

unesp



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**“ANÁLISE DE MODELOS PARA CARGAS NÃO
LINEARES NO ESTUDO TRIFÁSICO DE
PENETRAÇÃO HARMÔNICA”**

ALFREDO ARCANJO CRUZ FIGUEIREDO

ORIENTADOR:

PROF. DR. LUIS CARLOS ORIGA DE OLIVEIRA

Ilha Solteira - SP

1210001633



unesp



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

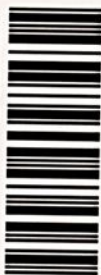
TÍTULO: ANÁLISE DE MODELOS PARA CARGAS NÃO-LINEARES NO ESTUDO TRIFÁSICO DE PENETRAÇÃO HARMÔNICA

AUTOR: ALFREDO ARCANJO CRUZ FIGUEIREDO

ORIENTADOR: Prof. Dr. LUIS CARLOS ORIGA DE OLIVEIRA

“Análise de Modelos para Cargas Não Lineares no Estudo Trifásico de Penetração Harmônica”

1210001653



Alfredo Arcanjo Cruz Figueiredo

Orientador:

Prof. Dr. Luis Carlos Origa de Oliveira

UNESP - "CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA"	
SERVIÇO TÉC. DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE CHEGADA 04.04.06	DATA DE TOMBO 28.04.06
REGISTRADO POR Origa	TOMBO Te. 1653
AQUISIÇÃO Wooapi Autor R\$ 10.00	CLASSIFICAÇÃO F445a

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – FEIS – UNESP como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Co. Arq 456799
syf 59687

Ilha Solteira (SP), Fevereiro de 2006.

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP-Ilha Solteira

Figueiredo, Alfredo Arcanjo Cruz.

F475a Análise de modelos para cargas não lineares no estudo trifásico de penetração harmônica / Alfredo Arcanjo Cruz Figueiredo – Ilha Solteira: [s.n.], 2006.
xvii, 112 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2006.

Orientador: Luis Carlos Origa de Oliveira

Bibliografia: p. 109-112

- 650 650
1. Análise harmônica. 2. Redes elétricas – Análise. 3. Energia elétrica – Distribuição.
4. Circuitos elétricos não-lineares.
650

SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE CHEGADA	DATA DE TOMBAMENTO
REGISTRADO POR	TOMBO
CLASSIFICAÇÃO	650

30404029

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: ANÁLISE DE MODELOS PARA CARGAS NÃO-LINEARES NO ESTUDO TRIFÁSICO DE PENETRAÇÃO HARMÔNICA

AUTOR: ALFREDO ARCANJO CRUZ FIGUEIREDO

ORIENTADOR: Prof. Dr. LUIS CARLOS ORIGA DE OLIVEIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA ELÉTRICA pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. LUIS CARLOS ORIGA DE OLIVEIRA

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

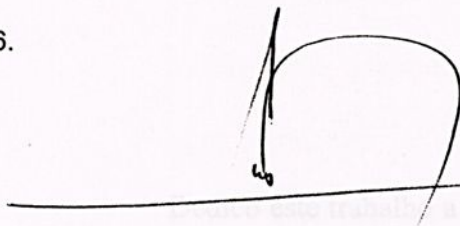
Prof. Dr. CARLOS ALBERTO CANESIN

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. JOÃO ONOFRE PEREIRA PINTO

Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

Data da realização: 24 de fevereiro de 2006.



Presidente da Comissão Examinadora
Prof. Dr. LUIS CARLOS ORIGA DE OLIVEIRA

Dedicatória

Sou eterna e imensamente grato a Deus por
abençoar a minha vida e iluminar sempre
minha mente, a minha família pelo incentivo e
apoio, a minha tia Maria Helena Cruz pelo
auxílio na correção gramatical, ao colega
Rodrigo Oliveira pelo auxílio nos testes
laboratoriais, aos meus amigos por sempre me
compreenderem e apoiarem nas minhas

Dedico este trabalho a Deus, pois por Ele tudo
na minha vida é feito, a minha **família** e a
Kelli Cristine, pelo apoio que me deram
durante a elaboração deste trabalho e pela
compreensão das horas em que estive ausente,
para cumprir minha tarefa.

Sumário

Agradecimentos

DEDICATÓRIA	I
AGRADECIMENTOS	II
LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE GRÁFICOS	XI
ABREVIATURAS	XII
SIMBOLOGIA	XIII
GRANDEZAS FÍSICAS	XIV
RESUMO	XV
ABSTRACT	XVI
INTRODUÇÃO	XVII
2 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA	1
2.1 Distorção Harmônica	2
2.1.1 Problemas Associados à Distorção	3
2.1.2 Distorção Harmônica de Tensão e	4
2.1.3 Cancelamento de Harmônica	5
2.1.4 Normas para Distorção Harmônica	6
2.2 Cargas Elétricas	7
2.2.1 Cargas Elétricas Lineares	8
2.2.2 Cargas Elétricas Não Lineares	9
2.3 Conclusões	10
3 MÉTODOS DE MODELAGEM E ANÁLISE DO IMPACTO DE CARGAS	11
3.1 Influência da Manobra de Capacitores na Geração de Harmônicas na Rede	12
3.2 Modelagem Probabilística	13
3.3 Conclusões	14

Sou eterna e imensamente grato a Deus por abençoar a minha vida e iluminar sempre minha mente, a minha família pelo incentivo e apoio, a minha tia Maria Helena Cruz pelo auxílio na correção gramatical, ao colega Rodrigo Oliveira pelo auxílio nos testes laboratoriais, aos meus amigos por sempre me compreenderem e apoiarem nas minhas decisões; ao orientador Luis Carlos Origa de Oliveira por me apoiar e orientar, à ENERSUL, instituição de tradição e seriedade reconhecida por toda sociedade, pela disponibilidade e oportunidade de desenvolver esta proposta.

Sumário

DEDICATÓRIA	I
AGRADECIMENTOS	II
LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE TABELAS.....	IX
LISTA DE GRÁFICOS	XI
ABREVIATURAS	XII
SIMBOLOGIA	XIII
GRANDEZAS FÍSICAS	XV
RESUMO.....	XVI
ABSTRACT	XVII
INTRODUÇÃO	1
2 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA.....	6
2.1 Distorção Harmônica	8
2.1.1 Problemas Associados à Distorção Harmônica	9
2.1.2 Distorção Harmônica de Tensão e Corrente.....	10
2.1.3 Cancelamento de Harmônica.....	11
2.1.4 Normas para Distorção Harmônica	13
2.2 Cargas Elétricas	14
2.2.1 Cargas Elétricas Lineares	14
2.2.2 Cargas Elétricas Não Lineares	15
2.3 Conclusões.....	18
3 MÉTODOS DE MODELAGEM E ANÁLISE DO IMPACTO DE CARGAS NÃO LINEARES	20
3.1 Influência da Manobra de Capacitores na Geração de Harmônicas na Rede	22
3.2 Modelagem Probabilística	23

3.3	Modelagem Determinística.....	26
3.3.1	Representação do Sistema de Potência.....	28
3.3.2	Simulação no Domínio da Frequência.....	30
3.3.2.1	Método da Matriz Admitância.....	31
3.3.2.2	Método de Iteração Harmônica.....	33
3.3.2.3	Método Algoritmo Newtoniano.....	34
3.3.2.4	Modelo de Thévenin e Norton.....	34
3.3.2.5	Modelo de Thévenin.....	35
3.3.2.6	Modelo de Norton.....	37
3.3.2.7	Influência da Impedância do Sistema no Modelo de Norton.....	40
3.3.3	Simulação no Domínio do Tempo.....	42
3.4	Cálculo de Parâmetros Equivalentes para Estudos Harmônicos baseados em Medições On-line.....	46
3.5	Conclusões.....	54
4	MODELAGEM TRIFÁSICA PROPOSTA PARA ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO.....	57
4.1	Modelagem do Ramal de Distribuição Teste no Ambiente PSpice.....	58
4.2	Modelo Proposto para o Transformador Trifásico no Ambiente PSpice.....	62
4.3	Simulação do Ramal de Distribuição Teste no Ambiente PSpice.....	65
4.4	Conclusões.....	70
5	INFLUÊNCIA DA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO NAS FORMAS DE ONDA DAS CORRENTES HARMÔNICAS.....	71
5.1	Resultados dos Ensaios Efetuados em Laboratórios.....	73
5.1.1	Definição dos Cenários quanto à Tensão de Alimentação.....	73
5.1.2	Carga com característica de Impedância Constante.....	76
5.1.3	Carga com característica de Corrente Constante.....	77
5.1.4	Carga com característica de Potência Constante.....	79
5.2	Conclusões.....	81
6	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MODELAGENS PARA CARGAS NÃO-LINEARES NO DOMÍNIO DO TEMPO.....	83
6.1	Análise de um Retificador Monofásico Onda Completa a Diodos.....	84
6.1.1	Características intrínsecas do Retificador frente à tensão de alimentação.....	87
6.1.2	Comparação dos resultados do Retificador frente aos Cenários.....	89
6.2	Método de Fontes de Corrente Constante.....	91
6.3	Método de Norton.....	95
6.4	Análise Comparativa entre as Técnicas de Modelagem.....	102
6.5	Conclusões.....	105

CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	106
---------------------------	-----

REFERÊNCIAS	109
-------------------	-----

Figura 1.1 – Reestruturação do Setor Elétrico, segmentação das Atividades. FONTE: Aneel.....	2
Figura 2.1 – Sistema simulado com transformador, condutores e carga. As impedâncias dos condutores são mostradas em p.u. relacionadas ao transformador.	12
Figura 2.2 – Forma de onda da corrente simulada do sistema. (a) Correntes retificadoras. (b) Corrente total no secundário do transformador. FONTE: Hansen, 2000.....	13
Figura 2.3 – Espectro harmônico da corrente dos retificadores e do transformador. FONTE: Hansen, 2000.....	13
Figura 2.4 – Carga Linear: (a) puramente resistiva, (b) associação RLC.....	15
Figura 2.5 – Exemplo de carga não linear.....	15
Figura 2.6 – Composição Harmônica da corrente gerada por um Desktop, nas condições de alimentação senoidal e na presença de distorção harmônica total de tensão de 5%. FONTE: Grady, 2000.	17
Figura 2.7 – Composição Harmônica da corrente gerada por uma lâmpada compacta, nas condições de alimentação senoidal e na presença de distorção harmônica total de tensão de 5%. FONTE: Grady, 2000.	17
Figura 3.1 – Representação do diagrama unifilar de um sistema de distribuição em Stockholm. FONTE: Thunberg, 2000.	22
Figura 3.2 – Corrente Harmônica da Carga, em função da configuração do sistema, medida em percentual da fundamental. FONTE: Thunberg, 2000.....	23
Figura 3.3 – Sistema de alimentação antes e depois da mudança de impedância.....	35
Figura 3.4 – Modelo de Norton e Equivalente de Thévenin para uma rede de alimentação e para a carga.	37
Figura 3.5 – Modelagem de cargas no domínio do tempo: (a) carga linear, (b) carga não linear. FONTE: Brownfield, 2001.....	44
Figura 3.6 – Modelagem de um transformador de força. FONTE: Brownfield, 2001.....	45
Figura 3.7 – Circuito equivalente com equipamento distorbidor. FONTE: Czarnecki, 1996.	47
Figura 3.8 – Sistema de medição e processamento de sinais. FONTE: Czarnecki, 1995.	50

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Reestruturação do Setor Elétrico, segmentação das Atividades. FONTE: Aneel.....	2
Figura 2.1 – Sistema simulado com transformador, condutores e carga. As impedâncias dos condutores são mostradas em p.u. relacionadas ao transformador.	12
Figura 2.2 – Forma de onda da corrente simulada do sistema. (a) Correntes retificadores. (b) Corrente total no secundário do transformador. FONTE: Hansen, 2000.....	13
Figura 2.3 – Espectro harmônico da corrente dos retificadores e do transformador. FONTE: Hansen, 2000.	13
Figura 2.4 – Cargas Lineares: (a) puramente resistiva, (b) associação RLC.....	15
Figura 2.5 – Exemplo de carga não linear.....	15
Figura 2.6 – Composição Harmônica da corrente gerada por um Desktop, nas condições de alimentação senoidal e na presença de distorção harmônica total de tensão de 5%. FONTE: Grady, 2000.	17
Figura 2.7 – Composição Harmônica da corrente gerada por uma lâmpada compacta, nas condições de alimentação senoidal e na presença de distorção harmônica total de tensão de 5%. FONTE: Grady, 2000.	17
Figura 3.1 – Representação do diagrama unifilar de um sistema de distribuição em Stockholm. FONTE: Thunberg, 2000.	22
Figura 3.2 – Corrente Harmônica da Carga, em função da configuração do sistema, medida em percentual da fundamental. FONTE: Thunberg, 2000.....	23
Figura 3.3 – Sistema de alimentação antes e depois da mudança de impedância.....	35
Figura 3.4 – Modelo de Norton e Equivalente de Thévenin para uma rede de alimentação e para a carga.	37
Figura 3.5 – Modelagem de cargas no domínio do tempo: (a) carga linear, (b) carga não linear. FONTE: Brownfield, 2001.....	44
Figura 3.6 – Modelagem de um transformador de força. FONTE: Brownfield, 2001.....	45
Figura 3.7 – Circuito equivalente com equipamento perturbador. FONTE: Czarnecki, 1996.	47
Figura 3.8 – Sistema de medição e processamento de sinais. FONTE: Czarnecki, 1995.	50



Figura 3.9 – Resultados da identificação das harmônicas de tensão do sistema de distribuição (En). FONTE: Czarnecki, 1995.	54
Figura 4.1 – Diagrama unifilar da rede primária, tomada como exemplo.....	59
Figura 4.2 – Circuito primário simplificado: Pontos de concentração.	60
Figura 4.3 – Representação gráfica de conjuntos de cargas lineares, empregadas em pontos de concentração de carga equivalente no primário.	60
Figura 4.4 – Circuito simplificado do ramal secundário em análise.	61
Figura 4.5 – Representação da carga linear no secundário.....	61
Figura 4.6 – Representação das cargas monofásicas não lineares no secundário.	61
Figura 4.7 – (a) Modelo proposto para o transformador trifásico; (b) unidade E/F empregada no modelo.	63
Figura 4.8 – Diagrama esquemático simplificado, empregado para simulação do modelo do transformador trifásico.....	63
Figura 4.9 – Resultados de simulação para o circuito da figura 4.9, com a conexão de carga plenamente equilibrada (magnitude e defasagem angular), (a) corrente no primário fase A; (b) corrente fase B, (c) corrente fase C, (d) corrente no secundário fase r, (e) corrente fase s, (f) corrente fase t.....	64
Figura 4.10 – Formas de onda das Tensões (verde) e correntes (vermelho) no lado primário do transformador; (a) corrente no primário fase A; (b) corrente fase B, (c) corrente fase C.	67
Figura 4.11 – Formas de onda das Tensões (verde) e correntes (vermelho) no lado secundário do transformador; (a) corrente no secundário fase r, (b) corrente fase s, (c) corrente fase t	67
Figura 5.1 – Visão do laboratório de testes, com os equipamentos utilizados nos ensaios. Em baixo, a Fonte de Tensão Ideal da <i>California Instruments</i> ; e, acima, o Osciloscópio Tektronix.....	73
Figura 5.2 – Forma de onda da tensão puramente senoidal.....	74
Figura 5.3 – Forma de onda da tensão com $DHT_V = 5\% \pm 0,1\%$	74
Figura 5.4 – Forma de onda da tensão com $DHT_V = 10\% \pm 0,1\%$	75
Figura 5.5 – Formas de onda de tensão e corrente de uma lâmpada incandescente frente a três cenários distintos quanto à tensão de alimentação.....	76



Figura 5.6 – Formas de onda de tensão e corrente de uma lâmpada fluorescente compacta frente a três cenários distintos quanto à tensão de alimentação.....	78
Figura 5.7 – Formas de onda de tensão e corrente de um computador desktop frente a três cenários distintos quanto à tensão de alimentação.....	80
Figura 6.1 – Retificador Monofásico a Diodos com capacitância de filtro.....	85
Figura 6.2 – Formas de ondas de um retificador monofásico onda completa.....	88
Figura 6.3 – Modelagem do retificador monofásico como fontes de corrente “constante”.	92
Figura 6.4 – Formas de ondas para o modelo de fontes de corrente “constante”.....	92
Figura 6.5 – Modelagem do retificador monofásico por meio do modelo de Norton.....	96
Figura 6.6 – Modelagem do retificador monofásico por meio do modelo de Norton adaptado.....	98
Figura 6.7 – Formas de ondas para o modelo de Norton.....	99
Figura 6.8 – Formas de ondas para o modelo de Norton – Cenário 02.....	101
Figura 6.9 – Comparativo dos resultados das formas de onda das correntes obtidas através das simulações, (a) Todos – cenário 01, (b) Todos – cenário 02, (c) Todos – cenário 03, (d) Retificador – cenário 01; (e) Retificador – cenário 02, (f) Retificador – cenário 03, (g) Fontes de Corrente – cenário 01, (h) Fontes de Corrente – cenário 02, (i) Fontes de Corrente – cenário 03, (j) Norton – cenário 01, (k) Norton – cenário 02, (l) Norton – cenário 03.....	103
Tabela 5.1 – Espectro harmônico da tensão Senoidal utilizada na simulação.....	74
Tabela 5.2 – Espectro harmônico da tensão com DHT _v = 5%, utilizada na simulação.....	75
Tabela 5.3 – Espectro harmônico da tensão com DHT _v = 10%, utilizada na simulação.....	75
Tabela 5.4 – Espectro harmônico das correntes de uma lâmpada incandescente.....	77
Tabela 5.5 – Espectro harmônico das correntes de uma lâmpada fluorescente compacta.....	79
Tabela 5.6 – Espectro harmônico das correntes de uma CPU.....	81
Tabela 6.1 – Componentes Harmônicas do Retificador Monofásico Convencional utilizado como carga não linear.....	86
Tabela 6.2 – Valores utilizados como base para cálculos.....	86
Tabela 6.3 – Espectro harmônico das correntes de um retificador monofásico onda completa.....	89
Tabela 6.4 – Espectro harmônico da corrente do modelo de fontes de corrente frente ao cenário 01.....	93

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Resumo da Caracterização dos Distúrbios.	8
Tabela 2.2 – Medições efetuadas em um Desktop, nas condições de alimentação senoidal e na presença de uma distorção harmônica total de tensão de 5%. FONTE: Grady, 2000.	16
Tabela 2.3 – Medições efetuadas em uma lâmpada compacta (15W), nas condições de alimentação senoidal e na presença de uma distorção harmônica total de tensão de 5%. FONTE: Grady, 2000.	17
Tabela 4.1 – Fontes de Corrente Conectadas no Secundário do Modelo do Transformador. ...	64
Tabela 4.2 – Correntes Calculadas no Primário do Modelo do Transformador (cargas equilibradas).	64
Tabela 4.3 – Parâmetros da Linha Primária (SE – P7).	65
Tabela 4.4 – Parâmetros da Linha Secundária ($S_0 - S_2$).	65
Tabela 4.5 – Parâmetros das Cargas Lineares Concentradas Conectadas à Linha Primária.	66
Tabela 4.6 – Parâmetros das Cargas Lineares Conectadas à Linha Secundária.	66
Tabela 4.7 – Parâmetros das Cargas Não-lineares Conectadas à Linha Secundária.	66
Tabela 4.8 – Espectro Harmônico das Tensões de Fase no Ponto S_0	68
Tabela 4.9 – Espectro Harmônico das Correntes de Fase Processadas no Transformador.	69
Tabela 5.1 – Espectro harmônico da tensão Senoidal utilizada na simulação.	74
Tabela 5.2 – Espectro harmônico da tensão com $DHT_V = 5\%$, utilizada na simulação.	75
Tabela 5.3 – Espectro harmônico da tensão com $DHT_V = 10\%$, utilizada na simulação.	75
Tabela 5.4 – Espectro harmônico das correntes de uma lâmpada incandescente.	77
Tabela 5.5 – Espectro harmônico das correntes de uma lâmpada fluorescente compacta.	79
Tabela 5.6 – Espectro harmônico das correntes de uma CPU.	81
Tabela 6.1 – Componentes Harmônicas do Retificador Monofásico Convencional utilizado como carga não linear.	86
Tabela 6.2 – Valores utilizados como base para cálculos.	86
Tabela 6.3 – Espectro harmônico das correntes de um retificador monofásico onda completa.	89
Tabela 6.4 – Espectro harmônico da corrente do modelo de fontes de corrente frente ao cenário 01.	93

Tabela 6.5 – Fontes de corrente e Impedâncias de Norton calculadas.	97
Tabela 6.6 – Espectro harmônico da corrente do modelo de Norton.	99
Tabela 6.7 – Espectro harmônico da corrente do modelo de Norton frente ao cenário 02. ...	101
Tabela 6.8 – Comparativo dos resultados do conteúdo harmônico das simulações feitas para o retificador monofásico, modelo de fontes de corrente e modelo de Norton – Cenário 01.	103
Tabela 6.9 – Comparativo dos resultados do conteúdo harmônico das simulações feitas para o retificador monofásico, modelo de fontes de corrente e modelo de Norton – Cenário 02.	104
Tabela 6.10 – Comparativo dos resultados do conteúdo harmônico das simulações feitas para o retificador monofásico, modelo de fontes de corrente e modelo de Norton – Cenário 03.	104



Lista de Gráficos

Gráfico 6.1 – Comparativo do espectro harmônico da corrente, de um retificador, frente aos cenários. (a) Magnitude, (b) Defasagem angular.	90
Gráfico 6.2 – Comparativo do espectro harmônico de corrente do modelo de fontes de corrente constante. (a) Magnitude, (b) Defasagem angular.....	94
Gráfico 6.3 – Comparativo do espectro harmônico de corrente do modelo de Norton. (a) Magnitude, (b) Defasagem angular.	100
Gráfico 6.4 – Comparativo dos resultados do conteúdo harmônico das simulações feitas para o retificador monofásico, modelo de fontes de corrente e modelo de Norton, (a) magnitude – cenário 01; (b) magnitude – cenário 02, (c) magnitude – cenário 03, (d) fase – cenário 01, (e) fase – cenário 02, (f) fase – cenário 03.....	104

