaz
X_C	Reatância capacitiva
X_L	Reatância indutiva
[Y]	Matriz admitância
[V]	Vetor n-dimensional de tensões nodais
[I]	Vetor n-dimensional de correntes injetadas
$Y_{Série}$	Admitância série
Y_{Shunt}	Admitância em paralelo

LISTA DE ABREVIACÕES

ATP:	<i>Alternative Transient Program</i>
AG:	Algoritmo Genético
ANEEL:	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA/CC:	Corrente Alternada / Corrente Contínua
CFP:	Correção de Fator de Potência
EMTP:	<i>Electromagnetics Transient Program</i>
FFT:	<i>Fast Fourier Transform</i>
IEC:	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE:	<i>Institute of Electric and Electronic Engineers</i>
PAC:	Ponto de Acoplamento Comum
PRODIST:	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
QEE:	Qualidade da Energia Elétrica
SEP:	Sistema Elétrico de Potência
SIN:	Sistema Interligado Nacional
TDH:	Taxa de Distorção Harmônica Total
TF:	Transformada de Fourier

RESUMO

O setor elétrico brasileiro tem enfrentado grandes mudanças devido a modernização dos equipamentos elétricos, principalmente quando se refere aos consumidores residenciais. Isso tem proporcionado um aumento considerável do nível de distorção de harmônicos nas redes elétricas de distribuição, o que pode ser justificado pelo uso acentuado de equipamentos baseados na eletrônica de potência, na tentativa de torná-los cada vez mais eficientes e compactos. Portanto, torna-se necessário a realização de diagnóstico quanto aos níveis de distorções harmônicas em sistemas elétricos. O monitoramento por analisadores de energia é a melhor forma de obter os dados do sistema elétrico, entretanto a simulação computacional é uma eficiente ferramenta capaz de reproduzir os distúrbios e o comportamento da rede elétrica para diferentes modos de operação. Logo, este trabalho tem como objetivo apresentar um ambiente computacional que auxilie nos estudos de propagação de harmônicos nos sistemas elétricos. Para isso, utilizou-se o *software* ATP (*Alternative Transient Program*) para a modelagem do sistema elétrico, o comportamento harmônico de uma carga não linear é representado por valores eficazes de medidas de correntes harmônicas em função do tempo. As medidas foram obtidas por meio de analisares de qualidade da energia conectados em uma rede de distribuição da região norte do Brasil. Logo, para esse conjunto de medidas, foi realizado um conjunto de simulações, disponibilizando ao usuário valores de tensões harmônicas para todos os barramentos do sistema elétrico. Portanto, com o simulador de redes elétricas será possível realizar estudos de propagação de harmônicos em diversos sistemas elétricos, podendo auxiliar como uma ferramenta de planejamento estratégico quanto ao uso de medidas mitigadoras ou mesmo para o controle estratégico das distorções harmônicas, a partir das avaliações dos principais momentos críticos de distorções harmônicas em todos os pontos da rede elétrica. Para demonstrar a utilização, o sistema industrial de 13 barras foi utilizado como um sistema teste para as análises nesta dissertação.

PALAVRAS-CHAVES: Simulador de Redes Elétricas, Harmônicos, Qualidade da Energia, ATPDraw.

ABSTRACT

The electricity sector in Brazil has faced many changes due to the modernization of electrical equipment, especially when it refers to residential consumers. This has provided a considerable increase in the level of harmonic distortion in the electric distribution networks, which can be explained by the large use of devices based on power electronics in an attempt to make them more efficient and compact. Therefore, it becomes necessary execute analysis of the levels of harmonic distortion in the power systems. Monitoring by power quality analyzer is the best way to collect data of the electrical system; however, the computer simulation is an efficient tool capable of reproducing the disturbances and behavior of the electric networks for different operating modes. Thus, this paper aims to present a computational environment that helps the harmonic propagation studies in electrical systems. For this, it was used the software ATP (Alternative Transient Program) for modeling the electrical system, the harmonic behavior of a nonlinear load is represented by effective values of harmonic currents in function of time. The measurements were obtained through power quality analysis of a distribution network in the North Region of Brazil. Thus, for this set of measures, a set of simulations was performed, providing for the users the values of harmonic voltages for all buses of the electrical system. Therefore, with the simulator of electrical networks it is possible perform harmonic propagation studies in several electrical systems, and it can work as a strategic planning tool for the use of mitigating measures or for the strategic control of harmonic distortion, from evaluations of most critical moments of harmonic distortion at all points of the network. To demonstrate its use, the industrial system of 13 bar was used as a test system for analysis in this dissertation

KEY-WORDS: Simulator of Electrical Grids, Harmonics, Power Quality, ATPDraw.

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

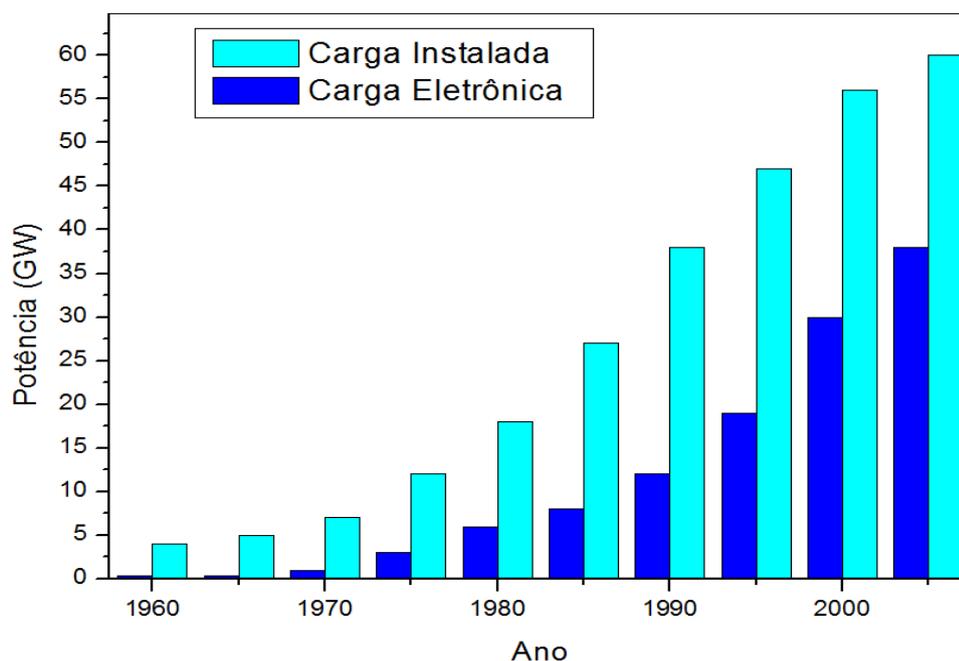
A qualidade da energia elétrica (QEE) está sendo discutida desde o final da década de 80, sendo de interesse tanto aos consumidores residenciais, comerciais e industriais, quanto as concessionárias. Este, sendo um tema que abrange uma série de fenômenos que possivelmente podem ocorrer nos sistemas elétricos em baixa, média e alta tensão (FERNANDES, 2009).

O aumento de interesse sobre esse tema, segundo Dugan *et al* (2004) se consolidou após o acréscimo e uso de equipamentos como: televisores, computadores, refrigeradores, condicionadores de ar, impressoras, entre outros, que são cargas que apresentam características não lineares e sensíveis a distúrbios no sistema elétrico de potência (SEP).

De acordo com Semlyen (2000), a presença de cargas eletrônicas tem aumentado consideravelmente nos últimos anos, o que tem possibilitado o surgimento de um novo cenário brasileiro. Devido a isso, observa-se a elevação nos níveis de distorção harmônica, as quais podem degradar a QEE. Atualmente, diversas pesquisas apresentam interesse nos métodos em análise reversa de harmônicos, sendo possível realizar a localização e identificação de fontes harmônicas (FERNANDES, 2009).

De acordo com Gonzalez (2012), na década de 80 o setor industrial apresentava maiores contribuições para a distorção harmônica de corrente ao se comparar com os consumidores comerciais e residenciais. No entanto, nos últimos anos, o consumo residencial e comercial teve um aumento expressivo quanto as distorções harmônicas de corrente. Isso é justificado pelo aumento da quantidade de equipamentos que utilizam a eletrônica de potência para o seu funcionamento. A Figura (1) apresenta o crescimento das cargas eletrônicas pela potência instalada no período de 1960 a 2005 no Brasil.

Figura 1. Crescimento das cargas eletrônicas no Brasil



Fonte: GARCIA, 2008. p.7, modificada.

A QEE está relacionada a um conjunto de alterações sujeitas a ocorrer no sistema elétrico, ou seja, qualquer problema nos níveis de tensão, corrente ou na frequência, resultando em falha ou má operação de equipamentos (LEÃO, 2014). O diagnóstico em um sistema elétrico quanto a sua conformidade pode ser realizado de duas maneiras: por meio de medições, identificando a presença de distorção harmônica de tensão e corrente, possibilitando um diagnóstico real do sistema, ou então por meio de simulações computacionais, obtendo computacionalmente os níveis de distorções nos pontos de interesse (MENDONÇA, 2012).

Dessa forma, neste trabalho será apresentado o desenvolvimento de um simulador para análises de propagação harmônica em redes elétricas. A partir disso, será possível analisar os níveis de distorção harmônica para diferentes topologias da rede elétrica.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico serão brevemente abordados de forma cronológica alguns trabalhos que relatam experiências de metodologias utilizadas para a determinação dos impactos de cargas geradoras de harmônicos na distorção harmônica de tensão de um sistema elétrico.

Em Xu *et al* (1999) foi proposto um método que possibilitou a decomposição das correntes e tensões harmônicas do PAC (ponto de acoplamento comum) em duas componentes, devido a contribuição do consumidor e da concessionária, sendo possível

quantificar a violação do consumidor e da concessionária dos limites permissíveis de distorção. De maneira semelhante em Xu *et al* (2000), o método proposto também realizou testes de sensibilidade quanto ao efeito do ângulo de fase, do erro de medição do ângulo de fase, do efeito da ressonância e do efeito do cancelamento harmônico.

Em Mazumdar *et al* (2008) é apresentado um método baseado em redes neurais artificiais para determinar o responsável pela contribuição harmônica (seja consumidor ou fornecedor) quando uma determinada carga é conectada em um PAC com sinal de tensão distorcido. De maneira similar, Barcelos (2012) utiliza essa inteligência computacional para a modelagem de cargas não lineares e também para estimação de sua contribuição harmônica.

Em Li *et al* (2003), foi proposto um método para determinar se a maior contribuição harmônica no ponto de acoplamento comum é devido ao consumidor ou a concessionária. Para isso, foi constituído um indicador confiável para identificar as fontes harmônicas dominantes.

Em Thomazella (2004) foi proposto o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para análise e estimação dos níveis de tensão induzidos em linhas de distribuição. Para isso, utilizou-se do ATP para quantificar e avaliar os níveis de sobretensão nas linhas de distribuição.

Em Pires (2006) foi proposto uma metodologia para caracterizar os harmônicos causados por aparelhos eletroeletrônicos de consumidores residenciais e comerciais a fim de avaliar o impacto destes harmônicos no sistema de distribuição de energia. Para isso, utilizou-se de medições dos cenários destas cargas não lineares.

Kumar *et al* (2007) apresenta em seu trabalho um algoritmo para estimar os harmônicos em sistemas elétricos usando algoritmo genético (AG), algoritmo genético híbrido – mínimos quadrados (*least square*) (AG-LS), otimização por enxame de partículas híbridas (*particle swarm optimization – least square*) (PSO-LS) e técnicas de redes neurais adaptadas (ANN). O objetivo deste trabalho é estimar a magnitude e ângulo de fase dos harmônicos através de análises da forma de onda. As quatro técnicas são analisadas e os resultados são comparados a porcentagem de erro no tempo para encontrar a técnica eficiente para estimar harmônicos.

Apresenta-se em Nunes (2007) uma análise da penetração harmônica em um sistema de distribuição devido às correntes injetadas por cargas não lineares residenciais e comerciais. Portanto, a partir de medições de tensões e correntes harmônicas e de dados físicos sobre o sistema, componentes presentes no sistema foram modelados computacionalmente no *software* ATP Draw. Logo, as correntes e tensões harmônicas distorcidas obtidas

computacionalmente foram analisadas e comparadas com os valores estabelecidos por normas internacionais de harmônicos.

Em Silva (2008) é apresentada a influencia da distorção harmônica de tensão e de corrente, assim como dos desequilíbrios de tensão, nos erros de medição de energia elétrica ativa em medidores eletrônicos trifásicos. Portanto, foi proposto um arranjo padrão de medição, sendo ensaiados os medidores para diferentes distúrbios, como variações na frequência, formas de onda de tensão e corrente distorcidas e sistemas desequilibrados.

Em Teixeira (2009) é apresentada a modelagem do sistema elétrico de um consumidor industrial de grande porte na tentativa de buscar melhorias para que o mesmo opere sem prejudicar a qualidade da energia da concessionária. Para isso, inicialmente foram realizadas medições, com objetivo de identificar as componentes harmônicas injetadas por essa empresa.

Em Rexhepi (2012), após demonstrar a importância de identificar as fontes harmônicas para evitar possíveis problemas que as mesmas podem proporcionar, é proposta uma metodologia capaz de identificar a localização da fonte harmônica e também a sua propagação. Esses estudos são realizados em uma rede elétrica de Kosovo através de modelos computacionais e medições.

Em Soares (2012) foi proposta uma metodologia para estimar a contribuição harmônica de múltiplas cargas geradoras de harmônicos na distorção de tensão em um sistema elétrico. Para isso, são criados modelos estatísticos que descrevem o comportamento da tensão harmônica em um sistema elétrico em função da corrente harmônica das cargas presentes neste sistema. Essa metodologia possibilitou a avaliação do impacto das cargas geradoras de harmônicos nos níveis de distorção harmônica de tensão do sistema elétrico em análise.

Em Cerbantes (2012) é proposto um algoritmo para simulação e avaliação dos impactos provocados por cargas especiais na qualidade da energia elétrica de redes de distribuição secundárias, visando aumentar a rapidez e precisão do processo de permissão da instalação de novos consumidores industriais. As cargas conectadas aos sistemas elétricos são modeladas como potência constante e os impactos do funcionamento destas cargas são avaliados através da comparação entre o estado inicial da rede e para cada estágio obtido com o funcionamento das cargas na rede.

Em Ali (2013) é realizado um estudo de propagação harmônica em uma rede elétrica industrial no ATP Draw. Para isso, modelou os diferentes tipos de componentes, tais como transformadores de potência, linhas de transmissão, cabos, cargas, além das fontes harmônicas que injetam correntes distorcidas de 3^a, 5^a, 7^a, 9^a e 11^a ordens. Isso tudo irá contribuir para a distorção da forma de onda da tensão e de corrente na rede elétrica.

Silva (2014) analisou computacionalmente os níveis de distorção harmônica gerados nos serviços auxiliares de uma planta de uma usina termoeletrica. Para isso, utilizou o *software* ATP para realizar as simulações no domínio do tempo, sendo modelados os geradores, transformadores, linhas e as cargas não lineares. A partir disso, foi possível determinar os níveis de distorção harmônica em diversos locais da planta na tentativa de facilitar a mitigação desse distúrbio.

Em Lima (2014) desenvolveu-se uma ferramenta computacional para modelar o carregamento não linear da rede, analisando o fluxo harmônico e consequentes interações com os dispositivos da rede.

No trabalho de Rehman (2014) apresenta-se uma metodologia para estimação de harmônicos em sistemas elétricos através de decomposição em valores singulares (*singular value decomposition* - SVD), transformada rápida de Fourier (FFT) e a técnica dos mínimos quadrados.

1.3 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

Este trabalho tem como objetivo apresentar um ambiente computacional para auxiliar os estudos da propagação de harmônicos em sistemas elétricos. Para isso, inicialmente deve-se modelar computacionalmente, conforme as solicitações do *software* ATP, uma rede elétrica para a realização dos estudos de propagação de harmônicos. As características das cargas não lineares são reproduzidas por medidas de correntes harmônicas que são obtidas por meio de analisadores elétricos. Essas medidas com valores eficazes de correntes harmônicas representam o comportamento harmônico das cargas não lineares em função do tempo. Logo, a partir desses dados, para cada valor eficaz da corrente harmônica em um instante de tempo é realizada uma simulação.

Os resultados fornecidos ao usuário apresentam valores de tensões harmônicas em todos os barramentos do sistema elétrico. Com isso, para cada instante de tempo, com a atualização dos valores eficazes das correntes harmônicas, apresenta-se um novo valor de tensão harmônica. Dentre as metodologias utilizadas para avaliar o comportamento da propagação de harmônicos no sistema elétrico, o monitoramento por equipamento de medição é a melhor forma de obter os dados do sistema elétrico, no entanto, a simulação computacional é uma eficiente ferramenta, capaz de reproduzir os distúrbios e o comportamento da rede elétrica para diferentes modos de operação, o que justifica o uso de metodologias computacionais para esses estudos.

Portanto, devido aos distúrbios causados por distorções harmônicas em equipamentos elétricos, torna-se importante o uso de medidas mitigadoras para atenuação e controle estratégico. Assim, o simulador de redes elétricas pode ser utilizado como uma ferramenta de auxílio do planejamento estratégico, permitindo a avaliação dos níveis de distorções harmônicas em diversos momentos, principalmente os momentos críticos.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para atingir os objetivos propostos nesta dissertação, os conteúdos foram organizados na seguinte estrutura:

O capítulo 2 apresenta a caracterização dos distúrbios elétricos relacionados a qualidade da energia, bem como as suas origens, as normas e regulamentações relacionadas, as consequências e as metodologias utilizadas para mitigação dos harmônicos.

No Capítulo 3 é realizada uma abordagem a respeito das técnicas de modelagem e análise de propagação de harmônicos no sistema elétrico. Portanto, são apresentadas as principais técnicas e modelos matemáticos utilizados para a representação do sistema elétrico.

No Capítulo 4 é demonstrada a importância da utilização do software ATP para análises e estudos de propagação harmônica em redes elétricas. Para isso, são demonstrados os procedimentos utilizados pelo software e a metodologia utilizada para a modelagem dos componentes elétricos que compõem uma rede elétrica. Por fim, são apresentadas as funcionalidades do simulador e as interfaces gráficas que permitem os estudos pelo usuário.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados para os estudos de propagação harmônica para diferentes topologias da rede elétrica. No capítulo 6 são abordadas as conclusões deste trabalho, assim como propostas de trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

2 HARMÔNICOS NO SISTEMA ELÉTRICO

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Juntamente ao aumento da capacidade de geração, transmissão e distribuição dos sistemas de energia elétrica, houve ampliação das cargas não lineares em diversos níveis da distribuição (GONZALEZ, 2005). Isso é justificado pela inserção de equipamentos eficientes, que utilizam a eletrônica de potência na tentativa de reduzir o consumo, e paralelamente contribuem para a distorção harmônica. Com isso, há um acréscimo de perdas na rede elétrica, além de diversos efeitos, como: ressonância harmônica, vibração, ruídos e fadiga nos ativos da rede elétrica (DUFEEY, 1989).

Dugan *et al* (2002) afirma que a distorção harmônica é causada por cargas não lineares que produzem correntes distorcidas (não senoidais) mesmo quando energizada por uma fonte não distorcida no sistema de potência. O aumento das cargas não lineares dos consumidores residenciais e comerciais no Brasil proporcionou um aumento considerável dos níveis de distorções harmônicas, paralelamente a isso, surgiram preocupações quanto aos níveis de distorções geradas por esses consumidores (SILVA, 2010).

As distorções harmônicas em sistemas elétricos podem ser extremamente prejudiciais para o funcionamento adequado dos equipamentos elétricos (ALMEIDA, 2012). Alguns efeitos que são ocasionados pela distorção harmônica, como: aquecimento dos condutores, alteração do torque e ruídos em motores e danos a bancos de capacitores devido a fenômenos de ressonância (ARRILLAGA *et al*, 2003).

Outro problema advindo dos harmônicos refere-se aos transformadores e máquinas síncronas, corroborando para o aumento das perdas elétricas e aquecimento, além da diminuição da vida útil (FIGUEREDO, 2006).

Idealmente, as tensões e correntes presentes nos diversos pontos da rede elétrica, inclusive nos pontos de acoplamento comum entre a rede e os consumidores, devem ser puramente senoidais. Dessa forma, no Brasil, de acordo com os Procedimentos de Rede (PRODIST), devem apresentar uma frequência próxima a 60 Hz. No entanto, a realidade tem mostrado que essas grandezas apresentam desvios em sua forma de onda senoidal (DUGAN, 2003 *apud* SOARES, 2012).

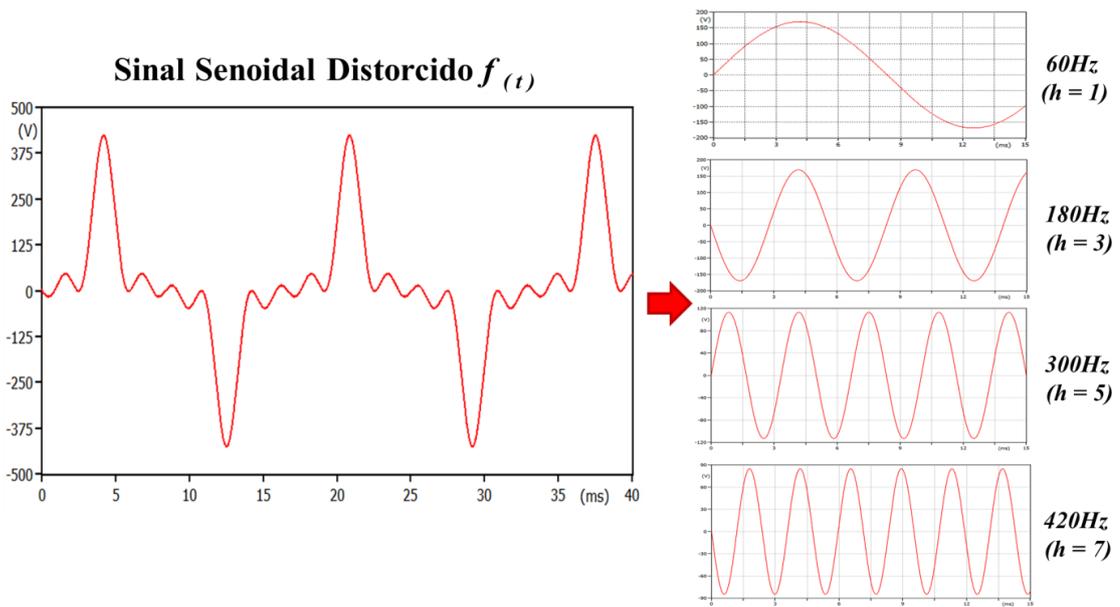
A partir disso, a presença de cargas harmônicas gera grandes preocupações quanto a qualidade da energia elétrica, propiciando a necessidade da realização de estudos para identificação e mitigação das cargas não lineares que contribuem para a distorção harmônica. Portanto, nesse capítulo inicialmente são apresentados métodos para a caracterização de harmônicos assim como os indicadores para a distorção harmônica de tensão e corrente. Por conseguinte, são apresentadas algumas normas e regulamentações associadas a vários aspectos da qualidade da energia, também sendo apresentadas as causas das distorções harmônicas e as principais fontes geradoras. Posteriormente, apresentam-se os efeitos das distorções harmônicas e as metodologias utilizadas para a mitigação.

2.2 MÉTODOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DE HARMÔNICOS

Para quantificar o grau de distorção presente na tensão e/ou corrente, pode-se utilizar a série de Fourier. Ao utilizar essa série, as formas de ondas distorcidas poderão ser analisadas separadamente e a distorção final é determinada pela superposição das várias componentes constituintes do sinal distorcido.

Após a decomposição dos sinais distorcidos através da série de Fourier em sinais distintos possuindo frequências múltiplas da frequência fundamental, conforme ilustrado na Figura (2), é apresentada a decomposição do sinal distorcido nas componentes harmônicas de 3^a, 5^a e 7^a ordens que compõem esse sinal. É válido ressaltar que para essa ilustração a frequência fundamental é de 60 Hz.

Figura 2. Composição harmônica de um sinal distorcido.

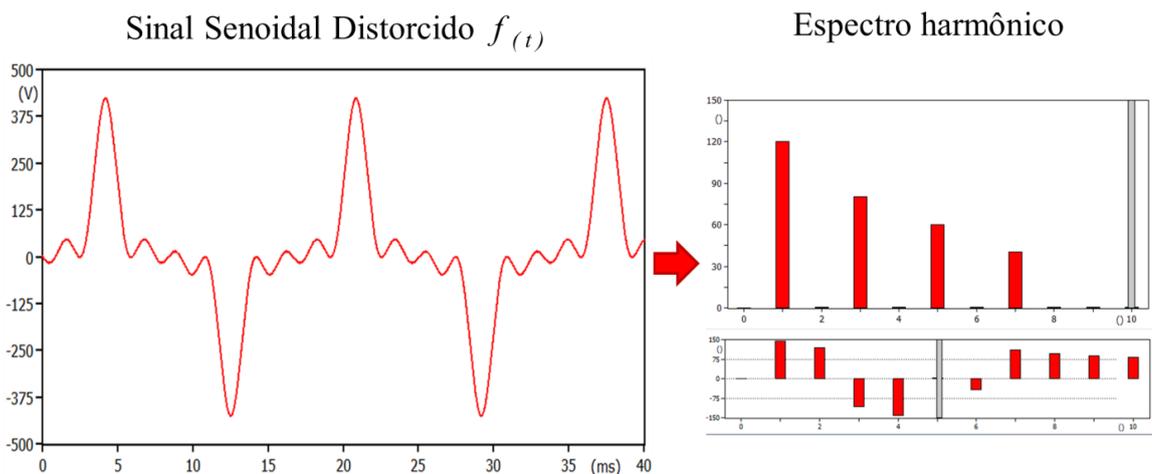


Fonte: O Autor.

A Figura (2) ilustra as diversas formas de onda periódicas distorcidas expressas como a soma de senoides, em que a frequência de cada uma é um múltiplo inteiro da frequência fundamental da onda distorcida. Essa soma é referida como uma série de Fourier.

Outra forma de verificar o conteúdo harmônico do sinal distorcido é por meio do seu espectro harmônico, conforme ilustrado na Figura (3), podendo ser identificadas as componentes harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordens do sinal da tensão.

Figura 3. Sinal distorcido com o seu espectro harmônico.



Fonte: O Autor

Portanto, a seguir será ilustrado na Equação (2.1) o somatório de Fourier que pode representar o sinal distorcido ilustrado anteriormente na Figura (2).

$$f_{(t)} = a_0 + a_1 \cdot \text{sen}(\omega t) + a_2 \cdot \text{sen}(2\omega t) + a_3 \cdot \text{sen}(3\omega t) + \dots + a_n \cdot \text{sen}(n\omega t) \\ + b_1 \cdot \text{cos}(\omega t) + b_2 \cdot \text{cos}(2\omega t) + b_3 \cdot \text{cos}(3\omega t) + \dots + b_n \cdot \text{cos}(n\omega t) \quad (2.1)$$

De maneira simplificada, a expressão para a série de Fourier pode ser representada pela Equação (2.2).

$$f_{(t)} = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \text{cos}(n\omega t) + b_n \cdot \text{sen}(n\omega t)) \quad (2.2)$$

Os coeficientes de Fourier a_0 , a_n e b_n são encontrados a partir das Equações (2.3), (2.4) e (2.5), respectivamente.

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f_{(t)} dt \quad (2.3)$$

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} f_{(t)} \text{cos}(n\omega t) dt \quad (2.4)$$

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} f_{(t)} \text{sen}(n\omega t) dt \quad (2.5)$$

Logo, através da série de Fourier uma função periódica de sinal senoidal com frequência fundamental f pode ser expressa como uma soma infinita de funções periódicas com frequências múltiplas da fundamental (SANKARAN, 2002).

2.3 INDICADORES DE DISTORÇÃO HARMÔNICA

A distorção é um termo que pode ser aplicado em muitas áreas da engenharia elétrica. Em assuntos relacionados à qualidade de energia, geralmente refere-se à deformidade da forma de onda da tensão ou da corrente alternada senoidal. Quando as mesmas tornam-se distorcidas, perdem a conformidade senoidal. Portanto, a seguir serão apresentados alguns tópicos apresentando os principais indicadores de distorção harmônica.

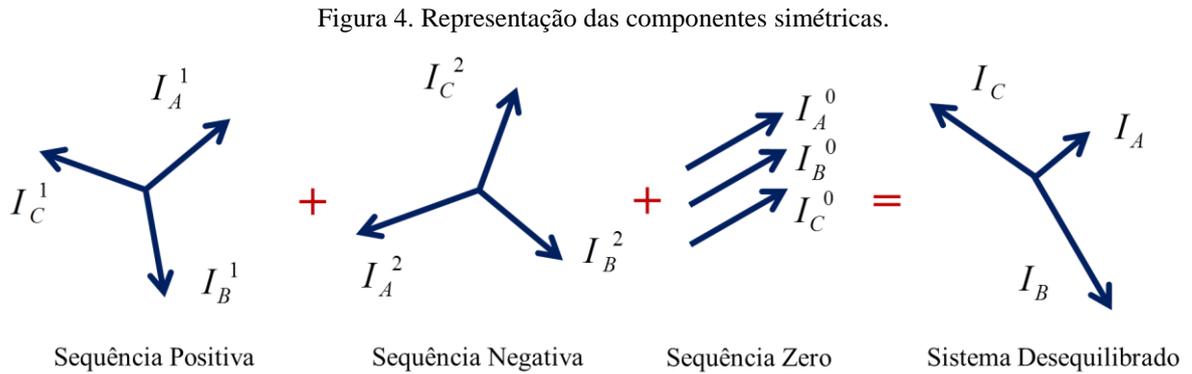
2.3.1 Componentes Simétricas

As componentes simétricas, também chamadas componentes de sequência, representam uma abordagem clássica para análise de sistemas trifásicos senoidais em condições desequilibradas (FORTESCUE, 1918 *apud* COSTA, 2012). Essa ferramenta permite a decomposição de um sinal trifásico periódico senoidal em três sistemas trifásicos compostos pelas componentes de sequência positiva, sequência negativa e de sequência zero.

Para um sistema trifásico simétrico equilibrado, uma análise monofásica pode ser estendida as demais fases, reduzindo a complexidade das análises. No entanto, para um

sistema desequilibrado ou assimétrico, as análises devem ser realizadas para cada uma das fases, independentemente.

Portanto, um sistema trifásico composto pela fase A, fase B e fase C, apresenta componentes de sequência zero (0), sequência positiva (1) e sequência negativa (2). Ou seja, um sistema trifásico composto por três fasores é decomposto por componentes de sequência, conforme apresentado na Figura (4).



Fonte: CARDOSO Jr, 2012, modificada, p. 01.

A Figura (4) ilustra os fasores A, B e C de um sistema desequilibrado trifásico a partir de três conjuntos de sequência positiva, sequência negativa e sequência zero, respectivamente, da esquerda para a direita. A soma fasorial dos componentes resulta no fasor original. Essa técnica também pode ser estendida para cada ordem harmônica h da sequência de fases correspondente a um conjunto de componentes simétricas.

2.3.2 Valor Eficaz (RMS)

Para uma fonte de tensão alternada, com tensão $v_{(t)}$, alimentando uma impedância constante, conforme apresentado na Figura (5), essa tensão pode ser descrita conforme a Equação (2.6) (MONTICELLI, 2003).

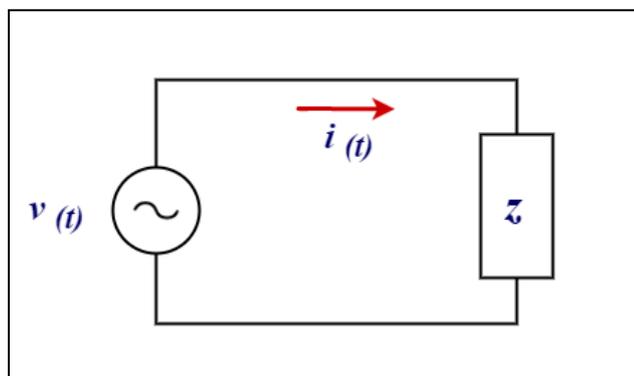
$$v_{(t)} = V_p \text{sen}(wt - \phi_v) \quad (2.6)$$

Sendo V_p o valor de pico da tensão, $w = 2\pi f$ a frequência angular juntamente a frequência elétrica e ϕ_v uma fase arbitrária. A corrente elétrica $i_{(t)}$ correspondente é dada pela Equação (2.7).

$$i_{(t)} = I_p \text{sen}(wt - \phi_i) \quad (2.7)$$

Sendo I_p o valor de pico da corrente, $w = 2\pi f$ a frequência angular juntamente a frequência elétrica e ϕ_i uma fase arbitrária.

Figura 5. Fonte alternada ideal alimentando uma impedância constante.



Fonte: O Autor.

O módulo do fasor associado a uma corrente senoidal pode ser obtido pela Equação (2.8). Essa equação também pode definir o valor da corrente eficaz.

$$|\vec{I}| = \frac{I_p}{\sqrt{2}} = I_{RMS} \quad (2.8)$$

O valor eficaz ou RMS (*Root Mean Square*) de uma onda periódica de corrente ou tensão está relacionado com um sinal AC corresponde ao mesmo nível DC, produzindo a mesma potência sobre a carga. Então, esse valor eficaz de uma corrente elétrica periódica de período T definida pelo valor da corrente contínua que dissipa a mesma energia em corrente alternada no intervalo de tempo igual a T resulta na Equação (2.9) (MONTICELLI, 2003):

$$I_{RMS} = \sqrt{\left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T i_{(t)}^2 dt} \quad (2.9)$$

Analogamente, pode-se definir o módulo do fasor para a tensão $v_{(t)}$, conforme apresentado na Equação (2.10).

$$|\vec{V}| = \frac{V_p}{\sqrt{2}} = V_{RMS} \quad (2.10)$$

Então, pode-se obter de maneira análoga a corrente, o valor eficaz da tensão, conforme apresentado na Equação (2.11).

$$V_{RMS} = \sqrt{\left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T v_{(t)}^2 dt} \quad (2.11)$$

2.3.3 Valor Eficaz Verdadeiro (*True RMS*)

A partir da necessidade de se medir o valor eficaz de sinais que não são senoidais, como por exemplo, os harmônicos, utilizam-se instrumentos com capacidade de medir o valor eficaz verdadeiro, também conhecido como (*True RMS*). Portanto, o uso desse tipo de equipamento é indispensável na realização de diagnósticos e mitigação de problemas causados por harmônicos em uma rede elétrica.

Logo, comercialmente os equipamentos de medidas usam os termos *RMS* e *True RMS* para diferenciar o sistema de medida utilizado. Dessa forma, para avaliar uma carga não linear, como por exemplo, uma lâmpada fluorescente com reator eletrônico, somente um medidor *True RMS* terá capacidade de fornecer resultados precisos.

2.3.4 Medidas de Distorção Harmônica

Devido a causa de diversos problemas relacionados à qualidade da energia estar estritamente relacionada aos componentes harmônicos, faz-se necessário o uso de normas e regulamentações na tentativa de estabelecer limites toleráveis de distorções. Para isso, necessita-se de indicadores para a quantificação e mitigação desses efeitos. Portanto, a seguir, serão apresentados alguns dos principais indicadores de harmônicos.

2.3.4.1 Distorção Harmônica Total

Os harmônicos são tensões ou correntes com frequências correspondentes a múltiplos inteiros da frequência fundamental. O grau de distorção harmônica presente na tensão e/ou na corrente pode ser quantificado matematicamente, essa caracterização é demonstrada pelo indicador intitulado distorção harmônica total (THD). As Equações (2.12) e (2.13) são apresentadas para o cálculo da taxa de distorção harmônica de tensão e corrente, respectivamente.

$$THD_v(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.12)$$

$$THD_i(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad (2.13)$$

Onde h é o número inteiro da ordem harmônica, V_h e I_h são os valores eficazes das componentes de tensão e corrente harmônica, respectivamente, V_1 e I_1 são os valores

eficazes da tensão e da corrente fundamentais, respectivamente. A THD é definida em consequência da necessidade de determinar numericamente os harmônicos presentes em um determinado ponto da instalação. Este indicador pode ser utilizado para auxiliar no diagnóstico de problemas nas redes elétricas.

2.3.4.2 Taxa de Distorção de Demanda

A taxa de distorção total de demanda (DTD) é um indicador utilizado pela recomendação IEEE 519 (1992) para quantificar a distorção harmônica de corrente em relação à demanda de corrente da carga. O valor DTD é uma informação obtida a partir da relação com a corrente máxima da carga, logo, para um valor elevado encontrado dessa taxa, possivelmente haverá uma elevada circulação de harmônicos no sistema elétrico. A Equação (2.14) apresenta o cálculo para encontrar a distorção total de demanda.

$$DTD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \quad (2.14)$$

Onde: I_L é a corrente de demanda máxima da carga na frequência fundamental medida no ponto de acoplamento comum entre a carga e o sistema e I_h é o valor eficaz da componente de corrente harmônica.

2.3.4.3 Fator K de Transformadores

Este é um fator amplamente relacionado aos transformadores, sendo importante para o cálculo do aumento de aquecimento de um transformador devido à circulação de correntes harmônicas. O mesmo pode ser calculador a partir da relação apresentada na Equação (2.15).

$$k = \sum_{h=1}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 \times h^2 \quad (2.15)$$

Onde: I_R é o valor eficaz da corrente nominal total, I_h é a corrente na ordem harmônica e h a ordem harmônica. No tópico a seguir serão apresentadas normas e regulamentações que estabelecem níveis máximos de harmônicos tolerados.

2.4 NORMAS E REGULAMENTAÇÕES

O regulamento técnico diz respeito a documento aprovado por órgãos governamentais, no qual se estabelecem as características de um produto ou dos processos e métodos de produção a eles relacionados, com inclusão das disposições administrativas aplicáveis e cuja

observância é obrigatória. As regulamentações podem referir-se a certas normas e tornar a conformidade com estas compulsórias, como exemplo de regulamentos técnicos são as resoluções da ANEEL (LEÃO, 2014).

No entanto, devido a diversos problemas que podem ser causados por harmônicos no sistema elétrico, tornou-se necessário uma regulamentação com intuito de estabelecer limites e níveis máximos de distorção harmônica, visando propiciar a compatibilidade da rede elétrica com os níveis de qualidade da energia fornecida.

Logo, de acordo com Soares (2012), atualmente, algumas organizações nacionais e internacionais estão voltadas para o desenvolvimento de recomendações associadas a vários aspectos da qualidade de energia, dentre eles a distorção harmônica. Algumas dessas organizações são: IEC (*International Electro Technical Commission*), IEEE (*Institute of Electric and Electronic Engineers*) e ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica).

2.4.1 Norma IEC

As normas IEC 61000 são estruturadas em partes, por funções. Cada parte é subdividida em outras especificações ou relatórios técnicos. Devido a um número crescente de produtos eletrônicos fabricados atualmente, esses equipamentos devem cumprir requisitos normativos internacionais de emissão e imunidade.

Portanto, o IEC desenvolveu normas com o intuito de estabelecer limites de correntes harmônicas a serem injetadas na rede pública de alimentação. A aplicação é realizada para diversos tipos de equipamentos. A norma IEC 61000-3-2 avalia e define limites para componentes harmônicas de corrente de equipamentos com corrente nominal de entrada igual ou menor do que 16A por fase. Equipamentos com corrente nominal maior que 16A por fase e menor ou igual a 75A por fase são previstos na norma IEC 61000-3-12 (LEÃO, 2014).

A norma IEC 61000-3-4 refere-se a equipamentos elétricos e eletrônicos com corrente nominal de entrada superior a 16A por fase, conectados a sistemas de distribuição de baixa tensão (para sistemas monofásicos com tensão nominal de até 240V e sistemas trifásicos com tensão nominal de até 600V). Os limites definidos nessa norma referem-se a equipamentos elétricos e eletrônicos operando a 50 ou 60 Hz.

2.4.2 Norma IEEE

A norma 519 que trata de limites harmônicos proposta no documento IEEE (2014) (*Recommended Practices and Requirements for Harmonics Control in Electrical Power Systems*) apresenta uma abordagem conjunta entre concessionárias e clientes para limitar o

impacto de cargas não lineares, definindo níveis aceitáveis de tensão e de correntes harmônicas para o ponto de entrega de energia pela concessionária ou ponto comum de conexão (PCC).

Portanto, essa norma descreve os principais fenômenos causadores de distorção harmônica, além de abordar conteúdo a respeito das fontes causadoras de harmônicos. Também são apresentados o comportamento do sistema na presença de harmônicos e métodos de medição e de análise, entre outros. Além disso, são definidos limites de distorção de harmônicos para a tensão conforme demonstrados na Tabela (1).

Tabela 1. Limites para distorção harmônica de tensão.

Tensão no PAC	Distorção Individual	THDv
69 kV e abaixo	3%	5%
69001 até 161000 V	1,5%	2,5%
Acima de 161000 V	1%	1,5%

Fonte: IEEE, 2014.

Os limites para a distorção harmônica total e individual de corrente pode ser demonstrada na Tabela (2).

Tabela 2. Limites para distorção harmônica total e individual de corrente.

Máxima corrente harmônica em porcentagem de corrente de carga (I_0 – valor da componente fundamental); (I_{CC} - corrente de curto-circuito)						
Harmônicos Ímpares						
$\frac{I_{CC}}{I_0}$	< 11	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 < h$	THD _i (%)
< 20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20 - 50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50 - 100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100 - 1000	12	5,5	5	2	1	15
> 1000	15	7	6	2,5	1,4	20

Fonte: IEEE, 2014.

2.4.3 Regulamentação ANEEL

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), órgão responsável pela regulamentação do setor elétrico brasileiro, define um conjunto de regulamentos para o sistema de distribuição por meio de documentos sob a denominação de Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica (PRODIST) no Sistema Interligado Nacional (SIN).

Portanto, a ANEEL desenvolveu vários módulos no PRODIST com intuito de manusear alguns aspectos do sistema de distribuição. Dentre esses módulos, destaca-se o Módulo 8, sobre Qualidade de Energia Elétrica, definindo terminologias, caracterizando fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos a conformidade de tensão em regime permanente, propondo limites de distorção harmônica total e individual de tensão. Os limites de distorção harmônica total estão demonstrados na Tabela (3).

Tabela 3. Valores de referência globais para distorções harmônicas totais.

Tensão nominal do barramento	Distorção harmônica total de tensão (%)
$V_N \leq 1kV$	10
$1kV < V_N \leq 13,8kV$	8
$13,8kV < V_N \leq 69kV$	6
$69kV < V_N \leq 230kV$	3

Fonte: PRODIST, 2012

O fenômeno de distorção harmônica de tensão ocorre continuamente em um sistema, por isso tem os valores de seus indicadores apurados normalmente por meio de campanhas de medição realizadas em períodos de 7 (sete) dias consecutivos e em casos específicos, pode-se adotar medição por períodos mais longos, ou mesmo contínuos, em função de análises técnicas e situações especiais. Os limites de distorção harmônica individual estão demonstrados na Tabela (4).

Tabela 4. Valores de referência globais para taxas de distorções harmônicas individuais.

Ordem Harmônica	Distorção harmônica individual de tensão (%)			
	$V_N \leq 1kV$	$1kV < V_N \leq 13,8kV$	$13,8kV < V_N \leq 69kV$	$69kV < V_N \leq 230kV$
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
3	6,5	5	4	2
9	2	1,5	1,5	1
15	1	0,5	0,5	0,5

21	1	0,5	0,5	0,5
>25	1	0,5	0,5	0,5
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
>12	1	0,5	0,5	0,5

Fonte: PRODIST, 2012

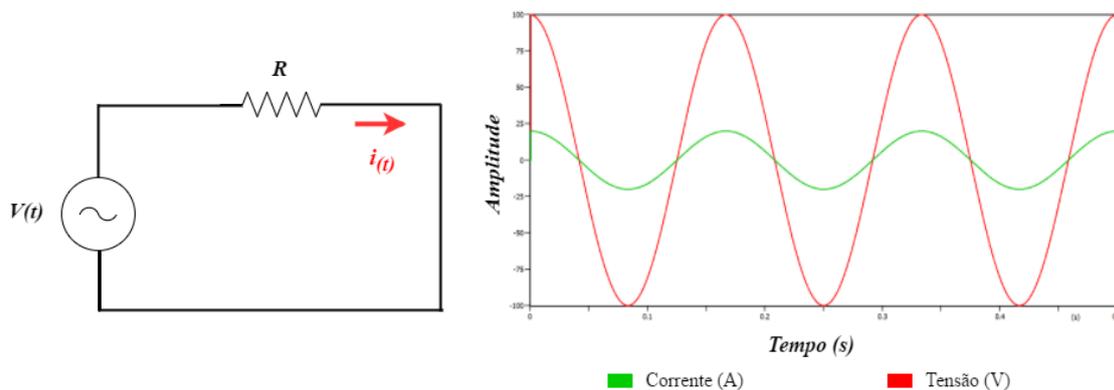
2.5 CAUSAS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Para estudar as características dos sistemas elétricos é usual considera-los como resultado da interligação e interação de diferentes componentes básicos, como fonte de alimentação, componentes de rede e carga elétrica. Logo, o objetivo deste tópico é apresentar os tipos de cargas, estas lineares ou não lineares, sendo descrito como as componentes harmônicas são geradas e o que é afetado no sistema elétrico.

2.5.1 Cargas Lineares

Uma carga é dita linear quando a corrente que circula por ela é diretamente proporcional à tensão aplicada. Logo, em geral são constituídas por resistores, indutores não saturáveis e capacitores de valores fixos. Assim, os mesmos drenam correntes de mesma forma de onda da fonte de alimentação.

Figura 6. Características de uma carga linear.



Fonte: O Autor.

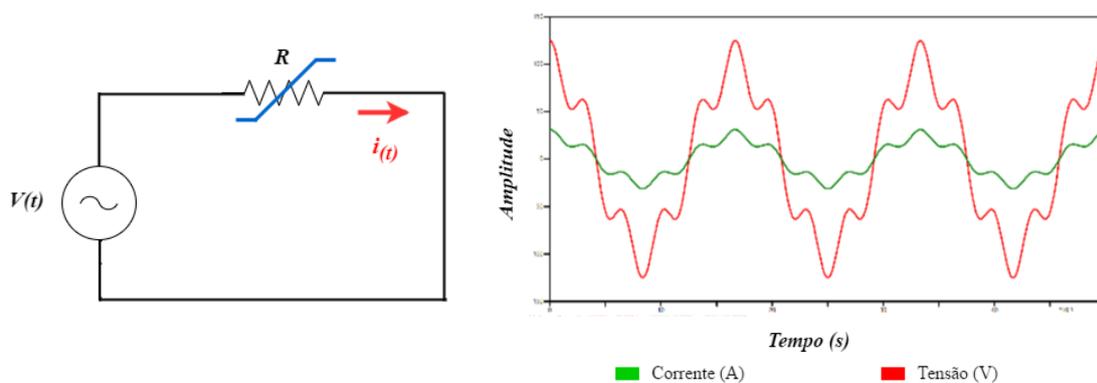
As cargas puramente resistivas são cargas lineares, pois a forma de onda de tensão e corrente são similares às fornecidas pela fonte de alimentação. Outro exemplo são as cargas

indutivas e capacitivas, cuja relação entre tensão e corrente se dá através de operações de derivação ou integração, onde as formas de onda de corrente absorvidas pelas cargas não são distorcidas, apenas adiantadas ou atrasadas 90° em relação à fonte de alimentação.

2.5.2 Cargas Não Lineares

Caracteriza-se por cargas não lineares quando a forma de onda de corrente absorvida pela carga não é semelhante a forma de onda de tensão, isso é possível devido a uma série de fatores como por exemplo, o uso de chaveamentos eletrônicos de uma carga, que permite a condução de corrente de carga durante um período para uma determinada frequência. As cargas não lineares são as principais causadoras de distorções harmônicas no sistema elétrico (GALHARDO, 2003).

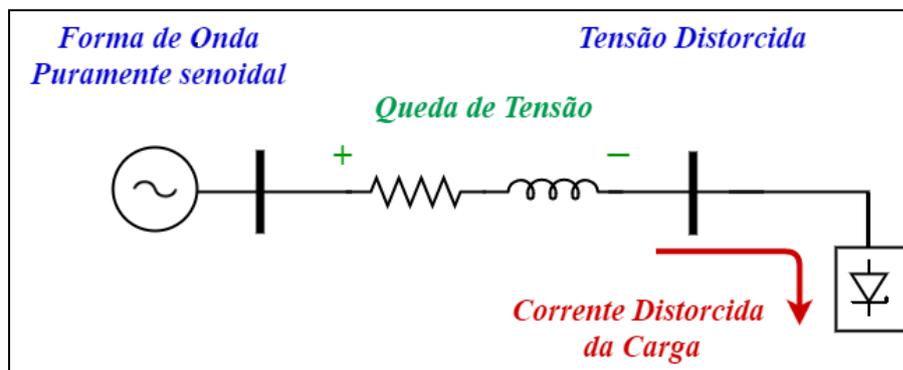
Figura 7. Características de uma carga não linear.



Fonte: O Autor.

As cargas não lineares, embora alimentadas por uma fonte de tensão puramente senoidal, absorve uma corrente distorcida em virtude da não proporcionalidade existente entre tensão e corrente, que por sua vez provoca quedas de tensão em cada harmônico com sua passagem pela impedância série dos cabos e linhas de transmissão, e, conseqüentemente, causando uma distorção na tensão em diversos pontos de uma rede elétrica. Devido a isso, as cargas não lineares são tidas como fontes de correntes harmônicas, que, quando conectadas a um sistema elétrico, injetam correntes harmônicas. A Figura (8) demonstra como uma carga não linear provoca o surgimento de distorção de tensão em uma rede elétrica.

Figura 8. Representação de uma carga não linear provocando distorção na tensão.



Fonte: DUGAN *et al*, 2003, p. 171.

A presença de harmônicos no sistema elétrico faz com que os mesmos operem em condições não senoidais. Logo, simplificações realizadas por engenheiros nas análises para a frequência fundamental não são aplicáveis (DUGAN *et al*, 2003).

2.6 FONTES GERADORAS DE HARMÔNICOS

Com o advento da eletrônica de potência cada vez mais aliada aos equipamentos elétricos e às necessidades de alternativas energéticas, houve um crescimento acentuado de cargas não lineares, tanto para os consumidores residenciais como para os comerciais e industriais (GHOSH *et al*, 2001 *apud* LIMA *et al*, 2016). Portanto, com o aumento expressivo de equipamentos baseados na eletrônica de potência, como fornos de micro-ondas, computadores, televisores e condicionadores de ar entre outros, tem aumentado a distorção harmônica de corrente e de tensão dos sistemas elétricos (OWEN, 1998 *apud* LIMA *et al*, 2016).

Logo, esses diferentes setores de consumo estão dominados por uma variedade de equipamentos com características não lineares, que basicamente recaem em três categorias: os dispositivos eletrônicos de potência, os ferromagnéticos e os a arco. Os dispositivos eletrônicos estão presentes em equipamentos como conversores estáticos monofásicos e trifásicos. Os dispositivos ferromagnéticos são representados pelos transformadores e máquinas rotativas e os dispositivos a arco estão presentes na iluminação a descarga ou fornos elétricos a arco (TOSTES, 2003). Portanto, neste tópico serão apresentadas as principais fontes geradoras de harmônicos contidas no atual sistema de distribuição.

2.6.1 Fornos Elétricos a Arco

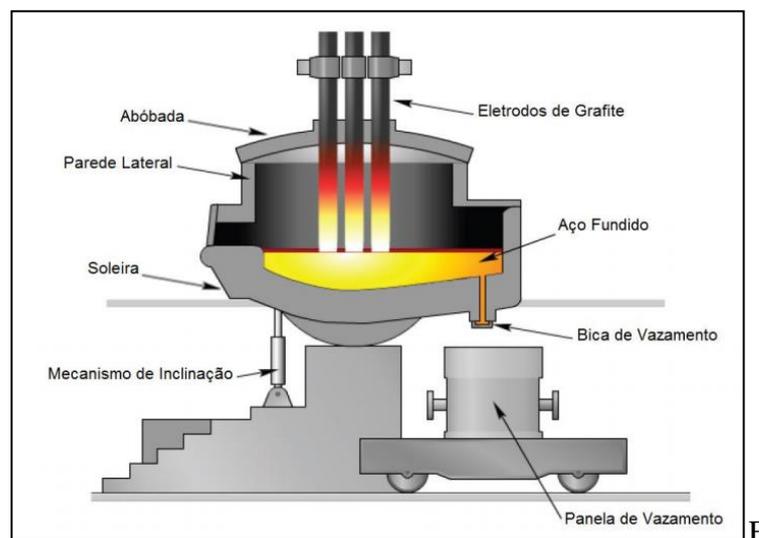
São equipamentos normalmente utilizados em empresas siderúrgicas no processo de fusão e refinamento de metais, principalmente do ferro, para a produção de aço (SOARES,

2012). Os fornos elétricos a arco operam em ciclos que se iniciam com o carregamento do forno, subsequente ignição do arco, finalizando-se com o metal fundido, posteriormente o processo é reiniciado novamente (MELLO, 1988).

Esses fornos são equipamentos eletro-intensivos, perturbadores, com grande impacto na qualidade de energia. As perturbações comumente observadas são correntes harmônicas medidas no alimentador que podem ocasionar distorções na tensão ou mesmo interharmônicos. Também é percebido o desequilíbrio de tensão e corrente, assim como a cintilação e flutuação luminosa. Essas flutuações de tensão tornam-se mais perceptíveis quanto maior for a potência dos fornos em relação a potência de curto-circuito no PCC (Ponto de Acoplamento Comum).

De acordo com Mello (1988), as correntes harmônicas produzidas pelos fornos originam-se da não linearidade apresentada pela característica entre tensão e corrente do arco com a variação aleatória a que fica submetida a tensão de arco, devido processo de fusão e ao constante movimento do arco. Segundo Tostes (2003), esses equipamentos transformam energia elétrica em energia térmica através do arco elétrico. A Figura (9) ilustra a estrutura de um forno elétrico a arco trifásico.

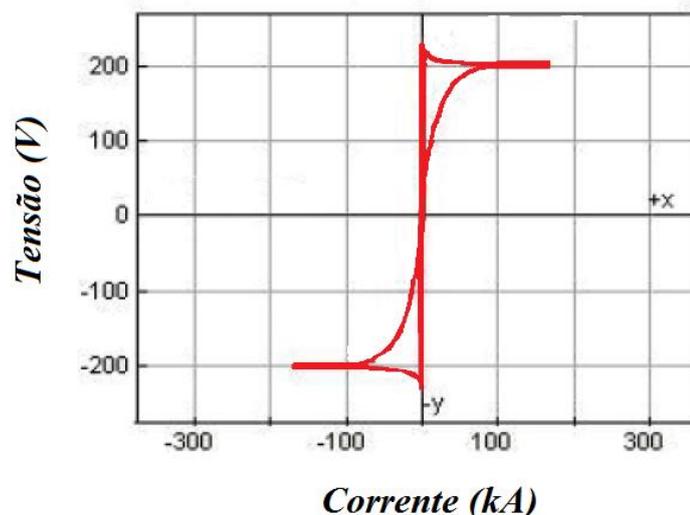
Figura 9. Partes constituintes de um forno elétrico a arco.



Fonte: GORNERUP *et al*, 2012.

Os fornos a arco são considerados como uma fonte de distúrbio intenso, uma vez que os mesmos são responsáveis pelo aparecimento de desequilíbrios, flutuações de tensão e correntes harmônicas (SOARES, 2012). Segundo Arrillaga (2003), a relação tensão e corrente de um forno a arco possui uma forma quase trapezoidal, a Figura (10) demonstra essa curva trapezoidal da tensão e corrente com o funcionamento do forno.

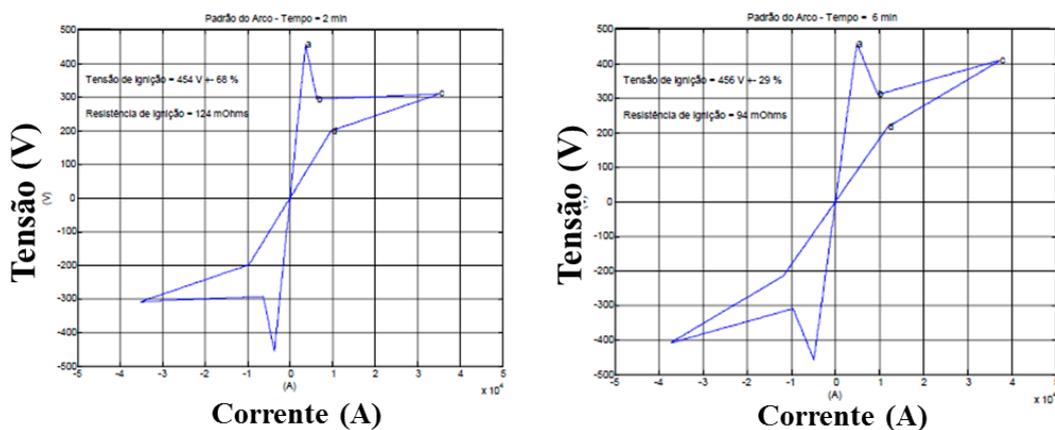
Figura 10. Gráfico de tensão e corrente de um forno a arco.



Fonte: EBERHARD, 2011, p. 91.

Na Figura (11) são ilustrados os valores de tensão e corrente durante o funcionamento de um forno a arco, sendo as medições realizadas no secundário de um transformador nos instantes de tempo de 2, 4, 6 e 7 minutos, respectivamente.

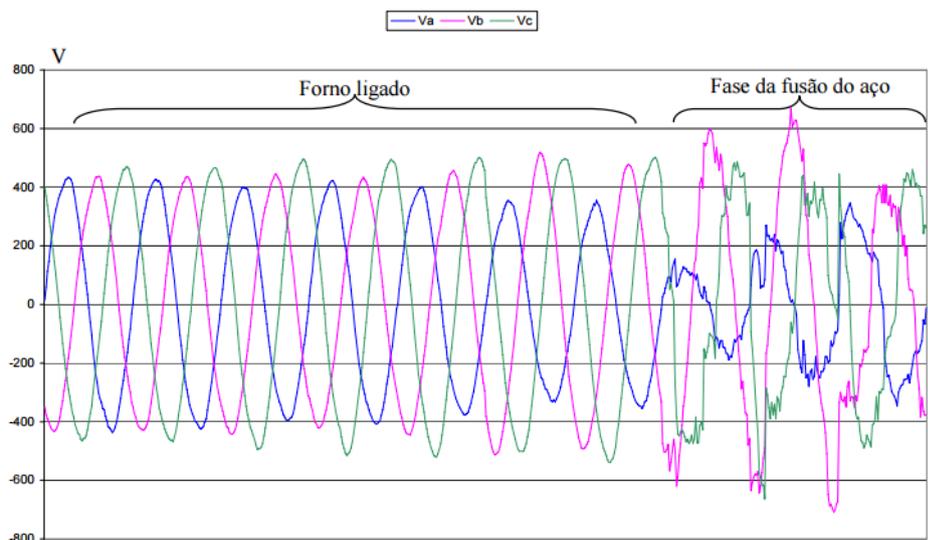
Figura 11. Característica não linear da tensão versus a corrente do arco em função do tempo.



Fonte: CARDOSO, 2006, p. 26.

Na Figura (12) apresenta-se o comportamento das formas de ondas de tensão nas fases A, B e C registradas no secundário do transformador. Na mesma figura é possível observar o comportamento da forma de onda de tensão quando o forno está ligando e quando é iniciado o processo de fusão do aço.

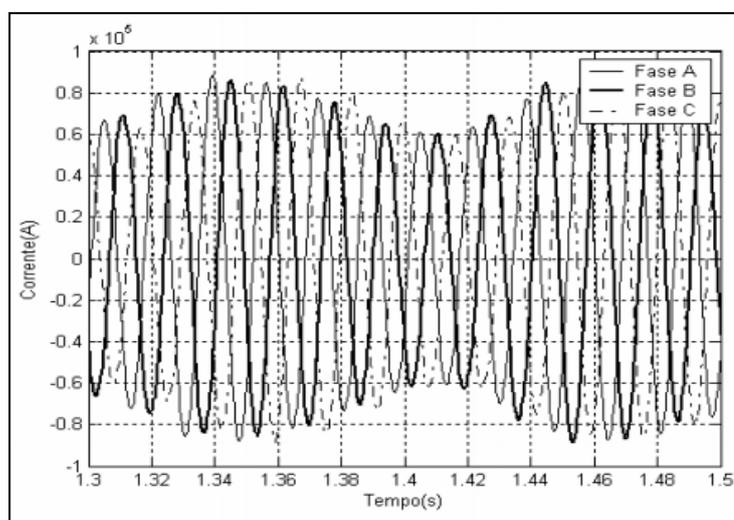
Figura 12. Formas de ondas da tensão de um forno elétrico a arco para as fases A, B e C.



Fonte: CÂNDIDO, 2008, p. 26.

As formas de ondas da tensão e corrente de um forno a arco são funções não periódicas no tempo e de natureza estocástica. A Figura (13) mostra a forma de onda de corrente de um forno.

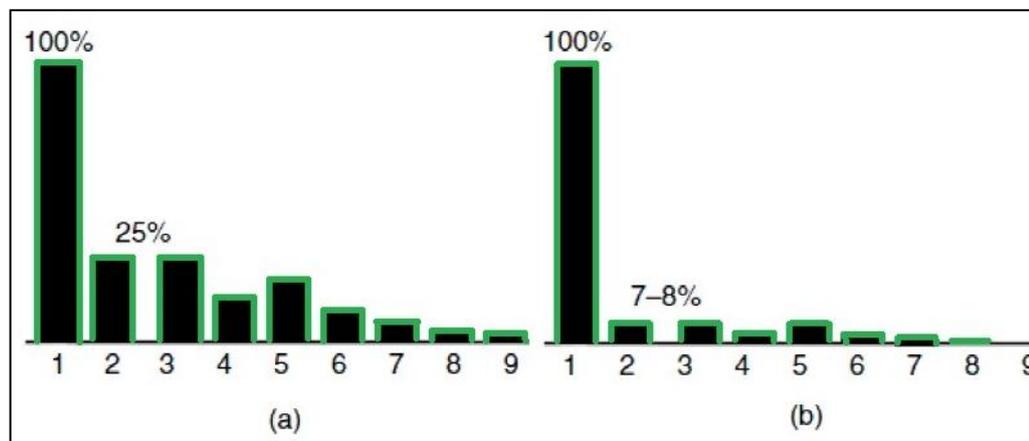
Figura 13. Corrente no secundário do transformador do forno para as fases A, B e C.



Fonte: ALVES *et al*, 2007.

O espectro harmônico da corrente gerada por um forno varia de acordo com a sua etapa de operação. Porém, independentemente da etapa, os fornos geram harmônicos pares, sendo que o segundo harmônico se sobressai em relação aos outros. A Figura (14) demonstra o espectro harmônico gerado por um forno a arco nas etapas de fusão e refinamento do metal.

Figura 14. Conteúdo harmônico gerado por um forno durante a etapa de (a) fusão e de (b) refinamento.



Fonte: BAGGINI, 2008.