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

Pcc – Ponto de Acoplamento

Ssc – Potência de Curto-Circuito

PC – Microcomputador Desktop

EC – Banco de Capacitores

RMS – Root Mean Square

SVC – Static Var Compensator

FFT – Fast Fourier Transform

M – Sistema de Medição

SPC – Sistema de Processamento de Sinal

ANSI – American National Standards Institute

F.C. – Fonte de corrente

Ret. – Retificador monofásico onda completa a diodos

SE – Subestação Transformadora



Abreviaturas

ANEEL	–	Agencia Nacional de Energia Elétrica
AWG	–	<i>American Wire Gauge Standard</i>
DC	–	Corrente Contínua
DHT	–	Distorção harmônica total
DHT _v	–	Distorção harmônica total de tensão
DHT _i	–	Distorção harmônica total de corrente
EMTP	–	<i>Electromagnetic Transient Program</i>
h	–	Ordem Harmônica
IEC	–	<i>International Electrotechnical Commission</i>
A	–	Analogico
D	–	Digital
IEEE	–	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
Pcc	–	Ponto de Acoplamento
Ssc	–	Potência de Curto-Circuito
PC	–	Microcomputador <i>Desktop</i>
EC	–	Banco de Capacitores
RMS	–	<i>Root Mean Square</i>
SVC	–	<i>Static Var Compensator</i>
FFT	–	<i>Fast Fourier Transform</i>
M	–	Sistema de Medição
SPC	–	Sistema de Processamento de Sinal
ANSI	–	<i>American National Standards Institute</i>
F.C.	–	Fonte de corrente
Ret.	–	Retificador monofásico onda completa a diodos
SE	–	Subestação Transformadora

Simbologia

Símbolo	Descrição	Un.
Σ	– Somatória	
$\sqrt{}$	– Raiz quadrada	
∞	– Infinito	
$\approx$	– Aproximadamente	
$\neq$	– Diferente	
ω	– Frequência angular	rad/s
θ_n	– Ângulo da tensão harmônica de ordem n	graus elétricos (°)
φ_n	– Ângulo da corrente harmônica de ordem n	graus elétricos (°)
I	– Corrente	A
I_1	– Corrente fundamental	A
I_h	– Corrente de ordem harmônica “h”	A
V	– Tensão	V
V_1	– Tensão fundamental	V
V_h	– Tensão de ordem harmônica “h”	V
R	– Resistor	Ω
L	– Indutor	H
C	– Capacitor	F
D	– Diodo	
Y	– Admitância	Siemens
G	– Condutância	Siemens
B	– Susceptância	Siemens
Z	– Impedância	Ohm
ph	– Fase	
σ	– Desvio padrão	unid.
σ^2	– Variância	unid.
T	– Transformador de força	
J_h	– Fonte de corrente harmônica de ordem “h”	

- E_h – Fonte de tensão harmônica de ordem “h”
 E – Fonte de tensão controlada por tensão (PSpice)
 F – Fonte de corrente controlada por corrente (PSpice)

Símbolo – Nome da unidade

- W – Watt
 V – Volt
 A – Ampère
 F – Faraday
 S – Siemens
 H – Henry
 Ω – Ohm
 VA – Volt-Ampère (Potência Aparente)
 k – Kilo (10^3)
 m – Milli (10^{-3})
 μ – Micro (10^{-6})
 n – Nano (10^{-9})
 m – metro
 Hz – Hertz
 $^\circ$ – Graus
 s – segundos

Grandezas Físicas

Resumo

Unidades de Grandezas Físicas do SI (Sistema Internacional de Unidades)

Símbolo – Nome da unidade

W	–	<i>Watt</i>
V	–	<i>Volt</i>
A	–	<i>Ampère</i>
F	–	<i>Faraday</i>
S	–	<i>Siemens</i>
H	–	<i>Henry</i>
Ω	–	<i>Ohm</i>
VA	–	<i>Volt-Ampère (Potência Aparente)</i>
k	–	<i>Quilo (10^6)</i>
m	–	<i>Mili (10^{-3})</i>
μ	–	<i>Micro (10^{-6})</i>
n	–	<i>Nano (10^{-9})</i>
m	–	<i>metro</i>
Hz	–	<i>Hertz</i>
°	–	<i>Graus</i>
s	–	<i>segundos</i>



Resumo

A ampliação do uso da eletrônica de potência na maioria das cargas elétricas de um sistema elétrico tem ocasionado significativas mudanças no perfil de corrente e na operação desse sistema. As características das cargas atuais, especificamente não lineares, têm sido um dos principais agentes responsáveis pela degradação da qualidade da energia fornecida aos consumidores finais. A mudança no modelo do setor elétrico e no perfil de carga aumentou o interesse, o número de estudos e a necessidade de uma ferramenta de análise consistente quanto à questão da qualidade da energia elétrica. Inúmeros estudos têm sido desenvolvidos para avaliarem-se, pelas causas e conseqüências, os fenômenos relacionados à circulação de elevado conteúdo harmônico no sistema elétrico. Ao longo das últimas décadas, têm sido desenvolvidas várias técnicas de modelagem dos sistemas e das cargas não lineares, técnicas essas que variam quanto à aquisição de dados, à complexidade da modelagem, aos problemas de formulação e aos algoritmos de solução. Uma modelagem trifásica de sistemas elétricos de distribuição a quatro fios será apresentada neste trabalho, por meio da simulação, no domínio do tempo, de sistemas trifásicos desequilibrados avaliando-se o comportamento da penetração harmônica no sistema de suprimento. Nesse sentido, tem-se como objetivo apresentar a análise feita quanto às técnicas de modelagem de cargas não lineares, e quais destas possibilitam uma representação mais eficiente das características intrínsecas de um determinado modelo de carga, frente a diferentes cenários quanto à tensão de alimentação. A utilização da modelagem proposta do sistema e a adoção de um modelo mais adequado para representação das cargas tornam possível, no domínio do tempo, uma análise mais precisa do conteúdo harmônico, tanto para as tensões, como para as correntes que circulam nos sistemas elétricos, o que permite a previsão e antecipação de possíveis soluções a problemas associados à questão.



Abstract

The use of power electronic devices has presented a great increasing in the last decade, leading to significant changes into current harmonic content and power system operation. The present loads characteristics, specially the non-linear ones, have become the great responsible for the energy quality degradation at final consumer. In this context, changes into electrical power systems and load profile increased the interest, focus in studies, and needing of a consistent analysis tool, related to Power Quality. Several studies have been developed to evaluate the phenomena related to harmonic content in electrical power grid, evaluating their causes and consequences. During last decade, several power system and non-linear loads modeling techniques have been presented, which varies in terms of data acquisition, modeling complexity, formulation problems and solution of algorithms. This work presents an electrical three-phase four wires distribution system modeling, enabling the harmonic analysis in time domain under unbalanced system condition, and also non-linear load modeling techniques, evaluating their intrinsic characteristics under different voltage supply sceneries. The power system modeling proposed in this work, through a more precise load modeling, allows a better time domain harmonic content analysis such for voltages as currents, predicting and the advance possible problem, and solutions associated to harmonic content in the electrical power systems.



CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Em uma economia de alta competitividade, a permanência no mercado constitui um contínuo desafio para as empresas prestadoras de serviço. Manter a qualidade do produto e dos serviços passa, por conseguinte, a merecer uma maior atenção, uma vez que a liberdade da fixação dos preços escapa da decisão dos empresários que tenham os seus produtos ou serviços submetidos ao controle dos órgãos oficiais, como é o caso das empresas distribuidoras de energia elétrica. Melhoria na qualidade, com informações originadas através de ferramentas de análise específicas e confiáveis, resulta em parâmetros mais consistentes para a medida do desempenho técnico, com repercussões econômicas que aproximam a condução dos negócios ao objetivo fundamental do empreendimento, ou seja, o aumento do seu lucro líquido.

No contexto internacional, o setor elétrico brasileiro apresenta características que o diferenciam de qualquer outro. Sua base geradora tem sua origem eminentemente hidráulica (76%), com a geração térmica exercendo a função de complementaridade nos momentos de pico do sistema. Em 2004, a capacidade instalada brasileira era de 90.733 MW – incluindo 50% de Itaipu Binacional (12,6 MW) – e se constituía na maior da América Latina.

A dimensão continental e a diversidade geográfica e econômica brasileiras deram origem a diferentes sistemas elétricos de transmissão, referentes a mercados regionais com distintas características de desenvolvimento.

O setor de eletricidade tem características próprias, a mercadoria não pode ser armazenada, deve ser produzida a baixo custo e em grande escala, tem de ser consumida no

momento em que é gerada. Esse fato reforça o conceito de que o sistema elétrico é um processo interligado, onde a geração, transmissão e a distribuição de energia elétrica trabalham simultaneamente para produção e entrega do produto final, a energia. Portanto são de fundamental importância a eficiência e a confiabilidade na qualidade do produto entregue através desse sistema. Apesar de permanecerem características monopolísticas na transmissão e distribuição, a geração e a comercialização começam a migrar para um cenário de livre concorrência, conforme mostrado na Figura 1.1.

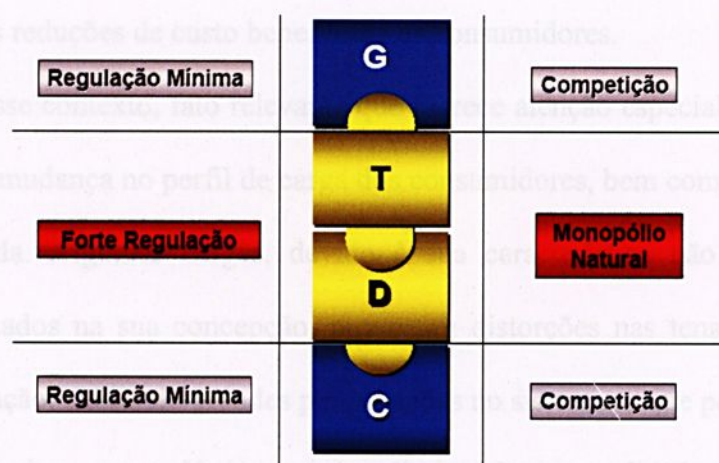


Figura 1.1 – Reestruturação do Setor Elétrico, segmentação das Atividades. FONTE: Aneel.

As reformas setoriais vêm ocorrendo de forma paralela à privatização de ativos federais e estaduais, baseando-se em três pilares fundamentais: introdução de competição nos segmentos de geração e comercialização de energia elétrica; criação de um instrumental de regulamentação para a defesa da concorrência nos segmentos competitivos, com destaque para a garantia do livre acesso nos sistemas de transporte (transmissão e distribuição); e regulação tarifária e da qualidade dos serviços nos segmentos que permanecem como monopólio natural (fornecimento de energia no mercado cativo e transmissão de eletricidade), incluindo, ainda, mecanismos de regulação técnica da rede de transmissão.

A reforma do setor elétrico prevê a redução progressiva do número de consumidores cativos. Nesse sentido, desde julho/2000, já podem comercializar livremente a energia requerida todos os consumidores com carga mínima de três MW atendidos em qualquer nível.

Esse modelo foi implantado, visando estimular a eficiência produtiva, visto que, devido ao preço previamente especificado, as empresas tendem a minimizar os custos para se apropriarem de receitas excedentes. Assim, essas empresas diminuíram seus gastos através da redução das perdas de energia no sistema de transmissão e distribuição, apossando-se dessa diferença para aumentar suas receitas. O grande desafio é garantir a qualidade dos serviços e fazer com que tais reduções de custo beneficiem os consumidores.

Dentro desse contexto, fato relevante que merece atenção especial, dos operadores do setor elétrico, é a mudança no perfil de carga dos consumidores, bem como, na forma de onda da corrente gerada. Algumas cargas, devido à sua característica não linear, devido aos dispositivos utilizados na sua concepção, provocam distorções nas tensões e correntes das barras de alimentação, causando grandes perturbações no sistema, o que pode ocasionar falhas e “queimas” de equipamentos elétricos, e uma diminuição na qualidade do produto entregue ao consumidor final.

Em face destes dados, o estudo da qualidade de energia elétrica tem ganhado uma forte representatividade nos estudos desenvolvidos dentro do setor elétrico. Atenção especial tem sido dada à análise da penetração harmônica, avaliando-se as origens e conseqüências das tensões e da circulação de correntes harmônicas através do sistema de suprimento e distribuição.

Equipamentos eletrônicos estão sendo utilizados em todos os níveis de tensão, desde linhas de transmissão a circuitos de baixa tensão dentro das instalações de usuários finais. Apesar de terem níveis de potência relativamente baixos, variando de alguns watts a quilowatts, os equipamentos domésticos estão presentes em grande número nas redes de



distribuição, portanto, nesse cenário, o impacto de injeção harmônica por cargas domésticas se torna considerável.

Cada vez mais, as correntes harmônicas geradas por consumidores tipicamente domésticos estão se somando às injetadas por complexos industriais e consumidores do setor de serviços, o que pode resultar em uma diminuição da qualidade da energia elétrica, e trazer como consequência o aumento das perdas elétricas no sistema e, por conseguinte, a diminuição dos ganhos das empresas do setor. Torna-se cada vez mais importante a necessidade da avaliação do impacto de uma nova carga a ser conectada na rede.

Para tanto, torna-se necessária também a representação das diversas cargas domésticas presentes na rede, assim como novas cargas adicionadas nas futuras unidades consumidoras. Portanto, a necessidade por modelagem de equipamentos eletrônicos se faz tanto pelos equipamentos existentes como pelas novas aplicações.

Os objetivos das simulações dos sistemas elétricos em geral incluem: verificar o desempenho de um equipamento; a resposta do sistema; identificar problemas; e avaliar possíveis soluções para os problemas.

A problemática relativa ao alcance de resultados confiáveis advém do fato de somente a adoção de uma ferramenta de análise de harmônicas, representando o sistema com uma modelagem unifilar e equilibrado, não ser o suficiente para atingirem-se os objetivos desejados. Este fato gera, em muito dos casos, desvios consideráveis entre os resultados calculados e os que realmente foram verificados experimentalmente, ou, através de medições nos sistemas elétricos. Outro fator relevante é a adoção de uma modelagem eficiente para as cargas conectadas no sistema, representando suas características frente a condições distintas de alimentação. Com o intuito de minimizar ou até mesmo eliminar esse problema, deve-se adotar, como suporte, uma ferramenta de análise eficiente.



Estabeleceu-se como objetivo apresentar uma avaliação do comportamento de três tipos de cargas, com características distintas, em relação à potência requerida do sistema (impedância constante, corrente constante, potência constante), quanto à influência do grau de distorção harmônica presente na tensão de alimentação. Após esta análise será feito um estudo da aplicação dos métodos de modelagem trifásicos, para sistemas de distribuição, comparando-se entre as diversas técnicas de modelagem de cargas não lineares, que serão citadas neste trabalho, a que melhor representa as condições reais de operação e as características intrínsecas para uma carga específica.

Os fenômenos relacionados à qualidade de energia elétrica, no contexto geral, têm tomado uma posição relevante, tanto para as concessionárias como para os próprios consumidores. Há uma preocupação crescente quanto à distorção de tensão causada por cargas não lineares ligadas ao sistema de fornecimento de energia elétrica. Quando alimentadas diretamente pelo sistema, estas cargas geralmente provocam formas de onda não senoidais de corrente, o que pode ocasionar distorção significativa na tensão da linha. Os planejadores dos sistemas de potência, que devem antecipar e minimizar os problemas que ocorrem devido às harmônicas, necessitam de métodos que predigam o impacto harmônico de equipamentos eletrônicos no sistema de alimentação. As concessionárias, que procuram manterem-se competitivas no mercado de fornecimento de energia elétrica, devem estar atentas com as questões de qualidade de energia, no que se refere às novas exigências do mercado consumidor.

Com a explosão do uso de computadores pessoais e do número de cargas elétricas, as quais são controlados por dispositivos de eletrônica de potência, conectados ao sistema, as correntes harmônicas injetadas no sistema e a tensão distorcida resultante começam a se tornar um grande problema quanto à qualidade de energia. Além disso, o aumento da influência



CAPÍTULO II

2 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

A falta ou a má qualidade, também conhecida como perturbação no sistema elétrico, afetam indistintamente tanto as companhias energéticas como os consumidores e fabricantes de equipamentos, sendo responsabilidade das agências governamentais de regulamentação conciliar a relação entre todos os agentes envolvidos no sistema elétrico.

Os fenômenos relacionados à qualidade de energia elétrica, no contexto geral, têm tomado uma posição relevante, tanto para as concessionárias como para os próprios consumidores. Há uma preocupação crescente quanto à distorção de tensão causada por cargas não lineares ligadas ao sistema de fornecimento de energia elétrica. Quando alimentadas diretamente pelo sistema, estas cargas geralmente provocam formas de onda não senoidais de corrente, o que pode ocasionar distorção significativa na tensão da linha. Os planejadores dos sistemas de potência, que devem antecipar e minimizar os problemas que ocorrem devido às harmônicas, necessitam de métodos que predigam o impacto harmônico de equipamentos eletrônicos no sistema de alimentação. As concessionárias, que procuram manterem-se competitivas no mercado de fornecimento de energia elétrica, devem estar atentas com as questões de qualidade de energia, no que se refere às novas exigências do mercado consumidor.

Com a explosão do uso de computadores pessoais e do número de cargas elétricas, as quais são controlados por dispositivos de eletrônica de potência, conectados no sistema, as correntes harmônicas injetadas no sistema e a tensão distorcida resultante começam a se tornar um grande problema quanto à qualidade de energia. Além disso, o aumento da ênfase

na eficiência do sistema de potência tem provocado o aumento da utilização de capacitores *shunt* para correção do fator de potência, e isso está ocorrendo tanto nas instalações internas dos clientes, como nas linhas do sistema de potência das concessionárias. Os capacitores mudam as características da frequência do sistema, o que pode resultar em ressonância que amplificará certas tensões harmônicas e distúrbios transitórios. Por isso, filtros harmônicos são necessários em alguns pontos do sistema de potência para minimizar as distorções harmônicas.

Considerando os efeitos adversos provocados por cargas não lineares sobre outros equipamentos dos consumidores, ou em outras unidades consumidoras, o conhecimento da magnitude das tensões harmônicas, e das correntes harmônicas torna-se de grande interesse.

Caracteriza-se como um problema para o sistema elétrico de potência, qualquer distúrbio ou ocorrência que se manifeste nos níveis de tensão, na frequência característica, nas formas de onda da tensão ou corrente e que possa resultar em insuficiência, má operação, falha ou defeito permanente em equipamentos pertencentes a esse sistema elétrico. Muitas das questões de qualidade da energia estão intimamente ligadas aos dispositivos e estruturas que utilizam a eletrônica de potência.

A seguir estão, resumidamente, apresentados na Tabela 2.1 alguns tipos de distúrbios a que está sujeita a forma de onda da tensão de alimentação, classificados de acordo com as características relacionadas à sua duração, tipo de ocorrência e áreas de ocorrência.

Tabela 2.1 – Resumo da Caracterização dos Distúrbios.

Fenômeno	Conteúdo Espectral Típico	Duração Típica	Amplitude de Tensão Típica
Transitórios			
Impulsivos			
Nanosegundo		< 50 ns	
Microsegundo		50 ns - 1ms	
Milisegundo		> 1 ms	
Oscilatórios			
Baixa Frequência	< 5 kHz	3 - 50 ms	0.4 p.u.
Média Frequência	5 - 500 kHz	20 µs	0.4 p.u.
Alta Frequência	0.5 - 5 MHz	5 µs	0.4 p.u.
Variações de Curta Duração			
Instantânea			
Sag		0.5 - 30 ciclos	0.1 - 0.9 p.u.
Swell		0.5 - 30 ciclos	1.1 - 1.8 p.u.
Momentânea			
Interrupção		0.5 - 3 s	< 0.1p.u.
Sag		30 ciclos - 3 s	0.1 - 0.9 p.u.
Swell		30 ciclos - 3 s	1.1 - 1.4 p.u.
Temporária			
Interrupção		3 s - 1 minuto	< 0.1p.u.
Sag		3 s - 1 minuto	0.1 - 0.9 p.u.
Swell		3 s - 1 minuto	1.1 - 1.2 p.u.
Variações de Longa Duração			
Interrupção Sustentada		> 1 minuto	0.0 p.u.
Subtensão		> 1 minuto	0.8 - 0.9 p.u.
Sobretensão		> 1 minuto	1.1 - 1.2 p.u.
Desequilíbrio de Tensão		regime permanente	0.5 - 2 %
Distorção da Forma de Onda			
Nível DC		regime permanente	0 - 0.1 %
Harmônicas	de ordem 0 - 100	regime permanente	0 - 20 %
Inter-harmônicas	0 - 6 kHz	regime permanente	0 - 2 %
Notching		regime permanente	
Ruído	faixa ampla	regime permanente	0 - 1 %
Flutuação de Tensão	< 25 Hz	intermitente	0.1 - 7 %
Variação da Frequência do Sistema		< 10 s	

2.1 Distorção Harmônica

Dentre os distúrbios que envolvem os padrões de qualidade de energia, a área referente a harmônicos encontra-se numa posição de destaque. Em um sistema elétrico, as tensões de alimentação devem, idealmente e para um perfeito funcionamento dos equipamentos elétricos, ser perfeitamente senoidais. Entretanto, esta condição idealizada raramente será encontrada na prática, haja vista que as tensões e as correntes encontram-se distorcidas. Essa deformação, na forma de onda, é expressa em termos de distorções harmônicas de tensão e corrente, tendo como sua principal causa a operação de cargas com características não lineares. A tensão

distorcida no lado secundário do transformador pode ter duas origens: uma porção provém do lado de média tensão; e a outra no secundário devida às correntes harmônicas circulantes, provenientes da carga, no circuito.

Qualquer função contínua e periódica, em um intervalo qualquer, pode ser representada por um somatório de componentes senoidais e uma componente constante, segundo Fourier. A componente senoidal de mesma frequência do sinal original é denominada fundamental, e as demais componentes senoidais, com frequências múltiplas da componente fundamental, são denominadas harmônicas [18].

2.1.1 Problemas Associados à Distorção Harmônica

A seguir estão descritos alguns dos principais problemas advindos da presença de harmônicas, em relação ao funcionamento dos principais equipamentos elétricos presentes no sistema de distribuição [31].