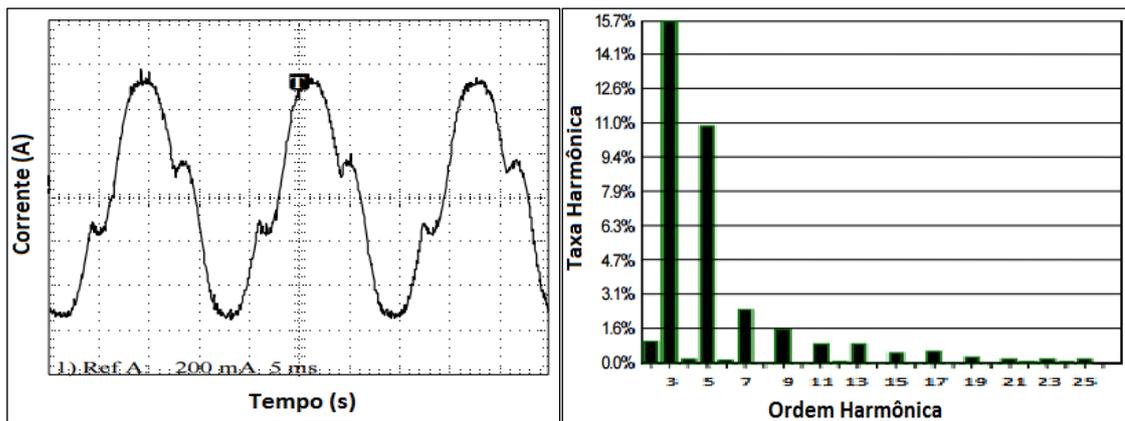
2.6.2 Lâmpadas Fluorescentes

As lâmpadas fluorescentes constituem uma das fontes de correntes harmônicas mais comuns nos sistemas elétricos (SOARES, 2012). Com o funcionamento baseado em descargas, esses equipamentos necessitam de reatores para fornecer uma elevada tensão inicial. Portanto, são utilizados reatores eletromagnéticos e reatores eletrônicos. De acordo com Pires (2006), os reatores eletrônicos são econômicos do ponto de vista energético, no entanto apresentam maiores produção de harmônicos.

2.6.2.1 Lâmpadas com Reatores Eletromagnéticos

Os reatores eletromagnéticos são constituídos de uma bobina com núcleo de ferro ligado em série com um dos eletrodos da lâmpada fluorescente, estando conectados ao capacitor. Com isso, o reator poderá controlar e estabilizar a corrente elétrica estabelecida entre os eletrodos da lâmpada, sendo possível através da saturação que ocorre no núcleo de ferro. Assim, esta saturação irá provocar distorções na forma de onda da corrente. A Figura (15) demonstra a forma de onda e o espectro harmônico da corrente do reator eletromagnético. Nota-se que as correntes harmônicas dominantes são de 3^a, 5^a, 7^a e 9^a ordens.

Figura 15. Forma de onda e espectro harmônico de uma lâmpada fluorescente com reator eletromagnético.

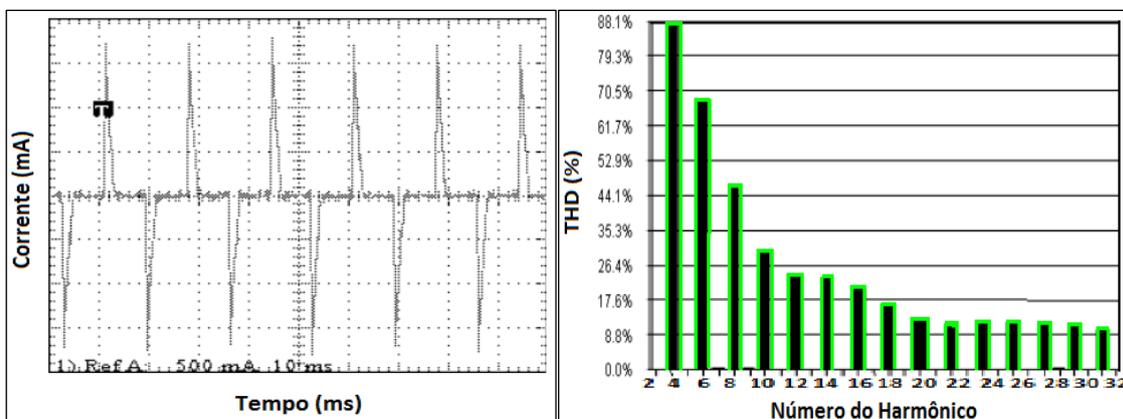


Fonte: ALMEIDA, 2004, p. 27.

2.6.2.2 Lâmpadas com Reatores Eletrônicos

Os reatores eletrônicos consistem de um circuito retificador-inversor que eleva a frequência do sinal para uma faixa de 20 a 50 kHz. As altas frequências de operação proporcionam um aumento da eficiência e da vida útil, assim como a redução de ruídos (ALMEIDA, 2004). A forma de onda e espectro harmônico para esse tipo de reator está demonstrada na Figura (16).

Figura 16. Forma de onda e espectro harmônico de uma lâmpada fluorescente com reator eletrônico.



Fonte: ALMEIDA, 2004, p.30.

Com os resultados apresentados nas Figuras (15) e (16), observa-se que os reatores eletrônicos provocam maiores níveis de distorção na forma de onda da corrente se comparado ao reator eletromagnético.

2.6.3 Transformadores

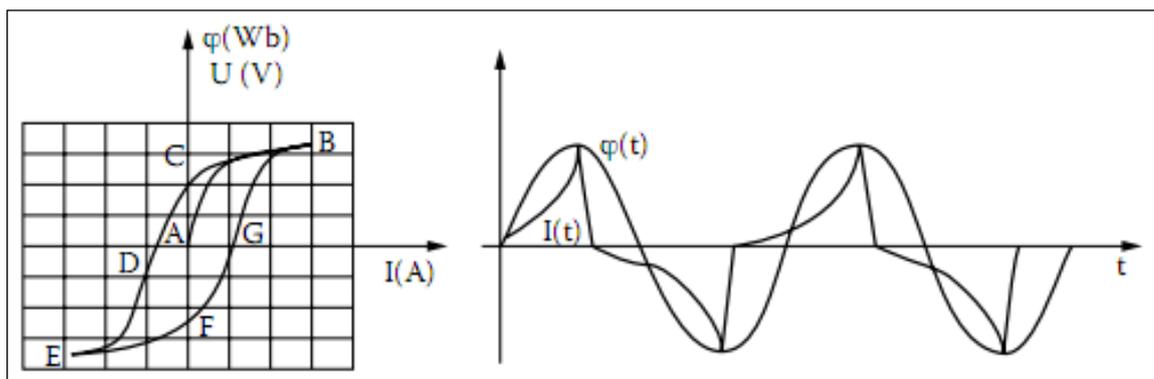
Os transformadores são máquinas elétricas estáticas que em regime permanente e sob condições normais de operação não provocam distorções significativas na rede elétrica.

Entretanto, quando estes equipamentos estão em condição de saturação, há um aumento considerável da contribuição harmônica (MELLO, 1988).

Da mesma forma, as características não lineares dos materiais ferromagnéticos utilizados nos núcleos dos transformadores, assim como a corrente de magnetização necessária para a manutenção do fluxo magnético não serão senoidais, o que enquadra estes equipamentos como fonte de harmônicos no sistema elétrico. De acordo com La Rosa *et al* (2006), esses equipamentos geralmente sofrem saturação quando operam em duas situações: com potência ou tensão acima da estabelecida no projeto. A primeira situação pode ocorrer durante os picos de corrente e a segunda ocorre principalmente durante as cargas leves.

Um transformador operando na região de saturação terá uma corrente de magnetização não linear como demonstrado na Figura (17), a qual apresenta uma variedade de harmônicos ímpares, principalmente de terceira ordem. Esse efeito torna-se evidente com o aumento da carga (LA ROSA, 2006).

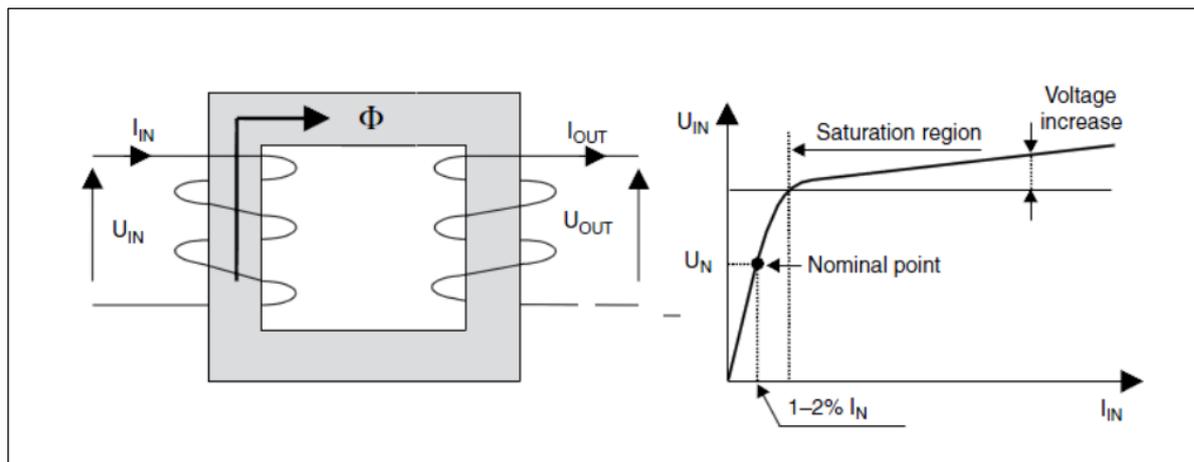
Figura 17. Corrente distorcida com o transformador em condição de saturação.



Fonte: LA ROSA, 2006. p. 36.

Esses equipamentos são normalmente projetados para operar com uma corrente de magnetização de 1% a 2% da corrente nominal, que é o ponto em que um transformador opera com a tensão nominal ou próxima a ela, conforme pode ser visto na curva da magnetização do transformador, conforme a Figura (18).

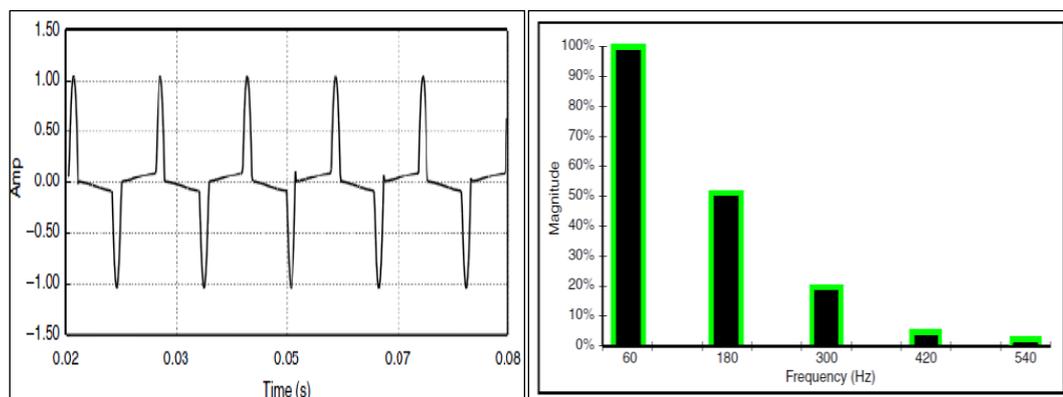
Figura 18. Diagrama esquemático e curva de magnetização de um transformador.



Fonte: BAGGINI, 2008.

A onda distorcida de corrente de magnetização e o conteúdo harmônico dessa onda, gerados pela não linearidade do núcleo podem ser observados na Figura (19). Portanto, as correntes harmônicas ímpares são significantes, como a 3ª, 5ª, 7ª e 9ª ordens, no entanto, harmônicos de terceira harmônica é predominantemente significativa.

Figura 19. Formas de ondas e espectro harmônico de corrente de magnetização de um transformador.



Fonte: DUGAN *et al*, 2004, p. 197.

Mesmo quando a corrente de magnetização simétrica associada a um transformador é predominantemente de harmônicos ímpares, ao assumir que o enrolamento está conectado em delta (Δ), os harmônicos gerados no transformador serão de ordens $6k \pm 1$, para ($k = 1, 2, 3, \dots$).

2.6.4 Conversores Estáticos

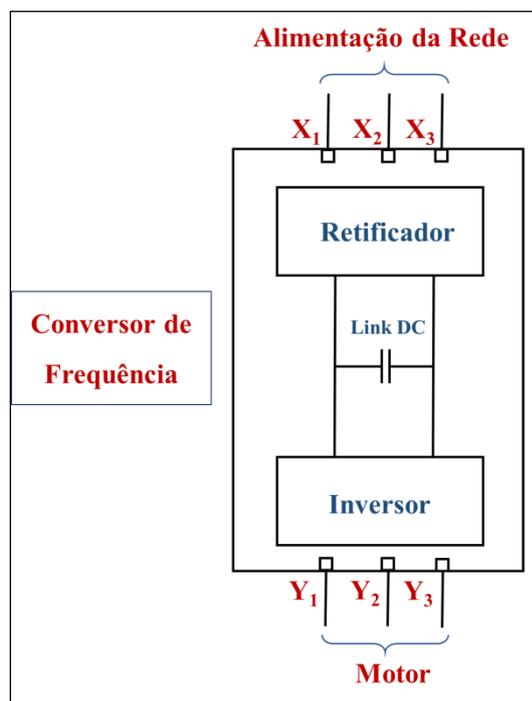
Por muito tempo as aplicações de velocidade variável dos motores foram implementadas por meio de componentes mecânicos, hidráulicos e eletromecânicos. Com a evolução da

eletrônica de potência foi possível programar sistemas de variação de velocidade eletrônicos através dos conversores de frequência.

De acordo com Mello (1988), os conversores estáticos, sendo estes os retificadores e inversores, constituem uma das fontes mais expressivas de correntes harmônicas. Os mesmos apresentam grande importância no ramo industrial, já que são responsáveis pelo controle de velocidade dos motores. Afirma Magalhães (2010) que esses equipamentos eletrônicos proporcionam uma alta confiabilidade no controle dos motores, economia de energia e uma redução da frequência de manutenção dos mesmos.

Os conversores de frequência são compostos por um retificador, um circuito intermediário CC e um inversor, conforme a Figura (20). O inversor produz a partir do circuito intermediário CC a alimentação trifásica para o motor. O desacoplamento entre o retificador e o inversor é feito pelo circuito intermediário (*link CC*), de tal forma que o sinal de saída do conversor é completamente independente do sinal da alimentação da rede em termos de módulo e frequência.

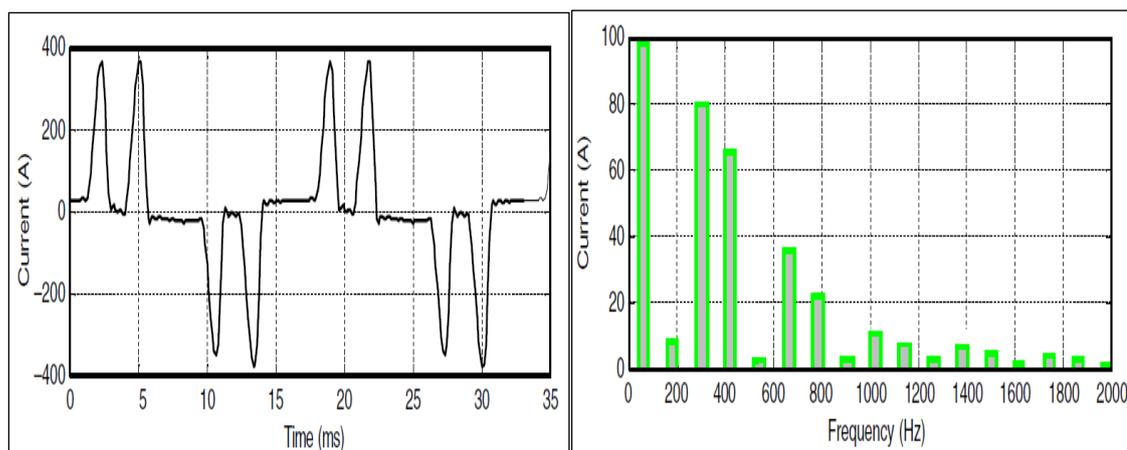
Figura 20. Componentes de um conversor de frequência.



Fonte: MAGALHÃES, 2010, modificada.

Os conversores trifásicos geram harmônicas características de ordem $h = k \cdot q \pm 1$, sendo q o número de pulsos do conversor e k um número inteiro (1, 2, 3,...). A Figura (21) ilustra a forma de onda e histograma de frequências de conversores de potência trifásicos.

Figura 21. Formas de onda e espectro harmônicos de corrente em conversor trifásico.



Fonte: DUGAN *et al*, 2004, p. 191.

Além destas cargas geradoras de harmônicos apresentadas, existem outras, que geralmente são de uso residencial e de pequena potência, como aparelhos televisores, carregadores de celulares, aparelhos de som, computadores, aparelhos de micro-ondas, que em grande número podem provocar distorções harmônicas significativas nos sistemas elétricos.

2.7 EFEITO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

A presença de distorções harmônicas provoca efeitos indesejáveis nos sistemas elétricos. A partir disso, algumas características podem ser observadas facilmente pelo ser humano, como o aumento de vibrações e o aquecimento excessivo dos condutores. Outras características necessitam da utilização de aparelhos específicos para diagnosticá-las corretamente, como por exemplo, a ressonância, perdas elétricas em decorrência do efeito pelicular, quedas de tensão e redução do fator de potência, entre outros fenômenos.

Todos esses efeitos ocasionados pela distorção harmônica afetam consideravelmente as instalações sendo um fator relevante no impacto econômico, já que os mesmos contribuem na degradação dos equipamentos elétricos com a diminuição da vida útil. A partir disso, torna-se necessário realizar investimentos para manutenção e/ou substituição desses equipamentos. Portanto, neste tópico serão apresentadas as principais características que ocorrem na rede elétrica devido ao efeito pelicular e a ressonância, sendo esta em série ou em paralelo.

2.7.1 Efeito Pelicular

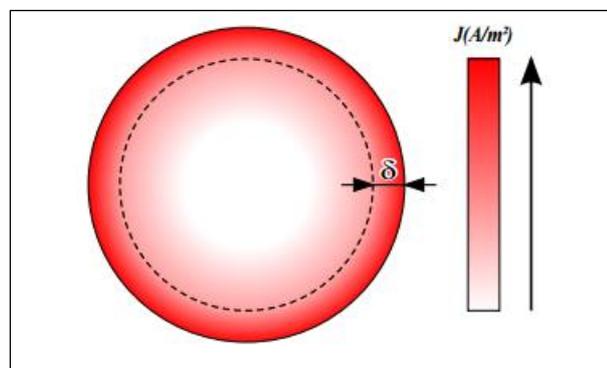
De acordo com o trabalho de Robert (1999) *apud* Barbosa (2012), quando uma corrente elétrica contínua flui em um condutor homogêneo, de seção transversal não negligenciável,

ela se distribui uniformemente na seção. No entanto, não se pode afirmar o mesmo quando a corrente é alternada, pois a distribuição não é uniforme. Logo, a distribuição depende da frequência, campo elétrico e condutividade elétrica, além das dimensões e formas geométricas do condutor. No caso de um condutor de seção transversal circular, a densidade de corrente varia ao longo do raio, sendo máxima na superfície e mínima sobre o eixo. A concentração de corrente próxima à superfície do condutor chama-se efeito pelicular (*skin effect*).

Em corrente alternada o efeito pelicular impõe algumas desvantagens: A resistência elétrica efetiva do condutor aumenta em relação a resistência medida em corrente contínua. Conseqüentemente, haverá maior perda sob forma de calor, por unidade de comprimento de condutor do que se o mesmo fosse percorrido por uma corrente elétrica constante.

Para melhor compreender este efeito, é apresentado na Figura (22) o efeito pelicular em um condutor de seção circular. Neste caso, a densidade de corrente varia ao longo do raio, sendo máxima na superfície do condutor e mínima sobre o eixo. Nota-se, também, que existe uma maior concentração de corrente na região (δ) denominada grau de penetração ou profundidade de penetração.

Figura 22. Distribuição de corrente em um condutor de seção circular.



Fonte: BARBOSA, 2012, p. 33.

Esse efeito normalmente é desprezado na frequência fundamental por causar pequenos efeitos, porém, passam a ser significativos para frequências acima de 350 Hz (BAGGINI, 2008). O grau de penetração ou profundidade de penetração pode ser calculado utilizando-se a Equação (2.16).

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (2.16)$$

Onde δ é o grau de penetração harmônica, ρ é a resistividade do cabo e μ é a permeabilidade magnética.

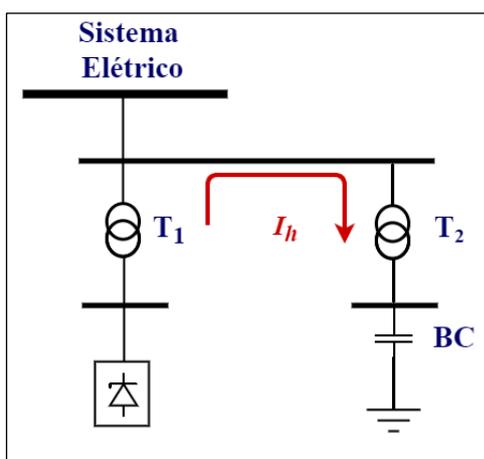
2.7.2 Ressonância Harmônica

A ressonância é um fenômeno no qual uma frequência coincide com a frequência natural do sistema. Para esse efeito a frequência de um harmônico torna-se igual a frequência natural da rede elétrica, considerando que essa rede é composta de elementos resistivos, indutivos e capacitivos, como por exemplo: cabos, transformadores, reatores e capacitores (SOARES, 2012). A ressonância harmônica pode ser classificada de duas formas: ressonância em série ou ressonância em paralelo, que serão apresentadas nos tópicos a seguir.

2.7.2.1 Ressonância em Série

Na ressonância em série, as reatâncias capacitivas e indutivas se anulam fazendo com que a impedância do sistema diminua passando a ter valores numéricos iguais as resistências do sistema. Dessa forma, a corrente sofrerá uma amplificação de seu nível, aumentando a distorção de corrente. A apresentação do circuito ressonante em série está ilustrada na Figura (23).

Figura 23. Circuito ressonante em série.



Fonte: JESUS & OLIVEIRA, 2012.

Este tipo de ressonância é comum em projetos de filtros harmônicos para a limpeza de sistemas elétricos. Logicamente, o equipamento é dimensionado para suportar as adversidades de funcionamento, como sobre correntes e sobre tensões harmônicas, sendo aproveitada a potência de serviço na tensão fundamental para a correção do fator de potência no ponto de instalação.

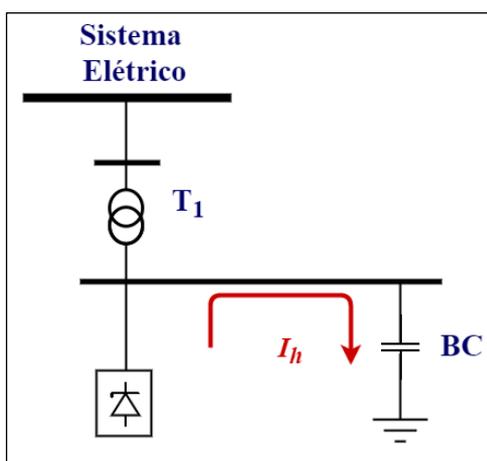
2.7.2.2 Ressonância em Paralelo

A ressonância em paralelo apresenta um elevado valor de impedância, pela combinação em paralelo da reatância capacitiva com a reatância indutiva, na frequência onde ambas se

equivalem. Portanto, a admitância será mínima, resultando na amplificação da tensão, provocando um aumento do nível de distorção harmônica de tensão.

Este efeito apresenta sérios problemas, pois quando percorrida uma pequena corrente, conseqüentemente, devido a alta admitância, as tensões nos terminais são elevadas drasticamente, danificando equipamentos do sistema, principalmente os bancos de capacitores conectados no ponto de ocorrência da ressonância. A Figura (24) mostra um circuito paralelo ressonante.

Figura 24. Circuito ressonante em paralelo.



Fonte: JESUS & OLIVEIRA, 2012.

Nos sistemas elétricos de potência, a utilização de bancos de capacitores para a correção do fator de potência pode caracterizar em uma ressonância paralela. Desta forma, é imprescindível a realização de estudos harmônicos em sistemas onde existem fontes harmônicas significativas para o projeto e instalação de capacitores de maneira segura.

2.8 ELIMINAÇÃO DE HARMÔNICOS

A presença de distorções harmônicas de tensão e de corrente pode proporcionar aos equipamentos elétricos conectados a rede elétrica a sua queima ou mesmo levando ao mau funcionamento. Portanto, torna-se importante adotar medidas de controle para eliminação ou redução dos níveis de distorções harmônicas. Dentre as possíveis medidas, a instalação dos filtros harmônicos nos circuitos de potência apresenta-se como uma das mais eficazes e eficientes medidas mitigadoras. É afirmado por Arrillaga (2004) que os filtros harmônicos têm como propósito reduzir a distorção harmônica de tensão e corrente produzida pelos componentes não lineares da rede elétrica.

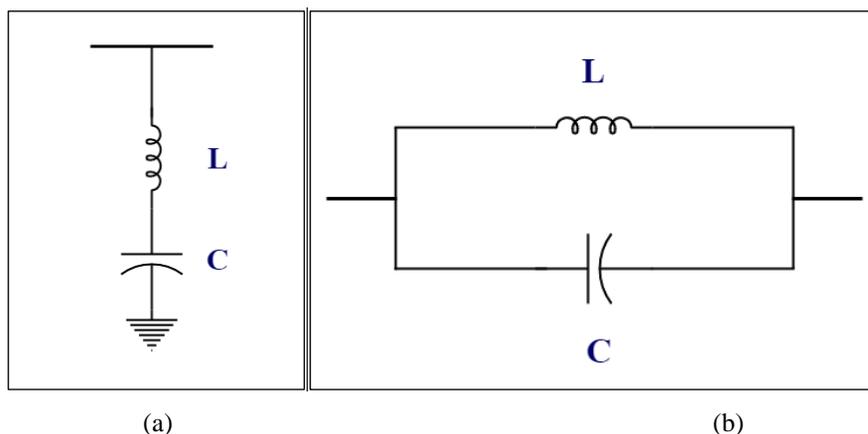
O dimensionamento dos filtros harmônicos deve atender aos limites estabelecidos pela concessionária, eliminar possíveis ressonâncias em frequências perigosas para os

equipamentos e componentes do sistema (TOSTES, 2003). Os filtros harmônicos são classificados como filtros passivos e filtros ativos. Estes são classificados como filtros passivos e filtros ativos, conforme a sua construção, a seguir será realizado uma breve abordagem a respeito dos filtros harmônicos.

2.8.1 Filtros Passivos

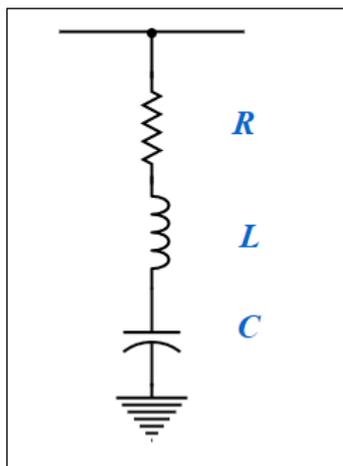
Os filtros passivos são equipamentos compostos basicamente por elementos passivos: resistor, indutor e capacitor, logo não utilizam nenhum elemento amplificador, como transistores ou amplificadores operacionais. Portanto, são facilmente implementados e não necessitam de uma fonte de alimentação. Adicionalmente, por serem de fácil construção e de baixo custo, os filtros passivos são usualmente utilizados na mitigação de harmônicos. Os mesmos apresentam dois possíveis esquemas de construção, podendo estar conectados em *shunt* ou em série com o circuito elétrico, conforme a Figura (25) (MORAIS, 2011).

Figura 25. Filtros passivos com as disposições de conexões (a) em *shunt* e (b) em série com o circuito.



Fonte: MORAIS, 2011.p. 20.

Os filtros passivos em *shunt* apresentam duas topologias bastante utilizadas, que também podem operar simultaneamente: filtros sintonizados e filtros amortecidos. O filtro *shunt* sintonizado é ajustado para a frequência que faz as suas reatâncias indutivas e capacitivas serem iguais. Os mesmos apresentam uma configuração relativamente simples, tendo um resistor (R), um capacitor (C) e um indutor (L) em série, conforme a Figura (26).

Figura 26. Filtros passivos *shunt* sintonizado.

Fonte: TOSTES, 2003. p. 79.

O filtro passivo amortecido é um circuito elétrico em que o capacitor está em série com um circuito em paralelo formado por uma resistência e uma indutância, tendo como objetivo realizar a filtragem de frequências acima da sua frequência de sintonia. Tanto o filtro passivo amortecido quanto o sintonizado costumam ser utilizados em conjunto em uma rede elétrica quando apresenta elevadas distorções harmônicas. Geralmente, os filtros sintonizados são utilizados para harmônicos com elevada amplitude e os filtros amortecidos para harmônicos de frequências elevadas (SASAKI, 2014).

2.8.2 Filtros Ativos

Os filtros ativos são projetados utilizando componentes ativos, como transistores, semicondutores e amplificadores operacionais, a fim de fornecer o conteúdo harmônico de sinal oposto ao produzido pela carga não linear, anulando o seu efeito de distorção. Para o seu funcionamento necessita-se de uma fonte de alimentação e os mesmos podem apresentar configuração em série ou em paralelo (MORAIS, 2011).

O filtro ativo em série tem como objetivo minimizar a distorção harmônica da tensão de alimentação de uma carga, na tentativa de corrigir as eventuais componentes harmônicas presentes na tensão da rede local. Esse tipo de filtro tem a finalidade de garantir uma tensão senoidal de alimentação para a carga, evitando que as distorções cheguem a mesma. O filtro em paralelo ou em derivação tem a capacidade de minimizar a distorção harmônica que flui pela rede elétrica, para isso, é injetada uma corrente, que ao somar com a corrente da carga passará a transmitir uma corrente sem distorções harmônicas (POMILIO, 2009).

Contudo, o filtro ativo em paralelo não tem a capacidade de eliminar as distorções de tensão na rede que alimenta uma carga, uma vez que o mesmo se encontra conectado em

paralelo com a carga, do ponto de vista da rede. Adicionalmente, o filtro ativo em série não tem a capacidade de eliminar o fluxo de corrente distorcida da carga para a fonte, uma vez que o mesmo se encontra conectado em série com a carga, do ponto de vista da fonte (MORAIS, 2011). Por isso, os filtros ativos instalados em plantas industriais costumam apresentar a configuração combinada destas tecnologias, assim a qualidade da energia é melhorada com relação a tensão e corrente.

2.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A distorção harmônica de tensão tem sua origem devido à presença de cargas não lineares no sistema que geram formas de onda de correntes não senoidais. A circulação dessas correntes, através da impedância do sistema, em sentido à fonte de suprimento, causa o surgimento de tensões harmônicas, as quais podem resultar em aumento de perdas elétricas e danos às cargas conectadas ao longo das redes de distribuição.

Portanto, inicialmente foram apresentados neste capítulo os métodos para a caracterização dos níveis de distorções harmônicas em uma rede elétrica, as principais normas e regulamentações nacionais e internacionais que estabelecem limites máximos de distorções harmônicas de tensão e corrente, assim como as principais fontes geradoras de harmônicos e os efeitos causados por essas fontes.

Também foram apresentadas as principais metodologias utilizadas para a mitigação de harmônicos no sistema elétrico devido à utilização de filtros passivos e filtros ativos. No Capítulo a seguir serão abordadas técnicas de modelagens utilizadas na implementação computacional para o desenvolvimento de análise de propagação de harmônicos em redes elétricas.

CAPÍTULO III

3 TÉCNICAS DE MODELAGEM E ANÁLISE DE PROPAGAÇÃO DE HARMÔNICOS

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A distorção harmônica pode causar diversos efeitos danosos aos equipamentos conectados no sistema elétrico de potência, assim como citado no capítulo anterior. Esse aumento do nível de distorção harmônica tem justificado o desenvolvimento de metodologias que buscam avaliar a propagação harmônica na tentativa de reduzi-la ou até mesmo eliminá-la. Portanto, a simulação computacional é uma eficiente ferramenta para análise dos processos operacionais por apresentar resultados satisfatórios. Para isso, o uso de modelos matemáticos adequados e representativos do sistema elétrico viabilizam as análises do seu comportamento (SCHWANZ, 2013). Baseado nisso, diversas técnicas tem sido desenvolvidas para análises de penetração harmônica no sistema elétrico. Portanto, a seguir serão apresentados os principais modelos matemáticos utilizados no fluxo de carga harmônico trifásico. Além disso, serão apresentadas as técnicas de modelagem, principalmente a que foi utilizada no *software* ATP.

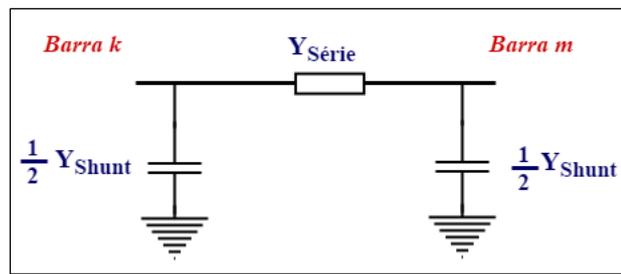
3.2 FLUXO DE CARGA HARMÔNICO TRIFÁSICO

A avaliação do comportamento do sistema deve ser realizada para cada frequência de interesse, uma vez que a presença das distorções harmônicas provocam efeitos indesejáveis. A geração de distorções harmônicas por ser um fenômeno não linear e complexo, exige uma modelagem por fase de um sistema trifásico, para a rede elétrica e os dispositivos que a compõem (TOSTES, 2003). Portanto, a seguir serão apresentados os modelos trifásicos das linhas e cabos, transformadores, cargas e bancos de capacitores.

3.2.1 Modelos de Linhas e Cabos

Os cabos e linhas, para estudos envolvendo frequências harmônicas, devem ser representados através de seus circuitos equivalentes ou modelos matemáticos que apresentem de forma satisfatória os resultados. De acordo com Tostes (2003) as linhas e cabos podem ser representados por um modelo equivalente - π por fase, conforme ilustrado na Figura (27), contendo uma impedância série e admitância *shunt* variáveis com a frequência.

Figura 27. Representação esquemática do modelo π trifásico para linhas e cabos.



Fonte: TOSTES, 2003. p. 98.

Logo, para a linha com os parâmetros distribuídos de resistência, indutância, capacitância e condutância, a solução exata em regime permanente é representada pela Equação (3.1):

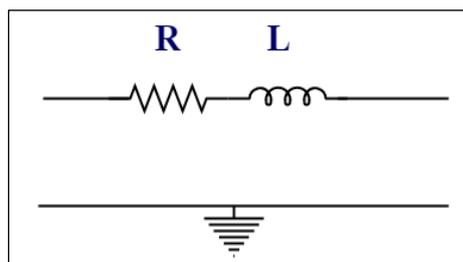
$$\begin{bmatrix} I_{mk} \\ I_{km} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{SÉRIE} + \frac{1}{2} Y_{SHUNT} & -Y_{SÉRIE} \\ -Y_{SÉRIE} & Y_{SÉRIE} + \frac{1}{2} Y_{SHUNT} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_m \\ V_k \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

A partir do modelo básico apresentado na Figura (26), podem-se representar diversos modelos, adaptando-os às características particulares das linhas e cabos.

3.2.1.1 Modelo 1

Esse é um modelo adequado para a representação de linhas e cabos considerados curtos, devido a equivalência para linhas sem apresentar o efeito capacitivo, conforme ilustrado na Figura (28).

Figura 28. Representação esquemática do modelo 1 para linhas e cabos.

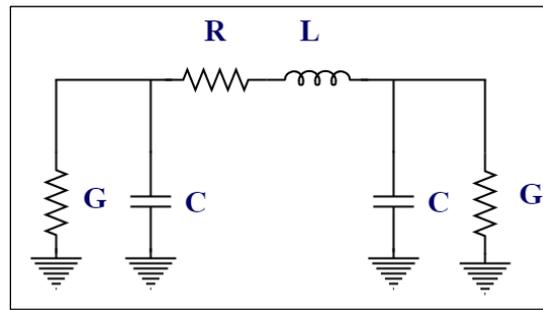


Fonte: TOSTES, 2003. p. 101.

3.2.1.2 Modelo 2

Para esse modelo, além da presença da capacitância, há possibilidades de representar o efeito da condutância para terra (TOSTES, 2003). A Figura (29) apresenta a representação esquemática do modelo 2 para linhas e cabos.

Figura 29. Representação esquemática do modelo 2 para linhas e cabos.



Fonte: TOSTES, 2003. p. 102.

A reatância indutiva X_L e a reatância capacitiva X_C podem ser modificadas de acordo com a frequência, conforme apresentado nas Equações (3.2) e (3.3), onde h é a ordem harmônica.

$$X_L = h \omega L \quad (3.2)$$

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

De acordo com Pires (1986), a variação da resistência de um condutor em decorrência do efeito pelicular é observada em diversos trabalhos. Logo, recomenda-se considerar variações para resistência junto com a frequência através da raiz quadrada da ordem harmônica. Para a representação dos sistemas de distribuição, as linhas e cabos devem utilizar um modelo equivalente que usa um fator de correção para utilizar o efeito pelicular. As Equações (3.4) e (3.5) são para as linhas e cabos, respectivamente.

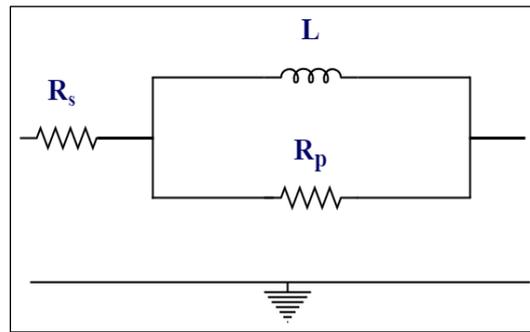
$$R_{h(LINHAS)} = R_1 \left(1 + \frac{0,646 h^2}{192 + 0,518 h^2} \right) \quad (3.4)$$

$$R_{h(CABOS)} = R_1 (1,187 + 0,532 \sqrt{h}) \quad (3.5)$$

3.2.1.3 Modelo 3

Devido a complexidade apresentas anteriormente para representar as variações da resistência e indutância juntamente com a frequência, o modelo 3 permite representar esses valores em linhas e cabos que variam juntamente com a frequência. A Figura (30) apresenta a representação esquemática do modelo 3 para linhas e cabos.

Figura 30. Representação esquemática do modelo 3 para linhas e cabos.



Fonte: TOSTES, 2003. p. 103.

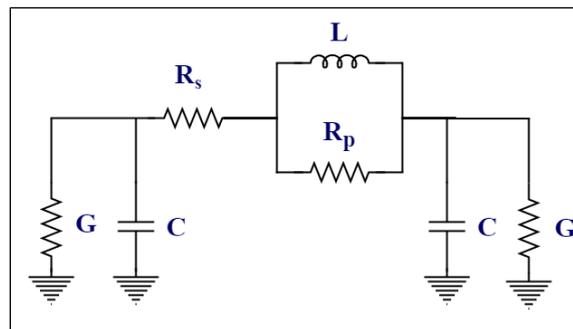
Para a utilização corretamente deste modelo, deve-se tomar cuidado com a escolha dos parâmetros. Logo, o valor da impedância equivalente (Z_{eq}) apresentada no modelo 3 em função da frequência pode ser encontrado na Equação (3.6). Onde $\omega = 2\pi f$, sendo f a frequência em Hz , R_p e R_s são as resistências em paralelo e em série respectivamente.

$$Z_{eq} = R_s + \frac{j\omega L \cdot R_p}{R_p + j\omega L} \quad (3.6)$$

3.2.1.4 Modelo 4

Apesar de ser poder representar o comportamento de variação da impedância equivalente de linhas e cabos juntamente com a variação da frequência, o modelo 4 pode-se representar o efeito da capacitância e condutância ao terra. A Figura (31) demonstra a representação esquemática do modelo 4 para linhas e cabos.

Figura 31. Representação esquemática do modelo 4 para linhas e cabos.



Fonte: TOSTES, 2003. p. 105.

Para alguns tipos de redes com n nós, um sistema com n equações pode ser formado de acordo com a Equação (3.7):

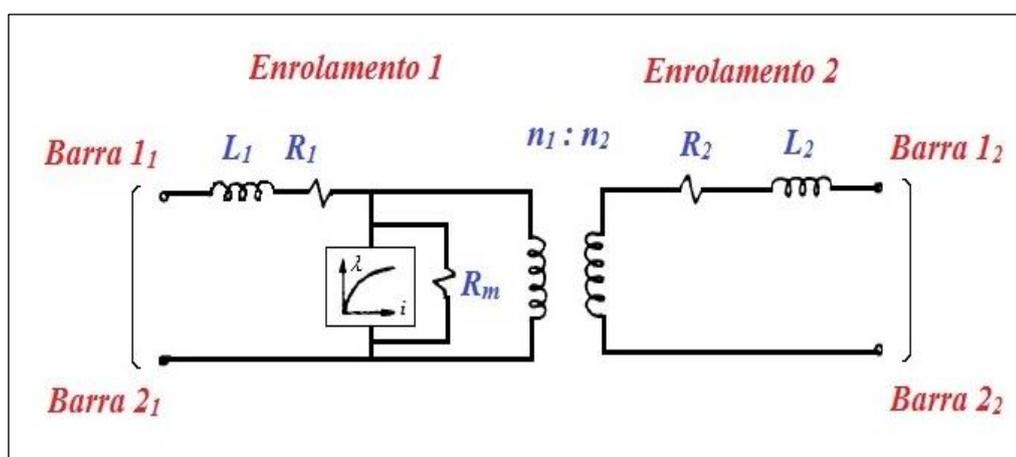
$$[Y] \cdot [V] = [I] \quad (3.7)$$

Onde: $[Y]$: matriz admitância nodal simétrica, com elementos complexo; $[V]$: vetor n dimensional de tensões nodais (valores de fasores complexo); $[I]$: vetor n dimensional de correntes injetadas (valores de fasores complexo).

3.2.2 Modelos de Transformadores

A modelagem de transformadores trifásicos é de grande importância para estudos de fluxo de carga harmônico, devendo haver um compromisso entre o detalhamento da representação do sistema a ser avaliado e os dados disponíveis. No entanto, a representação desses equipamentos deve considerar as frequências de ressonância, incluindo a capacitância e a indutância do enrolamento (CLUA *et al*, 2000). A Figura (32) apresenta as características para a construção de um transformador. É válido ressaltar que para este modelo, deve-se obter além da resistência e indutância dos enrolamentos, a curva de magnetização.

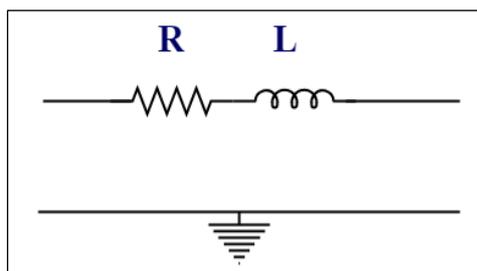
Figura 32. Representação do circuito de um transformador com dois enrolamentos.



Fonte: DOMMEL, 1996.

A representação mais simples de um transformador considera-se apenas a indutância e resistência que podem ser encontrados a partir dos dados de placa do transformador, conforme apresentado na Figura (33).

Figura 33. Representação esquemática do modelo 1 para transformadores.



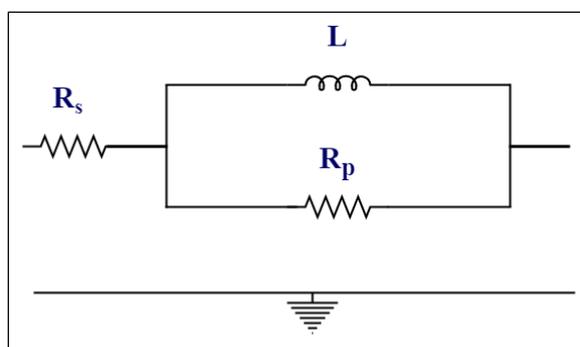
Fonte: O Autor.

A admitância harmônica desse modelo pode ser obtida conforme a Equação (3.8). Sendo R a resistência obtida pela potência que representa as perdas no dispositivo e X_l a reatância de curto-circuito do transformador.

$$Y_{th} = \frac{1}{R\sqrt{h} + jX_l h} \quad (3.8)$$

No trabalho de Pesonen (1981) é sugerido que os transformadores sejam representados por uma resistência em série com uma montagem construída de uma resistência em paralelo com uma indutância, conforme apresentado na Figura (34). A indutância pode ser obtida através da reatância de dispersão à frequência fundamental, porém as resistências são independentes da frequência.

Figura 34. Representação esquemática do modelo 2 para transformadores.



Fonte: O Autor.

Esse modelo 2 pode ser utilizado para representar transformadores sujeitos à frequências harmônicas, por apresentar uma resistência em série (R_s) com uma montagem construída de uma indutância em paralelo com a resistência (R_p). Os valores de R_s e R_p são constantes e independentes da frequência. Em Ribeiro (1992) é apresentado uma metodologia para estimar os valores dessas resistências que estão demonstradas nas Equações (3.9) e (3.10).

$$90 < \frac{V^2}{S \cdot R_s} < 110 \quad (3.9)$$

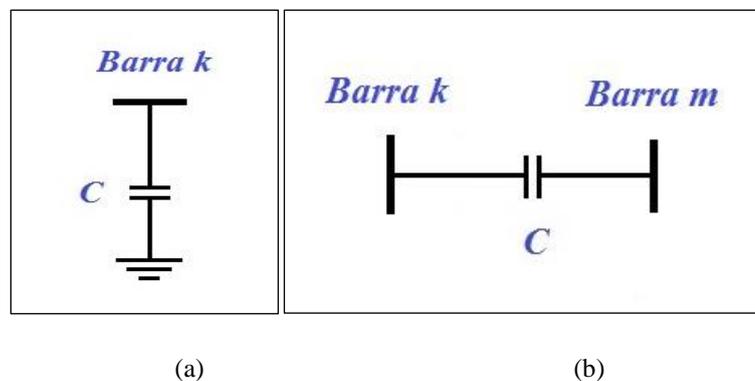
$$13 < \frac{S \cdot R_p}{V^2} < 30 \quad (3.10)$$

Onde: V é a tensão nominal e S é a potência nominal do transformador. Alguns trabalhos, como Pires (1986) é mostrado que em determinados transformadores a influência da capacitância pode ser desprezada para uma determinada faixa de frequência.

3.2.3 Modelos de Bancos de Capacitores

Os bancos de capacitores geralmente são utilizados para compensar o baixo fator de potência no sistema elétrico. A inserção dos capacitores pode ser em série ou em paralelo. No entanto, em ambos o capacitor é representado somente por sua reatância capacitiva equivalente. A Figura (35) ilustra o modelo inserido no sistema.

Figura 35. Modelo de capacitor em (a) compensação paralela e (b) compensação série.



Fonte: TOSTES, 2003.

3.2.4 Modelos de Cargas

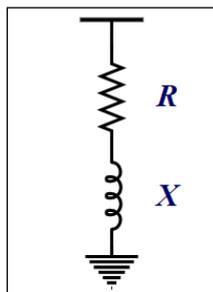
Para representar de maneira simplificada os diversos tipos de consumidores conectados no sistema elétrico, utiliza-se um modelo específico de carga. A representação dos modelos de cargas na simulação altera significativamente o fluxo das correntes harmônicas. Também, estas constituem um dos principais elementos de amortecimento, afetando as condições de ressonância, podendo causar um aumento na impedância a altas frequências (MENDONÇA, 2012).

Geralmente as cargas são expressas pela potência ativa e reativa utilizada para o cálculo dos parâmetros no circuito equivalente. Portanto, a seguir serão apresentados os modelos alternativos utilizados de acordo com as características e informações das cargas.

3.2.4.1 Modelo A

O modelo A, conforme ilustrado pela Figura (36), poderá ser adotado no caso de consumidores residenciais e comerciais, onde existe a predominância de cargas resistivas e as cargas motrizes são desprezadas.

Figura 36. Modelo A para representação de cargas.



Fonte: O Autor.

Logo, é constituído apenas por uma resistência e uma reatância que são calculados pela potência ativa e reativa consumidas pela carga elétrica, conforme demonstrado nas Equações (3.11) e (3.12).

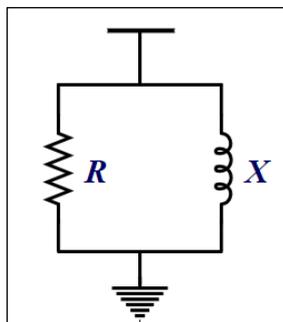
$$R = P \cdot \frac{V^2}{P^2 + Q^2} \quad (3.11)$$

$$X = Q \cdot \frac{V^2}{P^2 + Q^2} \quad (3.12)$$

3.2.4.2 Modelo B

Amplamente utilizado em programas de simulação de fluxo de carga harmônico. O mesmo considera a resistência em paralelo com a reatância, conforme a Figura (37).

Figura 37. Modelo B para representação de cargas.



Fonte: O Autor.

Este modelo também pode representar cargas com uma significativa parcela de motores. Os parâmetros são calculados a partir do consumo de potência ativa e reativa da carga, conforme apresentados nas Equações (3.13) e (3.14).

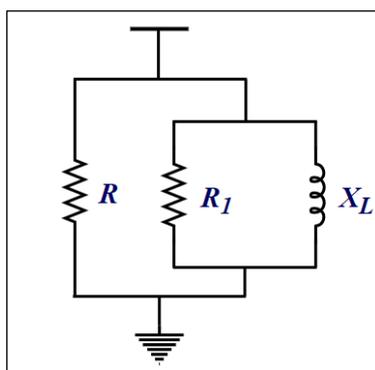
$$R = \frac{V^2}{P} \quad (3.13)$$

$$X = \frac{V^2}{Q} \quad (3.14)$$

3.2.4.3 Modelo C

O modelo C apresenta-se adequado para a representação das cargas quando a presença de motores elétricos é significativa. A Figura (38) ilustra a representação esquemática do modelo C para as cargas elétricas.

Figura 38. Modelo C para cargas.



Fonte: O Autor.

Neste modelo uma fração K da demanda total da carga é usada para representar os motores. Para considerar a potência instalada, utiliza-se o fator igual a 1,2. Assim, têm-se as Equações (3.15) e (3.16) para o cálculo da resistência e da indutância equivalentes, respectivamente.

$$R = \frac{V^2}{P \cdot (1 - K)} \quad (3.15)$$

$$X_L = \frac{V^2}{1,2 \cdot K \cdot K_1 \cdot P \cdot \omega} \quad (3.16)$$

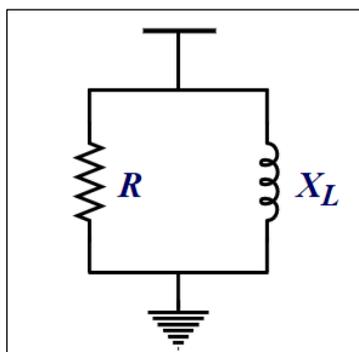
Onde: P é a demanda total de potência ativa, K é a fração de demanda total correspondente aos motores e K_1 é a severidade da condição de partida (entre 4 e 7). A resistência R_1 representa o amortecimento causado pelas perdas do motor, sendo calculada pela Equação (3.17). Sendo K_2 um valor considerado de aproximadamente 0,2.

$$R_1 = \frac{X}{K_2} \quad (3.17)$$

3.2.4.4 Modelo D

O modelo D, proposto por Ranade *et al* (1998), também é adequado para representar consumidores com elevada presença de motores elétricos. A Figura (39) ilustra a representação esquemática do modelo D para as cargas elétricas.

Figura 39. Modelo D para representação de cargas.



Fonte: O Autor.

Os parâmetros deste modelo são obtidos a partir do conjunto de equações apresentadas a seguir:

$$R = \frac{V^2}{P \cdot k} \quad (3.18)$$

$$X_L = \frac{V^2}{k \cdot Q} \quad (3.19)$$

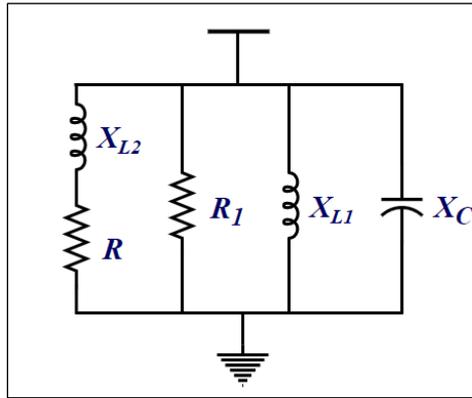
$$k = 0,1 \cdot h + 0,9 \quad (3.20)$$

Dependendo da aproximação adotada, é possível compor um modelo composto para a carga. O efeito esperado é a melhor representação. Uma vez que as concessionárias normalmente não têm um estudo completo de suas próprias cargas, uma investigação sobre a composição das mesmas é necessária para permitir uma escolha adequada do modelo ou composição do modelo.

3.2.4.5 Modelo E

Para a representação genérica de consumidores residenciais e cargas industriais conectadas em um mesmo barramento, de acordo com Neto (2009), pode-se utilizar o modelo E. A Figura (40) ilustra a representação esquemática do modelo E para as cargas elétricas.

Figura 40. Modelo E para representação de cargas.



Fonte: O Autor.

As equações a seguir servem para encontrar os valores das componentes na modelagem da carga.

$$R = \frac{V^2}{P \cdot (1 - K - KE)} \quad (3.21)$$

$$R_1 = \frac{\omega \cdot X_{L1}}{K_2} \quad (3.22)$$

$$X_{L1} = X_M \cdot \frac{V^2}{K_m \cdot K \cdot P \cdot \omega} \quad (3.23)$$

$$X_{L2} \cong 0,1 \cdot \frac{R}{\omega} \quad (3.24)$$

A potência absorvida pelas máquinas rotativas nem sempre corresponde exatamente ao valor do amortecimento. Logo, a potência ativa e reativa não pode ser usada diretamente para representar a carga com frequência harmônica. Desta forma, apresenta-se o modelo E que consegue contemplar essa modelagem abrangente.

3.2.5 Modelo de Fonte de Corrente Harmônica

Uma fonte harmônica causa distorções através da injeção de harmônicos de corrente no próprio sistema. Por isso, torna-se natural representá-los como fontes de correntes harmônicas. Assim, sendo o modelo mais utilizado para a representação das fontes harmônicas, o módulo e a fase podem ser encontrados a partir do espectro das correntes harmônicas do dispositivo (EXPÓSITO *et al*, 2010). Para isso, alguns procedimentos devem ser utilizados para criar o modelo de fonte de corrente, como:

- a) A carga produtora de harmônicos é tratada como uma carga de potência constante na frequência fundamental, e então, é resolvido o fluxo de potência na frequência fundamental do sistema.
- b) O módulo e ângulo de fase da fonte de corrente harmônica que representam a carga são determinados pelas Equações (3.25) e (3.26):

$$I_h = I_1 \frac{I_{h(\text{espectro})}}{I_{1(\text{espectro})}} \quad (3.25)$$

$$\theta_h = \theta_{h(\text{espectro})} + h(\theta_1 - \theta_{1(\text{espectro})}) \quad (3.26)$$

Sendo que $I_{h(\text{espectro})}$ representa o espectro típico da corrente harmônica da carga, $I_{1(\text{espectro})}$ é o espectro de corrente para a frequência fundamental, $\theta_{1(\text{espectro})}$ é o espectro do ângulo para a frequência fundamental e $\theta_{h(\text{espectro})}$ é o espectro do ângulo para a frequência harmônica.

3.3 TÉCNICAS DE MODELAGEM

A formulação mais simples baseia-se na utilização de modelos monofásicos para a representação do sistema elétrico, podendo desprezar os efeitos de não linearidades e do acoplamento eletromagnético entre fases (ARRILLAGA, 1997). No entanto, os sistemas elétricos trifásicos podem ser representados pelo conjunto monofásico. A solução será obtida após a injeção de corrente para cada frequência harmônica. A carga harmônica pode ser representada pela injeção de corrente como um circuito Norton. A solução é fornecida para cada uma das frequências analisadas no sistema elétrico (SCHWANZ, 2013).

Para representar um modelo de uma carga não linear como uma fonte de corrente, deve-se reproduzir computacionalmente a corrente drenada no barramento em condições nominais de operação. Para isso, necessita-se de dados do conteúdo harmônico drenado, como magnitude e as fases das componentes harmônicas (NDIAYE, 2006). Para o estudo de propagação harmônica realiza-se a solução de diversos sistemas de equações, cada um para representar o comportamento em uma frequência específica. Desta forma, o sistema matricial para as ordens harmônicas pode ser expresso pela Equação (3.27).

$$[I_h] = [Y_h] \cdot [V_h] \quad (3.27)$$

Sendo I_h o vetor de correntes harmônicas, V_h o vetor de tensões harmônicas em um ponto específico do sistema e Y_h a matriz admitância do sistema analisado, todos para uma

determinada frequência h . A matriz admitância para um sistema trifásico para cada frequência harmônica, demonstrada na Equação (3.28), é obtida através da análise nodal do circuito para cada frequência de interesse. Sendo Y_{ki} a admitância mútua entre as barras k e i e Y_{ii} a admitância própria da barra i .

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1i} & \cdots & Y_{1k} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2i} & \cdots & Y_{2k} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i1} & \cdots & Y_{ii} & \cdots & Y_{ik} & \cdots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{k1} & Y_{k1} & \cdots & Y_{ki} & \cdots & Y_{kk} & \cdots & Y_{kn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n1} & \cdots & Y_{ni} & \cdots & Y_{nk} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

A obtenção da inversão de uma matriz é um processo numérico trabalhoso, o que justifica a utilização de outros métodos, como os de soluções diretas e iterativas que são comumente utilizados. A partir desses métodos surgiu uma gama de ferramentas para a realização do estudo de análise harmônica em sistemas elétricos de potência. A seguir serão apresentados alguns destes métodos (VARIZ, 2006).

3.3.1 Varredura em Frequência (*Frequency Scan*)

Através deste método é possível detectar as possíveis frequências de ressonância do sistema elétrico. Para isso, uma corrente senoidal com frequência definida é injetada na barra. Dessa forma, após a injeção das correntes nos barramentos de interesse deve-se calcular a resposta do sistema, repetindo-se esse procedimento para todas as frequências de interesse. A Equação (3.29) demonstra o cálculo da tensão correspondente ao fluxo.

$$[V_h] = [Y_h]^{-1} \cdot [I_h] \quad (3.29)$$

Sendo Y_h a matriz admitância da rede, I_h a matriz da corrente harmônica e V_h são as tensões harmônicas, sendo o h a maneira de denotar a ordem harmônica. A impedância vista pela barra é calculada para todas as frequências, realizando varreduras para os espectros de frequência de interesse. O resultado disto é um gráfico (ou uma curva) de magnitude da impedância vista da barra no eixo vertical *versus* a frequência harmônica (ou a ordem harmônica) no eixo horizontal.

Essa ferramenta pode ser aplicada tanto para sistemas monofásicos quanto trifásicos (RAUMA, 2012). No entanto, apresenta algumas limitações, como por exemplo, não é

possível indicar o componente do sistema causador da ressonância ou mesmo a localização para o controle (HUANG, 2007).

3.3.2 Varredura em Frequência Harmônica (*Harmonic Frequency Scan*)

Para a solução no *software* ATP em estudos de propagação de harmônicos em redes elétricos é utilizado o método HFS (*Harmonic Frequency Scan*). Esse método de solução executa uma série de soluções fasoriais determinadas pela relação dos tipos de fontes senoidais harmônicas fornecidas pelo usuário. Os resultados, que serão tensões harmônicas nos nós e correntes harmônicas nos ramos para todas as frequências especificadas, poderão ser visualizadas no arquivo de saída (.LIS) como listagens tabeladas, ou mesmo em gráficos na extensão TPLOT. A utilização desta metodologia apresenta uma considerável redução no tempo de execução se comparado com análises harmônicas no domínio do tempo, além de evitar problemas quanto a precisão de análises de Fourier (VEZETO, 2001).

3.3.3 Método de Injeção de Corrente

Este método é bastante utilizado em análises harmônicas, sendo apresentadas algumas etapas para a sua solução (VARIZ, 2006):

- a) Determinação da matriz admitância nas frequências de interesse;
- b) Construção do vetor de injeção de correntes harmônicas das frequências de interesse para cada uma das cargas não lineares dos sistemas nas barras que possuem fontes de harmônicos conectados;
- c) Solução para encontrar as tensões nas barras do sistema para cada uma das frequências de interesse.

Para o método da injeção de correntes as equações utilizadas na representação da injeção de correntes são formadas a partir das contribuições de todos os elementos. Assim, deve-se considerar todos os elementos, como por exemplo, para uma admitância Y_{km} conectado entre os barramentos k e m , irão gerar uma contribuição de injeção de corrente, sendo definidas pelas Equações (3.30) e (3.31) (PENIDO, 2008).

$$I_{km} = y_{km} (V_k - V_m) \quad (3.30)$$

$$I_{mk} = y_{km} (V_m - V_k) \quad (3.31)$$

Assim, neste método as equações de injeção de corrente vão sendo formadas a partir das contribuições de cada elemento que está ligado em um ou mais nós, sendo que cada elemento é considerado uma unidade básica. Os métodos de injeção de corrente são bastante utilizados

na análise harmônica, no entanto, a precisão dos resultados depende da topologia da rede e dos tipos de elementos conectados (VARIZ, 2006).

3.3.4 Método de Fluxo de Carga de Interação Harmônica

Para este método as cargas não lineares são modeladas como fontes de corrente dependentes das tensões, para todas as frequências consideradas, conforme apresentado na Equação (3.32) (SCHWANZ, 2013).

$$I_h = f(V_1, V_2, \dots, V_n, c) \quad (3.32)$$

Sendo I_h a corrente harmônica de frequência h , V_1, V_2, \dots, V_n são as tensões harmônicas do sistema e c representa algumas variáveis, como ângulos de disparos e potência na saída da carga. Para esse método, inicialmente é utilizado uma estimativa para os valores das tensões e em seguida calculam-se os valores das correntes. Posteriormente, com os novos valores de tensão, recalculam-se os novos valores de corrente, repetindo o processo iterativo até a convergência (NIQUINI, 2009).

3.3.5 Fluxo de Potência Harmônico utilizando o Método de Newton

Este é um método amplamente utilizado para resolução de problemas não lineares, onde o sistema é linearizado e resolvido a cada iteração (NIQUINI, 2009). O mesmo apresenta elevada robustez no processo de convergência e estando amplamente vinculadas as condições iniciais utilizadas. Assim, o modelo matemático das cargas não lineares precisa ser conhecido, pois deve ser corretamente descritos em suas derivadas em função das variáveis analisadas (SCHWANZ, 2013).

Tendo em vista a necessidade de detalhamento e precisão na modelagem dos elementos do sistema, a convergência deste método é considerada mais eficaz que o método de fluxo de carga de interação harmônica, principalmente quando o ponto inicial da iteração estiver próximo do ponto de solução (FIGUEIREDO, 2006).

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O monitoramento por equipamento de medição ainda é a melhor forma de se obter dados sobre o sistema elétrico, no entanto, torna-se economicamente inviável a monitoração em todo o sistema. A simulação computacional é uma eficiente ferramenta para análise de processos operacionais. Logo, a partir disso, torna-se necessário a utilização de modelos matemáticos para a representação computacional do sistema elétrico.