- **Transformadores** – aumento do nível de perdas elétricas, tanto do cobre como do ferro; risco de saturação na presença de harmônicas pares; diminuição da vida útil em função do sobre aquecimento e/ou rompimento da isolamento.
- **Máquinas Assíncronas** – aumento no nível de aquecimento, particularmente, nas gaiolas duplas ou nas ranhuras profundas; torques pulsantes.
- **Condutor Neutro** – aquecimento acima do normal devido à presença de harmônicas de sequência zero. Os equipamentos eletrônicos geram significativo nível de harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordens, junto com elas aparecem as denominadas harmônicas *Triplens* (triplas), ou seja, as ordens harmônicas ímpares múltiplas de três. Considerando-se um sistema trifásico equilibrado, as *triplens* são de sequência zero e, portanto, somam-se no condutor neutro.



- **Capacitores de Potência** – aumento do nível de aquecimento; solicitação do isolamento; e perda de vida útil.
- **Cabos ou Condutores Elétricos** – aumento do nível de perdas ôhmicas e dielétricas, levando a diminuição da vida útil.

2.1.2 **Distorção Harmônica de Tensão e Corrente**

As correntes harmônicas podem causar distorções na tensão; porém, observa-se que a carga não tem total influência sobre a distorção na forma de onda da tensão. Devido à influência da impedância intrínseca do sistema, uma mesma carga, em pontos de acoplamento diferentes, resulta em valores de distorções de tensão diferentes.

Pode-se controlar a quantidade de corrente harmônica injetada no sistema no ponto de acoplamento da carga, com a instalação de filtros harmônicos nas instalações dos consumidores ou minimizando-se as correntes distorcidas geradas pelas cargas não lineares, com alteração no modo construtivo destas. Se a injeção de corrente harmônica está dentro de limites aceitáveis, o controle sobre a distorção da tensão deve ser exercido pela companhia elétrica responsável pelo sistema elétrico, realizando-se o controle sobre a impedância do sistema, com a instalação de bancos de capacitores sintonizados para determinadas ordens harmônicas, os quais fazem o papel de filtro harmônico.

Uma das formas mais conhecidas e mais utilizadas para se quantificar a qualidade de energia elétrica, em relação a harmônicas, é o valor total da distorção harmônica encontrada em uma forma de onda, dado seu conteúdo harmônico. Através de uma unidade quantitativa, a DHT (Distorção Harmônica Total), pode-se calcular a distorção total, tanto para tensão como para corrente. O cálculo da DHT pode ser efetuado através da equação (2.1) para tensão e da equação (2.2) para corrente.



$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.1)$$

onde:

V_h é o valor eficaz da componente da tensão harmônica de ordem h ;

V_1 é o valor eficaz da componente fundamental da tensão harmônica.

$$DHT_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad (2.2)$$

onde:

I_h é o valor eficaz da componente de corrente harmônica de ordem h ;

I_1 é o valor eficaz da componente fundamental de corrente harmônica.

A DHT é uma medida de valor *efetivo* das componentes harmônicas de uma forma de onda distorcida, relativo à componente fundamental. A DHT é importante para muitas aplicações; entretanto, sendo o foco do estudo a análise do comportamento de apenas uma ordem harmônica em específico, devem ser observadas as limitações impostas por este índice.

2.1.3 Cancelamento de Harmônica

Na presença de cargas não lineares, monofásicas e trifásicas, pode ocorrer o cancelamento de harmônicas devido à diferença angular entre as correntes geradas por estes dois tipos distintos de cargas elétricas não lineares. Devido a este fato, sempre que se for analisar a presença de harmônicas no sistema elétrico, deve-se levar em consideração a diferença de ângulos de fase; por isso, a adição de correntes e tensões harmônicas deve ser geométrica e não aritmética [7].

Numa instalação industrial ou em um edifício comercial, existirão poucas cargas não lineares trifásicas, enquanto haverá muitas pequenas cargas monofásicas não lineares. Em [7]

os autores avaliaram a redução da distorção da tensão em função da combinação de cargas não lineares trifásicas e monofásicas. Um pequeno sistema de distribuição, foi utilizado nas simulações em [7] (Figura 2.1). O lado de média tensão foi assumido senoidal e equilibrado.

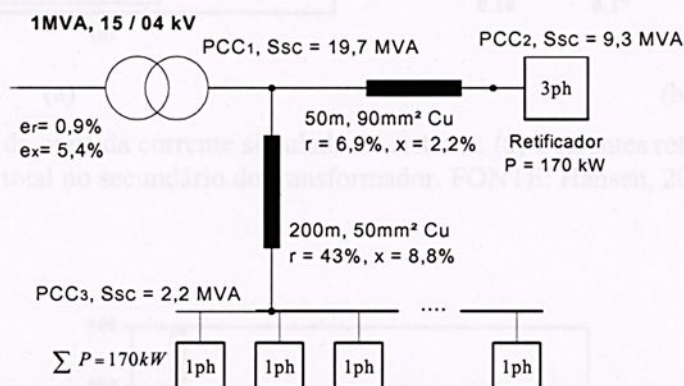


Figura 2.1 – Sistema simulado com transformador, condutores e carga. As impedâncias dos condutores são mostradas em p.u. relacionadas ao transformador.

A Figura 2.2 (a) mostra os resultados das formas de onda das corrente após as simulações, para os dois tipos de retificadores. As correntes se somam no secundário do transformador, o que está representado na Figura 2.2 (b). A forma de onda resultante parece mais senoidal do que as outras duas correntes individualmente.

A distorção harmônica total para a corrente do retificador trifásico é de 51%, e de 88% para os retificadores monofásicos. Quando as correntes se somam no transformador, a distorção resultante é de apenas 38%. Esta redução se deve principalmente ao cancelamento da quinta harmônica, o que pode ser visto mais claramente na Figura 2.3.

2.1.4 Normas para Distorção Harmônica

Com o aumento da utilização do processamento eletrônico em equipamentos do sistema elétrico, principalmente nos países desenvolvidos, foram elaboradas normas para

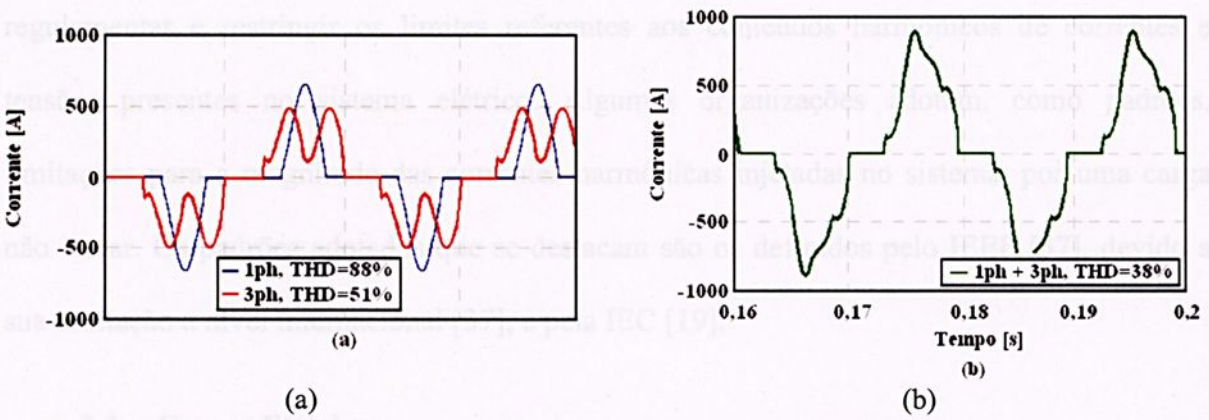


Figura 2.2 – Forma de onda da corrente simulada do sistema. (a) Correntes retificadoras. (b) Corrente total no secundário do transformador. FONTE: Hansen, 2000.

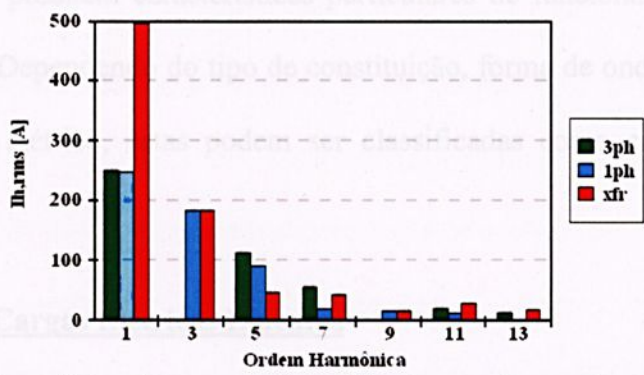


Figura 2.3 – Espectro harmônico da corrente dos retificadores e do transformador. FONTE: Hansen, 2000.

Pode-se concluir que, para alguns casos como o apresentado em [7], ao adicionarem-se cargas não lineares trifásicas, em um circuito com cargas não lineares monofásicas existentes, ou vice-versa, a DHT de corrente no transformador e, conseqüentemente, as perdas no transformador poderão não aumentar. Efeito similar poderá ser percebido na média tensão, mesmo sendo as cargas não lineares monofásicas alimentadas por transformadores diferentes daqueles das cargas não lineares trifásicas.

2.1.4 Normas para Distorção Harmônica

Com o aumento da utilização do processamento eletrônico em equipamentos do sistema elétrico, principalmente nos países desenvolvidos, foram elaboradas normas para

regulamentar e restringir os limites referentes aos conteúdos harmônicos de correntes e tensões presentes no sistema elétrico. Algumas organizações adotam, como padrões, limitações para a magnitude das correntes harmônicas injetadas no sistema, por uma carga não linear. Os padrões adotados que se destacam são os definidos pelo IEEE [37], devido a sua aceitação a nível internacional [37], e pela IEC [19].

2.2 Cargas Elétricas

No sistema elétrico, é encontrada uma grande variedade de tipos de cargas elétricas conectadas, as quais possuem características particulares de funcionamento e de influência distintas no sistema. Dependendo do tipo de constituição, forma de onda de corrente gerada e impacto no sistema elétrico, estas podem ser classificadas como cargas lineares ou não lineares.

2.2.1 Cargas Elétricas Lineares

A carga elétrica linear é classificada como aquela que, em regime de operação, apresenta uma impedância de carga essencialmente constante à alimentação durante o ciclo da tensão aplicada. As cargas lineares são compostas exclusivamente por elementos passivos tais como: resistores, capacitores e indutores ou por uma associação destes. Esses elementos não influenciam diretamente na deformação da forma de onda da tensão, ou seja, a forma de onda da corrente será um espelho da forma de onda da tensão, apresentando as mesmas distorções harmônicas encontradas na tensão, podendo ocorrer uma defasagem angular quando da presença de elementos indutivos e/ou capacitivos.

Na Figura 2.4, estão representados alguns exemplos de cargas lineares e suas respectivas formas de onda de correntes drenadas do sistema de alimentação.

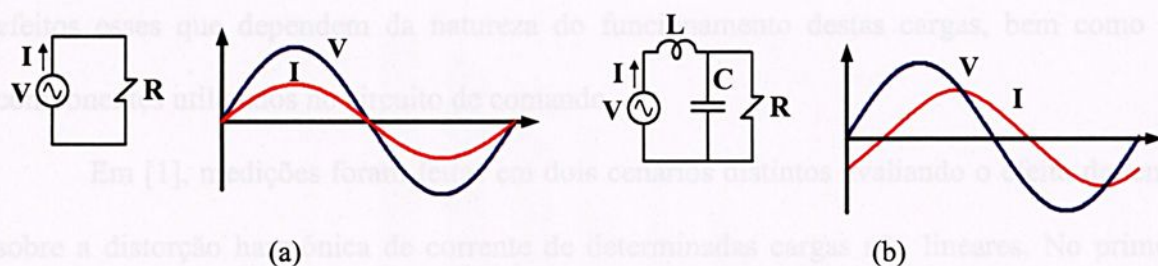


Figura 2.4 – Cargas Lineares: (a) puramente resistiva, (b) associação RLC.

2.2.2 Cargas Elétricas Não Lineares

São as cargas elétricas que drenam uma corrente com características não senoidais, inclusive com possibilidade de descontinuidade, ou cuja impedância equivalente varia durante o ciclo da forma de onda da tensão de entrada. As cargas não lineares podem ser constituídas de dispositivos de eletrônica de potência, compostos por elementos “semicondutores” ativos e passivos, e elementos R–L–C passivos (armazenadores de energia, ou, não).

Na Figura 2.5, apresenta-se um exemplo de carga não linear, retificador monofásico de onda completa a diodos e filtro capacitivo, bem como, a forma de onda da corrente drenada do sistema de alimentação, no qual se verifica o comportamento não senoidal da forma de onda (descontinuidade) e sua elevada distorção em relação à tensão senoidal de alimentação.

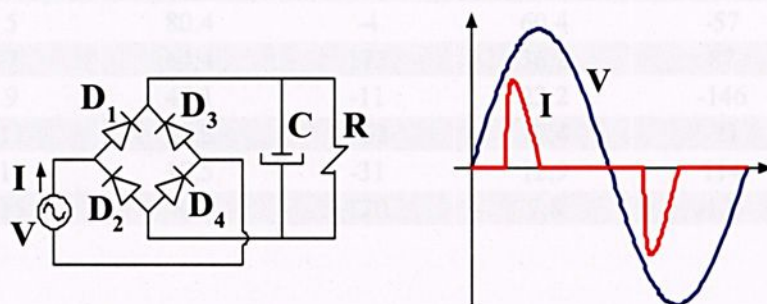


Figura 2.5 – Exemplo de carga não linear.

A distorção harmônica encontrada na tensão de alimentação pode influenciar nas formas de onda da corrente e nas harmônicas produzidas por cargas elétricas não lineares,

efeitos esses que dependem da natureza do funcionamento destas cargas, bem como dos componentes utilizados no circuito de comando.

Em [1], medições foram feitas em dois cenários distintos avaliando o efeito da tensão sobre a distorção harmônica de corrente de determinadas cargas não lineares. No primeiro cenário, a tensão de alimentação foi ajustada para apresentar uma forma de onda senoidal com distorção harmônica total menor a 0,2%; e, para o segundo cenário, a tensão de alimentação apresentava uma forma de onda de tensão achatada no pico, tipicamente encontrada em edifícios comerciais, com distorção harmônica total de $5\% \pm 0,1\%$.

O foco principal do trabalho desenvolvido em [1] foi a avaliação de cargas como computadores (Tabela 2.2 e Figura 2.6), lâmpadas fluorescentes e lâmpadas fluorescentes compactas (Tabela 2.3 e Figura 2.7), as quais constituem a maioria das cargas não lineares monofásicas encontradas em um edifício comercial [1].

Tabela 2.2 – Medições efetuadas em um Desktop, nas condições de alimentação senoidal e na presença de uma distorção harmônica total de tensão de 5%. FONTE: Grady, 2000.

Corrente Harmônica	Tensão Soneidal		Tensão Não Senoidal DHT _v = 5%	
	Magnitude (%)	Ângulo (°)	Magnitude (%)	Ângulo (°)
1	100,0	3	100,0	-7
3	92,7	178	84,9	148
5	80,4	-4	60,4	-57
7	64,4	173	36,2	87
9	47,1	-11	22,2	-146
11	30,8	162	17,4	-21
13	17,5	-31	12,9	114
15	8,8	120	7,8	-121

Figura 2.7 – Composição Harmônica da corrente gerada por uma lâmpada compacta, nas condições de alimentação senoidal e na presença de distorção harmônica total de tensão de 5%. FONTE: Grady, 2000.

Constata-se que as correntes harmônicas geradas por pontes retificadoras a diodo monofásicas têm grande dependência da tensão aplicada. Estas correntes tendem a interagir

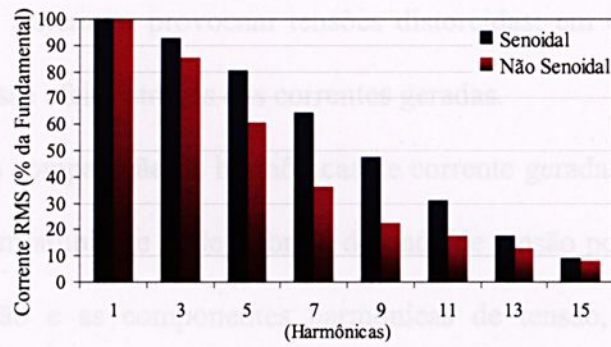


Figura 2.6 – Composição Harmônica da corrente gerada por um Desktop, nas condições de alimentação senoidal e na presença de distorção harmônica total de tensão de 5%. FONTE: Grady, 2000.

Tabela 2.3 – Medições efetuadas em uma lâmpada compacta (15W), nas condições de alimentação senoidal e na presença de uma distorção harmônica total de tensão de 5%. FONTE: Grady, 2000.

Corrente Harmônica	Tensão Soneidal		Tensão Não Senoidal DHTv = 5%	
	Magnitude (%)	Ângulo (°)	Magnitude (%)	Ângulo (°)
1	100,0	-56	100,0	-58
3	15,7	-24	17,2	-31
5	3,3	-117	2,8	-125
7	1,9	147	1,6	140
9	1,2	81	1,3	72
11	0,7	-9	0,6	-17
13	0,5	-110	0,5	-117
15	0,4	137	0,4	129

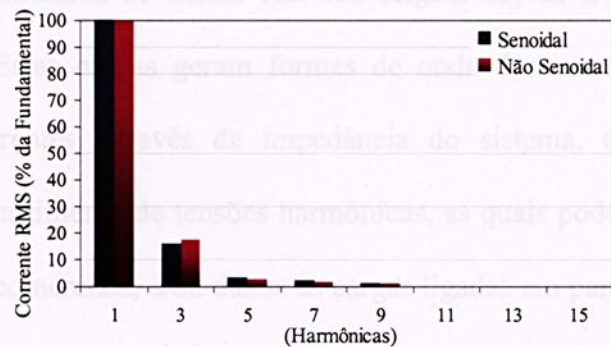


Figura 2.7 – Composição Harmônica da corrente gerada por uma lâmpada compacta, nas condições de alimentação senoidal e na presença de distorção harmônica total de tensão de 5%. FONTE: Grady, 2000.

Constata-se que as correntes harmônicas geradas por pontes retificadoras a diodo monofásicas têm grande dependência da tensão aplicada. Estas correntes tendem a interagir

com a impedância do sistema e provocam tensões distorcidas; em contrapartida, as pontes tendem a compensar esse efeito através das correntes geradas.

Medições, para comparação de harmônicas de corrente geradas por cargas eletrônicas, devem ser feitas em um ambiente onde a forma de onda de tensão possa ser cuidadosamente controlada. A distorção e as componentes harmônicas de tensão, as quais combinam a influência da impedância do sistema e das correntes harmônicas geradas pelas cargas, são parâmetros apropriados a serem especificados numa proposição de testes para avaliação do impacto de harmônicas no sistema.

Com os resultados apresentados nas Tabelas 2.2 e 2.3, verifica-se que as correntes geradas pelas lâmpadas fluorescentes compactas não se alteram significativamente em relação à mudança na tensão de alimentação, por tratar-se de cargas com características elétricas de corrente constante. Entretanto, para o desktop (potência constante), as distorções harmônicas da corrente tendem a reduzir com a aplicação de formas de onda de tensão distorcidas.

2.3 Conclusões

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

Mostrou-se a necessidade de uma energia de boa qualidade para o perfeito funcionamento e desempenho de dispositivos de eletrônica de potência, principalmente, devido a sua sensibilidade quanto à variação das tensões e/ou frequências do sistema. Neste ponto encontra-se um dilema, pois, ao mesmo tempo em que as cargas eletrônicas são



sensíveis a distorções na tensão de alimentação, estas são as principais agentes causadoras, devido ao processamento de energia através de dispositivos eletrônicos, de distorções de correntes que conseqüentemente geram distorções de tensão no sistema.

Usualmente, a distorção de tensão provém da combinação das influências da distorção proveniente da rede MT, impedância do sistema e corrente harmônica gerada pela carga.

Um dos problemas que têm adquirido grande destaque nacional e que terá ênfase neste trabalho, é a presença de correntes distorcidas geradas / injetadas por cargas não lineares, conectadas ao sistema de distribuição a quatro fios.

Para a elaboração de uma análise em um sistema elétrico de distribuição, quanto à influência de distorções harmônicas, torna-se necessário o conhecimento das cargas presentes no sistema elétrico, suas características de funcionamento, bem como, a utilização de um eficiente método de modelagem destas. As cargas elétricas estão divididas em duas classes: cargas lineares e cargas não lineares. A análise dos sistemas elétricos só pode ser efetuada, verificando a sua performance perante distúrbios causados pela presença de cargas não lineares, com a utilização de diversos métodos de simulações numéricas / computacionais, que têm sido desenvolvidas e analisadas ao longo das últimas duas décadas. Os principais métodos utilizados são apresentados, analisados, discutidos e comparados no capítulo a seguir.



CAPÍTULO III

3 MÉTODOS DE MODELAGEM E ANÁLISE DO IMPACTO DE CARGAS NÃO LINEARES

A qualidade da energia é um assunto que atualmente destaca-se dentro do cenário da engenharia elétrica. Em decorrência disso, vários estudos e pesquisas têm sido realizadas no intuito de assegurar, ou até mesmo melhorar, os padrões de qualidade requeridos ao bom funcionamento dos sistemas elétricos.

As distorções nas formas de onda de corrente e/ou tensão estão entre os principais problemas associados à qualidade da energia elétrica, razão pela qual, muitos trabalhos têm sido desenvolvidos no sentido não só de identificar as fontes geradoras de harmônicas, mas também de investigar os mecanismos de propagação ao longo das redes elétricas e as consequências na operação dos equipamentos e sistemas.

Portanto, a análise dos sistemas de distribuição, quando da presença de cargas não lineares, envolve a necessidade da modelagem destas e dos principais dispositivos do sistema de distribuição, envolvendo, muitas vezes, a necessidade do desenvolvimento de modelos complexos, refinados algoritmos de cálculos, dados completos dos dispositivos do sistema e experimentação para subsidiar a validação dos modelos propostos.