Portanto, neste capítulo foram apresentados os diversos modelos para a representação dos componentes conectados a rede elétrica, como para as cargas elétricas, linhas e cabos, transformadores e banco de capacitores. Por conseguinte apresentaram-se as principais técnicas de modelagem no domínio da frequência para a propagação harmônica.

CAPÍTULO IV

4 SIMULADOR PARA ANÁLISE DE PROPAGAÇÃO DE HARMÔNICOS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Distúrbios no sistema elétrico devido à propagação de harmônicos podem causar problemas em equipamentos conectados na rede elétrica. Dentre os principais efeitos gerados, podem-se citar a má operação de equipamentos eletrônicos, sobretensão e sobrecorrente comprometendo a isolação e a vida útil dos equipamentos elétricos e a interferência em sistemas de comunicação.

O monitoramento por equipamento de medição apresenta a melhor forma de obter dados sobre o sistema elétrico, no entanto é inviável a monitoração de todos os pontos de um sistema elétrico real (ARRUDA, 2008). No entanto, as simulações computacionais apresentam resultados satisfatórios, o que justifica o desenvolvimento de análises e estudos de propagação de harmônicos em um sistema elétrico.

Com isso, o *software* ATP permite realizar estudos de propagação de harmônicos através de simulações computacionais, sendo possível avaliar os níveis harmônicos de tensão em diversos pontos da rede elétrica. Logo, neste capítulo são apresentados os modelos que servirão para a representação dos sistemas elétricos que foram utilizados como modelo de estudos apresentados neste trabalho.

4.2 ATP (*Alternative Transient Program*)

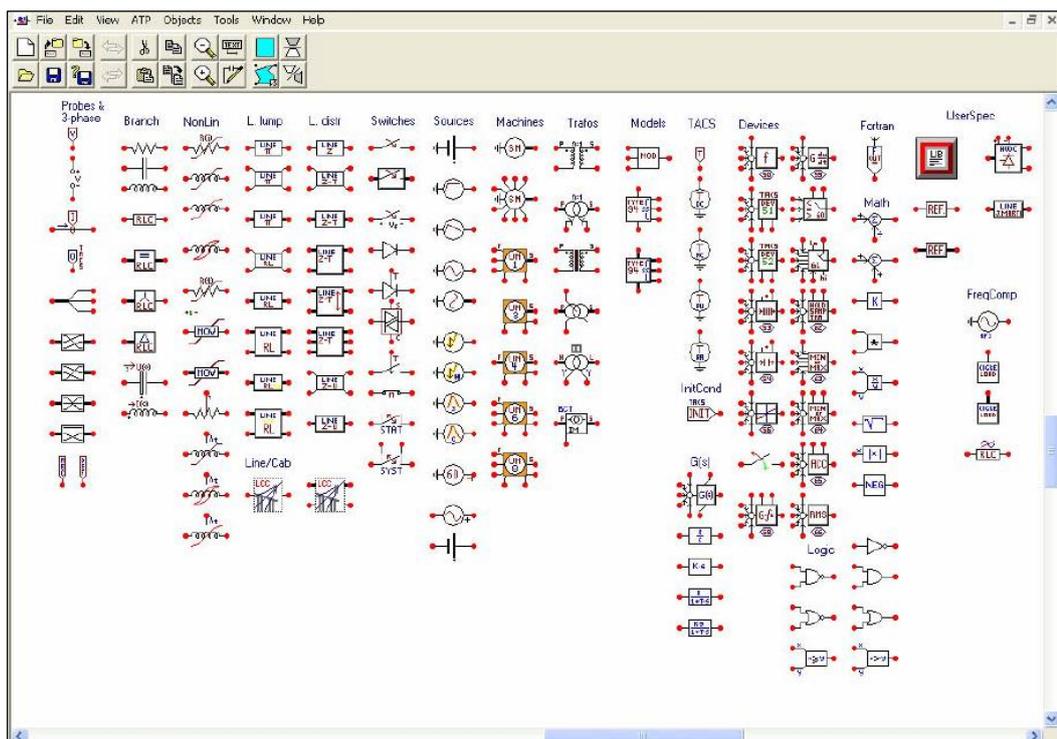
O *software* ATP foi criado por H. Dommel para o desenvolvimento de simulações computacionais de fenômenos transitórios e eletromagnéticos. Inicialmente, somente circuitos monofásicos poderiam ser representados. Atualmente, devido algumas melhorias, os circuitos polifásicos também podem ser representados além de possuir ferramentas necessárias para a modelagem de diversos elementos como dispositivos da eletrônica de potência (SILVA, 2012).

Este *software* dispõe de recursos que permitem a representação de sistemas de transmissão e distribuição em uma única plataforma. Essas representações são possíveis com o uso de modelos pré-estabelecidos, como: resistências, indutâncias, capacitâncias, chaveamentos, transformadores, linhas e cabos e fontes de tensão, entre outros modelos.

4.3 ATPDraw

O *ATPDraw* é um programa de apoio que proporciona uma interface gráfica para entrada de dados no *software* ATP a partir de uma plataforma MS – Windows. Assim, pode-se criar e editar arquivos que representam os circuitos a serem simulados computacionalmente (ZAPPELINI, 2008). Este *software* é uma ferramenta de fácil utilização devido aos meios gráficos disponibilizados, permitindo a representação tanto de circuitos monofásicos quanto polifásicos. A Figura (41) ilustra alguns modelos de elementos que compõem a rede elétrica disponível no *ATPDraw*.

Figura 41. Modelos de elementos de redes elétricas disponíveis no ATP Draw.



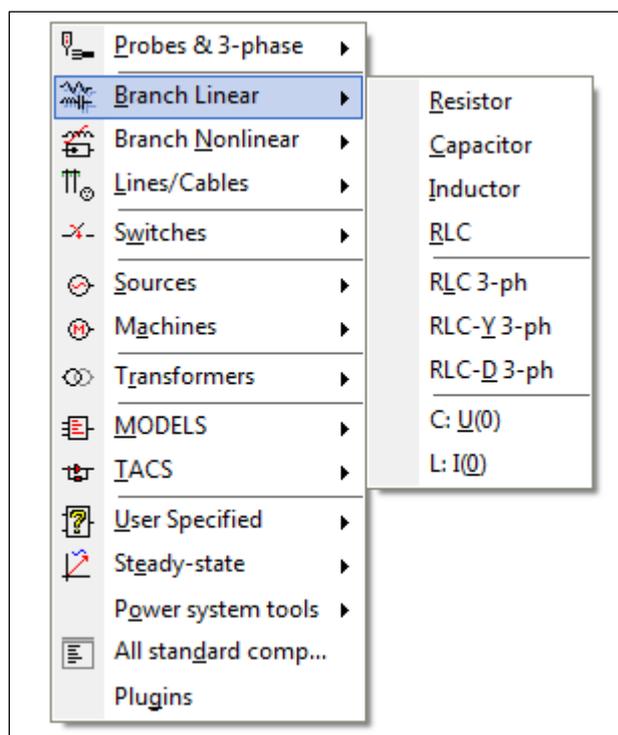
Fonte: O Autor.

4.3.1 Definição dos Componentes

Inicialmente para execução de um circuito no *ATPDraw* é necessário a inserção dos componentes elétricos. Um elemento pode ser implementado após ser selecionada uma das

opções disponíveis em seus componentes, essas estando na plataforma do software. Para isso, basta clicar com o lado direito do mouse e selecionar o componente desejado para posteriormente configurar conforme a característica desejada. A Figura (42) demonstra algumas opções de elementos de circuitos.

Figura 42. Seleção das opções disponíveis no *ATPDraw*.

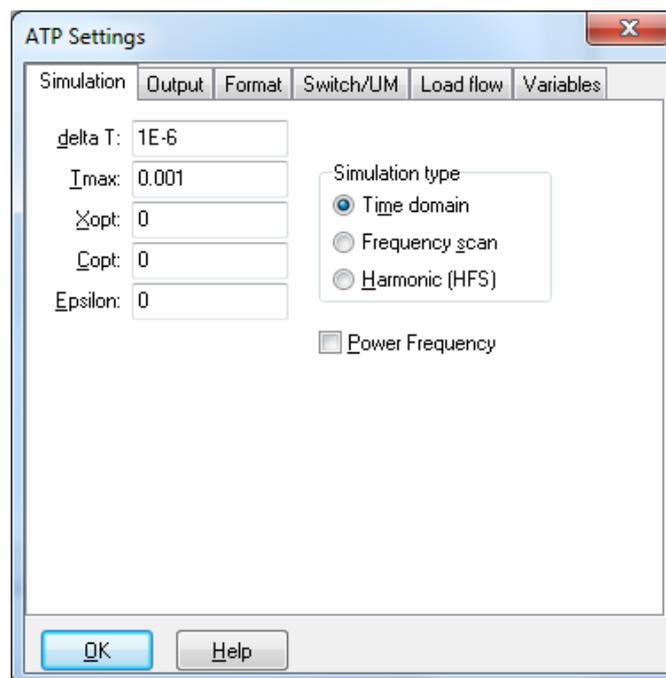


Fonte: O Autor.

4.3.2 ATP Setting

De acordo com Dommel (1984), o ATP Setting é o local do *ATPDraw* destinado à configuração dos parâmetros da simulação, sendo necessário fornecer o passo de integração, o tempo máximo da simulação e também a unidade a ser adotada para as indutâncias e capacitâncias. Ao abrir o ATP Settings é disponibilizada uma caixa de parâmetros ao usuário apresentando as seguintes divisões, conforme demonstrado na Figura (43).

Figura 43. Janela disponível no ATP Settings.



Fonte: O Autor.

- a) **Simulation:** é destinado para apresentação dos dados sobre os possíveis cenários para a simulação no ATP Draw. Para isso, deve-se definir basicamente o passo de integração da simulação e o tempo máximo de duração da mesma.
- b) **Output:** esta janela é destinada para escolha de integração da simulação;
- c) **Format:** é destinada a colocação de formato de arquivo na caixa de diálogos do ATP;
- d) **Switch/UM:** esta janela é destinada a cenários possíveis para interruptores e máquinas universais;
- e) **Load Flow:** esta janela é destinada para as configurações gerais do fluxo de carga, como destinação do número de iterações;
- f) **Variables:** Através desta aba o usuário tem a permissão para especificar uma série de variáveis e não valor de dados na caixa de diálogo do componente.

4.4 MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO NO ATP

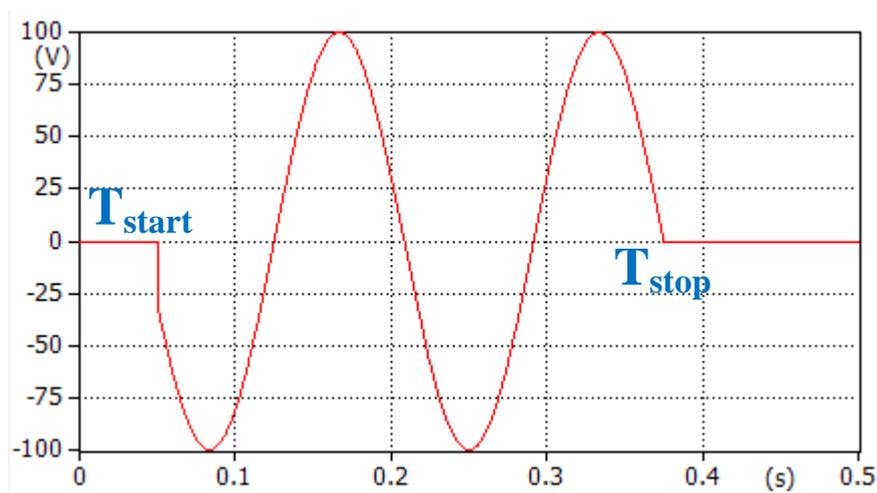
A modelagem dos componentes elétricos da rede é realizada através de circuitos equivalentes expressos por resistências, capacitâncias e indutâncias próprias e mutuas. O ATP utiliza-se de várias rotinas de suporte, assim como permite a inserção de novas rotinas, com o objetivo de gerar dados e condições necessárias para a simulação de um sistema elétrico (COURY *et al*, 2007). A seguir são apresentados os modelos harmônicos dos principais

dispositivos de rede operando em regime permanente. A correta representação dos elementos de um sistema de potência corrobora na confiabilidade dos resultados dos estudos elétricos.

4.4.1 Fontes de Tensão

Para a representação das unidades geradoras utilizou-se a fonte senoidal trifásica do tipo 14, com amplitude e ângulo determinado para cada fase. A forma de onda representada por esta fonte está mostrada na Figura (44) (PRIKLER & HOIDALEN, 1997).

Figura 44. Forma de onda gerada pela fonte senoidal do tipo 14.



Fonte: O Autor.

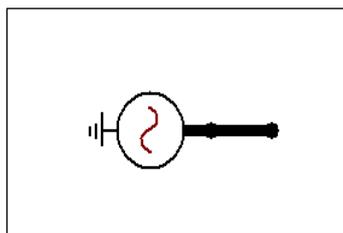
Para esse tipo de fonte deve-se fornecer ao *software* o tempo em que a fonte será ligada (T_{START}) e o tempo que a fonte será desligada (T_{STOP}), além das amplitudes e a defasagem angular da fonte. Na Tabela (5) apresentam-se as características que devem ser fornecidas inicialmente para a representação da fonte de tensão.

Tabela 5. Características da fonte de tensão para as fases ABC.

Parâmetro	Fase A	Fase B	Fase C
Amplitude (V)	11267,65	11267,65	11267,65
Frequência (Hz)	60	60	60
Ângulo (Grau)	0°	120°	240°

No ATP Draw os geradores trifásicos são representados por fontes de tensão senoidal trifásica com defasagem de 120° entre as fases, conforme a Figura (45).

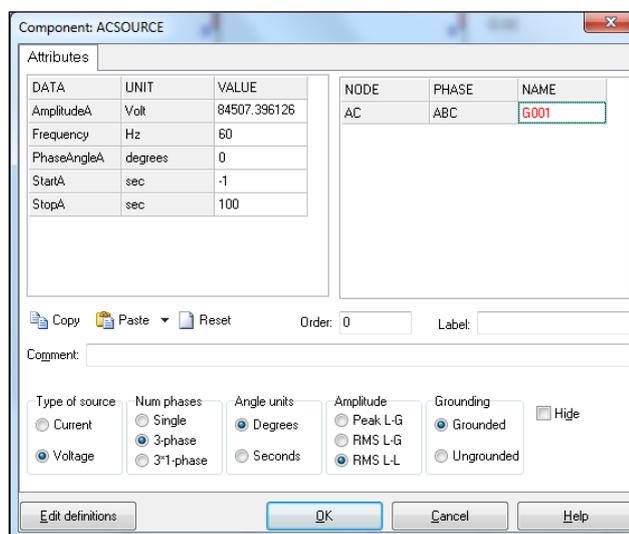
Figura 45. Modelo de fonte de tensão no ATP Draw.



Fonte: O Autor.

Para a representação correta das unidades geradoras, basta fornecer os dados intrínsecos do dispositivo, como amplitude e defasagem angular. A Figura (45) demonstra as opções que permitem as devidas configurações.

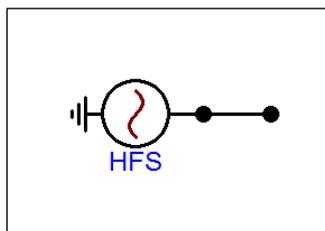
Figura 46. Representação da geração trifásica no ATP Draw.



Fonte: O Autor.

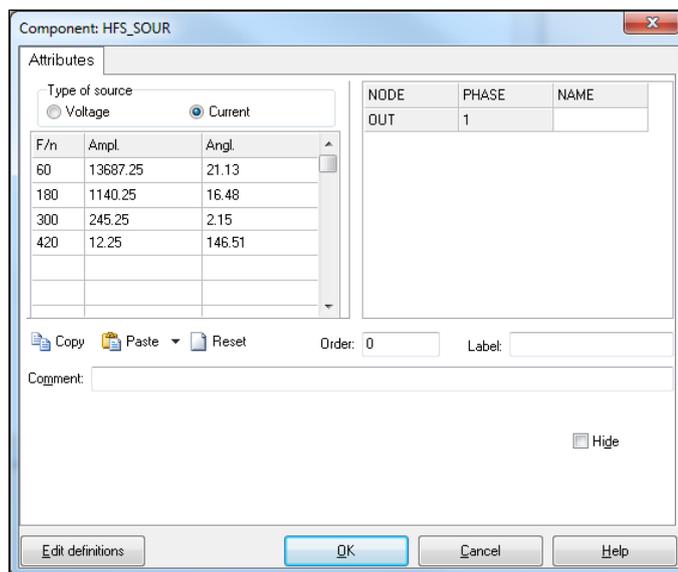
4.4.2 Fontes Harmônicas de Corrente

Para a representação das cargas não lineares como fonte de corrente harmônica, utilizou-se os modelos de fontes senoidais harmônicas (HFS) disponíveis no *software* ATP, conforme ilustrado na Figura (47). Nesse modelo, a representação do sistema elétrico trifásico é possível com a modelagem monofásica. Devido a isso, pode-se reproduzir uma fonte de corrente harmônica desequilibrada (PRIKLER & HOIDALEN, 1997).

Figura 47. Modelo de fonte harmônica monofásica no *ATPDraw*.

Fonte: O Autor.

Essa ferramenta permite ao usuário adicionar as frequências harmônicas, amplitudes e os seus respectivos ângulos para cada fase, conforme ilustrado na Figura (48). O mesmo pode ser utilizado para a representação de fonte de corrente ou fonte de tensão. No entanto, para o desenvolvimento desse estudo, todas as componentes harmônicas foram representadas como fontes de correntes harmônicas.

Figura 48. Representação dos harmônicos como fonte de corrente no *ATPDraw*.

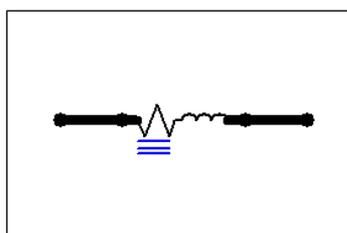
Fonte: O Autor.

4.4.3 Cabos e Condutores

O transporte de energia elétrica de um sistema elétrico de potência é realizado através das redes elétricas, com o desempenho dependente exclusivamente da geometria, ou seja, das características físicas, as redes de distribuição são classificadas como linhas curtas, sendo razoável desprezar as capacitâncias conectadas ao terra, ficando apenas no modelo com impedância em série (GARCIA, 2010). Para os cabos e condutores de extensão inferior a 80 km a capacitância também pode ser desconsiderada, sendo importante somente para linhas extensas e de alta tensão (STEVENSON, 1974).

Portanto, como os circuitos de distribuição são considerados mais simples quando comparados a sistemas de transmissão, podem ser modelados por uma impedância série com parâmetros resistivos e indutivos concentrados (R, L), ou seja, por um circuito RL série, em virtude do comprimento dos mesmos. Essa representação foi realizada através do modelo RLC3 do *ATPDraw*, conforme a Figura (49).

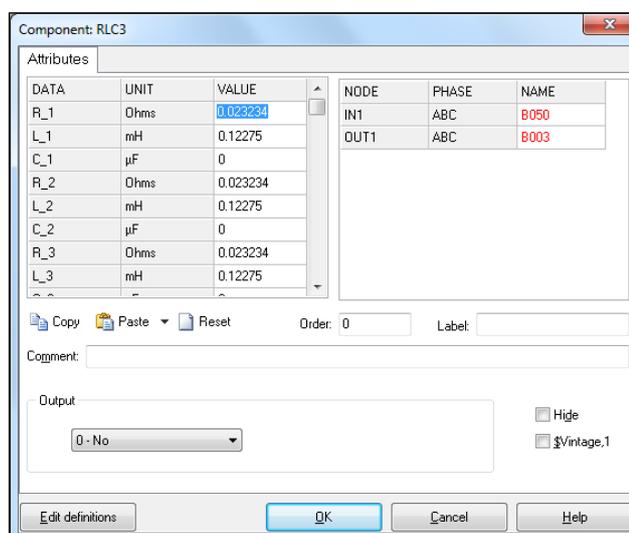
Figura 49. Modelo RLC3 no *ATPDraw*.



Fonte: O Autor.

Para a inserção de resistência e indutância na representação do sistema elétrico, utilizaram-se esses valores conforme fornecidos para os condutores de distribuição (IEEE, 1999). A partir disso, cada condutor elétrico será representado por valores específicos da reatância indutiva e resistência, conforme a Figura (50).

Figura 50. Representação das redes de distribuição no *ATPDraw*.

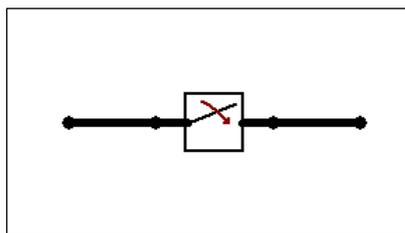


Fonte: O Autor.

4.4.4 Equipamentos de Manobras

Estes dispositivos são considerados como chaves que interligam dois pontos da rede, constando a indicação do seu estado, aberto ou fechado. Também é necessário indicar o tempo de abertura e fechamento dos equipamentos. A Figura (51) demonstra a representação das chaves seccionadoras no ATPDraw.

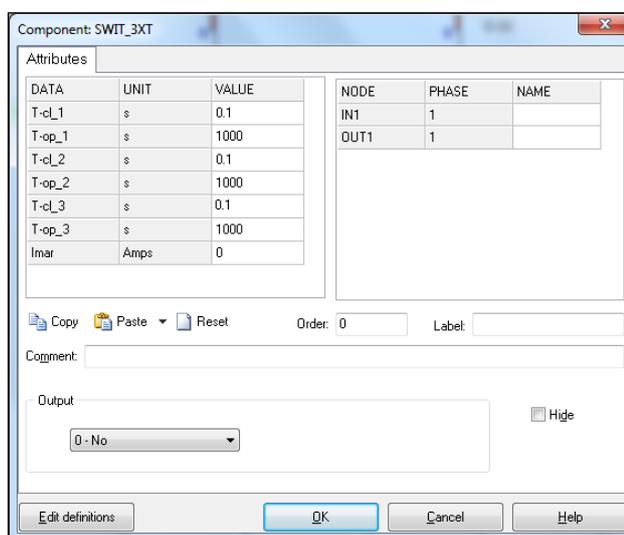
Figura 51. Modelo de chaves seccionadoras no ATPDraw.



Fonte: O Autor.

Para a inserção dos valores do tempo de abertura e fechamento das chaves seccionadoras, utiliza-se a aba mostrada na Figura (52), essa configuração também pode ser realizada individualmente por fase.

Figura 52. Representação dos equipamentos de manobra no ATPDraw.



Fonte: O Autor.

4.4.5 Cargas Elétricas

As cargas elétricas conectadas as redes de distribuição podem ser equilibradas ou desequilibradas, sendo representadas por um conjunto de impedâncias complexas. Para esta representação, pode-se utilizar as combinações dos modelos de potência constante, impedância constante ou corrente constante. As cargas alocadas nos alimentadores foram modeladas como impedância constante. A escolha do modelo deve-se as características das cargas conectadas ao sistema. Os valores das potências ativas e reativas utilizadas para o cálculo das cargas elétricas trifásicas estão demonstrados na Tabela (6) (IEEE, 1999).

Tabela 6. Valor de potência ativa e reativa consumida pela carga elétrica trifásica.

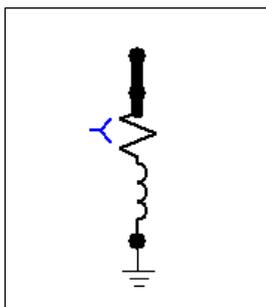
Barra	P _{Carga} (kW)	Q _{Carga} (kW)
B 03	2240	2000

B 51	600	530
B 49	1150	290
B 39	1310	1130
B 11	370	330
B 19	2800	2500
B 29	810	800

Fonte: IEEE, 1999.

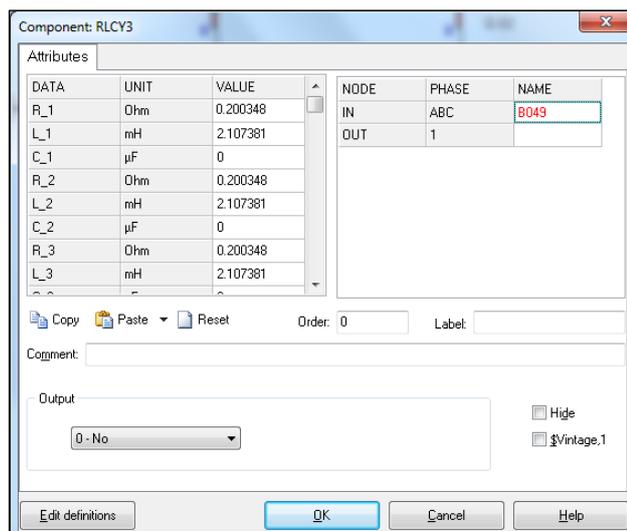
No terceiro capítulo deste trabalho são apresentados os diversos tipos de modelos para a representação de cargas nos sistemas elétricos de potência. Com isso, a partir dos valores de potência ativa e reativa, apresentados na Tabela (6), e com a tensão no barramento é possível encontrar os valores da impedância de cada carga. A Figura (53) apresenta o modelo de cargas elétricas no *ATPDraw*.

Figura 53. Modelo de carga elétrica no *ATPDraw*.



Fonte: O Autor.

Para as cargas balanceadas, os valores de resistência e indutância são considerados iguais para as três fases. No entanto, para a representação de cargas desbalanceadas os valores de resistência e indutância devem ser calculados para cada fase. É importante ressaltar que a representação correta das cargas elétricas afeta diretamente nos resultados, já que as cargas são as principais responsáveis pela variação de tensão na rede (NETO, 2009). A Figura (54) demonstra a representação das cargas trifásicas no *ATPDraw*.

Figura 54. Representação das cargas elétricas trifásicas no *ATPDraw*.

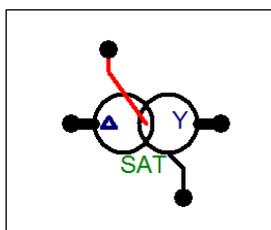
Fonte: O Autor.

4.4.6 Transformador

Os transformadores de potência são componentes indispensáveis em sistemas de conversão de energia elétrica, permitindo a ligação dos centros geradores aos centros consumidores (LIMA *et al*, 2015). Existem diferentes representações para os transformadores dependendo da modelagem utilizada. Para as frequências de interesse no estudo de propagação de harmônicos, deve-se determinar a matriz impedância, para isso, são necessários dados de ensaio a vazios ou de curto circuito do transformador para posteriormente encontrar os parâmetros elétricos, como impedância e resistências (MARTINEZ, 2010).

Para a simulação utilizou-se o modelo *SATURABLE* disponível no *ATPDraw*, conforme a Figura (55), que foi originalmente desenvolvido para transformadores monofásicos de n enrolamentos e posteriormente para transformadores trifásicos. As informações de entrada consistem de valores de resistência e indutância de cada enrolamento, onde as resistências simulam as perdas no cobre dos enrolamentos primários e secundários e as indutâncias de dispersão dos enrolamentos.

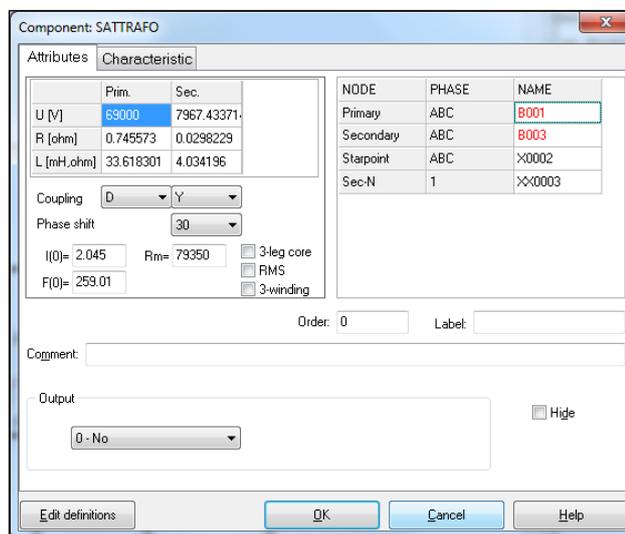
Figura 55. Modelo de transformadores no ATP Draw.



Fonte: O Autor.

Portanto, devem-se fornecer as resistências e indutância dos enrolamentos primários e secundários, assim como a resistência de magnetização e a curva de saturação. A Figura (56) demonstra a janela disponível no *ATPDraw* que permite fornecer esses dados.

Figura 56. Representação dos transformadores trifásicos no ATP Draw.



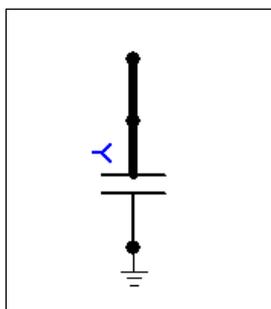
Fonte: O Autor.

Ressalta-se que para ligações em estrela (Y) a tensão será fase-neutro e para ligações do tipo delta (Δ) a tensão aplicada sobre o enrolamento será fase-fase.

4.4.7 Banco de Capacitores

Para representar a inserção de reativo na rede, utilizou-se o banco de capacitor com capacidade de 6000 kVAR de reativo. Os capacitores conectados na rede elétrica têm por objetivo melhorar os níveis de tensão nos pontos de interesse. A Figura (57) demonstra o modelo de capacitores em paralelo conectados em estrela (Y).

Figura 57. Modelo de capacitores no ATP Draw.



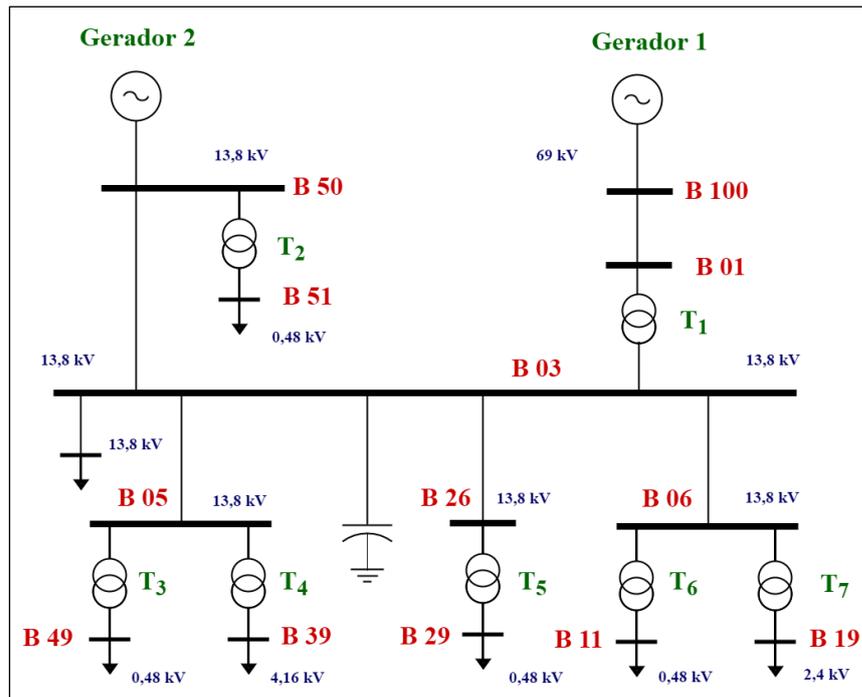
Fonte: O Autor.

O valor da reatância capacitiva é calculado a partir da energia reativa fornecida pelo capacitor e a tensão no barramento. É válido ressaltar que para um sistema balanceado os valores da reatância capacitiva devem ser iguais em todas as fases.

4.5 MODELAGEM DO SISTEMA

Para os testes e análises de propagação harmônica, utilizou-se o sistema de distribuição industrial balanceado de 13 barras (BIDS) (IEEE, 1999). A modelagem foi realizada no *software* ATP a partir dos recursos disponíveis no mesmo. A Figura (58) ilustra o diagrama unifilar do BIDS.