O objetivo do estudo de harmônicas é quantificar a distorção das formas de onda de tensões e/ou correntes em vários locais do sistema de potência. A necessidade de um estudo harmônico pode ser indicada pela excessiva distorção medida em sistemas existentes ou pela instalação de equipamento gerador de harmônicas. Nesse contexto, um passo importante reside na caracterização e modelagem das fontes geradoras de harmônicas. Entre as modernas



cargas não lineares, os dispositivos trifásicos baseados na eletrônica de potência têm uma significativa contribuição na geração de harmônicas durante seus processos de chaveamento. Ainda que os dispositivos de eletrônica de potência monofásicos largamente utilizados, tais como, os PC's, TV's e carregadores de baterias, também gerem correntes ricas em harmônicas ímpares, as magnitudes das harmônicas são normalmente pequenas, e os ângulos de fase são variados. Entretanto, quando presentes em grandes quantidades, estes podem trazer malefícios significativos para o sistema. A modelagem harmônica para este grupo de fontes harmônicas geralmente requer uma abordagem estatística ou probabilística.

Um método eficiente de simulação da propagação de harmônicas, produzidas por cargas eletrônicas, será de grande utilidade como ferramenta de estudos do sistema elétrico. Torna-se de grande valia poder prever, por meio de uma ferramenta de análise, a distorção de corrente e tensão ao longo de um sistema de distribuição, o impacto da adição de novas cargas do tipo não linear, ou o impacto da mudança da impedância característica do sistema [4]. Simulações dessa natureza podem auxiliar na solução ou predição de problema em potenciais, relacionados à propagação de harmônicas.

As modelagens disponíveis na literatura, para análise harmônica de cargas não lineares de grande porte, podem ser divididas em dois grupos: modelagens no domínio do tempo e modelagens no domínio da frequência [38].

- **Solução no domínio do tempo** – apresenta uma integração em tempo discretizado, a estabilidade e a precisão dependem do passo de cálculo adotado. Como os erros são acumulados, passo a passo, a solução pode divergir caso um tempo impróprio de cálculo seja escolhido. Os programas mais conhecidos que executam as simulações no domínio do tempo são o PSpice e o EMTP.
- **Solução no domínio da frequência** – é a mais robusta, pois a solução é encontrada para cada frequência, individualmente, e os erros não são acumulativos.



Usualmente, utiliza-se o método das fontes de corrente. Requer menor tempo de solução.

Embora não haja consenso sobre a preferência de quaisquer modelos específicos, a solução mais adequada deverá envolver necessariamente a interação em regime permanente entre o dispositivo e o sistema de potência.

3.1 Influência da Manobra de Capacitores na Geração de Harmônicas na Rede

Para ilustrar o comportamento da geração de corrente harmônica, no lado de carga da rede sobre condições diferentes de operação no sistema de transmissão, em [9] foram feitas medições de correntes harmônicas, em um transformador da subestação de Stockholm, antes e depois de manobram-se os bancos de capacitores da subestação. O sistema estudado, em [9], está mostrado na Figura 3.1.

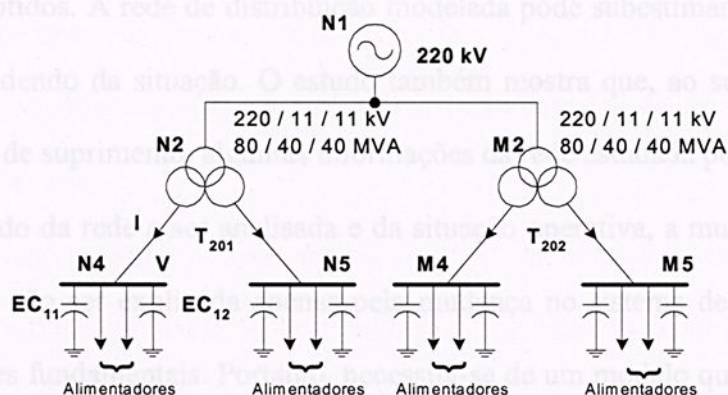


Figura 3.1 – Representação do diagrama unifilar de um sistema de distribuição em Stockholm.
FONTE: Thunberg, 2000.

Nesse estudo, medições de corrente e tensão harmônica foram feitas durante 75 minutos em um dos alimentadores de distribuição, com diferentes combinações de banco de capacitores conectados EC₁₁ e EC₁₂ [8, 9]. Após subtraírem-se as correntes que fluem para os bancos de capacitores, as correntes de 5ª e 7ª ordens harmônicas da carga, em percentual (em relação à fundamental), são mostradas na Figura 3.2. Nesta figura pode ser visto que, para

diferentes combinações de conexão dos bancos de capacitores, há uma mudança na corrente harmônica injetada pelo lado de carga da rede.

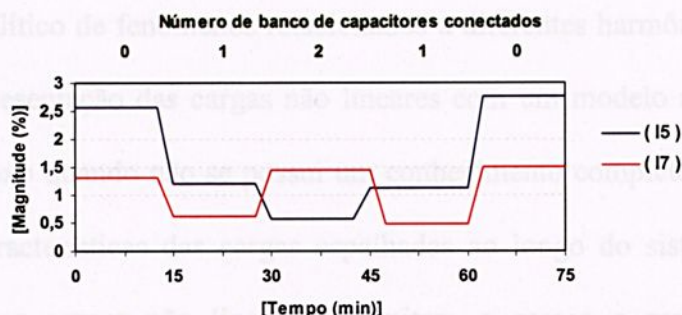


Figura 3.2 – Corrente Harmônica da Carga, em função da configuração do sistema, medida em percentual da fundamental. FONTE: Thunberg, 2000.

O estudo mostra que se modelando as cargas não lineares de uma rede de distribuição como uma fonte de “corrente constante”, para cada ordem harmônica, resultados exatos podem não ser obtidos. A rede de distribuição modelada pode subestimar ou sobreestimar os resultados, dependendo da situação. O estudo também mostra que, ao se mudar a condição operativa da rede de suprimento, algumas informações da rede estudada podem ser obtidas.

Dependendo da rede a ser analisada e da situação operativa, a mudança nas correntes harmônicas pode não ser explicada apenas pela mudança no sistema de suprimento ou das tensões e correntes fundamentais. Portanto, necessita-se de um modelo que possa representar, de uma forma mais abrangente, sistemas complexos de distribuição, bem como, cargas não lineares, as quais sofrem influência da tensão de alimentação.

3.2 Modelagem Probabilística

A utilização de métodos probabilísticos, para análise da distorção harmônica, teve início na década de 70, baseada na análise de valores instantâneos de corrente [39].

A maior parte dos estudos harmônicos utiliza métodos determinísticos, devido à precisão destes métodos na representação das componentes e cargas do sistema. Entretanto,

quando o modo de operação das cargas é flutuante e a análise envolve várias manobras operativas, o método determinístico não pode mais representar fielmente a situação; já os modelos probabilísticos podem representar as harmônicas mais adequadamente.

O estudo analítico de fenômenos relacionados a diferentes harmônicas de um sistema elétrico exige a representação das cargas não lineares com um modelo numérico adequado. Isso se torna complexo quando não se possui um conhecimento completo, com elevado grau de exatidão, das características das cargas espalhadas ao longo do sistema. Medições, no sistema que supre as cargas não lineares, permitem o acesso a regras de composição harmônica em diferentes pontos de acoplamento.

A principal vantagem da técnica probabilística é a sua habilidade em lidar com a variação aleatória das harmônicas, frente ao comportamento dos principais parâmetros das cargas (demanda, coincidência e sensibilidade à variação de tensão), bem como, a aleatoriedade do processo de chaveamento das cargas. Existem vários modelos de análise do comportamento probabilísticos da variação das correntes harmônicas produzidas pelas cargas do sistema de distribuição.

Em [14], para as cargas a serem estudadas e para as componentes reais e imaginárias das correntes harmônicas produzidas por estas cargas, um modelo detalhado foi apresentado, no qual tais cargas são expressas em função dos parâmetros aleatórios. O modelo considera algumas simplificações tais como: sistema trifásico balanceado, comutação instantânea, característica ideal dos tiristores e acionamento simétrico dos tiristores. As considerações e simplificações feitas, para se reduzir a complexidade do modelo e diminuir o tempo computacional gasto, aumentam o distanciamento entre os resultados fornecidos pelo modelo e os encontrados em um sistema real.

A partir da correlação entre a corrente harmônica e o número de consumidores para cargas residenciais, modelos estatísticos dependentes do tempo podem ser definidos. Para

tanto, processa-se o registro de uma curva diária de carga, de tensão e/ou corrente, efetuando-se o monitoramento, por uma semana, dos valores RMS e das componentes harmônicas. Então, relaciona-se o resultado das medições com a correspondente agregação de consumidores (número, demanda, consumo). Assim, um bom fator de correlação pode ser encontrado entre a amplitude da corrente harmônica e o número de consumidores [21].

Observa-se que a corrente harmônica, expressa por unidade de consumidores, pode ser constante. Com isso é possível considerar para cada ordem harmônica um valor principal (i_h) e uma variância (σ^2), como sendo a corrente de um “consumidor padrão”.

$$I_{h(t)} = i_{h(t)} \cdot N \pm \sqrt{\sigma^2 N} \quad (3.1)$$

onde:

$I_{h(t)}$ é a corrente harmônica total de ordem h ;

i_h é o valor principal da corrente harmônica de ordem h , correspondente a um usuário singular fictício;

σ^2 é a variância da corrente harmônica de ordem h ;

N é o número total de usuários.

A equação (3.1) não faz referência a ângulos de fase entre a tensão e corrente. Então, para se obter uma estimativa, a composição de correntes harmônicas nos pontos de acoplamento deve ser feita anteriormente.

O rateio entre a corrente total medida e a soma das correntes harmônicas dos ramais, para cada ordem harmônica, pode ser calculado com a equação (3.2), obtendo-se o fator de diversidade (k_h).

$$k_h = \frac{|\dot{I}_{ht}|}{I_{hs}} \quad (3.2)$$

onde:

I_{ht} é a corrente harmônica total medida;

I_{hs} é a soma dos módulos das correntes harmônicas.

Este coeficiente quantifica a combinação das harmônicas e engloba o efeito do ângulo entre as correntes na barra.

Apesar das modelagens probabilísticas serem capazes de reproduzir as mudanças inerentes às condições de carga e tensão de alimentação, usualmente, estas não podem representar fielmente um quadro real do problema a ser analisado. Essas aproximações nem sempre conseguem detectar o comportamento de todos os parâmetros envolvidos no estudo e análise de harmônicas [39].

3.3 Modelagem Determinística

O método determinístico considera, para efeitos de análise, o sistema em uma dada condição operativa, “determinada” por medições, considerando-se que não existem grandes variações da carga ao longo dos períodos.

O método mais utilizado, em softwares comerciais, pelas companhias de distribuição para análise de harmônicas em sistemas de potência, são os baseados na Matriz Admitância. Uma das razões para que este método seja largamente utilizado é a desnecessidade de um conhecimento detalhado sobre o sistema a ser analisado. Esses programas permitem que se especifique uma fonte de corrente ou tensão para cada ordem harmônica, baseando em medições. Entretanto, modelar um sistema de distribuição como uma fonte de corrente ou tensão pode não ser suficiente, caso as condições de operação variem muito do cenário encontrado no momento quando as medições forem feitas [10].

Nos métodos de Interação Harmônica, os equipamentos que injetam harmônicas nas redes são modelados como fontes de corrente dependentes da tensão. Programas baseados

neste modelo exigem um conhecimento mais aprofundado, de tais equipamentos, do que os programas que utilizam o método da Matriz Admitância.

Outros métodos que levam em consideração a dependência da tensão para as cargas não lineares estão baseados em algoritmos newtonianos, denominado Método de Newton. Esses métodos exigem que as equações para as cargas estejam disponíveis, de tal forma, que suas derivadas possam ser facilmente calculadas [9].

Uma outra abordagem seria a representação do sistema de distribuição por meio dos modelos de Thévenin ou Norton. A qualidade e a eficácia do método de Norton estão ligadas diretamente ao tipo de sistema a ser analisado, bem como, à ferramenta utilizada para a estimativa do modelo.

As modelagens feitas para avaliação do efeito de cargas, que envolvem a eletrônica de potência, podem ser divididas em duas categorias, em relação ao objetivo do estudo [3]:

- **Regime Permanente** – onde o foco principal é a análise de como o sistema de potência responde à injeção de harmônicas provenientes de um ramal com cargas eletrônicas. Exemplos: estudo de propagação harmônica, em regime permanente, em sistemas de distribuição e transmissão; ressonância harmônica; distorção de tensão e corrente do sistema; cálculo / dimensionamento de filtros e avaliação da performance; análise de interferência em sistemas de telefonia; e perdas sistêmicas associadas à presença de harmônicas;
- **Desempenho Dinâmico e Transitório** – há a necessidade de uma modelagem mais complexa incluindo, por vezes, os circuitos de comando e controle. Exemplos: sistemas com SVC (Static Var Compensator); armazenador de energia por supercondutor magnético; condições de energização de linha; e aplicação de controle de velocidade.



Existe uma grande variedade de técnicas sendo utilizadas para análise de harmônicas no sistema de potência. Essas técnicas variam em termos de dados requeridos, complexidade da modelagem, problemas de formulação e algoritmos de solução [20], e podem ser classificadas, em relação a sua função principal, como:

- Ferramentas de simulação de eletrônica de potência;
- Simulação de harmônicas no domínio do tempo ou programas do tipo EMTP;
- Simulação de harmônicas baseada no domínio da frequência.

3.3.1 Representação do Sistema de Potência

Normalmente, todos os componentes não são representados individualmente, o que poderia facilmente atingir níveis complexos, tornando difícil a implementação ou gerando modelos representativos gigantescos. O que de fato necessita ser simulado, normalmente, são as características terminais do equipamento, e como este interfere com o sistema de alimentação.

A caracterização dos componentes adequadamente é muito importante, e, na maior parte das simulações, representações detalhadas são evitadas, diminuindo a complexidade do modelo, tempo computacional e acumulação de erros de cálculo.

O sistema pode ser simplificado dependendo do objeto de estudo. Se o objetivo for a caracterização da geração harmônica, por um determinado tipo de carga não linear, o sistema pode ser reduzido significativamente. Alguns procedimentos podem ser adotados para reduzir a complexidade da modelagem, dentre os quais são citados:

- Usar um equipamento equivalente para representar combinações em série ou paralela de um conjunto de componentes;
- Representar cargas eletrônicas de potência com características similares por um único equivalente;



- Usar um modelo mais simples do componente e apropriado para a aplicação;
- Representar um subsistema por injeção de potência sempre que possível;
- Incluir as condições dinâmicas e de controle somente quando necessário;
- Usar módulos para desenvolvimento de modelos em larga escala.

Entretanto, para se aplicar as reduções sugeridas, algumas considerações devem ser observadas no momento de aplicá-las, tais como:

- Cancelamento harmônico quando cargas múltiplas são representadas por uma única equivalente;
- Distorção existente no sistema;
- Desbalanceamento;
- Corrente e tensão entre os componentes ligados em série e em paralelo;
- Previsão de perda na comutação.

Quando a distorção de tensão existente é baixa, o restante do sistema pode ser representado, satisfatoriamente, por um equivalente de 1ª ordem (fundamental), conectado na barra de média tensão.

Caso o objetivo seja avaliar o efeito, no sistema de potência, de cargas não lineares o modelo deve ser estendido para cobrir as possíveis cargas sensíveis. Portanto, especial atenção deve ser tomada em relação ao desbalanceamento no sistema envolvido.

Modelos extensivos para o sistema são requeridos no estudo de propagação harmônica e ressonância. Os componentes do sistema principal e a topologia dominante precisam ser mantidos. Capacitores, filtros, componentes passivos do circuito não linear e todas as demais fontes de injeção harmônica devem ser representadas.

Normalmente, ocorrem erros de simulação e controle, e estes provêm de aproximações dos componentes de chaveamento, da redução no sistema, de elementos adicionais para controle de oscilação numérica, de simplificações do sistema de controle, de utilização de um



passo de cálculo impróprio, da estrutura do programa e método de solução, ou de condições iniciais do sistema incorretas [3].

3.3.2 Simulação no Domínio da Frequência

No domínio da frequência, algumas abordagens básicas são normalmente utilizadas para construir modelos que incluem o desenvolvimento de fórmulas analíticas para a Série de Fourier, sendo uma função da tensão terminal e demais parâmetros associados à operação como fonte harmônica. O modelo mais comum, para cargas elétricas, consiste na representação em forma de uma fonte de corrente harmônica, que é especificada pelo seu espectro em magnitude e fase. O método direto consiste no cálculo dos perfis das tensões e correntes harmônicas, utilizando-se isoladamente o modelo da fonte de corrente harmônica. Esta é a forma mais simples para análise harmônica, entretanto pode fornecer resultados insatisfatórios.

Satisfazer às interações entre os dispositivos supramencionados de eletrônica de potência e o sistema de potência é fenômeno complicado; assim, a análise harmônica com técnicas iterativas se torna necessária. Fenômenos, tais como desequilíbrios das redes elétricas, desequilíbrios e distorções nas tensões de alimentação, erros nos sistemas de produção de pulsos, entre outros, devem ser previstos para que os efeitos da operação das cargas não lineares sejam considerados no sentido de avaliar a produção de harmônicas não características. Desenvolver e integrar modelos harmônicos precisos, dos dispositivos no algoritmo de solução da análise harmônica iterativa, com boa eficiência computacional, é uma condição indispensável. As cargas, definidas como não lineares, podem ser avaliadas por meio de modelos analíticos que simulam seus comportamentos.



3.3.2.1 Método da Matriz Admitância

No método da Matriz Admitância, pode-se efetuar uma análise de uma frequência típica. Assim, haverá apenas uma entrada de corrente diferente de zero, para a frequência específica. A análise de varredura de frequência é a ferramenta mais efetiva para detectar condições de ressonância harmônica em um sistema, sendo amplamente utilizada para projetos e análise de filtros.

Caso se tenha acesso a dados específicos das características das fontes harmônicas, a análise para cada frequência pode ser expandida para determinar informações adicionais de distorções harmônicas.

Para este método, a equação (3.3) é resolvida para cada frequência harmônica de interesse, sendo esse cálculo repetido em passos de frequência discretos. Os resultados obtidos são as tensões harmônicas provocadas pelos equipamentos geradores de harmônicas. Matematicamente, o processo consiste em resolver a equação (3.3) do sistema, na frequência específica h .

$$[I_h] = [Y_h] \cdot [V_h] \quad (3.3)$$

onde:

I_h é a corrente harmônica de ordem h medida;

V_h é a tensão harmônica de ordem h num ponto específico do sistema;

Y_h é a admitância do sistema analisado na frequência h .

Para calcular os índices de distorção, tais como o DHT_v , a grande maioria dos softwares do tipo Matriz Admitância utiliza como parâmetro a tensão nominal na frequência fundamental. Porém, essa técnica pode gerar resultados pessimistas ou otimistas, dependendo do ângulo de fase utilizado. Caso os ângulos de fases das correntes injetadas sejam

estabelecidos arbitrariamente, os efeitos de duas ou mais fontes harmônicas, vistos em um ponto de acoplamento qualquer, podem ser tanto de adição, como de cancelamento.

Em [4], uma ferramenta de análise utilizada para análise de penetração harmônica foi o HARMFLO (software comercial), e a teoria básica para este software é a método da Matriz Admitância, com a aplicação do modelo de Newton-Raphson. Logo, as equações são geradas por meio dos dados de impedância de linha e transformadores, tipos de barras (cargas ou geração de potência ativa e reativa) e a definição da barra swing de tensão (barra controlada). Para esse caso, são necessárias informações detalhadas sobre o conversor eletrônico de potência, gerador de harmônicas, tarefa essa que possui um alto grau de dificuldade e complexidade. No HARMFLO, cinco parâmetros precisam ser ajustados:

- **Barra swing** – fonte de tensão fictícia representando a geração no ponto de acoplamento. Como dado de entrada, precisa-se da impedância de curto-circuito e a carga total atendida pela barra.
- **Linhas e transformadores** – equivalente em série da resistência e reatância característica em relação ao parâmetro a ser modelado.
- **Correção do fator de potência** – definição da quantidade de bancos de capacitores ou reatores e sua condição de operação, aberto ou fechado.
- **Barras de cargas lineares** – representação de uma carga R/L (resistência em paralelo com uma indutância) aglomerando todas as cargas lineares individuais.
- **Barras com cargas não lineares** – necessita-se para a modelagem a carga ativa e o fator de potência estimado, e a reatância do link dc, caso necessário. A reatância do link dc representa a soma do filtro dc e a reatância da carga.

Divergências entre medições e simulações podem ocorrer devido à não-representação de todas as cargas não lineares presentes no sistema. Os dados devem incluir todos os capacitores em derivação locados no sistema, uma representação razoável das cargas lineares



e uma representação exata da carga não linear. O conhecimento da topologia dos conversores, a inclusão da reatância em série significativa e os níveis de potência deles em operação, são fundamentais para o bom desempenho do modelo.

A principal desvantagem desses métodos é o uso do espectro harmônico característico para representar as cargas geradoras de harmônicas; isto dificulta a avaliação de caso envolvendo condições de operações atípicas. Essas condições podem ocorrer devido a carregamento parcial de cargas geradoras de harmônicas, altos níveis de distorções harmônicas de tensão e/ou condições de desequilíbrio no sistema de potência. A característica de dependência da tensão, em relação às cargas não lineares, pode tornar imprecisos os métodos baseados em espectros típicos.

3.3.2.2 Método de Iteração Harmônica

No método de Iteração Harmônica, a carga geradora de harmônicas é modelada com uma fonte de corrente dependente da tensão, sendo representada pela equação (3.4).

$$I_h = f(V_1, V_2, \dots, V_n, c) \quad (3.4)$$

onde:

h representa a ordem harmônica de interesse, variando de 1 a n ;

$(V_1, V_2, \dots, V_h)$ são os fasores das tensões harmônicas no sistema;

c é um grupo de variáveis, tais como ângulos de disparo e/ou potência de saída.

A equação (3.4) é resolvida utilizando-se uma tensão de alimentação estimada, normalmente próxima de 1 p.u. Os resultados, para as correntes obtidas, são utilizados como fontes de correntes (I_h) na equação (3.3), calculando-se, então, as tensões harmônicas para a cada frequência a ser utilizada. No próximo passo, utilizam-se as tensões calculadas para definir valores mais precisos para as fontes de correntes harmônicas, a partir da equação (3.4). Esse processo iterativo é repetido até que a convergência imputada seja alcançada.



Este método exige maior conhecimento do funcionamento do equipamento gerador de harmônicas, do que os métodos baseados na matriz admitância. Para que a convergência torne-se mais rápida e eficiente, inclui-se a admitância equivalente das cargas não lineares na matriz de admitância $[Y_h]$ da equação (3.3).