Figura 58. Sistema de distribuição industrial balanceado de 13 barras.



Fonte: LIMA *et al*, 2015.

O sistema modelado consiste na representação de uma planta industrial de tamanho médio (IEEE, 1999). O sistema é alimentado através de duas unidades geradoras: uma conectada no barramento (B100), operando na tensão de 69kV, a outra conectada no barramento (B50) com tensão de 13,8kV. Os cálculos de impedância dos cabos e condutores foram realizados a partir de dados da Tabela (7).

Tabela 7. Dados de impedância por unidade dos cabos de distribuição.

De	Para	R	X
B 100	B 01	0,00139	0,00296
B 03	B 50	0,00122	0,00243
B 03	B 05	0,00075	0,00063
B 03	B 26	0,00157	0,00131
B 03	B 06	0,00109	0,00091

Fonte: IEEE, 1999.

Deve-se utilizar o modelo mais adequado para representar as características das cargas elétricas. Para a obtenção da impedância das cargas conectadas nos barramentos, utilizaram-se os dados demonstrados na Tabela (8).

Tabela 8. Dados por unidade das cargas elétricas.

Barra	P_{CARGA} (MW)	Q_{CARGA} (MVar)
B 100	0,00139	0,00296
B 03	2240	2000
B 51	600	530
B 49	1150	290
B 39	1310	1130
B 11	370	330
B 19	2800	2500
B 29	810	800

Fonte: IEEE, 1999.

Para a representação dos transformadores de potência são necessários os valores de resistências e indutâncias dos enrolamentos primários e secundários, além de suas características intrínsecas, como tensões e tipo de ligação nos enrolamentos e potência. Os dados dos transformadores são demonstrados na Tabela (9).

Tabela 9. Dados dos transformadores.

De	Para	Tensão (kV)	Potência (kVA)	R (%)	X (%)
B 01	B 03	69/13,8	15000	0,4698	7,9862
B 50	B 51	13,8/0,48	1500	0,9593	5,6694
B 05	B 49	13,8/0,48	1250	0,7398	4,4388
B 05	B 39	13,8/4,16	1750	0,7442	5,9537
B 26	B 29	13,8/0,48	1500	0,8743	5,6831
B 06	B 11	13,8/0,48	1500	0,8363	5,4360
B 06	B 19	13,8/2,4	3750	0,4568	5,4810

Fonte: IEEE, 1999.

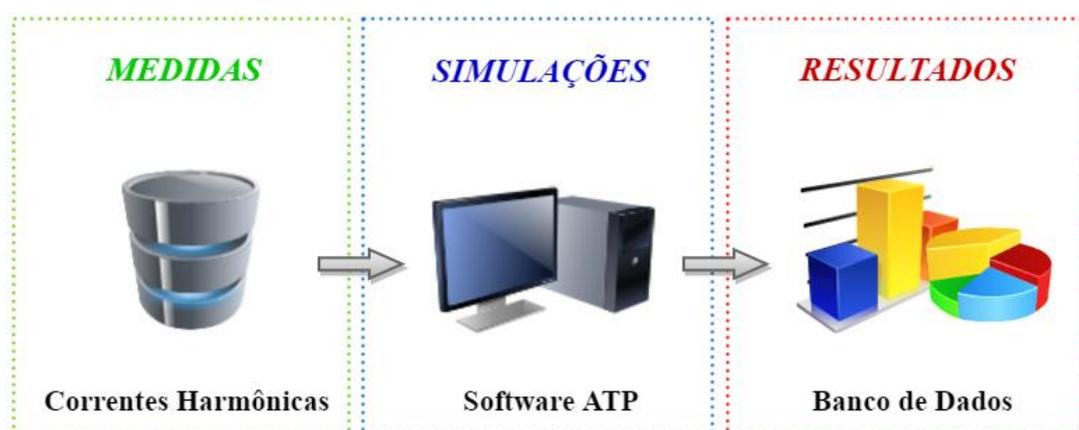
A correção do fator de potência é realizada através de uma compensação de um banco de capacitor de 6000kVAr conectado no sistema elétrico. Para os cálculos, utilizou-se a tensão e potência base com valores de 13,8kV e 10MVA, respectivamente. As cargas não lineares serão representadas através de fontes de correntes harmônicas, que utilizaram de valores de medidas realizadas em uma rede de distribuição da região norte do Brasil.

4.6 SIMULADOR

O simulador de redes elétricas tem por objetivo auxiliar no estudo de propagação de harmônicos em diversos sistemas elétricos. Para isso, as cargas não lineares são reproduzidas como fontes de correntes harmônicas, onde os valores eficazes foram obtidos por medidas realizadas em uma rede de distribuição da região norte de Brasil. Logo, para um conjunto de medidas, realizou-se um conjunto de simulações, permitindo demonstrar os resultados de tensões harmônicas em diversos pontos de interesse da rede elétrica para uma análise temporal.

A Figura (59) ilustra de maneira simplificada o fluxograma com o funcionamento do simulador de redes elétricas, onde inicialmente faz-se necessário o uso de medidas que permitirá realizar simulações para cada instante de tempo. Os resultados são fornecidos para cada instante de tempo para todas as frequências inicialmente fornecidas pelo usuário.

Figura 59. Fluxograma da funcionalidade do simulador de redes elétricas.

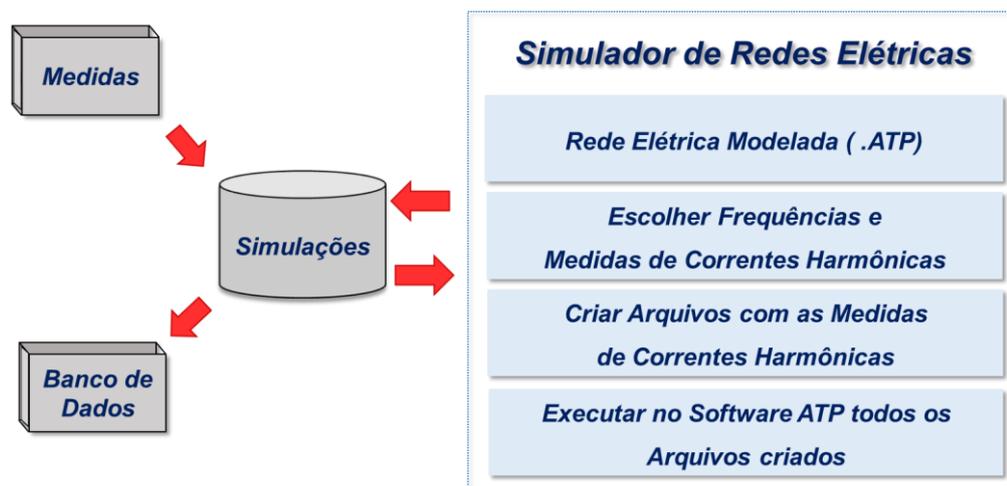


Fonte: O Autor.

Para o desenvolvimento de estudos de propagação de harmônico no simulador de redes elétricas, deve-se utilizar a rede elétrica modelada conforme a extensão definida no *software* ATP (em .ATP). Com as medidas dos valores eficazes das correntes harmônicas são criados arquivos para cada instante de tempo e após realizar um conjunto de simulações, são fornecidos os valores de tensão eficaz em todos os barramentos do sistema elétrico modelado para as frequências inicialmente definidas.

Com isso, as análises de propagação de harmônicos no sistema elétrico é apresentada para um conjunto de simulações. Logo, são realizadas análises estáticas para diferentes instantes de tempo. A Figura (60) apresenta o fluxograma com as etapas do simulador de redes elétricas.

Figura 60. Fluxograma do simulador de qualidade da energia.



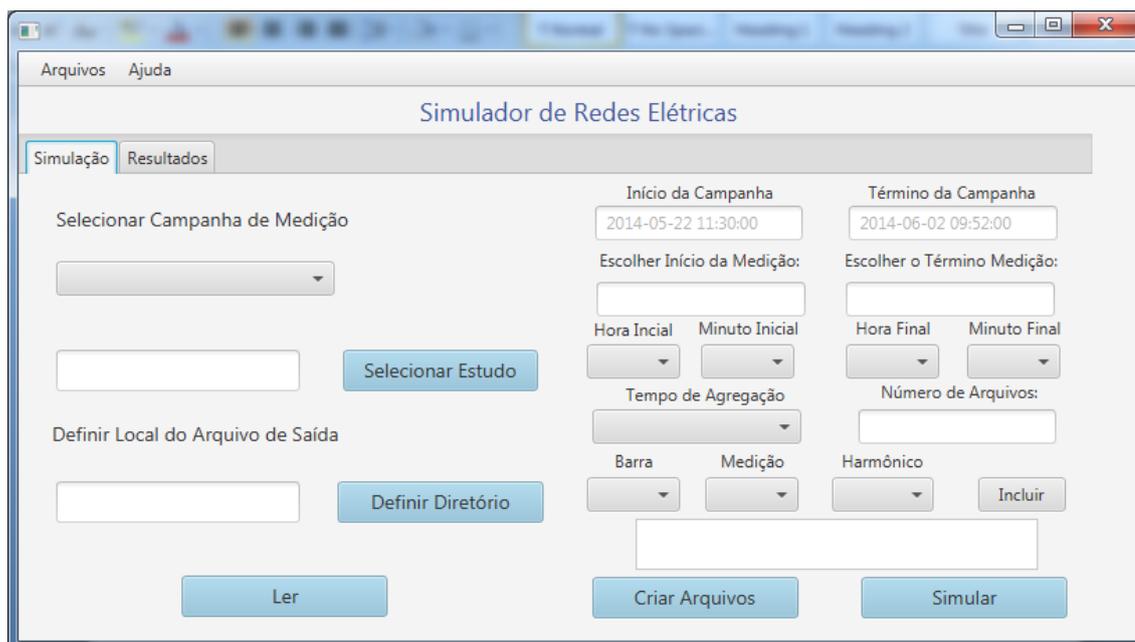
Fonte: O Autor.

Nos estudos de propagação de harmônicos em sistemas elétricos utilizando o simulador de redes elétricas, após utilizar uma rede elétrica modelada conforme solicitado no *software* ATP, deve-se selecionar as frequências de interesse e as medidas de correntes harmônicas que serão utilizadas para representar o comportamento não linear da carga elétrica. Posteriormente, são criados os arquivos (na extensão em .ATP) para cada instante de tempo e utilizando os valores eficazes das correntes harmônicas e por conseguinte executar um conjunto de arquivos para fornecer como resultados as tensões harmônicas para as frequências de interesse em todos os barramentos do sistema elétrico modelado.

4.7 INTERFACE GRÁFICA

A ferramenta desenvolvida utiliza a linguagem de programação Java com o paradigma de programa orientado a objetos (POO), com objetivo de introduzir características de herança, ou seja, os referencia a uma nova classe para aprimorá-lo. Com isso, terá contribuições na economia de tempo e para o desenvolvimento de novas classes, aumentando a probabilidade de um sistema ser implementado e mantido (DIETEL *et al*, 2010). A Figura (61) apresenta as opções iniciais do simulador de redes elétricas na aba de simulação.

Figura 61. Opções disponíveis no simulador de redes elétricas na aba de simulação.



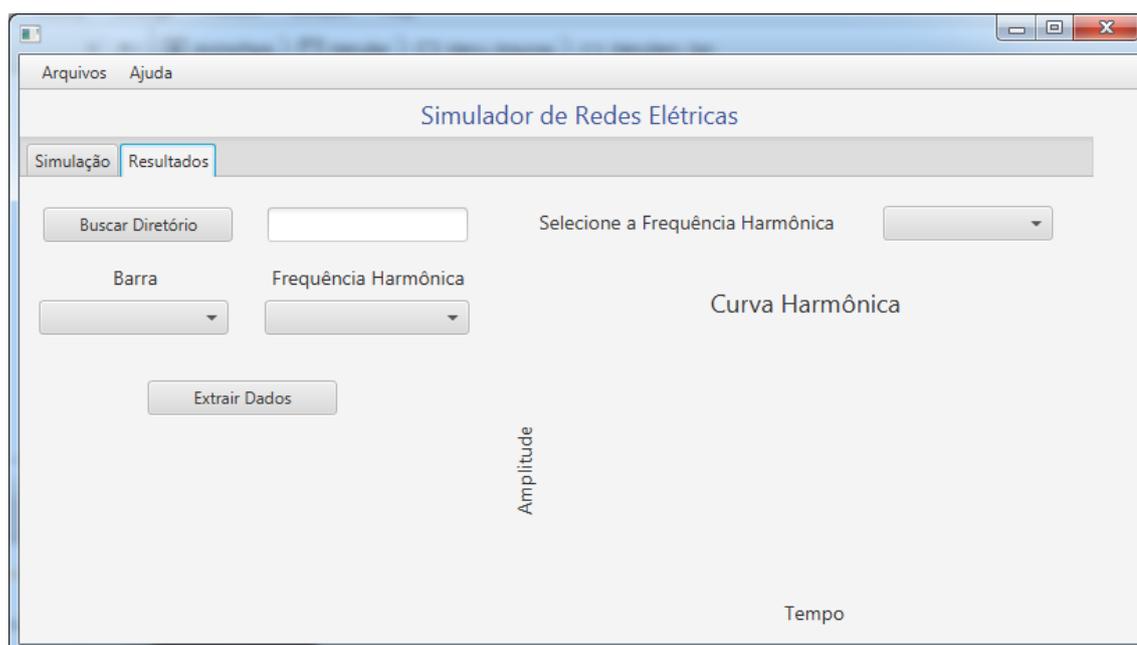
Fonte: O Autor

Com o simulador de redes elétricas é possível realizar de maneira automática o desenvolvimento de estudos computacionais de propagação harmônica em redes elétricas. As medidas do valor eficaz das correntes harmônicas irão representar o comportamento não linear das cargas elétricas conectadas nos barramentos. Portanto, inicialmente deve ser fornecido ao simulador de redes elétricas as medidas de correntes harmônicas e o arquivo de entrada (extensão em .ATP) que poderá ser qualquer rede elétrica modelada conforme os procedimentos estabelecidos no *software* ATP.

Como as medidas são obtidas por equipamentos de medição, a campanha de medição pode fornecer o comportamento não linear das cargas harmônicas para vários dias. Por isso, na mesma aba, o usuário poderá selecionar o tempo de início e término do estudo.

Para cada instante de tempo, será criado um novo arquivo (em .ATP), nesses novos arquivos as amplitudes e os ângulos das correntes harmônicas são adicionadas e atualizadas através das medidas. Após a criação desses arquivos, será realizado um conjunto de simulações que representarão um conjunto de resultados para a análise temporal. A Figura (62) ilustra a funcionalidade na aba de resultados no simulador de redes elétricas.

Figura 62. Opções disponíveis no simulador de redes elétricas na aba de simulação.



Fonte: O Autor

Alguns tópicos são disponibilizados no simulador de redes elétricas, nos quais o usuário poderá importar a campanha de medição, assim como editar ou criar um novo arquivo, sendo este a modelagem de uma rede elétrica conforme estabelecido pelo *software* ATP.

4.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentadas algumas características do *software* ATP. Para isso, apresentaram-se alguns modelos que podem representar um sistema elétrico para os estudos de propagação de harmônicos. Portanto, o uso de ferramentas computacionais no planejamento e/ou no diagnóstico de problemas na rede elétrica tornou-se uma ferramenta indispensável já apresentam resultados satisfatórios e permite que o usuário possa analisar diferentes condições de operação.

Logo, foi apresentada a metodologia utilizada para a representação de um sistema de distribuição no *software* ATP, sendo também abordados os objetivos a serem alcançados com a utilização do simulador de redes elétricas no estudo de propagação de harmônicos.

CAPÍTULO V

5 RESULTADOS

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentadas análises de propagação de harmônicos em uma rede de distribuição com até quatro cargas não lineares conectadas no sistema elétrico. Essas cargas não lineares foram modeladas como fontes de correntes harmônicas, para isso utilizou-se de medidas com valores eficazes de correntes harmônicas. Essas medidas foram obtidas por meio de analisadores conectados em uma rede de distribuição da região Norte, representando o comportamento diário das cargas não lineares, com tempo de agregação de um minuto, tendo apresentada uma quantidade de 1440 medidas.

Inicialmente, são apresentados os resultados com os níveis de distorções harmônicas de tensão para o estudo de propagação de harmônicos no sistema elétrico quando somente uma carga não linear está conectada. Por conseguinte, de maneira semelhante, será realizada a análise para quando duas cargas não lineares estão conectadas no sistema elétrico. Essa metodologia é utilizada para as análises e estudos de propagação de harmônicos no sistema quando até quatro cargas não lineares estiverem conectadas. A partir disso, será possível analisar o cancelamento harmônico com os diferentes perfis de cargas elétricas conectadas no sistema elétrico.

Por fim, são apresentados resultados de propagação de harmônicos no sistema elétrico para diferentes conexões nos enrolamentos primários e secundários dos transformadores de potência. É válido ressaltar que para as conexões em delta-estrela (Δ -Y) ouve um deslocamento de fase de 30° . No entanto, na ligação estrela-estrela (Y-Y) não há deslocamento de fase, o que pode contribuir para o cancelamento harmônico.

5.2 ANÁLISES DOS RESULTADOS

As cargas não lineares contribuem para o surgimento de distorções harmônicas nos sistemas elétricos, no entanto, à diversidade dessas cargas elétricas conectadas em um mesmo barramento podem contribuir para a diminuição dos níveis de distorção harmônica por meio do cancelamento harmônico ou mesmo a atenuação das correntes harmônicas resultante da decomposição das diferentes cargas não lineares.

Os transformadores de potência, para alguns tipos de conexão nos enrolamentos primários e secundários não permitem a propagação de harmônicos de sequência zero, como frequências de 3ª e 9ª ordens. No entanto, quando esses equipamentos operam em estado de saturação, apresentam contribuição de distorção harmônica. Para isso, inicialmente são apresentados estudos prévios para demonstrar algumas dessas constatações em simulações computacionais no *software* ATP.

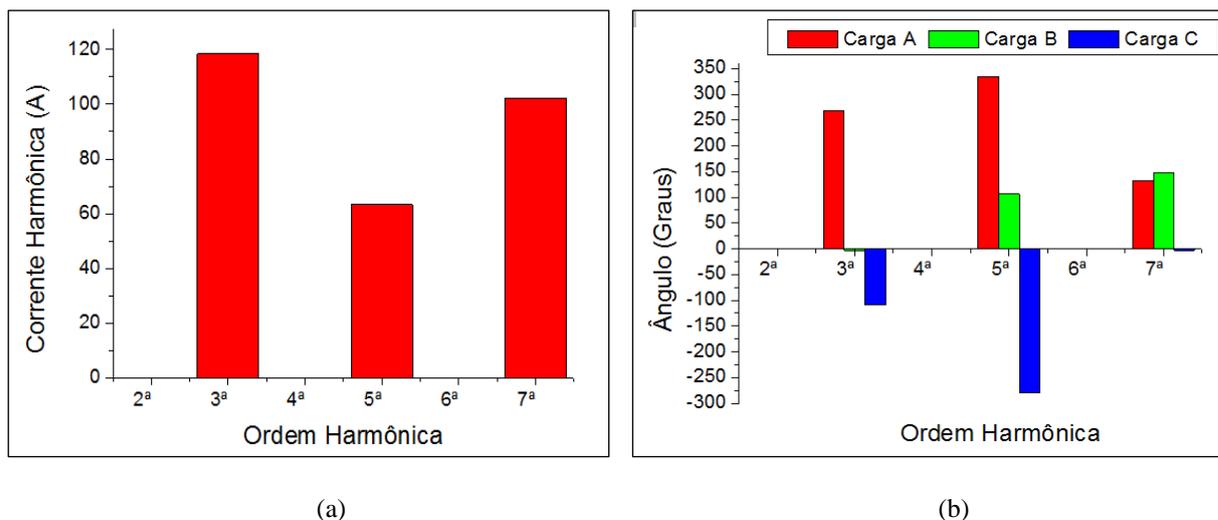
5.2.1 Cancelamento Harmônico

Dentre as diversas medidas possíveis para redução e controle das distorções harmônicas em sistemas elétricos, a instalação de filtros harmônicos apresenta-se como uma solução. Quando os mesmos são conectados em paralelo proporcionam um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas. No entanto, quando conectados em série, são injetam correntes harmônicas com defasagem oposta as produzidas por cargas não lineares.

Da mesma forma, a presença das cargas não lineares, tanto monofásicas quanto trifásicas, permite o cancelamento harmônico devido a diferença angular entre as cargas elétricas (HANSEN *et al*, 2000). Portanto, nos estudos de propagação de harmônicos em redes elétricas devem-se considerar os ângulos em fase para cada frequência harmônica.

Assim, para avaliar o cancelamento harmônico quando cargas com diferentes perfis estão conectadas em um mesmo barramento, modelaram-se três cargas não lineares trifásicas com perfis conforme estabelecidos no artigo IEEE (1999). A Figura (63) apresenta os valores eficazes das correntes harmônicas, sendo em (a) a amplitude e os (b) ângulos para cada carga elétrica. É importante ressaltar que as cargas são trifásicas e balanceadas, os dados apresentados na Figura (63) são para a fase A.

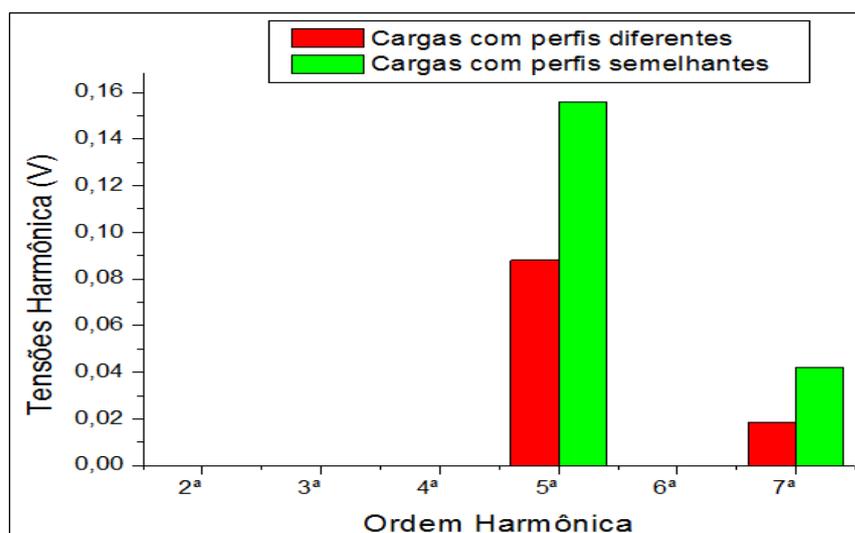
Figura 63. Amplitudes e ângulos das cargas harmônicas reproduzidas no sistema elétrico.



Fonte: O Autor.

Com a representação das três cargas trifásicas não lineares com diferentes perfis harmônicas, pode-se obter o resultado para estudos de propagação de harmônicos. Logo, ao considerar as cargas não lineares balanceadas e os enrolamentos dos transformadores de potência conectados em delta-estrela aterrado (Δ -Y), pode-se observar a ausência de harmônicos de sequência zero. A Figura (64) apresenta a comparação quando o sistema elétrico opera com três cargas elétricas não lineares com diferentes perfis harmônicos e com perfis semelhantes. A partir disso, pode-se observar o cancelamento de tensões harmônicas de 5ª e 7ª ordens quando o sistema opera com cargas não lineares com perfis diferentes.

Figura 64. Tensões harmônicas no barramento (B03) para cargas com perfis semelhantes e diferentes.



Fonte: O Autor.

Os resultados apresentados na Figura (64) são tensões harmônicas no barramento (B03) conectado ao lado delta (Δ) dos transformadores de potência. Os perfis harmônicos

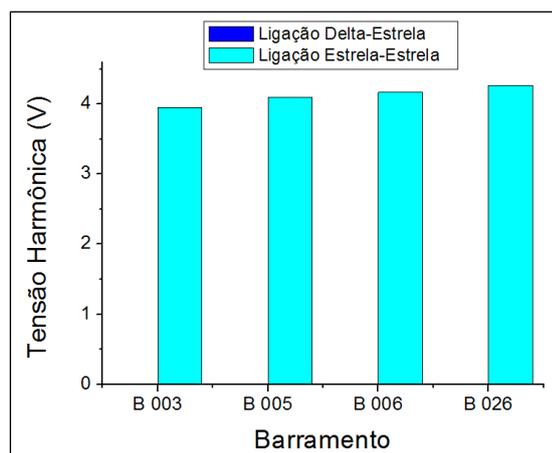
reproduzidos são disponibilizados em (IEEE, 1999). Logo, a partir dos resultados, pode-se observar que a presença de cargas não lineares com diferentes perfis harmônicos permite o cancelamento harmônico.

5.2.2 Filtragem de Harmônicos em Transformadores

Os transformadores de potência alteram o fluxo harmônico devido basicamente a três fatores: a impedância série, a conexão dos enrolamentos e o ramo de magnetização. Nesses equipamentos, dependendo da ordem harmônica e da conexão dos enrolamentos, podem-se produzir mudanças de fase $\pm 30^\circ$ para os harmônicos de tensão e corrente (DERICK, 1995 *apud* EXPÓSITO, 2010). Os enrolamentos primários e secundários de um transformador trifásico podem ser independentemente conectados em estrela (Y) ou delta (Δ) possibilitando quatro possíveis ligações, sendo: (Y-Y), (Y- Δ), (Δ -Y) e (Δ - Δ).

As conexões de transformadores em delta (Δ) possibilita a circulação de correntes de sequência zero em um circuito fechado, isolando as componentes harmônicas produzidas de um lado para o outro nos enrolamentos de um transformador (CHAPMAN, 2004). No entanto, as ligações em estrela (Y) nos enrolamentos primários e secundários permitem a circulação das correntes harmônicas de sequência zero, como de 3ª e 9ª ordens. A Figura (65) ilustra a propagação harmônica considerando as ligações (Y-Y) e (Δ -Y) nos enrolamentos do transformador de potência.

Figura 65. Tensões harmônicas de 3ª ordem para diferentes conexões dos enrolamentos de transformadores.



Fonte: O Autor.

Quando os transformadores estão conectados em delta-estrela (Δ -Y), as componentes harmônicas de correntes de terceira ordem e suas múltiplas inteiras serão isoladas, não propagando no sistema elétrico. Diferentemente quando esses equipamentos estão conectados em estrela-estrela (Y-Y), pois para esse tipo de conexão ocorrerá a propagação de correntes

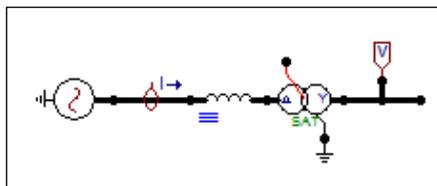
harmônicas de sequência zero no sistema elétrico, conforme apresentado na Figura (65), sendo as tensões harmônicas de 3ª ordem nos barramentos (B03, B05, B06 e B26) para os transformadores de potência conectados em (Δ -Y) e (Y-Y). É importante ressaltar que as cargas não lineares são trifásicas e balanceadas.

5.2.3 Saturação de Transformadores

De acordo com Expósito (2010), o ramo de magnetização dos transformadores de potência é uma fonte geradora de harmônicos. Logo, a energização de transformadores pode criar fluxos assimétricos e a saturação do núcleo, devido às características não lineares entre o fluxo magnético e a corrente de magnetização proporciona o aparecimento de harmônicos no sistema elétrico (ARAÚJO, 2005).

A saturação dos transformadores de potência conectados ao sistema elétrico foi analisada através de simulações transitórias, para isso, além dos valores de resistência e reatância dos enrolamentos primários e secundários, foi adicionada a curva de saturação. A Figura (66) ilustra a simulação do transformador em estado de saturação.

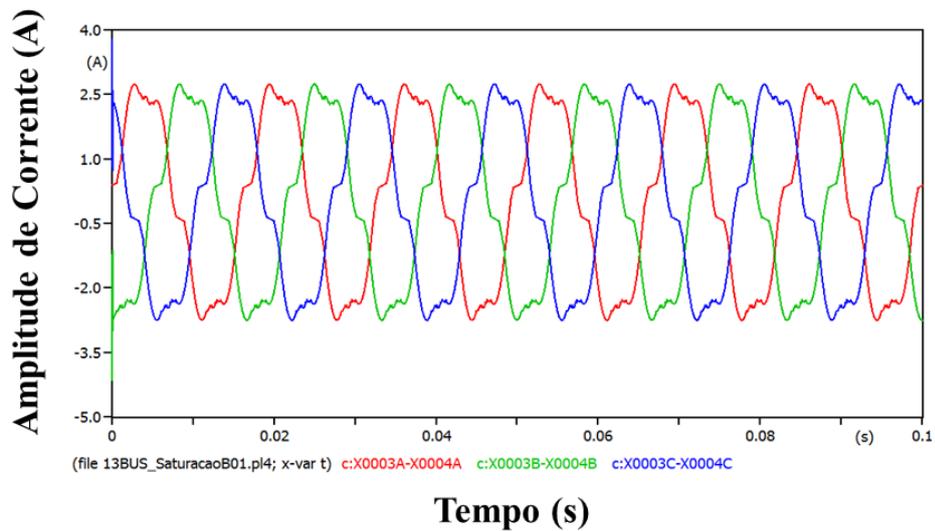
Figura 66. Simulação transitória do transformador em estado de saturação conectado em (Δ -Y).



Fonte: O Autor.

Com isso, obteve-se resultados de amplitudes e ângulo de fase e, por conseguinte foram representadas como fonte de corrente harmônica no estudo de propagação de harmônicos. Logo, a Figura (67) apresenta a corrente de magnetização simulada para o transformador T1 em estado de saturação.

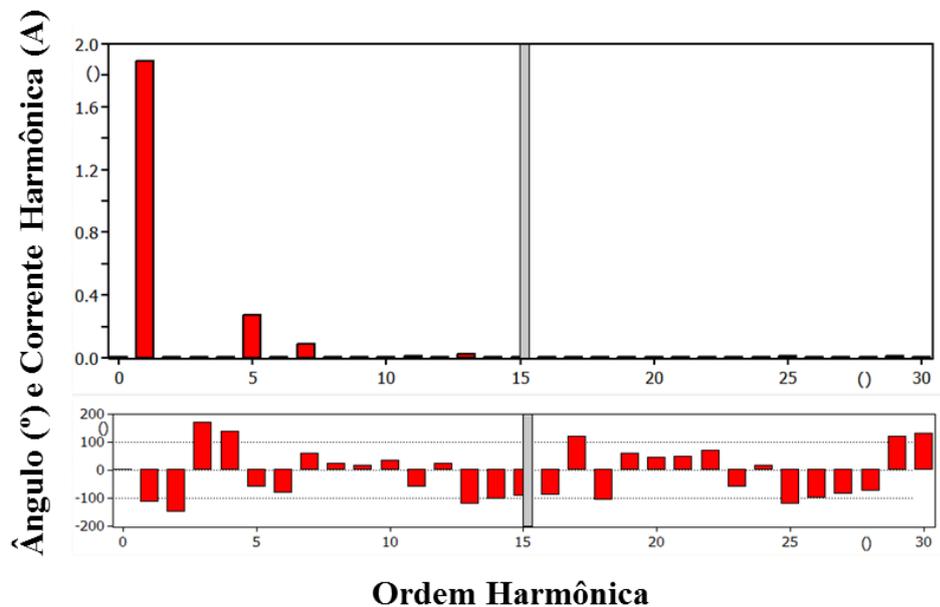
Figura 67. Corrente de magnetização para as fases A, B e C do transformador T1 em saturação conectado em (Δ -Y).



Fonte: O Autor

Na da Figura (67) é possível observar a presença de distorções harmônicas na corrente de magnetização do transformador de potência. A partir disso, pode-se extrair o espectro harmônico que compõe esse sinal. Portanto, na Figura (68) são demonstradas as amplitudes das correntes harmônicas e seus respectivos ângulos, onde as componentes harmônicas de 5ª e 7ª ordens apresentam maiores contribuições.