A representação de cargas não lineares como fontes de corrente dependentes da tensão, torna-se importante à medida que as correntes geradas por estas cargas sofrem influência direta da tensão de alimentação, conforme comentado no Capítulo II.

3.3.2.3 Método Algoritmo Newtoniano

O método Algoritmo Newtoniano leva em conta a natureza dependente da tensão para as cargas não lineares. As soluções para o sistema são obtidas através da equação (3.3) do sistema e da equação (3.4) da carga, de forma simultânea, usando algoritmos newtonianos. Este método geralmente exige que o modelo da carga esteja disponível de tal forma que as suas derivadas possam ser facilmente computadas. A convergência deste método mostra-se mais eficaz do que a do método de interação harmônica, principalmente quando o ponto de início da interação for próximo do ponto da solução.

3.3.2.4 Modelo de Thévenin e Norton

Modelar um sistema como fonte de corrente ou tensão pode não ser preciso o suficiente, caso as condições de operação do sistema de alimentação variem muito em relação às condições em que o espectro harmônico da tensão ou da corrente fora determinado. Como os sistemas de distribuição consistem, geralmente, de várias impedâncias conectadas em paralelo (shunt), ao se mudar a condição de operação do sistema de alimentação, as correntes harmônicas injetadas nas barras, onde as medições foram realizadas, podem sofrer mudança nos valores apresentados [10].



Dessa forma, necessita-se de modelos mais abrangentes para grandes sistemas elétricos. Uma primeira aproximação, nesse sentido, seria modelar o sistema de distribuição como um modelo de Thévenin ou Norton. Estes modelos são mais adequados para condições de operação com grandes variações, do que os modelos de fonte de tensão ou corrente “constante” [9].

3.3.2.5 Modelo de Thévenin

Usualmente é complicado obter e/ou medir o ângulo de fase em algumas barras remota; portanto a defasagem entre as tensões medidas, nas barras com supervisão e a barra remota, tem que ser estimada.

A Figura 3.3 mostra um sistema de distribuição qualquer, representado como um modelo de Thévenin, antes e depois de uma mudança operativa. A mudança pode ser ocasionada pelo chaveamento de um banco de capacitores ou pela entrada de um transformador em paralelo, fato este que provoca uma mudança na impedância intrínseca do sistema.

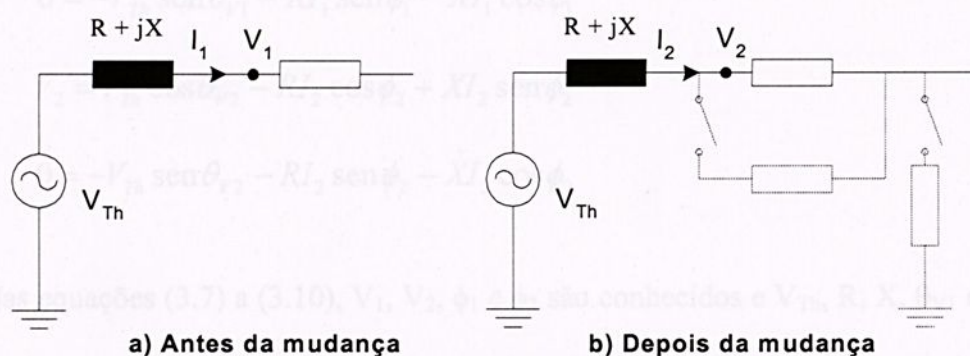


Figura 3.3 – Sistema de alimentação antes e depois da mudança de impedância.

Assumido que o ângulo da tensão de Thévenin seja a referência e possua valor “zero”, as equações que seguem podem ser formuladas a partir da análise da Figura 3.3:

$$V_1 e^{j\theta_{v1}} = V_{Th} - (R + jX) I_1 e^{j\phi_{11}} \quad (3.5)$$

onde:

V_{th} é a tensão representativa do modelo de Thévenin;

$R+jX$ é a impedância de Thévenin;

V_1 é a tensão no ponto de acoplamento antes das mudanças no sistema;

I_1 é a corrente harmônica injetada no sistema antes das mudanças.

$$V_2 e^{j\theta_{v2}} = V_{Th} - (R + jX) I_2 e^{j\phi_{12}} \quad (3.6)$$

onde:

V_2 é a tensão no ponto de acoplamento depois das mudanças no sistema;

I_2 é a corrente harmônica injetada no sistema depois das mudanças.

Se a defasagem entre a corrente e a tensão medida, é denominado como sendo ϕ_1 (antes) e ϕ_2 (depois), as equações (3.5) e (3.6) podem ser rescritas como:

$$V_1 = V_{Th} \cos \theta_{v1} - R I_1 \cos \phi_1 + X I_1 \sin \phi_1 \quad (3.7)$$

$$0 = -V_{Th} \sin \theta_{v1} - R I_1 \sin \phi_1 - X I_1 \cos \phi_1 \quad (3.8)$$

$$V_2 = V_{Th} \cos \theta_{v2} - R I_2 \cos \phi_2 + X I_2 \sin \phi_2 \quad (3.9)$$

$$0 = -V_{Th} \sin \theta_{v2} - R I_2 \sin \phi_2 - X I_2 \cos \phi_2 \quad (3.10)$$

Nas equações (3.7) a (3.10), V_1 , V_2 , ϕ_1 e ϕ_2 são conhecidos e V_{Th} , R , X , θ_{v1} e θ_{v2} são desconhecidos. Nesse caso, têm-se cinco incógnitas e apenas quatro equações. Para resolução do sistema de equações acima, uma quinta equação se faz necessária. A quinta equação pode ser formulada assumindo-se que a proporção X/R é conhecida e que este valor pode ser obtido através da informação de curto circuito do sistema, sendo dada por:

$$X = \frac{X}{R} \cdot R \quad (3.11)$$

Resolvendo-se o sistema de equações não lineares acima, a defasagem, entre a barra remota e a tensão medida, pode ser obtida. Nota-se que todas as informações necessárias, para calcular o modelo de Thévenin, podem ser obtidas por meio de duas medições da tensão harmônica em um determinado ponto do sistema. Nenhuma informação sobre a impedância harmônica do sistema de distribuição e da rede modelada é necessária; isso torna a estimativa simples e os cálculos rápidos.

3.3.2.6 Modelo de Norton

Para estimar um modelo de Norton, como o representado na Figura 3.4, medições da corrente harmônica (I_h) e tensão harmônica (V_h) devem ser feitas em duas condições distintas de operação, como comentado anteriormente. Então, é necessário que tensão e corrente possam ser medidas ou estimadas dos dois lados onde o equipamento está sendo conectado [8].

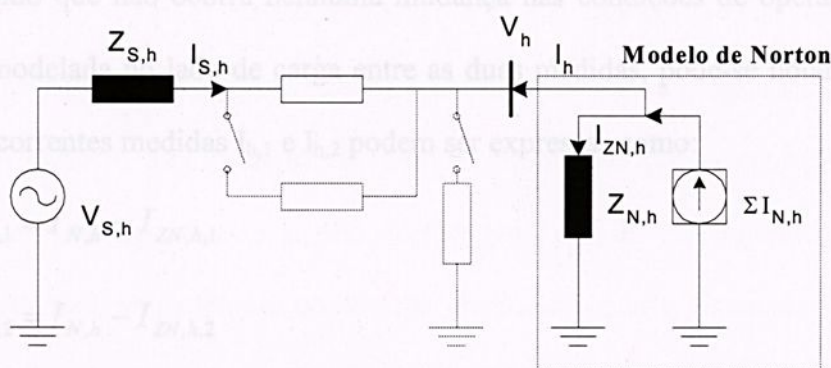


Figura 3.4 – Modelo de Norton e Equivalente de Thévenin para uma rede de alimentação e para a carga.

onde:

$V_{S,h}$ - Tensão harmônica do sistema de distribuição;

$Z_{S,h}$ - Impedância harmônica do sistema de distribuição;

- $I_{S,h}$ - Corrente harmônica do sistema de distribuição;
- V_h - Tensão harmônica no lado de carga;
- I_h - Corrente harmônica injetada no sistema de distribuição;
- $I_{N,h}$ - Corrente harmônica gerada no lado de carga da rede;
- $I_{ZN,h}$ - Corrente harmônica através da impedância de Norton;
- $Z_{N,h}$ - Impedância harmônica de Norton.

Através do circuito, pode ser visto que, ao se mudarem as condições de operação do sistema de distribuição, a tensão harmônica (V_h) e corrente harmônica (I_h e $I_{ZN,h}$) irão alterar-se. A corrente harmônica ($I_{N,h}$) gerada no lado de carga da rede encontra um trajeto elétrico que consiste em uma combinação paralela da impedância de Norton ($Z_{N,h}$) e a impedância total do sistema de distribuição ($Z_{S,h}$). Como $Z_{N,h}$, normalmente, é maior que a impedância do sistema, a maior parte de $I_{N,h}$ flui pelo sistema. Entretanto, como comentado anteriormente, modificar as condições da operação do sistema força a corrente que flui, tanto na impedância do sistema de distribuição, como em $Z_{N,h}$, a mudar.

Assumido que não ocorra nenhuma mudança nas condições de operação na rede de distribuição, modelada no lado de carga entre as duas medidas, pode-se notar que para cada harmônica as correntes medidas $I_{h,1}$ e $I_{h,2}$ podem ser expressas como:

$$I_{h,1} = I_{N,h} - I_{ZN,h,1} \quad (3.12)$$

$$I_{h,2} = I_{N,h} - I_{ZN,h,2} \quad (3.13)$$

Nas fórmulas, todas as quantidades são complexas.

A corrente, através da impedância harmônica de Norton ($I_{ZN,h}$), pode ser calculada, antes e depois da mudança nas condições de operação, como:

$$I_{ZN,h,1} = \frac{V_{h,1}}{Z_{N,h}}; I_{ZN,h,2} = \frac{V_{h,2}}{Z_{N,h}} \quad (3.14)$$

Usando a equação (3.14) nas equações (3.12) e (3.13) tem-se:

$$I_{h,1} = I_{N,h} - \frac{V_{h,1}}{Z_{N,h}}; I_{h,2} = I_{N,h} - \frac{V_{h,2}}{Z_{N,h}} \quad (3.15)$$

Subtraindo-se $I_{h,1}$ de $I_{h,2}$ tem-se:

$$I_{h,2} - I_{h,1} = \frac{V_{h,1} - V_{h,2}}{Z_{N,h}} \quad (3.16)$$

Resolvendo para $Z_{N,h}$ a equação (3.16), tem-se a impedância de Norton para cada ordem harmônica.

$$Z_{N,h} = \frac{(V_{h,1} - V_{h,2})}{(I_{h,2} - I_{h,1})} \quad (3.17)$$

Com a obtenção do valor calculado para a impedância de Norton, na equação (3.17), baseado em medições realizadas em dois cenários distintos de operação, a corrente harmônica de Norton da fonte pode então ser calculada.

$$I_{N,h} = I_{h,1} + \frac{V_{h,1}}{Z_{N,h}} \quad (3.18)$$

Note-se que, como as equações (3.17) e (3.18) são complexas, torna-se de vital importância que as medições sejam exatas, não somente para a magnitude da tensão e da corrente, como também para o ângulo de fase. É importante que as medições, de tensão e corrente, estejam referenciadas ao ângulo de fase para uma barra comum, onde o valor do ângulo não mude com as condições do sistema. Para a situação apresentada na Figura 3.4, o ângulo de fase adotado será o da tensão fundamental denominada como $V_{S,h}$.

A tensão $V_{S,h}$ pode ser calculada conforme demonstrado no item 3.3.2.5, somente tomando-se o cuidado, nesse caso, de substituir a nomenclatura ora denominada como V_{Th} .

Quando se muda a condição operativa do sistema, a corrente injetada pelo sistema pode mudar. A informação, quanto à mudança e suas causas, é usada para se estimar o modelo

de Norton para o lado de carga de um sistema de distribuição. Este modelo pode ser usado para se avaliar o efeito de filtros harmônicos sobre diferentes configurações operativas do sistema [9].

3.3.2.7 Influência da Impedância do Sistema no Modelo de Norton

Alguns autores utilizam o método da matriz admitância para se determinar as distorções de tensão provocadas pelas correntes apresentadas pelo modelo de Norton.

Em [10], analisou-se a influência da estrutura do sistema, no modelo de Norton, através de um sistema teste e de um modelo para se estimar a matriz admitância de Norton, dependente da frequência. As informações sobre importantes parâmetros que podem influenciar a estimativa do modelo de Norton foram encontradas.

Os resultados apresentados em [10] mostram que os elementos fora da diagonal principal da matriz admitância podem causar diferentes modelos harmônicos de Norton. Estes elementos fazem a estimativa do modelo mais sensível a mudanças no sistema de suprimento.

Visto que as informações obtidas das medições, necessárias para se estimar o modelo de Norton, são limitadas, pode ser difícil a mensuração da qualidade do modelo. Isso requer diversas medições em várias configurações do sistema. Logo, a admitância harmônica e a corrente harmônica podem ser calculadas através das equações (3.19) e (3.20).

$$Y_{Nh} = \frac{(I_{h2} - I_{h1})}{(V_{h1} - V_{h2})} \quad (3.19)$$

$$I_{Nh} = I_{h1} + Y_{Nh} \cdot V_{h1} = I_{h2} + Y_{Nh} \cdot V_{h2} \quad (3.20)$$

onde:

1 – configuração do sistema antes da mudança;

2 – configuração do sistema após a mudança.

Para se calcular a corrente injetada para diferentes ordens harmônicas, utiliza-se uma equação matricial, como descrita na equação (3.21).

$$\begin{bmatrix} I_h \\ \vdots \\ I_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{Nh} \\ \vdots \\ I_{NH} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{Nh} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & Y_{NH} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_h \\ \vdots \\ V_H \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Quando se muda a condição operativa do sistema, a tensão fundamental sofre alteração, bem como, as tensões harmônicas do sistema, o que provoca uma mudança nas condições de alimentação das cargas presentes no sistema. Caso as correntes sejam afetadas apenas pela tensão fundamental, pode-se aceitar o processo de modelagem descrito anteriormente. Entretanto, caso os equipamentos sejam afetados pelas tensões harmônicas aplicadas, as correntes geradas podem mudar, conforme descrito no Capítulo 2 (item 2.2.2). Neste caso, a matriz admitância pode não ser diagonal como na equação (3.21), mas possuir elementos significativos fora da diagonal principal. Então, existirá acoplamento entre diferentes ordens harmônicas; por exemplo, a 5ª harmônica de tensão pode afetar a geração de correntes de 5ª ordem e de outras ordens. A equação passa a ser reescrita como:

$$\begin{bmatrix} I_h \\ \vdots \\ I_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{Nh} \\ \vdots \\ I_{NH} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{Nh} & \cdots & Y_{NhH} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{NHh} & \cdots & Y_{NH} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_h \\ \vdots \\ V_H \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Levando-se em consideração o acoplamento entre diferentes ordens harmônicas, as equações (3.19) e (3.20) podem ser reescritas como:

$$Y_{Nh} = \frac{(I_{h2} - I_{h1})}{(V_{h1} - V_{h2})} - \sum_{i \neq h} Y_{Nhi} \frac{(V_{i1} - V_{i2})}{(V_{h1} - V_{h2})} \quad (3.23)$$

$$I_{Nh} = I_{h1} + Y_{Nhh} \cdot V_{h1} + \sum_{i \neq h} Y_{Nhi} V_{i1} = I_{h2} + Y_{Nhh} \cdot V_{h2} + \sum_{i \neq h} Y_{Nhi} V_{i2} \quad (3.24)$$

A conexão de bancos de capacitores em paralelo pode criar uma mudança nas tensões harmônicas, podendo ser maiores para algumas ordens que para outras, como descrito no item 3.1. A frequência de ressonância paralela depende, basicamente, do nível de curto-circuito, em MVA, onde o banco de capacitores está conectado, e da potência do banco.

Visto que as mudanças nas tensões harmônicas, geralmente, são maiores para as harmônicas de baixa ordem, o resultado para estas será melhor.

Os tipos de conversores encontrados no sistema e os capacitores a montante são os parâmetros que têm maior influência nos elementos fora da diagonal principal na matriz admitância harmônica.

3.3.3 Simulação no Domínio do Tempo

Nos modelos no domínio do tempo, o método de solução usado é uma simulação no tempo de todo sistema elétrico. Os períodos reais de operação, dentro de cada ciclo de operação do dispositivo, bem como os sistemas de potência são descritos por equações diferenciais. A solução é obtida atribuindo-se um conjunto de condições iniciais para os estados do sistema e integrando o sistema de equações no tempo. Os métodos de solução são os mais amadurecidos. Muitos programas comercializados foram desenvolvidos, e podem ser usados, para se obter uma solução completa no domínio do tempo. As componentes harmônicas das correntes e tensões são obtidas a partir das formas de onda resultante e da análise de Fourier discreta. Condições de entrada equilibradas, desequilibradas e/ou distorcidas podem ser implementadas, e o modelo do dispositivo pode ser tão detalhado quanto necessário [38]; entretanto, o tempo de solução e o esforço computacional crescem, significativamente, com relação ao detalhamento requerido. Outra desvantagem do modelo no domínio do tempo é que as restrições do fluxo de potência convencional podem não ser consideradas.



Os métodos numéricos aplicados em diferentes programas podem utilizar tanto técnicas iterativas quanto métodos de solução direta. A estabilidade e precisão da solução alcançada estão intimamente relacionadas ao passo de tempo utilizado na simulação. Como os erros de truncamento acumulam-se de um passo para o outro, a solução alcançada pode divergir da solução verdadeira, caso um passo de tempo impróprio seja escolhido.

Um método de análise para se determinar/prever a distorção de tensão nos vários pontos de acoplamento do sistema, causada por diversas combinações de concentração de cargas não lineares nas linhas de distribuição, utilizando como plataforma software no domínio do tempo (PSpice), foi desenvolvido em [5 e 6]. Como apresentado em [1], o PSpice pode ser utilizado para se calcular o DHT de tensão num determinado local do sistema de potência e para medir a distorção de tensão causada por uma dada concentração de um tipo específico de carga não linear. A DHT_V é um meio de medir a distorção harmônica causada pela circulação de correntes harmônicas na rede.

Analisando o sistema em um curto intervalo de tempo, pode-se observar que a forma de onda resultante da corrente permanece praticamente inalterada, desde que não haja mudanças significativas no sistema. Então, na ausência de condições de ressonância, os autores em [5] acham conveniente a representação das cargas não lineares como fontes de corrente harmônicas. Os valores utilizados para a modelagem das fontes de corrente são obtidos pelos valores da decomposição harmônica da corrente (forma de onda) da carga analisada.

Para simplificar o processo de modelagem, assim como reduzir o tempo computacional, em [5] foi considerado que o sistema trifásico seja equilibrado; então, este passa a ser modelado como um equivalente monofásico. Essa simplificação pode trazer perdas significativas nos resultados computados, principalmente devida às características dos

transformadores de distribuição (Δ -Y), que produzem efeitos distintos em situações de equilíbrio ou desequilíbrio de carga [36].

As correntes harmônicas geralmente fluem em sentido à fonte de suprimento, ao longo da impedância do sistema, com origem nas fontes harmônicas (cargas não lineares). Esta ação da circulação de correntes harmônicas na impedância do sistema ocasiona a geração de harmônicas de tensão. Considerando-se os efeitos adversos das cargas lineares nos demais equipamentos de consumidores adjacentes, apresentados no capítulo anterior, a magnitude das tensões e correntes harmônicas é de grande preocupação. Quanto melhor a representação do sistema, maior será a qualidade dos resultados obtidos, em termos de precisão.

Em [6], as residências sem cargas não lineares foram consideradas como cargas lineares, sendo representadas como uma combinação apropriada de cargas R-L em paralelo. Já as residências com cargas não lineares foram consideradas como uma carga linear, sendo também modelada como uma combinação R-L em paralelo, mais uma parcela de carga não linear, modelada como uma combinação de fontes de corrente. Vide Figura 3.5.

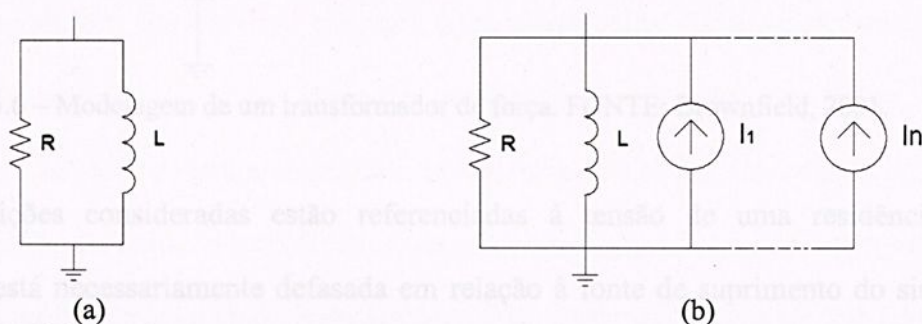


Figura 3.5 – Modelagem de cargas no domínio do tempo: (a) carga linear, (b) carga não linear.

FONTE: Brownfield, 2001.

O desenvolvimento de um bom modelo para a carga eletrônica não linear exige uma descrição detalhada do circuito da carga, a qual não será fornecida pela maioria dos fabricantes por serem informações patenteadas e/ou de propriedade intelectual dos mesmos. Para contornar este obstáculo, pode-se efetuar uma análise harmônica das medições efetuadas nas formas de ondas apresentadas pelas correntes das cargas não lineares, e utilizam-se estas

correntes para a modelagem das referidas cargas a serem incluídas no modelo do sistema de potência. Brownfield considera este método válido para a maioria das cargas não lineares, desde que a distorção harmônica total de tensão esteja abaixo de 10 % [6].

Para se modelar o transformador trifásico Δ/Y , mostrado na Figura 3.6, como um equivalente monofásico, os autores em [6] admitem que tais transformadores são eficazes em reter, no lado de baixa tensão, as harmônicas múltiplas de três, em situações ideais de equilíbrio de carga. Considerando-se que a amplitude da terceira harmônica é geralmente muito maior que as outras harmônicas múltiplas de três, adotou-se para modelar o transformador a inclusão de um filtro de derivação, ajustado ao terceiro harmônico, mais uma combinação de carga R-L em série, representando a impedância do próprio transformador [6].