Figura 68. Espectro harmônico obtido com a saturação do transformador T1 para a fase A.



Fonte: O Autor

Os resultados apresentados na Figura (68), demonstrando as componentes harmônicas que compõe o sinal distorcido da corrente de magnetização do transformador em estado de saturação, são obtidos no enrolamento primário que está conectado em delta. Com isso,

ressalta-se os valores em RMS para as componentes harmônicas de 5ª e 7ª ordens são respectivamente, 0,38A e 0,11A.

Seguindo a mesma metodologia, realizaram-se as análises para os demais transformadores que estão conectados no sistema elétrico. Com isso, as componentes harmônicas geradas por cada transformador operando em estado de saturação foram implementadas no estudo de propagação de harmônicos como fontes de correntes harmônicas. Logo, as componentes harmônicas geradas por cada transformador de potência estão demonstrados na Tabela (10).

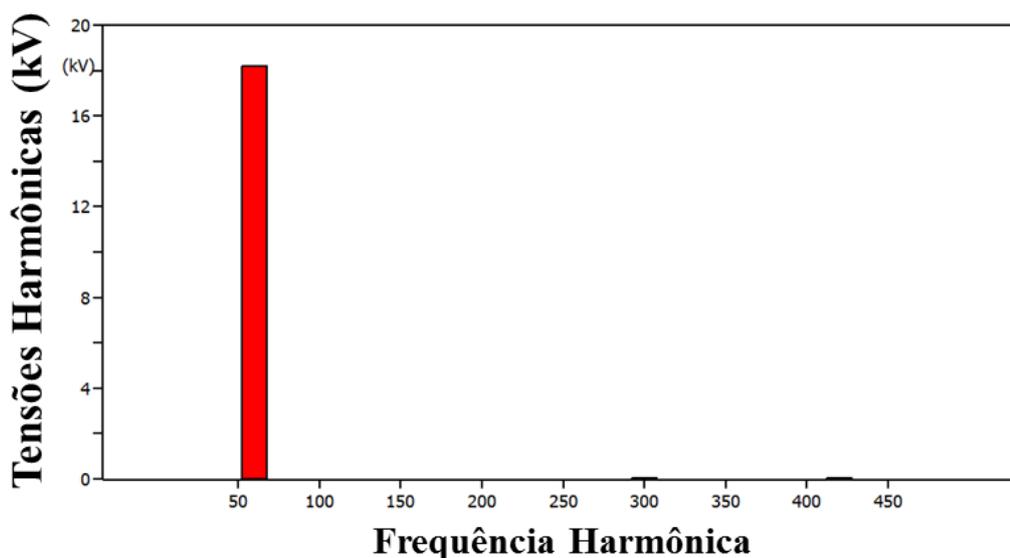
Tabela 10. Correntes harmônicas de transformadores em estado de saturação conectados em (Δ -Y).

Transformadores	1ª Ordem		5ª Ordem		7ª Ordem	
	Corrente (A)	Ângulo (°)	Corrente (A)	Ângulo (°)	Corrente (A)	Ângulo (°)
T1	1,89	8,36	0,26	-179,97	0,083	-179,96
T2	1,613	59,40	0,10968	179,80	0,04085	179,72
T3	1,4187	54,65	0,10968	179,84	0,04085	179,78
T4	1,7955	62,78	0,10968	179,77	0,4085	179,68
T5	1,613	59,40	0,10968	179,80	0,4085	179,72
T6	1,613	59,40	0,10968	179,80	0,4085	179,72
T7	3,5676	76,65	0,10967	179,45	0,4084	179,23

Fonte: O Autor

A partir disso, as componentes harmônicas de todos os transformadores foram representadas como fontes de correntes harmônicas e as cargas elétricas foram reproduzidas como cargas lineares. Com isso, avaliou a contribuição da própria rede para as distorções harmônicas quando esses equipamentos operam em estado de saturação. A Figura (69) mostra as tensões harmônicas no barramento (B03) para os transformadores operando em estado de saturação com os enrolamentos conectados em delta-estrela (Δ -Y).

Figura 69. Tensões harmônicas no barramento (B03) com os transformadores saturados e conectados em (Δ -Y).

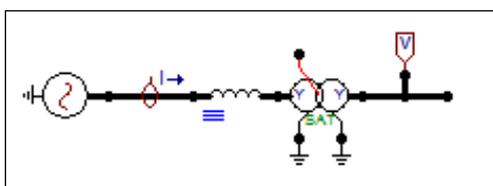


Fonte: O Autor

Portanto, na Figura (69) observa-se as tensões harmônicas de 5ª e 7ª ordens tendo valores respectivos de 0,0386V e 0,0182V. A ausência de tensões harmônicas de 3ª ordem é justificado devido à conexão dos transformadores não permitirem a propagação de harmônicos de sequência zero.

De maneira semelhante, com intuito de avaliar as distorções harmônicas dos transformadores operando em estado de saturação, no entanto, com os enrolamentos primários e secundários conectados em estrela-estrela (Y-Y), realizaram-se as análises transitórias. A Figura (70) ilustra a simulação do transformador T1 em estado de saturação.

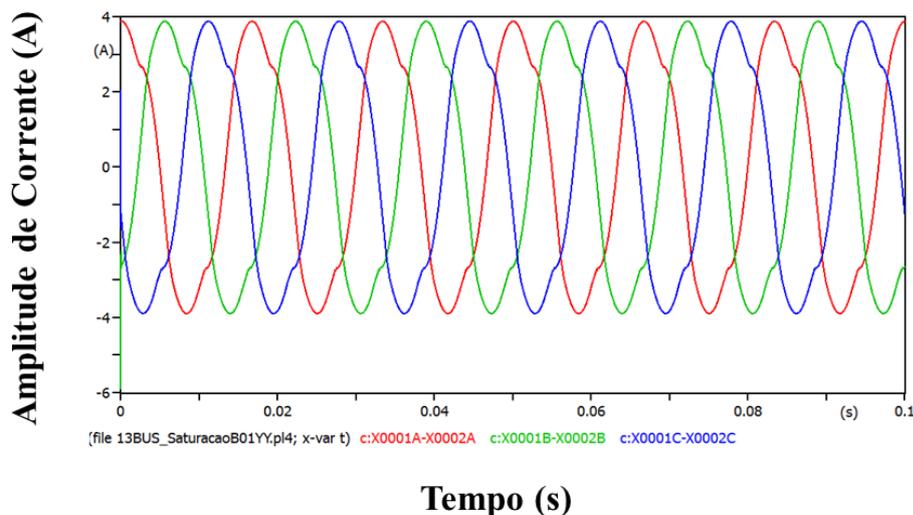
Figura 70. Simulação transitória do transformador em estado de saturação conectado em (Y-Y).



Fonte: O Autor

Com isso, obteve-se resultados de amplitudes e ângulo de fase e, por conseguinte foram representadas como fonte de corrente harmônica no estudo de propagação de harmônicos. Na Figura (71) é apresentada a corrente de magnetização simulada para o transformador T1 em estado de saturação conectado em (Y-Y).

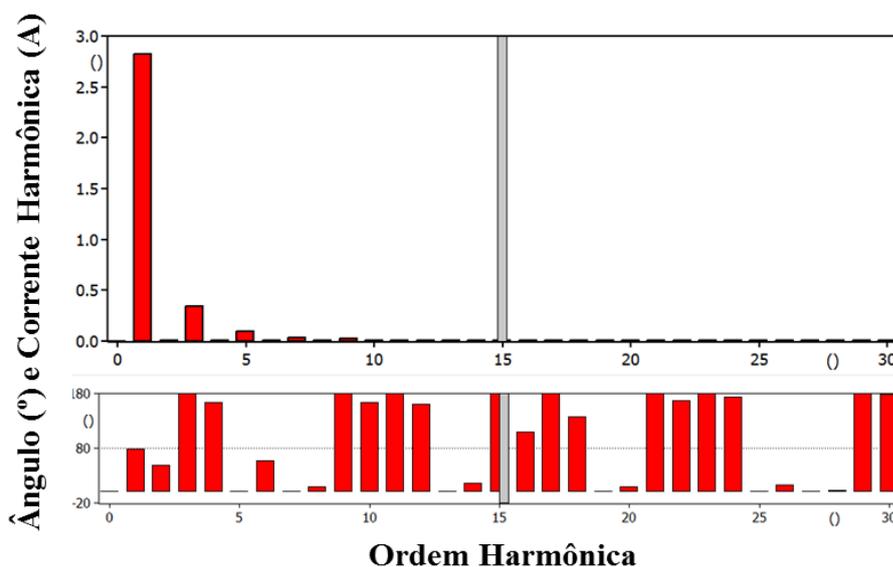
Figura 71. Corrente de magnetização para as fases A, B e C do transformador T1 em saturação conectado em (Y-Y).



Fonte: O Autor

Na da Figura (71) é possível observar a presença de distorções harmônicas na corrente de magnetização do transformador de potência. A partir disso, pode-se extrair o espectro harmônico que compõe esse sinal, conforme apresentado na Figura (72), sendo demonstradas as amplitudes das correntes harmônicas e seus respectivos ângulos, onde as componentes harmônicas de 5ª e 7ª ordens apresentam maiores contribuições.

Figura 72. Espectro harmônico para o transformador T3 conectado em (Y-Y).



Fonte: O Autor

Na Figura (72) é mostrado o espectro harmônico quando o transformador T1 opera em estado de saturação e conectado em estrela-estrela (Y-Y). Com isso, pode-se observar que para este tipo de ligação ocorre a circulação de componentes harmônicas de sequência zero.

Na Tabela (11) é mostrado as componentes harmônicas dos transformadores em estado de saturação conectados em estrela-estrela (Y-Y).

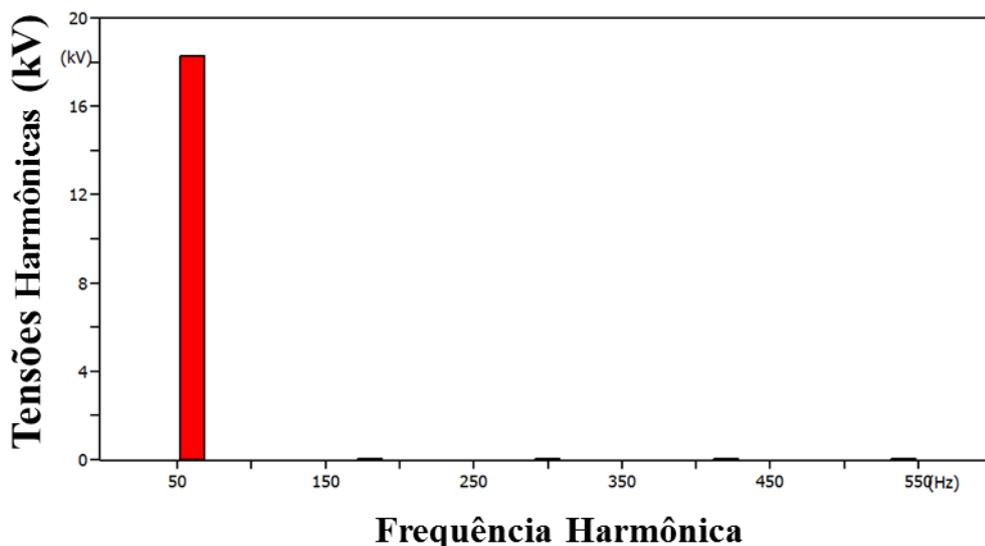
Tabela 11. Correntes harmônicas de transformadores em estado de saturação conectados em (Y-Y)..

Transformadores	1ª Ordem		3ª Ordem		5ª Ordem		7ª Ordem	
	Corrente (A)	Ângulo (°)						
T1	2,81	81,13	0,3462	55,34	0,0892	38,87	0,083	6,97
T2	1,4157	78,84	0,1478	179,88	0,03654	-0,18	0,0136	-0,26
T3	1,1894	76,67	0,1478	179,9	0,03654	-0,14	0,0136	-0,21
T4	1,62	80,26	0,1478	179,88	0,036	-0,22	0,0136	-0,26
T5	1,41	78,84	0,1478	179,9	0,3654	-0,14	0,0136	-0,21
T6	1,41	78,84	0,1477	179,88	0,3654	-0,18	0,0136	-0,26
T7	3,48	85,44	0,1477	179,66	0,0364	-0,52	0,0135	-0,76

Fonte: O Autor

A partir disso, as componentes harmônicas de todos os transformadores foram representadas como fontes de correntes harmônicas e as cargas elétricas foram reproduzidas como cargas lineares. Com isso, avaliou a contribuição da própria rede para as distorções harmônicas quando esses equipamentos operam em estado de saturação. Na Figura (73) é mostrado as tensões harmônicas no barramento (B03) para os transformadores operando em estado de saturação com os enrolamentos conectados em delta-estrela (Y-Y).

Figura 73. Tensões harmônicas no barramento (B03) com a saturação dos transformadores com conexão (Y-Y) dos enrolamentos.



Fonte: O Autor

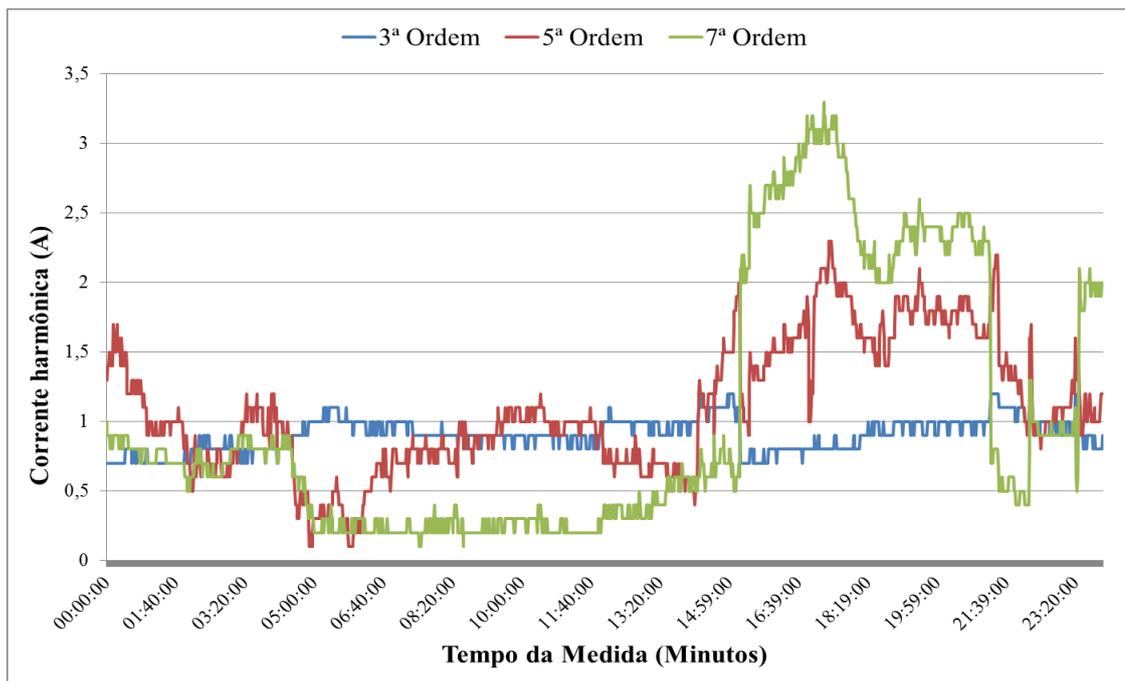
Portanto, na Figura (73) observam-se as tensões harmônicas de 3^a, 5^a, 7^a e 9^a ordens tendo valores respectivos de 0,0305V, 0,0128V, 0,0075V e 0,0062V. Observa-se a presença de harmônicos de sequência zero, como de 3^a e 9^a ordens, isso é justificado já que as ligações estrela-estrela (Y-Y) permite a propagação dessas componentes no sistema elétrico.

5.2.4 Medidas de Correntes Harmônicas

Por conseguinte, são apresentadas as medidas de correntes harmônicas que foram utilizadas para representar, por meio do modelo de fonte de corrente harmônicas, as quatro cargas não lineares conectadas em barramentos do sistema elétrico. Essas medidas de correntes harmônicas foram obtidas por meio de medições realizada em uma rede de distribuição da região norte do Brasil.

As medidas apresentam amplitudes e fases de correntes harmônicas de 3^a, 5^a e 7^a ordens para a representação do comportamento não linear das cargas elétricas. Essas medidas apresentam o comportamento de um dia, dispõe-se de 1440 medidas, pois o tempo de agregação foi de um minuto. A Figura (74) mostra as medidas com as amplitudes de correntes harmônicas utilizadas para a representação de uma carga não linear conectada no barramento (B11).

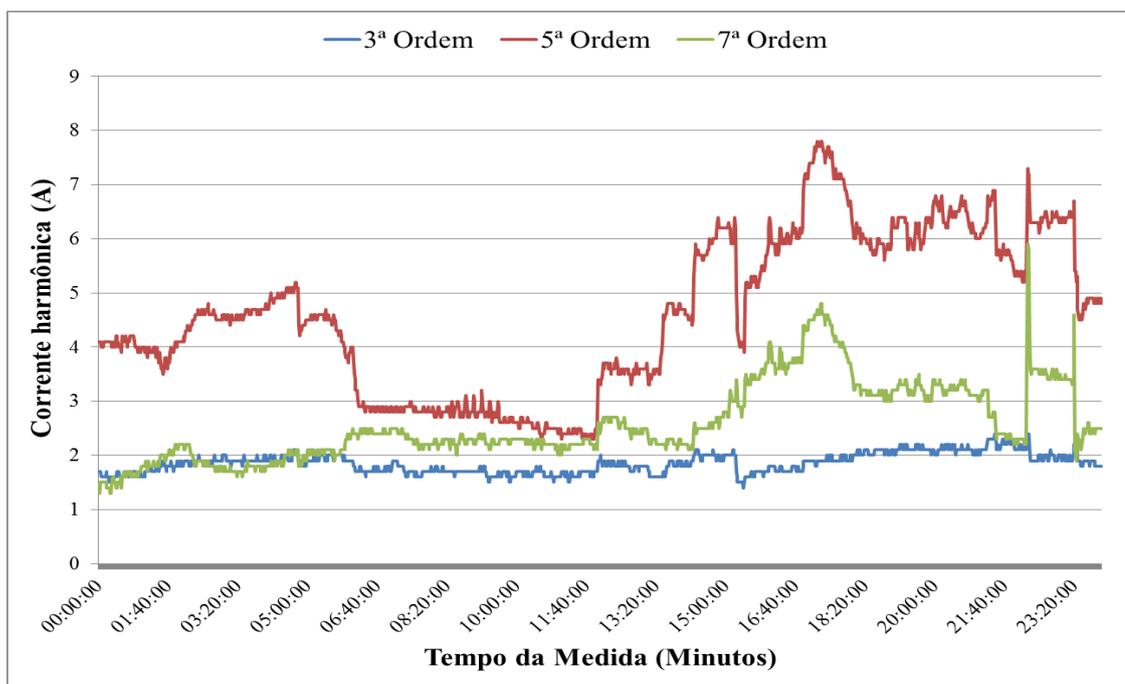
Figura 74. Medidas de correntes harmônicas da carga não linear conectada no barramento (B11).



Fonte: O Autor.

Da mesma forma, para representar o comportamento harmônico de uma carga não linear conectada no barramento (B29), utilizou-se de medidas com as amplitudes de correntes harmônicas, conforme apresentado na Figura (74).

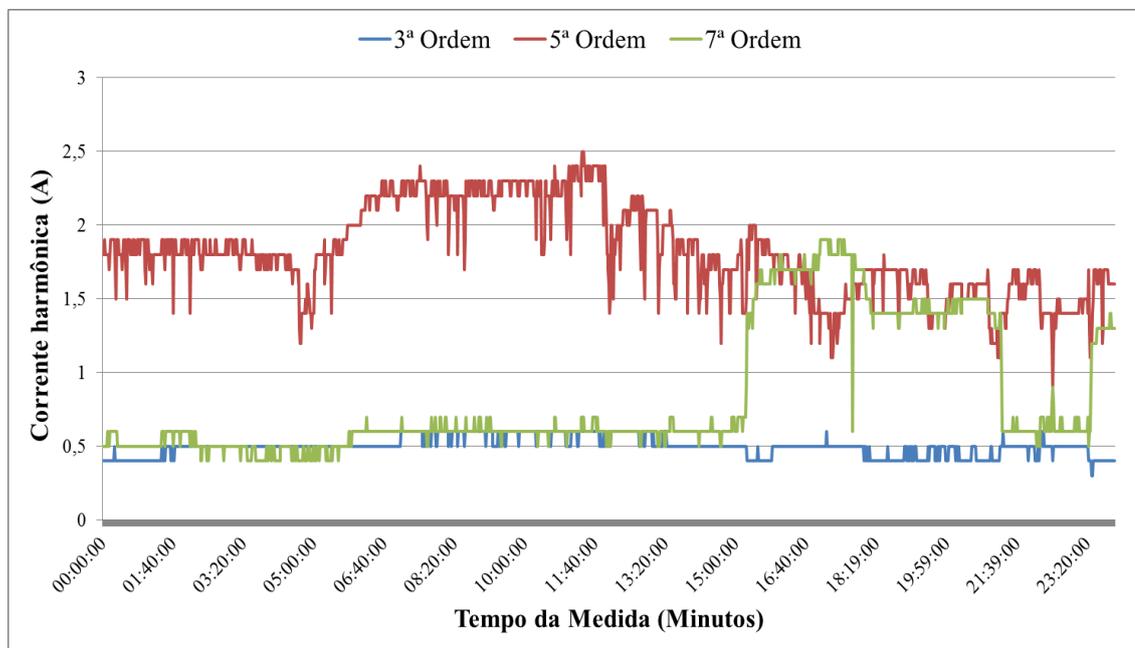
Figura 75. Medidas de correntes harmônicas da carga não linear conectada no barramento (B29).



Fonte: O Autor.

Analogamente, para representar o comportamento harmônico de uma carga não linear conectada no barramento (B49), foi utilizado medidas com as amplitudes de correntes harmônicas, conforme ilustrado (76) e também os seus respectivos ângulos locais.

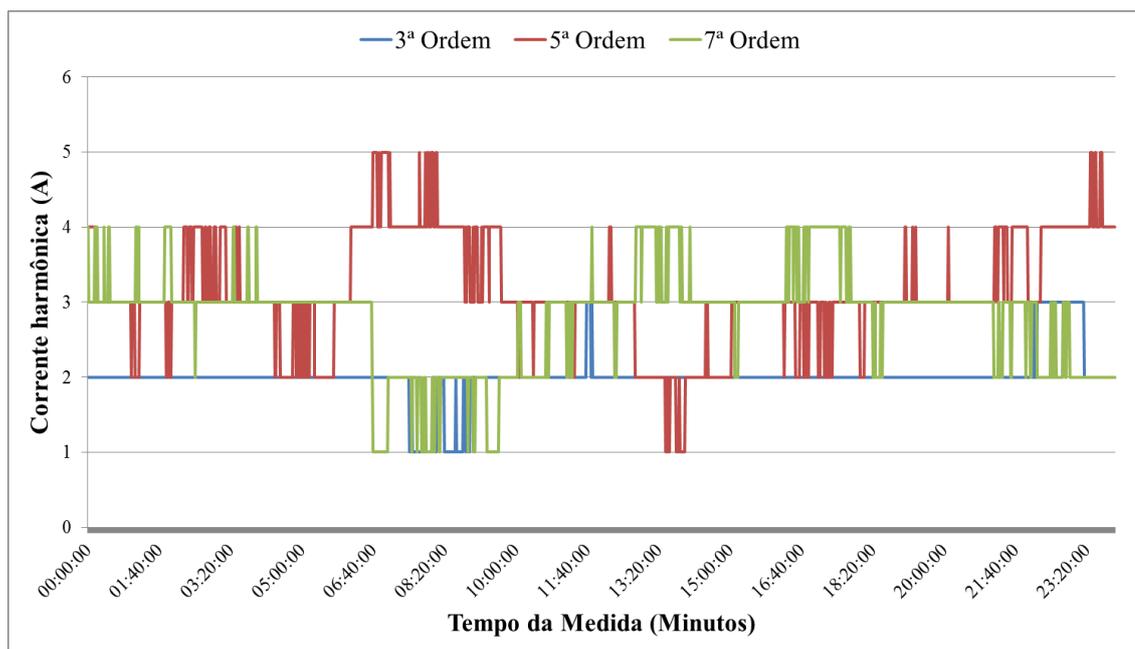
Figura 76. Medidas de correntes harmônicas da carga não linear conectada no barramento (B49).



Fonte: O Autor.

O comportamento harmônico da carga não linear conectada no barramento (B51) foi representado por meio de medidas de componentes harmônicas, conforme ilustrado na Figura (77). É válido ressaltar que para todas as medidas harmônicas utilizou-se dos ângulos locais obtidos pelas medições.

Figura 77. Medidas de correntes harmônicas da carga não linear conectada no barramento (B51).



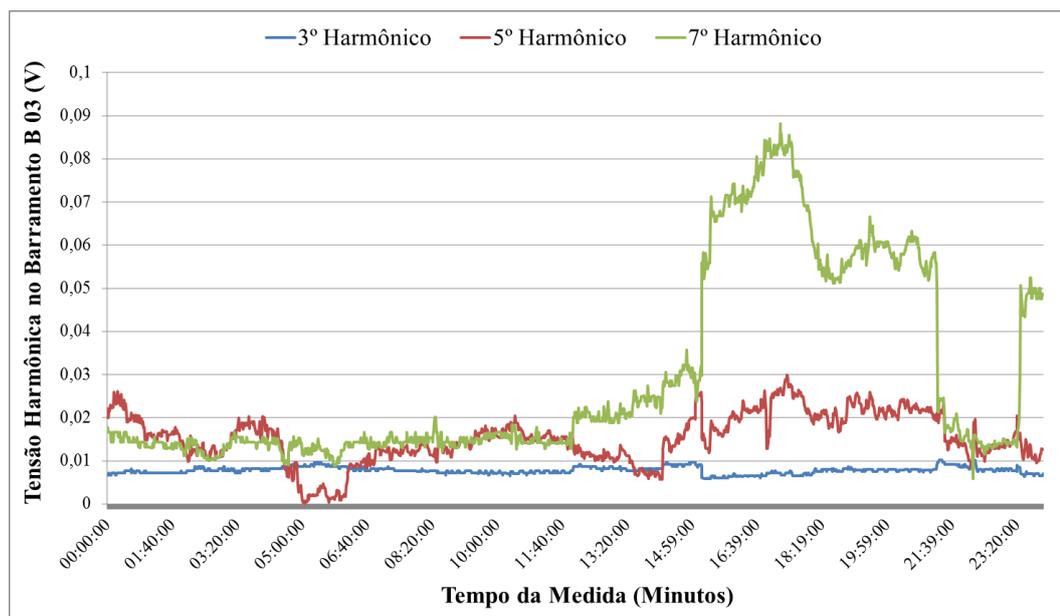
Fonte: O Autor.

A partir disso, os estudos de propagações de harmônicos no sistema elétrico podem ser realizados para configurações de até quatro diferentes cargas não lineares conectadas na rede elétrica. Os valores de medidas são apresentados para um determinado instante de tempo, sendo que para cada valor de medida foi realizado uma simulação, tendo como resposta tensões harmônicas em todos os barramentos do sistema elétrico. A seguir, serão apresentadas as tensões harmônicas para as diferentes configurações das cargas elétricas.

5.2.5 Resultados com o Simulador

A partir da representação do comportamento harmônico das cargas não lineares como fontes de correntes harmônicas, o estudo de propagação de harmônicos no sistema elétrico foi obtido para diferentes topologias da rede elétrica. Portanto, inicialmente na Figura (78) ilustra as tensões harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordens para os estudos de propagação de harmônicos no sistema elétrico quando uma carga não linear está conectada no barramento (B11).

Figura 78. Tensões harmônicas no barramento (B03) para uma carga não linear.

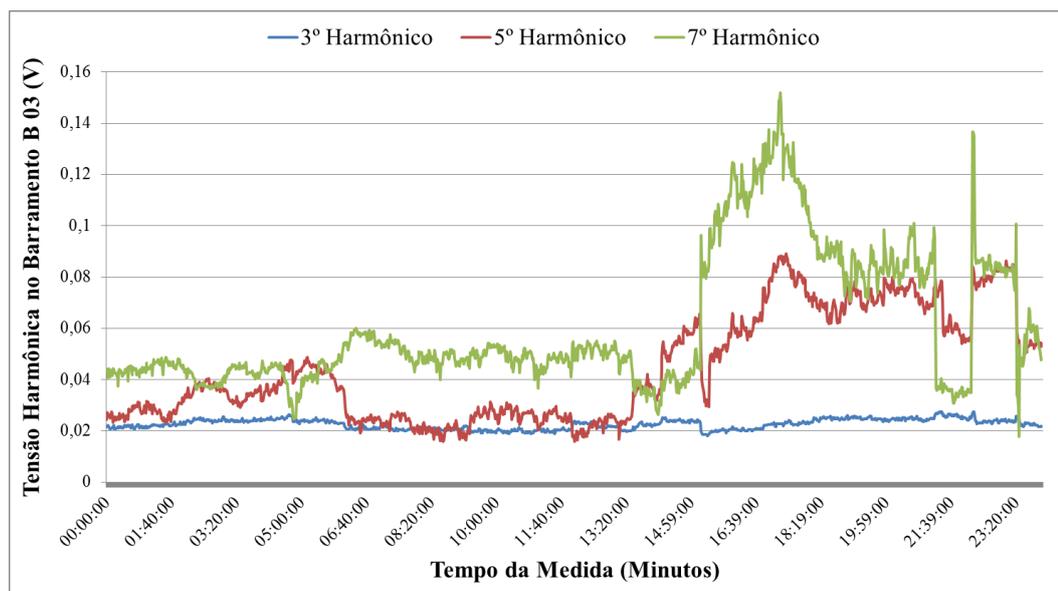


Fonte: O Autor

É válido ressaltar que os transformadores apresentam conexões em delta-estrela (Δ -Y) para os enrolamentos primários e secundários, com isso, não haverá a circulação de harmônicos de sequência zero para sistemas balanceados. No entanto, as cargas não lineares utilizadas nesse estudo são cargas reais obtidas por meio de medições e sendo todas desbalanceadas. Dessa forma, pode-se observar na Figura (78) que há circulação de componentes harmônicas de 3ª ordem, no entanto são pequenas distorções.

A seguir, na Figura (79) são apresentadas as tensões harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordens para estudos de propagação de harmônicos no sistema elétrico para duas cargas não lineares conectadas nos barramentos (B11) e (B29).

Figura 79. Tensões harmônicas no barramento (B03) para duas cargas não lineares.

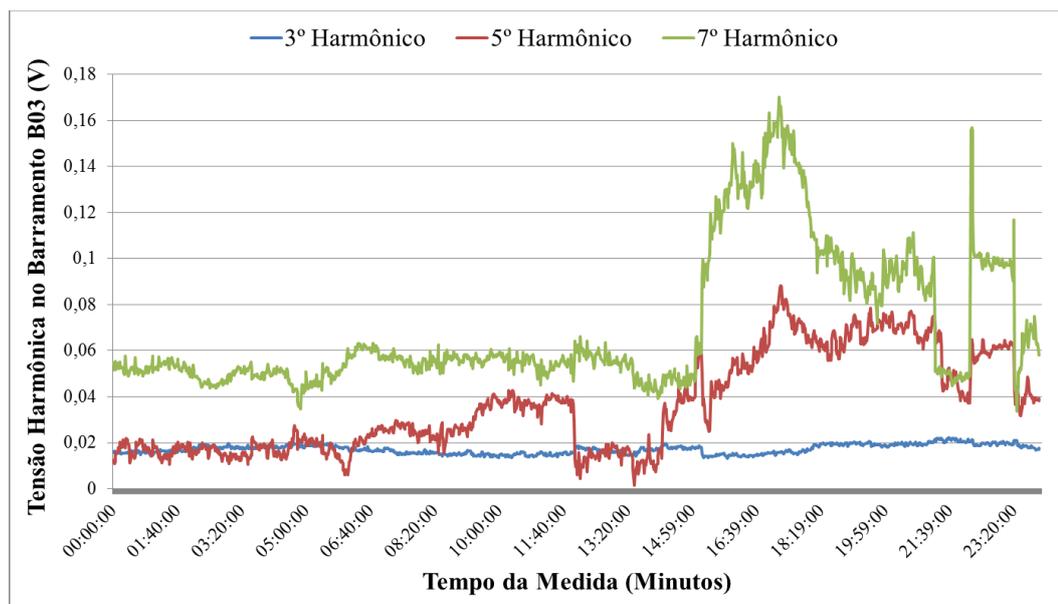


Fonte: O Autor

Com a inserção de duas cargas harmônicas não lineares conectadas nos barramentos (B11) e (B29), observa-se na Figura (79) a redução da tensão harmônica de 7ª ordem. Isso é justificado devido os diferentes perfis de cargas harmônicas apresentarem ângulos diferentes, o que permite o cancelamento harmônico entre as cargas elétricas.

Na Figura (80) são apresentadas as tensões harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordens para estudos de propagação de harmônicos no sistema elétrico para três cargas não lineares conectadas nos barramentos (B11), (B29) e (B49).

Figura 80. Tensões harmônicas no barramento (B03) para três cargas não lineares.

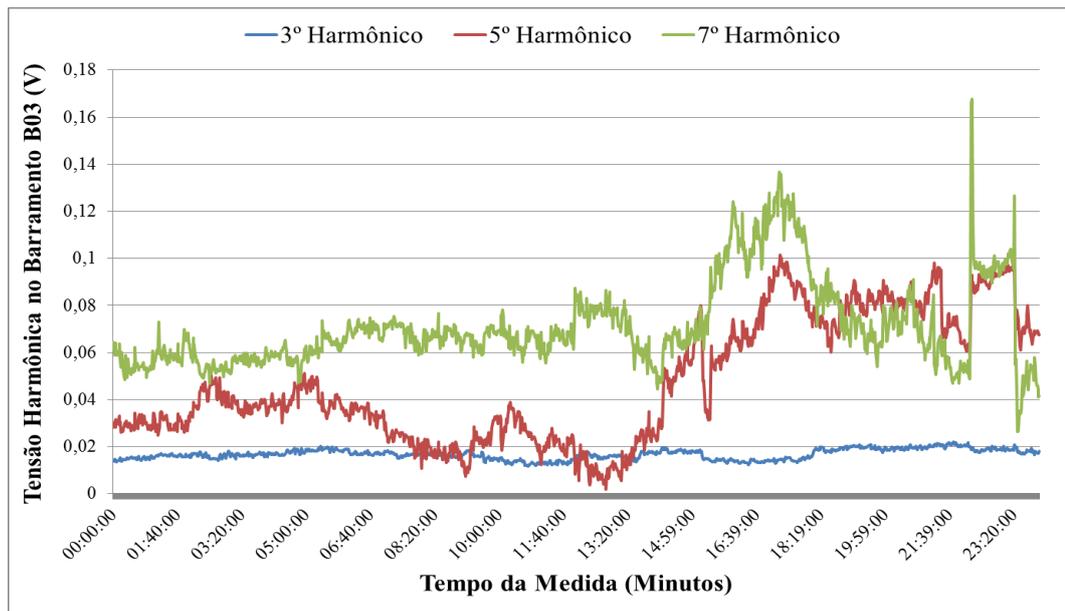


Fonte: O Autor

A presença das três cargas não lineares, estando conectadas nos barramentos (B11), (B29) e (B49), é possível observar a redução da tensão harmônica de 5ª ordem nos horários próximos às 12:00:00h. Entretanto, no mesmo período a tensão harmônica de 7ª ordem teve um aumento.

Na Figura (81) são apresentadas as tensões harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordens para estudos de propagação de harmônicos no sistema elétrico para três cargas não lineares conectadas nos barramentos (B11), (B29), (B49) e (B51).

Figura 81. Tensões harmônicas no barramento (B03) para quatro cargas não lineares.



Fonte: O Autor

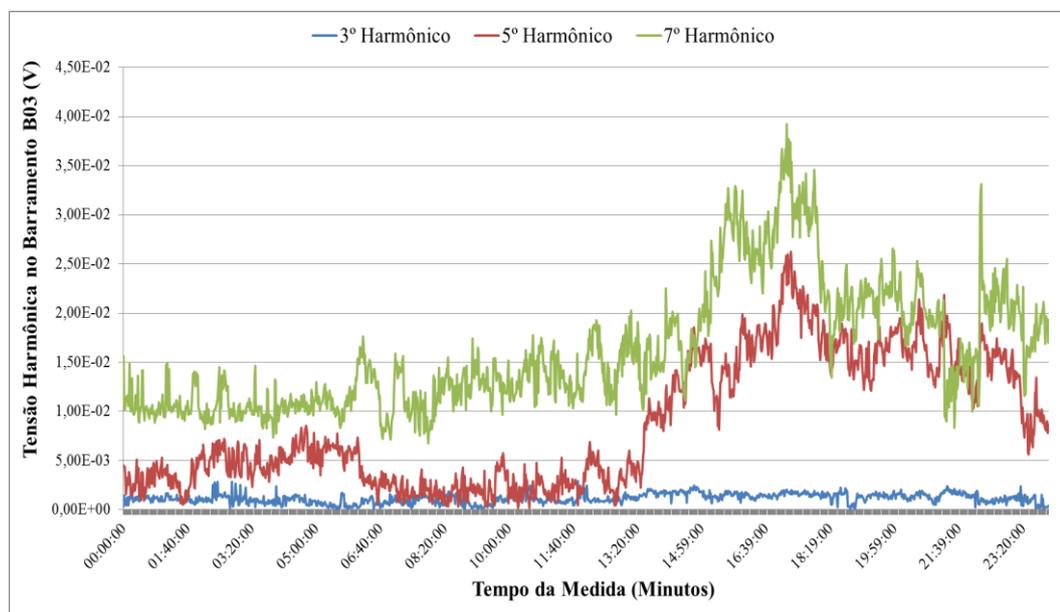
Para esse estudo, a presença das quatro cargas não lineares, estando conectadas nos barramentos (B11), (B29), (B49) e (B51), é possível observar o aumento da tensão harmônica de 5ª ordem, enquanto houve uma diminuição da tensão harmônica de 7ª ordem.

Observa-se em todos os resultados apresentados a propagação de tensões harmônicas de 3ª ordem, mesmo tendo os enrolamentos primários e secundários dos transformadores de potência conectados em delta-estrela (Δ -Y). As cargas não lineares reproduzidas no sistema elétrico como fonte de correntes harmônicas são cargas reais, logo, são consideradas desbalanceadas, o que justifica a propagação de uma parcela das distorções harmônicas.

Para avaliar a propagação das tensões harmônicas quando os transformadores estão conectados em estrela-estrela (Y-Y), realizou-se análise considerando quatro cargas não lineares conectadas nos barramentos (B11), (B29), (B49) e (B51). As medidas utilizadas para esta análise são as mesmas que foram usadas anteriormente, o objetivo é somente avaliar o quanto o tipo de ligação dos transformadores de potência pode afetar nas tensões harmônicas.

Na Figura (82) são mostradas as tensões harmônicas de 3^a, 5^a e 7^a ordens quando os enrolamentos primários e secundários dos transformadores estão conectados em estrela-estrela (Y-Y) e com quatro cargas não lineares conectadas no sistema elétrico.

Figura 82. Tensões harmônicas no barramento (B03) com os transformadores conectados em (Y-Y) para quatro cargas não lineares.



Fonte: O Autor

Com os resultados demonstrados na Figura (82), pode-se observar a diminuição considerável das tensões harmônicas de 3^a, 5^a e 7^a ordens. Para o desenvolvimento da simulação, considerou-se uma defasagem angular de 0° para a ligação estrela-estrela (Y-Y) e 30° para a ligação (Δ -Y). Essa defasagem angular para as diferentes conexões dos enrolamentos primários e secundários também contribuem para o cancelamento harmônico. Por isso, ao comparar os resultados apresentados na Figura (81) com a Figura (82), pode-se observar que neste ultimo apresentam menores distorções harmônicas de tensão.

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados estudos de propagação de harmônicos em uma rede elétrica para diferentes topologias. Para isso, utilizaram-se medidas de correntes harmônicas para representar as cargas não lineares. Para cada valor de medida, foi realizada uma simulação computacional e como resultado foi apresentado às tensões harmônicas em diversos pontos da rede elétrica.

Com os resultados dos níveis de distorções harmônicas de tensão, observou-se a presença de componentes harmônicos de sequência zero, como o de 3ª ordem. Isso é justificado já que as medidas são de cargas reais e as mesmas são cargas desbalanceadas. Da mesma forma, torna-se importante ressaltar que a presença de diferentes perfis harmônicos de cargas não lineares é importante para o cancelamento harmônico.

De maneira semelhante apresentou-se estudos considerando diferentes conexões nos enrolamentos primários e secundários dos transformadores de potência. A partir disso, observou-se que os níveis de distorções de tensão harmônica diminuíram consideravelmente quando a conexão adotada foi estrela-estrela (Y-Y).

CAPÍTULO VI

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

A distorção harmônica é um problema associado à qualidade da energia que provoca severos distúrbios no sistema elétrico. Portanto, torna-se necessário o uso de medidas mitigadoras, para atenuação das distorções harmônicas e também para o controle estratégico e adequado. Logo, dentre as maneiras que permitem a avaliação do comportamento harmônico no sistema elétrico, a simulação computacional é uma forma eficiente e apresenta baixos custos de investimento, se comparado a medições com equipamentos de medidas.

O sistema elétrico tem apresentado um aumento considerável de distorções harmônicas devido ao aumento de cargas não lineares conectadas as redes de distribuição. Portanto, é de grande valia a utilização de metodologias para avaliar o sistema elétrico quanto a sua conformidade de indicadores de energia. Uma das formas para realizar esta avaliação é através de estudos computacionais de redes elétricas.

Para a simulação computacional, faz-se necessário a representação dos dispositivos que compõem a rede elétrica. Para isso, no desenvolvimento deste trabalho são apresentadas metodologias para a representação das cargas, linhas, chaveamentos, fontes de geração e transformadores de potência. Quando a rede elétrica opera na região de saturação, há o aparecimento de distorções harmônicas, isso é justificado pelas características de magnetização dos transformadores de potência. Para isso, apresentou-se nesse trabalho, a contribuição dos transformadores de potência para a distorção harmônica quando os mesmos operam na região de saturação.

Sabe-se que dentre as metodologias utilizadas para avaliar o comportamento da propagação de harmônicos no sistema elétrico, o monitoramento por equipamento de medição e analisadores elétricos ainda é a melhor forma de obter os dados do sistema elétrico. No entanto, a simulação computacional é uma eficiente ferramenta, capaz de reproduzir os distúrbios e o comportamento da rede elétrica para diferentes modos de operação, tanto em momentos de baixo, médio ou alto de consumo. Isso justifica o uso de metodologias computacionais o desenvolvimento de estudos de propagações de harmônicos.

Portanto, devido aos diversos distúrbios apresentados neste trabalho, que são causados por distorções harmônicas em sistemas elétricos, torna-se importante o uso de medidas mitigadoras tanto para atenuação quanto para o controle estratégico das distorções harmônicas. Nessa perspectiva, o simulador de redes elétricas é uma ferramenta que pode ser utilizado como auxílio no planejamento estratégico, podendo avaliar os momentos críticos quanto aos níveis de distorções harmônicas e assim podendo auxiliar no planejamento estratégico.

6.2 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Como propostas dos próximos trabalhos a serem desenvolvidos, objetiva-se juntamente com a análise de propagação de harmônicos em um sistema elétrico, desenvolver um sistema inteligente capaz de proporcionar um diagnóstico automático a partir das condições de operações. Para isso, serão avaliadas algumas inteligências computacionais a fim de observar qual se adequa melhor à função. Portanto, a seguir serão apresentados em tópicos alguns dos objetivos que deseja-se alcançar com a continuação deste trabalho.

- Desenvolver estudos de simulação sobre transitórios eletromagnéticos no *software* ATP e sobre quais as possíveis interferências das distorções harmônicas nos dispositivo de proteção do sistema elétrico;
- Desenvolver uma ferramenta computacional no *software* ATP para obter a saturação dos transformadores e paralelamente avaliar os níveis de distorções harmônicas em todos os pontos da rede elétrica;
- Desenvolver estudos de simulação de curto-circuito.

6.3 PUBLICAÇÕES EM CONGRESSOS

Durante o desenvolvimento do trabalho, realizaram-se algumas publicações em congressos do setor elétrico. Portanto, a seguir são apresentados os trabalhos publicados no CLAGTEE – 2015 e SBSE – 2016, respectivamente.

- a) LIMA, D. S., MANITO, A. R. A., SOARES, T. M. & BEZERRA, U. H., “Simulador para Estudos de Propagação Harmônica e Análise de Impactos de Cargas Não Lineares em Redes Elétricas”. The XI CLAGTEE - Latin-American Congress Electricity Generation and Transmission. São José dos Campos – SP, Brasil, 2015.
- b) LIMA, D. S., CARVALHO, R. L. de S., MANITO, A. R. A., SOARES, T. M. & BEZERRA, U. H., “Simulador para Estudos de Propagação Harmônica: Análise da

Contribuição das Cargas não Lineares e das Redes Elétricas Operando sob Saturação”. SBSE – Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Natal – RN, Brasil, 2016.

No primeiro trabalho foi desenvolvido um estudo de propagação harmônica utilizando o simulador de qualidade da energia para uma rede de distribuição de 13 barras disponibilizada pelo IEEE (1999). No entanto, não foi avaliada a contribuição do próprio sistema quando opera em estado de saturação. Portanto, o segundo trabalho buscou alcançar esses objetivos, realizando avaliações do sistema quando operando em saturação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRAWAL B. L.; FARMER R. G. Use of Frequency Scanning Techniques for Subsynchronous Resonance Analysis, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, VOL. PAS-98, No. 2, March/April, 1979.

ALI, S. A. “Modeling of Power Networks by ATP-Draw for Harmonics Propagation Study”. Transactions on Electrical and Electronic Materials - Vol. 14, No. 6, pp. 283-290, December, 2013.

ALMEIDA, C. F. M. “Fontes Distribuídas de Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência”. (Tese de Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil, 2012. 267p.

ALMEIDA, J. E. L., “Utilização de Lâmpadas Fluorescentes Compactas (LFCs) Associadas a outras Cargas não Lineares: Seus Impactos em um Sistema de Distribuição”. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, Brasil. 2004, p.131.

ALTERNATIVE TRANSIENTE PROGRAM-ATP (ATP Draw). **User’s Manual Version 5.6.** [S.1]: Norwegian University of Technology Trondheim, 2009.

ALVARENGA, M. T. S., “Modelagem e Simulação da Proteção Diferencial de Alta Impedância de Barramentos no Software ATP” Brasília, Dezembro de 2014.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 8 – Qualidade da Energia, 2014.

ARRILLAGA, J. WATSON, N. R., *Power System Harmonic*. John Wiley & Sons. 2003.

ARRILLAGA, J., SMITH, B. C., WATSON, N. R., WOOD, A. R., *Power System Harmonic Analysis*. John Wiley & Sons. 1997.

BAGGINI, A., *Handbook of Power Quality*. John Wiley & Sons. 2008.

BARBOSA, T., SALLES, D., FREITAS, W., "Fluxo de Carga Harmônico Multifásico" Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática - CBA. UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 2012.

BARCELOS, V. B., “Estimação da Real Contribuição Harmônica de Cargas Não Lineares Utilizando Redes Neurais”. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Viçosa. p.36. Viçosa–Minas Gerais– Brasil, Outubro de 2012.

BEN – Balanço Energético Nacional, Ministério de Minas e Energia – MME/ Empresa de pesquisa Energética – EPE, 2015.

CÂNDIDO, M. R., **Aplicação da Transformada de Wavelet na Análise da Qualidade de Energia em Fornos Elétricos a Arco**. Tese de Doutorado, Electrical Engineering Department, São Paulo university (USP), 2008.

CARDOSO, M. M. G. “Reator Série Chaveado por Transistores para Fornos Elétricos a Arco”. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais. Brasil. 2006, p. 117.

CERBANTES, M. C. “Análise da Influência de Cargas Especiais no Indicadores de Qualidade das Redes de Distribuição de Energia Elétrica de Baixa Tensão”. (Dissertação de Mestrado). UNESP – Ilha Solteira, Brasil. 2012. 105p.

CORREA, L. de J. C. “**Teoría y práctica con el ATP**”. 1995. Documento de trabajo. Sin Definir - See more at: <http://www.bdigital.unal.edu.co/12024/#sthash.nWPpxVNk.dpuf>

COURY, D. V., OKESKOVICZ, M., GIOVANNI, R., “Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: dos relês eletromecânicos aos microprocessadores inteligentes”. São Carlos – SP – Brasil. 2007.

DAS, J. C. **Power System Analysis: Short-Circuit Load Flow and Harmonics**. 2ª Ed. [S.1]: CRC Press, 2012.

DEITEL, P. & DEITEL, H., J. **Java: Como Programar**. Ed. 8ª. Editora: Pearson Education, 2010.

DOMMEL, H. W. (1984), “Electro Magnetic Transients Program – Rule Book”, Oregon.

DOMMEL, H. W. EMTTP Theory Book, Microtran Power System Analysis Corporation, Vancouver, B.C., Canada, 1996.

DOMMEL, H. W.. “Electro-Magnetic Transients Program - EMTTP Theory Book”, Bonneville Power Administration, Portland, 1986.

DUBE, L. **User Guide to Models in ATP**. USA, Abr. 1996.

DUFEEY, C.K. e STRATFORD, R.P. (1989) “Update of harmonic standard IEEE-519: Recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems”. IEEE Transactions on Industry and Applications, vol.25, no.6, pp.1025-1033.

DUGAN, R. C., Mc GRANAGHAN, M.F., SANTOSO, S. and BEATY H. W., (2004), **Electrical Power System Quality**. Mc Graw-Hill, Second Edition.

DUGAN, R.C., **Electrical Power Systems Quality**, Second edition, McGraw-Hill, 2002.

EBERHARD, A. **Power Quality**. Intech. p. 91. 2011.

EXPÓSITO, G. A. CONEJO, A. J. CAÑIZARES, C. **Sistemas de Energia Elétrica - Análise e Operação**. 1ª Edição. Editora LTC. 2010.

FERNANDES, R. A. S. “Identificação de Fontes de Correntes Harmônicas por Redes Neurais Artificiais”. (Dissertação de Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Brasil, 2009. 127p.

FIGUEREDO, A. A. C. Análise de Modelos para Cargas não Lineares no Estudo Trifásico de Penetração Harmônica. (Mestrado em Engenharia Elétrica). UNESP, Ilha Solteira – São Paulo – Brasil, 2006.

FORTESCUE, C. L. Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks. AIEE Transaction, 37:1027-1140, 1918.

FRANÇA, F. A. X., “Estratégias para Estudos de Recomposição de Sistemas Elétricos via Análise de Varredura em Frequência”. Dissertação de Mestrado. p. 97. Campina Grande - Paraíba - Brasil, Setembro de 2009.

FURST, G. *MODELS Primer*. Can/Am Electromagnetic Transients Programs, Canada, 1994.

GALHARDO, M. A., PINHO, J. T. “Modelagem de Cargas não Lineares em Sistemas Elétricos de Potência.” Publicado nos anais do V SBQEE – Seminário Brasileiro sobre a Qualidade da Energia Elétrica, Aracajú – SE, Agosto, 2003.

GARCIA, F. R. “Harmônicos em Sistema Elétricos de Potência: Causas, Efeitos e Soluções”. Especialização em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Uberlândia, UFU, Brasil. 2008.

GARCIA, M. A. 2010. A Modelagem de Cargas Especiais (não-lineares) para Estudos Relacionados à Qualidade da Energia Elétrica via o Software ATP. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2010.

GARCIA, F. R. “Eficiência Energética e Qualidade de Energia: Efeito de Harmônicas sobre Banco de Capacitores na Baixa Tensão”. 12ª FIIIE – Feira Internacional da Indústria Elétrica e Eletrônica. Agosto de 2008. Belo Horizonte – MG, Brasil.

GHOSH, A. and LEDWIC, G. “A unified power quality conditioner (UPQC) for simultaneous voltage and current compensation,” *Elect Power Syst. Res.*, vol. 59, no. 1, pp. 55–63, 2001.

GONZALEZ, M. L. “Estimativa de Distorções Harmônicas Geradas por Consumidores Residenciais”, XVII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica - SENDI, Agosto de 2006, Belo Horizonte, MG.

GONZALEZ, M. L. SILVA, M. M. ALTHOFF, F. SILVA, S. R. “Distorções Harmônicas Geradas por Algumas cargas não Lineares com Tensões Senoidais”. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE. 2012. 06p. Natal – RN, Brasil.

GONZALEZ, M. L., “Correntes Harmônicas em Eletrodomésticos”, VI Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica - SBQEE, 21-24 de Agosto de 2005, Belém, PA.

GORNERUP *et al*, 2012.

HALPIN, S. M., RIBEIRO, P. F., DAI, J. J. “Frequency-Domain Harmonic Analysis Methods”. *IEEE Power Engineering Society: Tutorial in Harmonics Modeling and Simulation*. 2008. 09p.

HUANG, Z., CUI, Y. and XU, W., "Application of Modal Sensitivity for Power System Harmonic Resonance Analysis," *Power Systems*, IEEE Transactions on, Vol.22, 2007, pp. 222–231.

IEC 61000-3-2 – International Electrotechnical Commission, second edition, “Limits for harmonic current emissions (equipment input current = 16A), final draft EN 61000-3-2, March 2000;

IEEE Standard 399-1997, “IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power System Analysis”, IEEE, New York, 1997.

IEEE Task Force on Harmonic Modeling and Simulation, IEEE Power Eng. T&D Committee, “Impact of Aggregate Linear Load Modeling on Harmonic Analysis: A Comparison of Common Practice and Analytical Models”, *IEEE Transaction on Power Delivery*, pp. 625-630, Vol. 18, N°2, April 2003.

IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation. “Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks, Part 1 & 2“, *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 11, No. 1 Jan. 1996, pp. 452-474.

IEEE, 1996. “Modeling and Simulation of Propagation of Harmonics in Electric Power Networks”. Part I and Part II. *IEEE Transaction on Power Delivery*. Vol. 11. No. 1. pp. 452-474.

IEEE, 1999, Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, Test Systems for Harmonic Modeling and Simulation, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.14, n°2, abril, 1999.

JESUS, N. C. OLIVEIRA, H. R. P. M. “Amplificação da Distorção Harmônica em Sistema de Distribuição”. *Revista de Eletricidade Moderna*. 2012.

KUMAR, V. S., KANNAN, P. S., KALAISELVI, K., and KAVITHA, D. “Optimal Estimation of Harmonics in Power System using Intelligent Computing Techniques”. *Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks*, Orlando, Florida, USA, August 12-17, 2007.

LEÃO, R. P. S., SAMPAIO, R. F., Antunes. *Harmônicos Em Sistemas Elétricos*. Editora Elsevier, 2014. 354p.

LIMA, D. de S., MANITO, A. R. A., SOARES, T. M., U. H. BEZERRA, “Simulador para Estudos de Propagação Harmônica e Análise de Impactos de Cargas Não Lineares em Redes Elétricas”. The XI LATIN-AMERICAN Congress Electricity Generation and Transmission – CLAGTEE – São José dos Campos – SP, Brasil, 2015.

LIMA, D. de S., CARVALHO, R. L. de S., MANITO, A. R. A., SOARES, T. M. & BEZERRA, U. H. “Simulador para Estudos de Propagação Harmônica: Análise da Contribuição das Cargas não Lineares e das Redes Elétricas Operando sob Saturação”. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE, Natal, Brasil, 2016.

LIMA, D. O. **Modelação de Redes de Distribuição de Energia Elétrica com Carregamento não Linear, Incluindo Elementos de Regulação e Compensação**. (Tese de Doutorado). UNESP – São Paulo, Brasil, 2014. 187p.

MAGALHÃES, C. M. S., “Análise do Impacto de Conversores de Frequência na Qualidade da Energia do Sistema de Distribuição de uma Indústria de Petróleo”. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Pará, Belém – PA, Brasil, 2010.

MARTINEZ, VELASCO, J. A. *Power System Transients*. Parameter Determination. [s.1]: CRC Press, 2010.

MAZUMDAR, J. and HARLEY, R. G. (2008) “Recurrent Neural Networks Trained With Backpropagation Through Time Algorithm to Estimate Nonlinear Load Harmonic Currents,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 9, pp. 3844–3491, Setembro 2008.

MENDONÇA, G. A., “Avaliação das Abordagens Empregadas em Estudos de Propagação Harmônica em Sistemas Elétricos”. Dissertação de Mestrado. P 125. Belo Horizonte – Minas Gerais, Março de 2012.

MORAIS, E. E. C. “Estudo e Projeto de Implementação de Filtros Passivos para Atenuação de Harmônicos em Instalações Elétricas Industriais”, Universidade Federal do Ceará – UFC, 2011, 137p.

NDIAYE, M. S. “Modelagem de Cargas não Lineares por Fontes de Correntes Sincronizadas” (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. RJ – Brasil. 2006. 130p.

NETO, A. S., FERNANDES, A. B., “Efeito da Modelagem da Carga para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Transmissão”. Décimo Terceiro Encontro Regional Ibero-americano de CIGRÉ - XIII ERIAC, Puerto Iguazú, Argentina, 2009.

NIQUINI, F. M. M. “Modelagem do Elo de Corrente Contínua para Análise Harmônica Utilizando o Método de Injeção de Correntes Trifásico Harmônico com Solução Iterativa”. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, 2009, 173p.

NUNES, R. V. “Análise de Penetração Harmônica em Redes de Distribuição Desequilibradas Devido às Cargas Residenciais e Comerciais com a Utilização do ATP”. (Dissertação de Mestrado). UFMG – 2007.

OWEN, E. L. “History of Harmonics in Power Systems”, IEEE Industry Applications Magazine, vol. 4, Issue 1, pp. 6-12, 1998.

PERKINS, B. K., IRAVANI, M. R. 2004, “Entirely Harmonic Domain Distribution in A.C. Power Systems”. IEEE Transactions on power Delivery. Vol. 19. No. 3. Julho. 2004. Pp. 1368-1377.

PIRES, F. A. C., **Uma Contribuição ao Estudo de Harmônicas em Sistemas de Potência**. (Tese de Doutorado). UNICAMP. 1991.

PIRES, I. A., “Caracterização de Harmônicos Causados por Equipamentos Eletroeletrônicos Residenciais e Comerciais no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica”. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, Brasil, 2006.

POMÍLIO, J. A., DECKMANN, S. M., “Characterization and Compensation of Harmonics and Reactive Power of Residential and Commercial Loads”. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 22. No. 2 Abril, 2007.

PRIKLER, L. HOIDALEN., **ATP Draw para Windows 3.5**. Budapest, 1997.

RAUMA, K., “Electrical Resonances and Harmonics in a Wind Power Plant”. Thesis submitted for examination for the degree of Master of Science in Technology, Espoo, Finland, February, 2012. Aalto University - School of Electrical Engineering.

REHMAN, B., AHMAD, M., HUSSAIN, J. “Analysis of Power System Harmonics Using Singular Value Decomposition, Least Square Estimation and FFT”. *Energy Systems and Policies* (ICESP). 2014.

REXHEPI, V. M., AVDIU, N. Z., “An analysis of the Harmonics in the Power System of Kosovo”. *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 2012.

RIBEIRO, P. F., “Guidelines on Distribution System and Load Representation for Harmonic Studies”, ICHPS V International Conference on, pp. 272 – 280, September, 1992;

ROBERT, R. Efeito Pelicular. Revista brasileira de ensino de física, v.22, n.2, p. 285-289, jun. (2000).

ROSA, C. F. DE LA. (2006). *Harmonics and Power Systems*. First Edition, Taylor & Francis Group, LLC.

SANKARAN, C. *Power Quality*. CRC PRESS, 2002. 2002p.

SASAKI, Chari Midori; OSHIRO, Larissa Keiko. **Kit didático para implementação de filtros passivos e ativos**. 2014. 145 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Engenharia Industrial Eletrônica), Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

SCHWANZ, D. “Análise da Distorção Harmônica de um Parque Eólico através da Sua Modelagem no Domínio do Tempo e da Frequência”. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2013. 130p.

SEMLYEN, A. e SHLASH, M. (2000). “Principles of modular harmonic power flow methodology”. *IEEE Proceedings Generation Transmission and Distribution*, Vol.147, No.1.

SILVA, M. M., GONZALEZ, M. L., E. NOHME, S. R. SILVA, “Programas Computacionais para Estudos de Harmônicos em Sistemas Elétricos”. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE. 2012. 06p. Natal – RN, Brasil.

SILVA, C. J. M. “Diagnóstico sobre a utilização das lâmpadas fluorescentes compactas (LFC) como promotoras de eficiência energética nos sistemas de iluminação no Brasil”, (Dissertação de Mestrado). Universidade de São Paulo – SP – Brasil, 2008.

SILVA, M. M., GONZALEZ, M. L., SILVA, S.R., “A new Analytical Model for Evaluating Loads Supplied by Sinusoidal and Non-sinusoidal Voltage Sources”. *IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA)*, 2010.

SILVA, M. P.C., “Proposta de Modelagem e Simulação para Análise de Distorção Harmônica”. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS –Brasil. 2014.145p.

SIMITH, B.C., “A Steady State Model of the AC-DC Converter in the Harmonic Domain”. *IEEE Proceedings Generation Transmission and Distribution*, Vol. 142. No. 2. Pp. 109-118. 1995.

SOARES, T. M. “Estimação da Contribuição de Múltiplas Fontes Harmônicas Utilizando Regressão Não Paramétrica”. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, 2012.

STEVENSON, W. **Elemento de Análise Estática de Sistema de Potência**. 2ª Ed. São Paulo. Editora: Makron Books, 1986. 458p.

TEIXEIRA, D. Â., “Análise das Distorções Harmônicas: Estudo de Caso de um Sistema Industrial”. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2009. 128p.

THOMAZELLA, R. “Implementação Computacional para Avaliar os Níveis de Sobretensões Atmosféricas Induzidas em Linhas de Distribuição”. (Dissertação de Mestrado). Bauru – SP, Brasil, 2004. 129p.

TOSTES, M. E. L., **Avaliação dos Impactos Causados pela Geração de Harmônicos na Rede de Distribuição em Consumidores em baixa Tensão.** (Tese de Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém – Pará – Brasil. 184p.

VARIZ, A. M., **Cálculo do Fluxo de Harmônicas em Sistemas Trifásicos Utilizando o Método de Injeção de Correntes.** (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil, 2006. 258p.

XU, W. BAHRY, R. MAZIN, H. E. TAYJASANANT, T. “A Method to Determine the Harmonic Contribution of Multiples Loads”. *Power & Energy Society General meeting*, 2009.

XU, W. LIU, Y. “A Method for Determining Customer and Utility Harmonic Contribution at the Point of Common Coupling”. *IEEE Transaction on Power Delivery*. Vol. 15, No. 1, Abril, 2000.

XU, W. LIU, Y. “A Method to Determine Customer Harmonic Contributions for Incentive-Based Harmonic Control Applications”. *IEEE PES Summer Meeting: Panel on Harmonic Measurements and Allocation*. 1999.

ZAPPELINI, A. B. “Análise de Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido”. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 2008. 134p.