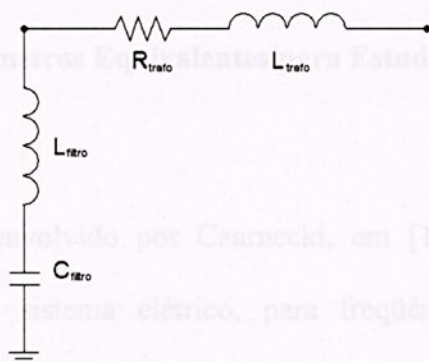


Figura 3.6 – Modelagem de um transformador de força. FONTE: Brownfield, 2001.

As medições consideradas estão referenciadas à tensão de uma residência em particular, que está necessariamente defasada em relação à fonte de suprimento do sistema. Como a fonte de suprimento será a referência no PSpice, a defasagem de tensão esperada em cada ponto de acoplamento deve ser levada em consideração na representação das cargas não lineares de cada residência [6].

As correntes foram decompostas no seu espectro harmônico no programa MATLAB (FFT), obtendo-se amplitude e fase para 31 harmônicas. Utilizou-se até a décima primeira ordem para representação no PSpice, como fonte de corrente, o que foi considerado aceitável em relação ao tempo de cálculo, memória requerida e complexidade computacional.

Por meio desta modelagem, ficou constatado que os efeitos das cargas não lineares são mais significativos no ponto de acoplamento, e que falhas de equipamentos, devido à distorção harmônica de tensão, têm maior probabilidade de ocorrer ao longo dos ramais de distribuição do que próximo à fonte de suprimento.

Incluindo-se o filtro de 3ª ordem no modelo do transformador, ocorre uma significativa redução na previsão de harmônicas desta ordem, no lado de alta tensão do transformador, fato este que pode não ocorrer em sistemas reais desequilibrados. As harmônicas *triplens* nos pontos de conexão não devem ser ignoradas, visto que esses pontos estão eletricamente distantes do lado delta do transformador e próximos às cargas não lineares ricas em correntes distorcidas.

3.4 Cálculo de Parâmetros Equivalentes para Estudos Harmônicos baseados em Medições On-line

Um método foi desenvolvido por Czarnecki, em [15], para medir e calcular os parâmetros equivalentes do sistema elétrico, para frequências harmônicas, quando da existência de distorção na forma de onda do sistema de distribuição. Para tanto, quatro parâmetros devem ser determinados, sendo eles: impedância do sistema; impedância da carga; valor RMS complexo da corrente harmônica (J) gerada pela carga; e valor RMS complexo das tensões harmônicas (E) do sistema de distribuição. Então, medições devem ser feitas em dois estágios distintos do sistema, antes e depois da mudança provocada por capacitores ou equipamentos geradores de harmônicas.

Parâmetros dos circuitos de Thévenin e Norton, conforme mostrado na Figura 3.7, para uma ordem harmônica h , são considerados como parâmetros equivalentes do sistema de distribuição e da carga no ponto de conexão.



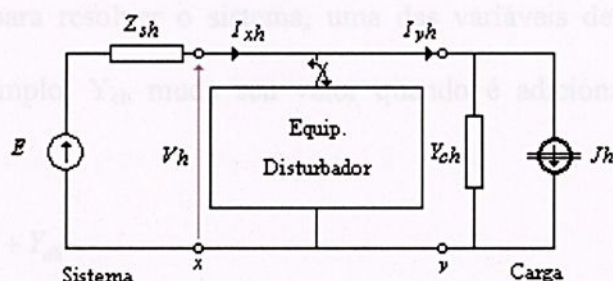


Figura 3.7 – Circuito equivalente com equipamento perturbador. FONTE: Czarnecki, 1996.

A identificação dos parâmetros deve ser efetuada em um ponto de operação, onde existam cargas não lineares; para tanto, faz-se necessária a realização de medições “on-line”. Para a execução dessas medições, utilizam-se as fontes geradoras de harmônica normalmente presentes nos sistemas de distribuição e estas harmônicas são usadas para a identificação dos parâmetros. A utilização de um equipamento com um espectro harmônico elevado, para desequilibrar o sistema, seria uma alternativa; entretanto, isso pode trazer prejuízos às demais cargas conectadas no sistema [15].

Pode ocorrer de a harmônica ser muito pequena para permitir medições de parâmetros; todavia, para este caso, pode não haver motivos que justifiquem a medição dos parâmetros.

As considerações feitas em [15], são destinadas a sistemas monofásicos com formas de ondas periódicas de tensão e de corrente. Contudo, os resultados podem ser aplicados para a análise de sistemas trifásicos equilibrados ou não.

A tensão (V_h) e corrente (I_h) harmônica, mostradas na Figura 3.7, podem ser calculadas através das equações (3.25) e (3.26).

$$V_h = \frac{1}{1 + Y_{ch} Z_{sh}} \cdot E_h - \frac{Z_{sh}}{1 + Y_{ch} Z_{sh}} \cdot J_h \quad (3.25)$$

$$I_h = \frac{Y_{ch}}{1 + Y_{ch} Z_{sh}} \cdot E_h - \frac{1}{1 + Y_{ch} Z_{sh}} \cdot J_h \quad (3.26)$$

Entretanto, para resolver o sistema, uma das variáveis deve mudar para um valor conhecido; por exemplo, Y_{ch} muda seu valor quando é adicionada uma carga linear de admitância Y_{dh} .

$$Y'_{ch} = Y_{ch} + Y_{dh} \quad (3.27)$$

Logo, os parâmetros são calculados para esta nova condição.

$$U'_n = \frac{1}{1 + Y'_{cn} Z_{sn}} \cdot E_n - \frac{Z_{sn}}{1 + Y'_{cn} Z_{sn}} \cdot J_n \quad (3.28)$$

$$I'_n = \frac{Y_{cn}}{1 + Y'_{cn} Z_{sn}} \cdot E_n - \frac{1}{1 + Y'_{cn} Z_{sn}} \cdot J_n \quad (3.29)$$

Para a obtenção de um sistema com quatro equações, é necessária mudança do sistema, devida à presença de um dispositivo adicional. As medições são feitas em dois estados do sistema, um definido sem o dispositivo gerador de harmônicas, e outro, com o uso do dispositivo de distorção adicional. Após esses passos, a obtenção das quatro equações necessárias para a determinação dos parâmetros do sistema torna-se possível. Ressalta-se que os parâmetros do sistema não devem variar entre as duas medições. Isolando-se as variáveis de interesse, pode-se, então, calcular todos os parâmetros necessários para a modelagem do sistema, como mostrado na Figura 3.7.

$$E_h = \frac{V_h I'_h - V'_h I_h}{I'_h - I_h} \quad (3.30)$$

$$J_h = \frac{V_h I'_h - V'_h I_h - Y_{dh} V_h}{V_h - V'_h} \quad (3.31)$$

$$Z_{sh} = \frac{V_h - V'_h}{I'_h - I_h} \quad (3.32)$$

$$Y_{ch} = \frac{I_h - I'_h + Y_{dh} V'_h}{V_h - V'_h} \quad (3.33)$$

Como valorar ou conhecer o parâmetro Y_{dh} nem sempre é uma tarefa fácil, a medição de corrente efetuada em dois pontos distintos passa a ser uma alternativa para o cálculo dos parâmetros, sendo definido pelas equações (3.34) à (3.37).

$$E_h = \frac{V_h I'_{xh} - V'_h I_{xh}}{I'_{xh} - I_{xh}} \quad (3.34)$$

$$J_h = \frac{V_h I'_{yh} - U'_h I_{yh}}{V_h - V'_h} \quad (3.35)$$

$$Z_{sh} = \frac{V_h - V'_h}{I'_{xh} - I_{xh}} \quad (3.36)$$

$$Y_{ch} = \frac{I_{yh} - I'_{yh}}{U_h - U'_h} \quad (3.37)$$

Para a composição e montagem do sistema de medição e processamento de sinal (M & SPS) foi utilizado, em [15], um microcomputador equipado com uma placa de conversão A/D de 12 bits com amostragem simultânea, circuitos de isolamento e de condicionamento de sinais, filtros anti-descontinuidade e um circuito de sincronismo, Figura 3.8. Para fornecer uma amostragem coerente, definida em 64 amostras por período da frequência fundamental, o conversor A/D foi ajustado para tal. As amostras foram processadas em um microcomputador (PC), com um algoritmo FFT de 64 pontos, para calcular os valores das harmônicas. Os circuitos de entrada resistiva, a simetria dos amplificadores de isolamento e os filtros anti-descontinuidade, nos canais de tensão e de corrente do M & SPS, possibilitam igualar suas transmitâncias complexas. Portanto, o valor calculado fornece, com algum erro, o valor das harmônicas de tensão e de corrente no sistema testado e seus deslocamentos de fase relativos. Um sinal gravado, em um período de duração, e uma amostragem coerente realizada possibilita processar o sinal já em tempo real, a cada ciclo de segundo, permitindo observar a variação dos parâmetros do sistema testado.

Os parâmetros do circuito são calculados a partir de medições em dois instantes muito próximos para diferentes cenários do sistema. Normalmente, os valores RMS da tensão e da corrente, nesses instantes, são muito próximos. As medições, então, são feitas com um reduzido erro sistêmico, porém com um erro randômico dobrado. Esses dois erros, chamados de “erros de cálculos”, afetam os resultados obtidos.

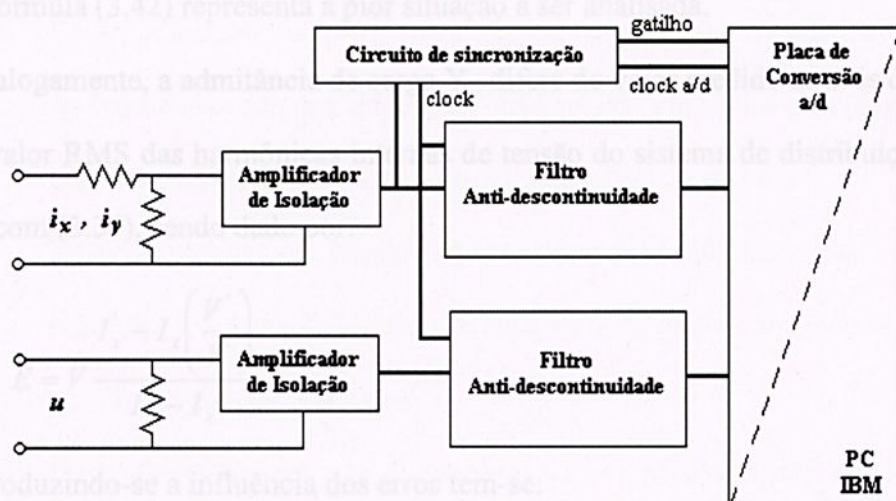


Figura 3.8 – Sistema de medição e processamento de sinais. FONTE: Czarnecki, 1995.

Logo, o incremento de tensão ΔV difere do valor real ($V - V'$) por um erro sistêmico ξ_u e por um erro randômico ρ_u .

$$V - V' = \Delta V + \xi_u + \rho_u \quad (3.38)$$

Os erros são dados por números complexos. Similarmente, o incremento de corrente é dado por:

$$I - I' = \Delta I + \xi_i + \rho_i \quad (3.39)$$

Como consequência, a impedância da fonte de suprimento Z_s difere do valor calculado, pelo erro ϵ_z .

$$Z_{sm} = -\Delta V / \Delta I_x \quad (3.40)$$

$$Z_s = Z_{sm}(1 + \varepsilon_z) \quad (3.41)$$

Caso a magnitude dos erros relativos, $\frac{\xi_u}{\Delta V}$, $\frac{\rho_u}{\Delta V}$, $\frac{\xi_i}{\Delta I_x}$ e $\frac{\rho_i}{\Delta I_x}$, seja bem menor do que

o valor unitário, a magnitude do erro ε_z é limitada por:

$$\varepsilon_z \approx \left| \frac{\xi_u}{\Delta V} - \frac{\xi_i}{\Delta I_x} \right| + \frac{\rho_u}{\Delta V} + \frac{\rho_i}{\Delta I_x} \quad (3.42)$$

A fórmula (3.42) representa a pior situação a ser analisada.

Analogamente, a admitância de carga Y_C difere do valor medido através do erro ε_y .

O valor RMS das harmônicas internas de tensão do sistema de distribuição é definido de acordo com (3.34), sendo dado por:

$$E = V \frac{I'_x - I_x \left(\frac{V'}{V} \right)}{I'_x - I_x} \quad (3.43)$$

Introduzindo-se a influência dos erros tem-se:

$$\frac{V'}{V} = 1 - \frac{\Delta V + \xi_u + \rho_u}{V} \quad (3.44)$$

logo,

$$E = V - \frac{\Delta V}{\Delta I_x} \left(\frac{1 + \frac{\xi_u + \rho_u}{V}}{1 + \frac{\xi_i + \rho_i}{\Delta I_x}} \right) I_x = V + Z_{sm} I_x (1 + \varepsilon_z) \quad (3.45)$$

Então, o valor RMS das harmônicas de tensão pode ser calculado em função da tensão harmônica terminal V_h , afetada pela corrente suprida e pela impedância da fonte medida. A fonte de corrente pode ser calculada analogamente.

$$J = I_y - \frac{\Delta I_y}{\Delta V} \left(\frac{1 + \frac{\xi_i + \rho_i}{\Delta I_y}}{1 + \frac{\xi_u + \rho_u}{\Delta V}} \right) V = I_y - Y_{ch} V (1 + \varepsilon_Y) \quad (3.46)$$

Através dos fatos supracitados, constata-se que a precisão na determinação dos parâmetros, por meio das medições realizadas no sistema, é afetada por três tipos de erros de medição, quais sejam:

1. Os erros sistêmicos ξ_u e ξ_i , os quais não se alteram em cada medição feita sob as mesmas condições. Medições diferenciais eliminam os componentes mais comuns associados a estes erros, tais como, temperatura e interferências eletromagnéticas em frequências harmônicas. A não linearidade do sistema de medição é a fonte dos erros sistemáticos, os quais não podem ser reduzidos pela repetição das medições.
2. Os erros randômicos ρ_u e ρ_i , causados pelos ruídos no sistema a ser testado e no sistema de medição. Sob uma circunstância em que o sistema permaneça inalterado, esses erros podem ser facilmente reduzidos repetindo-se as medições.
3. Os erros totais que ocorrem na medição dos valores RMS da tensão e corrente. Estes erros dependem da impedância do sistema de suprimento e da admitância do lado de carga.

O ruído, que prejudica a medição exata dos parâmetros, é gerado no sistema de potência, bem como, no circuito de condicionamento de sinal, principalmente devido aos amplificadores de isolamento, aos filtros anti-descontinuidade e ao capacitor chaveado. Além disso, deve-se considerar também o ruído de quantização do conversor A/D [15].

O ruído no domínio do tempo é transformado para o espectro harmônico de acordo com o teorema de Parseval. Se σ é o desvio padrão do ruído do sinal de entrada com valor

médio nulo, e N é o número de amostras, então, devido à distribuição uniforme do ruído sobre todas as componentes espectrais, os valores das harmônicas de sinal são calculados como um erro randômico do desvio padrão igual σ_s a:

$$\sigma_s = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (3.47)$$

A fórmula (3.47) é válida sob a suposição de que os valores das harmônicas são muito menores do que a fundamental. Também, um erro de truncamento causado pelo computador é negligenciado, pois a precisão padrão dos números reais no programa Matlab/Simulink, usado na simulação, é grande se comparada ao erro causado pelo valor randômicos dos mais baixos bits, na conversão A/D.

O método discutido foi verificado, em [15], com um modelo computacional do sistema sob teste. O programa de simulação Matlab/Simulink foi usado para este propósito. Foi adotado para teste um sistema de distribuição e uma carga com parâmetros conhecidos, dados por: $R_s=100 \text{ m}\Omega$, $L_s=50\mu\text{H}$, $G_c=100 \text{ mS}$ e $B_c=0$; os quais foram também usados no modelo computacional. Harmônicas da fonte de alimentação no modelo computacional receberam valores equivalentes aos observados no laboratório.

A estrutura do sistema testado, seus parâmetros e a distorção na forma de onda foram modeladas e junto com a estrutura e os parâmetros do sistema M & SPS. A Figura 3.9 mostra os resultados, com um capacitor de $210 \mu\text{H}$, bem como, com um dispositivo Gerador de Harmônicas, distorcendo o sistema. Os resultados de cinco simulações de medições, do valor de E_n , são apresentados. O valor de E_n calculado está marcado com “x” e sua fase com “o”. Os valores calculados e os valores “reais” medidos mostraram-se coincidentes, ocorrendo uma pequena variação nos valores encontrados para ordens superiores à 18ª frequência harmônica, como se pode constatar na Figura 3.9.

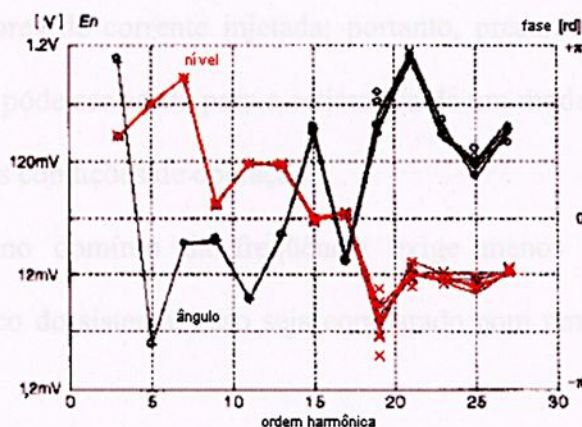


Figura 3.9 – Resultados da identificação das harmônicas de tensão do sistema de distribuição (En).
FONTE: Czarnecki, 1995.

3.5 Conclusões

Neste capítulo, verificou-se a necessidade de se modelar e analisar os sistemas de energia elétrica na presença de cargas não lineares. As simulações para estudo de propagação harmônica podem ser usadas para se prever a distorção na forma de onda da corrente e da tensão ao longo dos sistemas de distribuição. Sempre que conversores de potência são adicionados ao sistema ou as características do sistema são alteradas significativamente, simulações podem ser feitas para se determinar problemas potenciais advindos da presença de harmônicas na rede.

Foram abordados os métodos de modelagens probabilístico e determinístico, bem como, suas vantagens e desvantagens.

Para a análise de um sistema elétrico, quando as características das cargas presentes no sistema possam ser consideradas constantes, sem grandes variações ao longo do período analisado, o método determinístico mostra-se mais adequado, principalmente devido aos diferentes métodos de simulações.

Normalmente, as informações necessárias das cargas ou ramal a serem analisados não estão disponíveis. Nesse sentido, medições em campo servem como comparação com os resultados obtidos através de simulações. Com a variação da configuração do sistema, tem-se

uma variação dos valores de corrente injetada; portanto, presume-se que esta informação, advinda das medições, pode ser usada para a estimativa de um modelo capaz de representar o sistema sobre diferentes condições de operação.

Uma solução no domínio da frequência exige menos tempo computacional e conhecimento específico do sistema, caso seja comparado com uma solução no domínio do tempo.

O modelo de Norton tem seu uso dedicado à modelagem do sistema de distribuição quando o sistema não possui todas as suas características conhecidas. Usualmente, o estudo desses sistemas complexos utiliza fontes de corrente, para cada frequência harmônica específica, e esta modelagem pode ser aceita para o estudo de alguns casos; entretanto, pode não servir para outros, especialmente, onde a variação do perfil de carga seja muito acentuada ao longo de um período.

Ao se utilizar programas de simulação no domínio do tempo, é de suma importância a escolha de um bom critério a ser adotado na modelagem do sistema em estudo. Esse fato se justifica devido à característica do programa PSpice ou EMTP, onde não se utilizam equações do sistema e sim componentes do sistema modelados. Por esse motivo, todas as cargas e parâmetros devem ser modelados adequadamente para se obter um resultado confiável. A grande vantagem das simulações no domínio do tempo está na possibilidade de observar a dinâmica de um sistema, sobretudo na ocorrência de fenômenos transitórios.

Apresentou-se um exemplo de modelagem no domínio do tempo, através do PSpice, no qual foi proposta pelo autor uma representação monofilar do sistema, adotando-se condições de equilíbrio de carga entre fases. Essa representação não consegue avaliar os sistemas “reais” de distribuição, visto que, o desequilíbrio de carga é comum em sistemas trifásicos que possuem cargas monofásicas conectadas.



Verifica-se através dos fatos apresentados que, quanto maior a exigência por informações detalhadas da carga não linear a ser analisada, maior a chance de divergências entre os resultados calculados e os valores obtidos em medições feitas em campo, principalmente na comprovação do modelo. Portanto, precisa-se de um modelo mais abrangente, no qual informações minuciosas sobre as cargas a serem modeladas não sejam necessárias.

Um método muito importante para a determinação de parâmetros necessários para modelagem do sistema é apresentado por Czarnecki [16]. Nesse método de cálculo de parâmetros equivalentes, baseados em medições on-line, os parâmetros podem ser definidos em relação aos resultados obtidos por medições feitas em duas condições distintas do sistema, processo similar ao método de Norton, porém, com maior precisão e exatidão.

Os métodos apresentados têm sido estendidos à análise de casos em sistemas trifásicos desbalanceados, sendo necessária à reformulação da equação do sistema e das equações das cargas não lineares. A aproximação trifásica, para análise harmônica, tem vantagens em relação à representação monofásica. A principal delas seria a modelagem do fluxo harmônico de sequência zero, pois, mesmo em condições de sistemas com cargas equilibradas, alguns equipamentos geradores de harmônicas, tais como transformadores trifásicos, podem gerar harmônicas de sequência zero.

Assim, no capítulo seguinte, apresentar-se-á uma proposta de modelagem trifásica para um ramal de distribuição urbana (a quatro fios) através de simulações no domínio do tempo, utilizando-se como plataforma o software PSpice.

CAPÍTULO IV

4 MODELAGEM TRIFÁSICA PROPOSTA PARA ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO

As simulações de sistemas de distribuição de energia elétrica, realizadas no domínio do tempo, normalmente são baseadas em diagramas “unifilares”, compostos por cargas lineares e não lineares equilibradas. Entretanto, com o avanço da eletrônica de potência, disponibilizando, no mercado atual, elevada quantidade de cargas monofásicas com processamento eletrônico, o perfil de carga observado no sistema elétrico mostra um cenário de desbalanceamento entre fases, devido, principalmente, à distribuição disforme dessas cargas ao longo dos ramais de distribuição.

Portanto, a análise dos sistemas de distribuição quando da presença de cargas não lineares, no cenário de desbalanceamento de carga, envolve a necessidade de uma modelagem trifásica dessas cargas e dos principais dispositivos pertencentes a este sistema, para que os resultados das simulações possam ser os mais confiáveis possíveis, apresentando uma precisão desejável.

Entretanto, é comum encontrar na literatura o desenvolvimento de estudos de sistemas de distribuição trifásicos através de representações unifilares, conforme discutido no Capítulo III. Nesse tipo de representação, admite-se que o sistema trifásico é plenamente equilibrado, ou seja, as cargas conectadas no secundário dos transformadores são distribuídas de maneira uniforme entre as três fases.

A consideração de equilíbrio pleno leva alguns autores a considerarem que os transformadores, com conexão tipo Δ/Y – aterrado, sejam elementos capazes de impedir a

propagação das ordens triplas (triplens) do secundário para o primário [6]. Nessa idealização, as triplens não circularão no primário das redes de distribuição, o que não ocorre na situação “real”.

É fato que um cenário de pleno equilíbrio de cargas somente será obtido em condições muito especiais (testes laboratoriais), ou em situações hipotéticas. Portanto, a adoção da representação unifilar do sistema de distribuição pode levar a problemas de imprecisão, especialmente, no caso do resultado ser confrontado com medições experimentais (medições no sistema real). Assim, torna-se bastante interessante a realização de simulações com a representação completa dos sistemas trifásicos de distribuição, incluindo-se as conexões a quatro fios do secundário dos transformadores (três fases + condutor neutro). Para tanto, é imprescindível a adoção de modelos adequados para representar as cargas não lineares e os transformadores conectados ao sistema.

Este capítulo apresenta uma modelagem inovadora, uma vez que o sistema elétrico de distribuição no exemplo em análise, com forte presença de cargas não lineares, é simulado a partir de uma representação “trifásica”, apresentando também uma importante contribuição para as técnicas de modelagem de unidades transformadoras trifásicas para simulações por meio do PSpice [36 e 39].

4.1 Modelagem do Ramal de Distribuição Teste no Ambiente PSpice

Para a elaboração do modelo trifásico proposto é apresentada a modelagem de um ramal de distribuição urbano, o qual servirá como base para as simulações (Figura 4.1).

A modelagem apresenta um sistema trifásico no qual o transformador, as linhas de distribuição, as cargas lineares e não lineares, bem como, suas associações serão representadas por elementos disponíveis no software de simulação PSpice. As cargas lineares foram modeladas através de impedâncias constantes, como uma associação R-L em série, e as



cargas não lineares, através de fontes de correntes harmônicas, e os valores obtidos a partir dos espectros harmônicos característicos das correntes drenadas nos pontos de acoplamento.

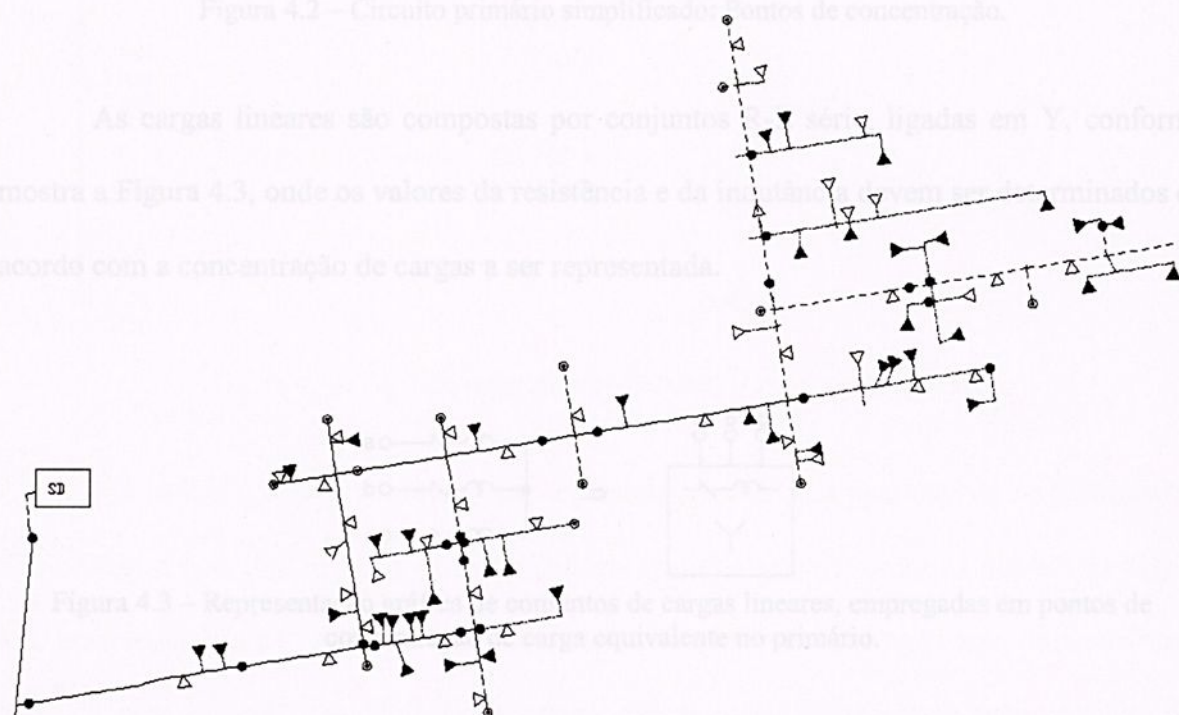


Figura 4.1 – Diagrama unifilar da rede primária, tomada como exemplo.

As tensões de alimentação do sistema, provenientes da subestação, são consideradas com características de um “barramento infinito”, ou seja, suas características de valores eficazes e formas de onda não se alteram, mesmo com um forte carregamento no sistema. Sendo assim, serão representadas por fontes de tensões senoidais, com tensões eficazes e frequências constantes.

Foram realizadas simplificações com o intuito de se reduzir o número de nós do circuito a ser simulado, o tempo computacional gasto e o erro de cálculo. As áreas de concentrações de cargas do ramal primário são apresentadas na Figura 4.2.

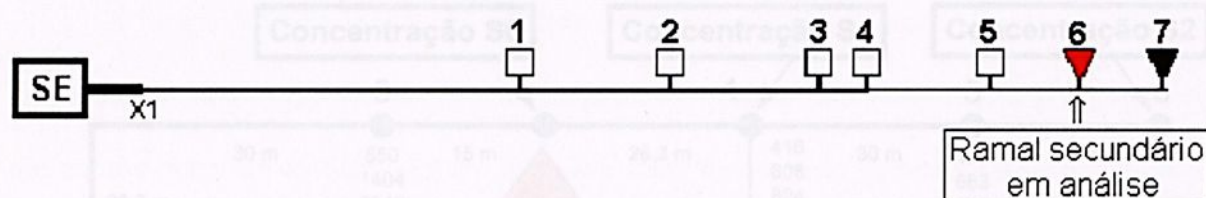


Figura 4.2 – Circuito primário simplificado: Pontos de concentração.

As cargas lineares são compostas por conjuntos R-L série, ligadas em Y, conforme mostra a Figura 4.3, onde os valores da resistência e da indutância devem ser determinados de acordo com a concentração de cargas a ser representada.

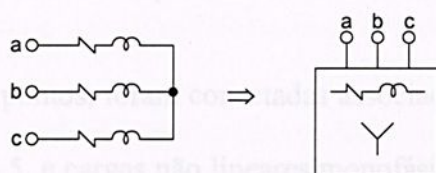


Figura 4.3 – Representação gráfica de conjuntos de cargas lineares, empregadas em pontos de concentração de carga equivalente no primário.

No ponto de conexão da rede secundária de interesse, faz-se necessária a adequada modelagem do transformador trifásico, em conexão Δ/Y - aterrado, de tal forma a representar-lhe plenamente as características elétricas. Nesse contexto, neste capítulo, discorrer-se-á sobre um modelo de unidade transformadora trifásica, para simulação no PSpice, representando as características elétricas reais desses dispositivos.

O ramal de distribuição secundário a quatro fios a ser analisado, apresentado na Figura 4.4, é conectado ao secundário do modelo do transformador trifásico. Neste ramal secundário, as cargas foram concentradas em três pontos distintos (S_0 , S_1 , S_2).

Figura 4.5 – Representação das cargas monofásicas não lineares no secundário.

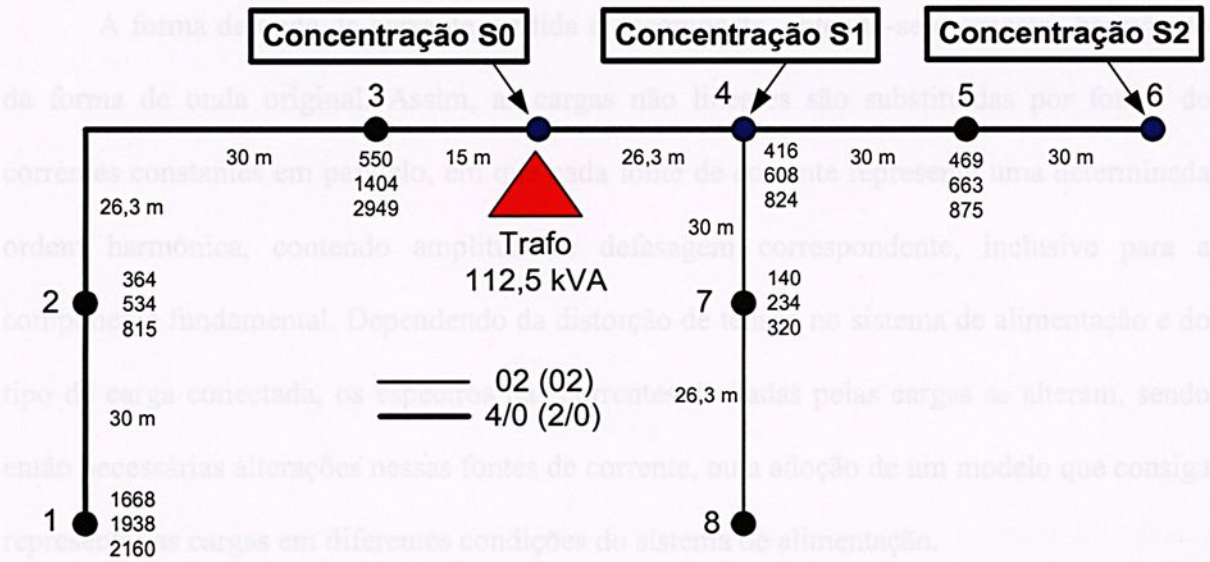


Figura 4.4 – Circuito simplificado do ramal secundário em análise.

Em cada um desses pontos, foram conectadas associações paralelas de cargas lineares, representadas pela Figura 4.5, e cargas não lineares monofásicas, conforme modelo da Figura 4.6, associadas nas três fases secundárias, estabelecendo-se um carregamento desequilibrado trifásico com conexão em Y. Para as cargas não lineares, destacam-se suas composições através do método de fontes de corrente “constante”.

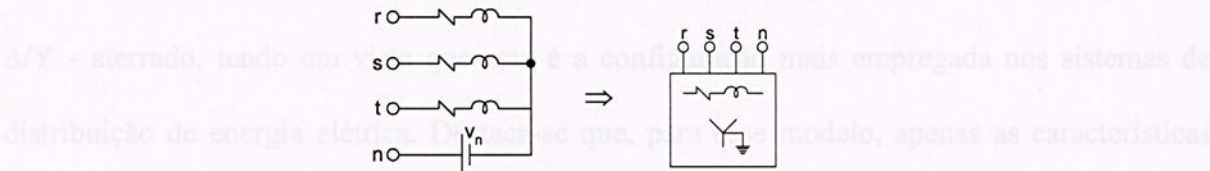


Figura 4.5 – Representação da carga linear no secundário.

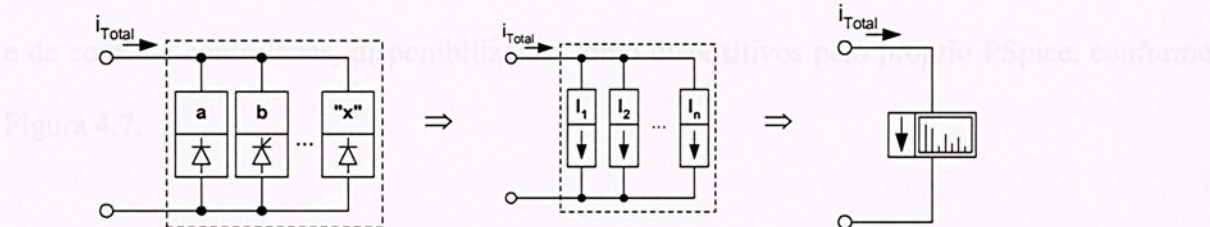


Figura 4.6 – Representação das cargas monofásicas não lineares no secundário.

A forma de onda da corrente medida é decomposta, obtendo-se o espectro harmônico da forma de onda original. Assim, as cargas não lineares são substituídas por fontes de correntes constantes em paralelo, em que cada fonte de corrente representa uma determinada ordem harmônica, contendo amplitude e defasagem correspondente, inclusive para a componente fundamental. Dependendo da distorção de tensão no sistema de alimentação e do tipo de carga conectada, os espectros das correntes drenadas pelas cargas se alteram, sendo então necessárias alterações nessas fontes de corrente, ou a adoção de um modelo que consiga representar as cargas em diferentes condições do sistema de alimentação.

4.2 Modelo Proposto para o Transformador Trifásico no Ambiente PSpice

Com a necessidade da modelagem trifásica dos sistemas, devido aos fatos expostos anteriormente, vem a demanda por modelos confiáveis que possam representar fielmente os principais equipamentos conectados na rede. Por isso, será apresentado um modelo de representação para o transformador trifásico, com conexões para três condutores no primário e quatro condutores no secundário, permitindo a avaliação dos efeitos advindos da conexão de cargas não lineares desequilibradas. A configuração escolhida para os enrolamentos é do tipo Δ/Y - aterrado, tendo em vista que esta é a configuração mais empregada nos sistemas de distribuição de energia elétrica. Destaca-se que, para esse modelo, apenas as características elétricas do transformador serão consideradas [36].

Foi implementado um modelo de transformador trifásico baseado em fontes de tensão e de corrente controladas, disponibilizadas como dispositivos pelo próprio PSpice, conforme Figura 4.7.



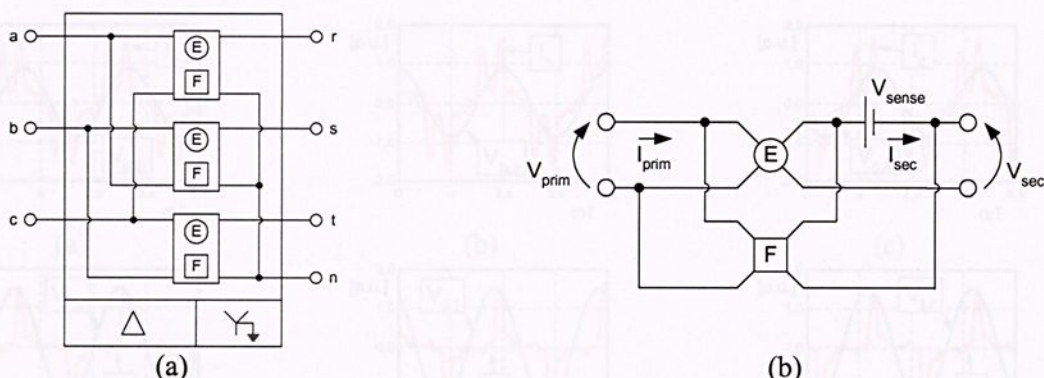


Figura 4.7 – (a) Modelo proposto para o transformador trifásico; (b) unidade E/F empregada no modelo.

A Figura 4.8 mostra o diagrama esquemático simplificado para simulação do modelo proposto de transformador trifásico. Nos resultados apresentados a seguir, a relação de transformação é assumida como sendo unitária. Além disso, admite-se que as unidades de tensão e corrente são fornecidas em valores p.u. (por unidade). As impedâncias dos condutores da rede de distribuição são desprezadas, permitindo que os efeitos relacionados com o modelo do transformador possam ser devidamente avaliados.

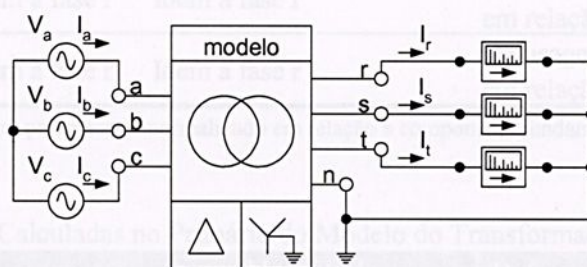


Figura 4.8 – Diagrama esquemático simplificado, empregado para simulação do modelo do transformador trifásico.

Alguns resultados de simulação do PSpice são apresentados na Figura 4.9, considerando-se a presença de uma carga não linear plenamente equilibrada (magnitude e defasagem angular). As fontes de corrente, que descrevem as cargas conectadas a cada uma das fases, são apresentadas na Tabela 4.1. Na Tabela 4.2 são apresentadas as componentes harmônicas das correntes de linha no primário do transformador, fornecidos pelo PSpice.

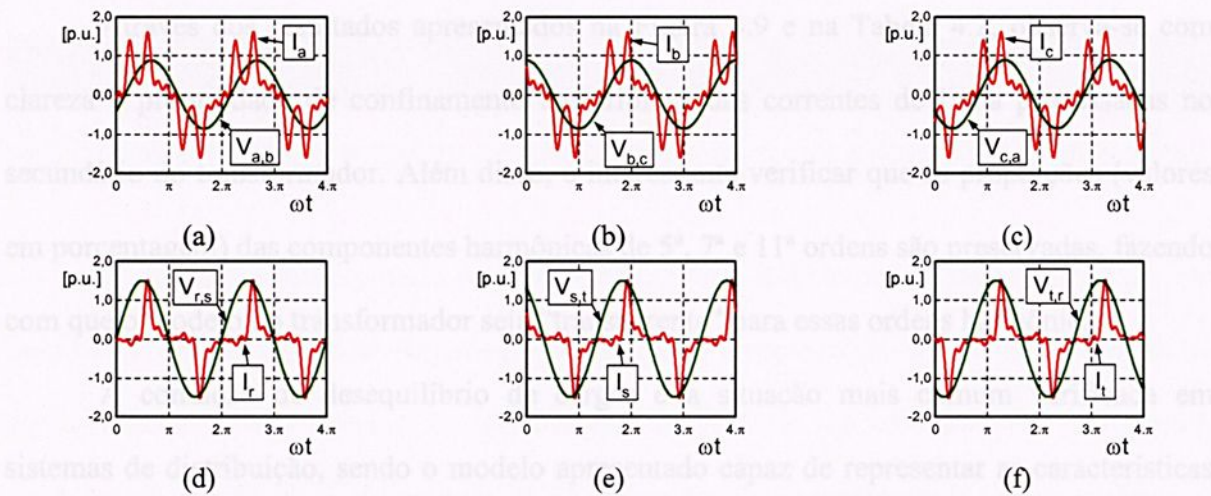


Figura 4.9 – Resultados de simulação para o circuito da figura 4.9, com a conexão de carga plenamente equilibrada (magnitude e defasagem angular), (a) corrente no primário fase A; (b) corrente fase B, (c) corrente fase C, (d) corrente no secundário fase r, (e) corrente fase s, (f) corrente fase t

Tabela 4.1 – Fontes de Corrente Conectadas no Secundário do Modelo do Transformador.

Fase	Componente Harmônica	Magnitude [p.u.] (*)		Defasagem Angular [°]
r	1	0,5	100%	-27,2
	3	0,375	75%	121,6
	5	0,235	47%	-78,2
	7	0,18	36%	67,2
	9	0,155	31%	-135,5
	11	0,095	19%	17,8
s	Idem à fase r	Idem à fase r		Defasagem de 120° em relação à fase r
t	Idem à fase r	Idem à fase r		Defasagem de 240° em relação à fase r

(*) o valor entre parênteses é normalizado em relação à componente fundamental

Tabela 4.2 – Correntes Calculadas no Primário do Modelo do Transformador (cargas equilibradas).

Fase	Componente Harmônica	Magnitude [p.u.] (*)		Defasagem Angular [°]
a	1	0,866	100%	2,8
	3	0	0%	-
	5	0,407	47%	-108,3
	7	0,312	36%	97
	9	0	0%	-
	11	0,164	19%	-12,5
b	Idem à fase a	Idem a fase a		Defasagem de 120° em relação à fase a
c	Idem à fase a	Idem à fase a		Defasagem de 240° em relação à fase a

(*) o valor entre parênteses é normalizado em relação à componente fundamental

Através dos resultados apresentados na Figura 4.9 e na Tabela 4.2, observa-se com clareza a propriedade de confinamento das triplens das correntes de linha processadas no secundário do transformador. Além disso, é interessante verificar que as proporções (valores em porcentagem) das componentes harmônicas de 5ª, 7ª e 11ª ordens são preservadas, fazendo com que o modelo do transformador seja “transparente” para essas ordens harmônicas.

A condição de desequilíbrio de cargas é a situação mais comum verificada em sistemas de distribuição, sendo o modelo apresentado capaz de representar as características elétricas de um transformador trifásico Δ/Y – aterrado para condições de desequilíbrio [39].

4.3 Simulação do Ramal de Distribuição Teste no Ambiente PSpice

As Tabelas 4.3 e 4.4 apresentam os parâmetros da linha primária e secundária respectivamente, dos quais os valores das impedâncias foram obtidos através das especificações dos condutores em cada trecho e da distância entre cada trecho do ramal de distribuição [38].

Tabela 4.3 – Parâmetros da Linha Primária (SE – P7).

Parâmetros	Distância						
	SE – P ₁	P ₁ – P ₂	P ₂ – P ₃	P ₃ – P ₄	P ₄ – P ₅	P ₅ – P ₆	P ₆ – P ₇
R [p.u.]	0,075m	0,208m	0,202m	0,035m	0,136m	0,102m	0,090m
L [p.u.]	0,403μ	1,044μ	1,015μ	0,176μ	0,684μ	0,513μ	0,452μ

Tabela 4.4 – Parâmetros da Linha Secundária (S₀ – S₂).

Parâmetros	Distância			
	S ₀ – S ₁		S ₁ – S ₂	
	Linha	Neutro	Linha	Neutro
R [p.u.]	0,178	0,283	0,406	0,646
L [p.u.]	0,793m	0,764m	1,808m	1,742m

A Tabela 4.5 representa os parâmetros, das cargas lineares conectadas ao primário, então utilizados para simulação. Os valores em p.u. são quantificados baseados em estimativas de consumo em cada ponto.

Tabela 4.5 – Parâmetros das Cargas Lineares Concentradas Conectadas à Linha Primária.

Barra							
Parâmetros	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇
R [p.u.]	20,04	3,30	0,51	1,23	4,05	-	28,75
L [p.u.]	25,75m	4,24m	0,85m	2,02m	6,65m	-	47,26m

O ramal secundário, onde se deseja efetuar uma análise mais detalhada, por ser um ramal com um carregamento fortemente não linear, é representado através da associação de cargas lineares e não lineares, em cenário de desequilíbrio, concentradas em três pontos, sendo estes S_0 , S_1 e S_2 (Anexo A.2). A parte linear é representada pelos parâmetros apresentados na Tabela 4.6, baseados em estimativas de consumo; já a parte não linear é representada pelas fontes de correntes associadas em paralelo com a parte linear, Tabela 4.7. As fontes de correntes são especificadas nas ordens da 1ª até a 7ª harmônica, pois estas ordens já representam satisfatoriamente a parte não linear, não sendo necessária a utilização de fontes adicionais com ordens superiores [39].

Tabela 4.6 – Parâmetros das Cargas Lineares Conectadas à Linha Secundária.

Ponto									
Parâm.	S ₀			S ₁			S ₂		
	Linha r	Linha s	Linha t	Linha r	Linha s	Linha t	Linha r	Linha s	Linha t
R [p.u.]	29,60	40,20	53,61	78,87	76,72	37,00	42,62	74,00	78,87
L [p.u.]	36,61m	18,80m	25,07m	56,06m	74,08m	45,77m	41,15m	91,53m	56,06m

Tabela 4.7 – Parâmetros das Cargas Não-lineares Conectadas à Linha Secundária.

Pto de concentração de cargas	Ordem Harmônica	Fase r		Fase s		Fase t	
		Amplitude [p.u.]	Ângulo de Fase [°]	Amplitude [p.u.]	Ângulo de Fase [°]	Amplitude [p.u.]	Ângulo de Fase [°]
S ₀	1	0,031591	0	0,028914	132	0,037109	-120
	3	0,008242	120	0,008811	-154	0,00348	171
	5	0,003429	-37	0,001905	-86	0,002426	-127
	7	0,001716	-168	0,000762	-30	0,001555	-109
S ₁	1	0,015242	12	0,015863	120	0,019053	-95
	3	0,003811	-154	0,002667	120	0,00448	138
	5	0,001979	34	0,002621	43	0,003426	-143
	7	0,002334	-150	0,001811	72	0,001555	-109
S ₂	1	0,013877	0	0,018296	120	0,0229	-120
	3	0,00274	-69	0,004385	-154	0,002726	-48
	5	0,001713	-7	0,002979	-86	0,001227	-157
	7	0,000777	11	0,001334	-30	0,000392	72

A partir dos dados apresentados nas Tabelas de 4.5 a 4.7 e por meio do PSpice, foi realizada uma simulação, na qual são apresentadas as formas de onda de tensões e correntes. Para a validação do modelo do sistema foi comparado os valores calculados com os medidos, destacando-se a performance da modelagem trifásica, bem como, da modelagem proposta para o transformador trifásico, o qual representa plenamente as características elétricas de um transformador real [39]. São apresentadas, nas Figuras 4.8 e 4.9, as formas de onda das tensões e correntes processadas pelo transformador.

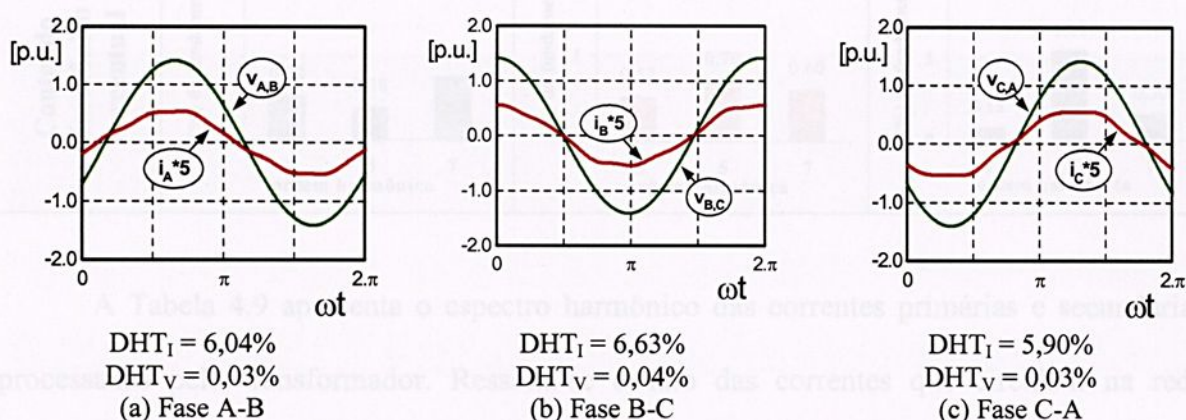


Figura 4.10 – Formas de onda das Tensões (verde) e correntes (vermelho) no lado primário do transformador; (a) corrente no primário fase A; (b) corrente fase B, (c) corrente fase C.

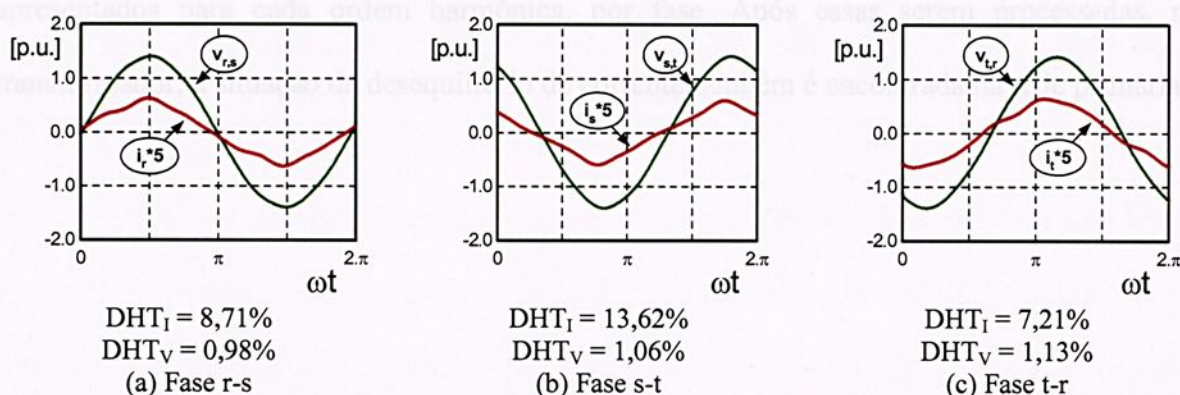


Figura 4.11 – Formas de onda das Tensões (verde) e correntes (vermelho) no lado secundário do transformador; (a) corrente no secundário fase r, (b) corrente fase s, (c) corrente fase t

É apresentado na Tabela 4.8 o espectro harmônico das tensões no ponto de concentração “S₀”. Como a carga não linear utilizada na simulação não é predominante, pode-

se observar um reduzido valor de distorção harmônica nas tensões do secundário e principalmente do lado primário.

Tabela 4.8 – Espectro Harmônico das Tensões de Fase no Ponto S₀.

Ordem Harmônica	Fase r-s		Fase s-t		Fase t-r	
	Amplitude [p.u.]	% da fundamental	Amplitude [p.u.]	% da fundamental	Amplitude [p.u.]	% da fundamental
1	1,392	100,00%	1,39	100,00%	1,391	100,00%
3	0,007	0,52%	0,007	0,52%	0,002	0,15%
5	0,005	0,38%	0,009	0,70%	0,015	1,08%
7	0,01	0,74%	0,008	0,60%	0,004	0,30%

Conteúdo Harmônico Percentual

(%) da fundamental

2

1

0

0,52

0,38

0,74

3

5

7

ordem harmônica

(%) da fundamental

2

1

0

0,52

0,70

0,60

3

5

7

ordem harmônica

(%) da fundamental

2

1

0

0,15

1,08

0,30

3

5

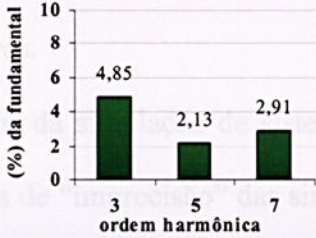
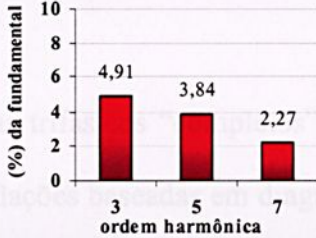
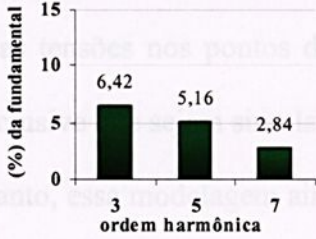
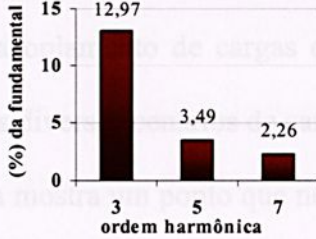
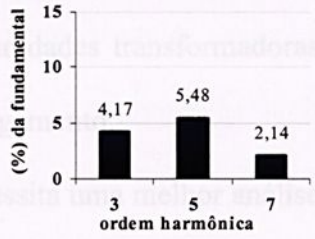
7

ordem harmônica

A Tabela 4.9 apresenta o espectro harmônico das correntes primárias e secundárias processadas pelo transformador. Ressalta-se o fato das correntes que circulam na rede secundária estarem em desequilíbrio, como pode ser observado nos valores de amplitude apresentados para cada ordem harmônica, por fase. Após essas serem processadas, no transformador, a situação de desequilíbrio de corrente também é encontrada na rede primária.

Através do espectro harmônico apresentado, na Tabela 4.9, é possível verificar a presença de componentes harmônicas de terceira ordem no lado primário, mesmo com a conexão Δ/Y . Em um transformador real, com uma carga equilibrada, a terceira harmônica ficaria “confinada” no enrolamento em conexão Δ e sairia do sistema com uma carga desequilibrada entre as fases, como o simulado, as correntes de sequência zero (tripla) são transferidas para o primário. Esse fato foi plenamente confirmado na modelagem apresentada, fornecendo assim, condições para uma análise adequada sobre a propagação das componentes harmônicas nas linhas de distribuição.

Tabela 4.9 – Espectro Harmônico das Correntes de Fase Processadas no Transformador.

Primário							
Ordem Harmônica	Fase a		Fase b		Fase c		
	Amplitude [p.u.]	% da fundamental	Amplitude [p.u.]	% da fundamental	Amplitude [p.u.]	% da fundamental	
1	0,10812	100%	0,11055	100%	0,11404	100%	
3	0,00524	4,85%	0,00543	4,91%	0,00130	1,14%	
5	0,00231	2,13%	0,00425	3,84%	0,00649	5,67%	
7	0,00314	2,91%	0,00251	2,27%	0,00132	1,16%	
Conteúdo Harmônico Percentual							
	Secundário						
	Ordem Harmônica	Fase r		Fase s		Fase t	
		Amplitude [p.u.]	% da fundamental	Amplitude [p.u.]	% da fundamental	Amplitude [p.u.]	% da fundamental
1	0,11140	100%	0,10123	100%	0,12060	100%	
3	0,00715	6,42%	0,01313	12,97%	0,00503	4,17%	
5	0,00574	5,16%	0,00354	3,49%	0,00660	5,48%	
7	0,00317	2,84%	0,00229	2,26%	0,00259	2,14%	
Conteúdo Harmônico Percentual							

Através do espectro harmônico apresentado, na Tabela 4.9, é possível verificar a presença de componentes harmônicas de terceira ordem no lado primário, mesmo com a conexão Δ/Y . Em um transformador real, com uma carga equilibrada, a terceira harmônica ficaria “confinada” no enrolamento em conexão Δ ; entretanto, com uma carga desequilibrada entre as fases, como o simulado, as correntes de sequência zero (triplens) são transferidas para o primário. Esse fato foi plenamente confirmado na modelagem apresentada, fornecendo assim, condições para uma análise adequada sobre a propagação das componentes harmônicas nas linhas de distribuição.

4.4 Conclusões

Neste capítulo foi apresentada uma modelagem proposta para simulações de sistemas trifásicos de distribuição. Essa modelagem torna-se extremamente importante devido aos atuais perfis das cargas presentes nos sistemas de distribuição, com características fortemente não lineares e em pleno desequilíbrio, com relação ao carregamento das unidades transformadoras.

A partir da simulação de sistemas trifásicos “completos”, pode-se eliminar uma das maiores fontes de “imprecisão” das simulações baseadas em diagramas unifilares: a admissão de um sistema operando em condição de pleno equilíbrio de carga.

Resultados interessantes puderam ser obtidos, evidenciando a importância e a necessidade de se considerar a condição de desequilíbrio de cargas para a análise de circulação de harmônicas através da rede de distribuição de energia elétrica.

A partir dessas conclusões, torna-se possível a completa análise das distorções harmônicas das tensões nos pontos de acoplamento de cargas e unidades transformadoras, permitindo inclusive que sejam simulados diversos cenários de carregamento.

Entretanto, essa modelagem ainda mostra um ponto que necessita uma melhor análise, o qual seria a representação das cargas não lineares, devido ao fato que as correntes injetadas para alguns tipos de cargas elétricas sofrem influência da tensão de alimentação. No método apresentado, neste capítulo, as cargas foram modeladas como fontes de corrente “constantes”, fato este que pode provocar desvios nos resultados, caso a tensão de alimentação sofra mudanças, principalmente, em sua DHT, em relação ao cenário onde as medições foram feitas, ou influencie as características das cargas conectadas no sistema.

Nesse sentido, no próximo capítulo, será feita uma análise experimental do comportamento dos principais modelos de cargas elétricas, em condições distintas de alimentação, no cenário de tensão senoidal ou no cenário de tensão distorcida ($DHT_V > 5\%$).



CAPÍTULO V

5 INFLUÊNCIA DA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO NAS FORMAS DE ONDA DAS CORRENTES HARMÔNICAS

As simulações no sistema de distribuição de energia elétrica realizadas no capítulo anterior utilizaram, para modelagem das cargas elétricas, o método de fontes de correntes constantes em paralelo, sendo o critério utilizado, para a adoção deste tipo de modelagem, a análise do comportamento das correntes drenadas no circuito teste através de medições realizadas em períodos distintos. As cargas elétricas presentes nesse circuito apresentaram uma característica de funcionamento com um perfil de corrente “constante”, não ocorrendo variações significativas nas formas de onda de corrente para cenários distintos de alimentação.

A potência absorvida por uma carga elétrica depende de sua natureza e pode variar em função da tensão a ela aplicada. Existem modelos para representação do comportamento da carga em função da tensão aplicada, dentro os quais destacam-se: cargas de impedância constante com a tensão, cargas de corrente constante com a tensão, cargas de potência constante com a tensão e cargas constituídas pela combinação dos modelos anteriores.

No Capítulo II (item 2.2.2), comentou-se que a tensão de alimentação possui efeitos diferenciados nas formas de onda da corrente e nas harmônicas, produzidas por cargas elétricas, sendo que, esses efeitos dependem da natureza do funcionamento das cargas.

Para as cargas de corrente constante com a tensão, o módulo da corrente absorvida e seu fator de potência permanecem constantes. Logo, a potência absorvida varia linearmente com a tensão aplicada.



Para as cargas de potência constante com a tensão, as potências ativa e reativa permanecem constantes. A corrente absorvida é inversamente proporcional à tensão aplicada.

Para as cargas de impedância constante com a tensão, a impedância da carga mantém-se constante. A potência absorvida varia quadraticamente com a tensão aplicada.

Foram selecionadas três cargas elétricas que possuísem, distintamente, os três diferentes comportamentos da potência absorvida em função da tensão de alimentação, com o intuito de avaliar-se o comportamento das suas formas de onda de corrente, quais sejam: uma lâmpada incandescente de 60 W / 127 V – impedância constante; uma lâmpada fluorescente compacta 15 W / 127 V – corrente constante; e um computador desktop – potência constante.

As cargas elétricas selecionadas foram ensaiadas, sendo alimentadas por uma Fonte de Tensão Ideal – vide Figura 5.1 (Fonte *California Instruments*) – sobre três cenários distintos quanto à tensão de alimentação, em termos da taxa de distorção harmônica. Observou-se o comportamento das formas de onda e do espectro harmônico das correntes inerentes a essas cargas.

Este capítulo apresenta os resultados obtidos através dos ensaios laboratoriais submetidos às cargas elétricas escolhidas, avaliando-se o desempenho individual sob cada um dos cenários. Serão apresentadas as formas de onda e os espectros harmônicos das correntes, considerando-se amplitudes e ângulos de fase de cada componente significativa. Para a análise dos conteúdos harmônicos das correntes, foram utilizados sistemas de aquisição da iOTech, osciloscópios Tektronix 420A e 340A, assim como, software de análise de sinais da Tektronix WaveStar, sendo os dados tabulados em planilhas após esses passos.



Figura 5.1 – Visão do laboratório de testes, com os equipamentos utilizados nos ensaios. Em baixo, a Fonte de Tensão Ideal da *California Instruments*; e, acima, o Osciloscópio *Tektronix*.

5.1 Resultados dos Ensaios Efetuados em Laboratórios

Após a escolha das cargas a serem ensaiadas, torna-se necessária a definição dos cenários quanto à tensão de alimentação, para que se possa avaliar o comportamento das cargas elétricas frente as diferentes situações de suprimento, obtendo-se assim os resultados característicos para cada uma delas.

5.1.1 Definição dos Cenários quanto à Tensão de Alimentação

Na análise, para a fonte de tensão controlada, utilizada nos ensaios, considera-se um nível de curto-circuito elevado, ou seja, ela não sofre influência das correntes presentes no circuito.

Como cenário 01, foi adotada uma tensão de alimentação puramente senoidal, sem distorções harmônicas ou influência de cargas adjacentes. As características adotadas para a fonte de tensão neste cenário estão discriminadas na Figura 5.2 e Tabela 5.1.

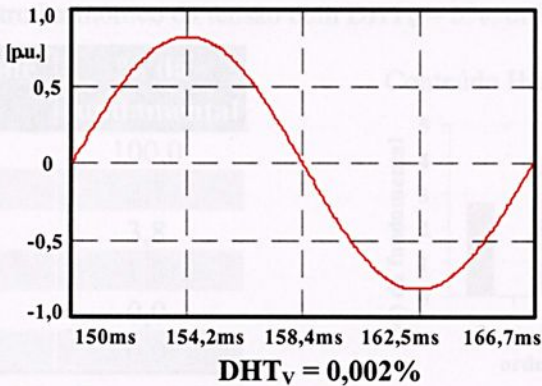
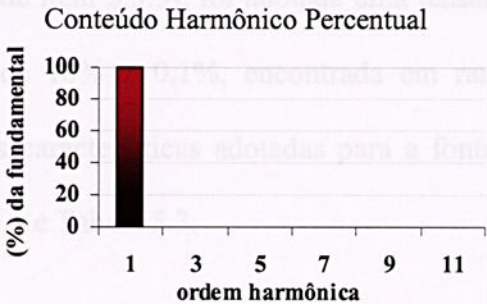


Figura 5.2 – Forma de onda da tensão puramente senoidal.

Tabela 5.1 – Espectro harmônico da tensão Senoidal utilizada na simulação.

Ordem Harmônica	Amplitude [p.u.]	% da fundamental
1	0,8182	100,0
3	0,0000	0,0
5	0,0000	0,0
7	0,0000	0,0
9	0,0000	0,0
11	0,0000	0,0



Como cenário 02, foi adotada uma tensão de alimentação com uma distorção harmônica total de $5\% \pm 0,1\%$, devida hipoteticamente a distorções harmônicas provocada pela influência de cargas adjacentes, distorções essas encontradas em edifícios comerciais. As características adotadas para a fonte de tensão, neste cenário, estão discriminadas na Figura 5.3 e Tabela 5.2.

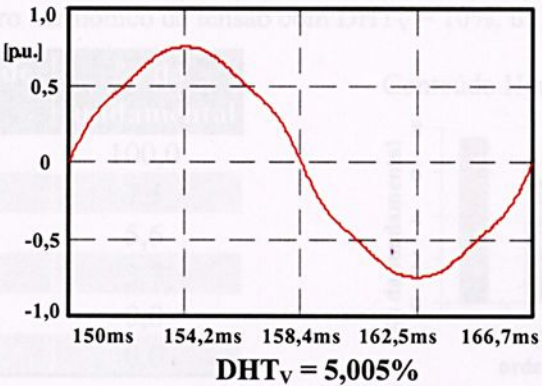
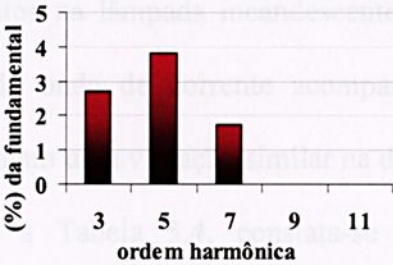


Figura 5.3 – Forma de onda da tensão com $DHT_V = 5\% \pm 0,1\%$.

Tabela 5.2 – Espectro harmônico da tensão com $DHT_V = 5\%$, utilizada na simulação.

Ordem Harmônica	Amplitude [p.u.]	% da fundamental
1	0,750	100,0
3	0,020	2,7
5	0,029	3,8
7	0,013	1,8
9	0,000	0,0
11	0,000	0,0

Conteúdo Harmônico Percentual



E como cenário 03, escolhido para representar uma condição no limite da funcionalidade do modelo de corrente constante (vide item 3.3.3), foi adotada uma tensão de alimentação com uma distorção harmônica total de $10\% \pm 0,1\%$, encontrada em ramais secundários com forte carregamento não linear. As características adotadas para a fonte de tensão neste cenário estão discriminadas na Figura 5.4 e Tabela 5.3.

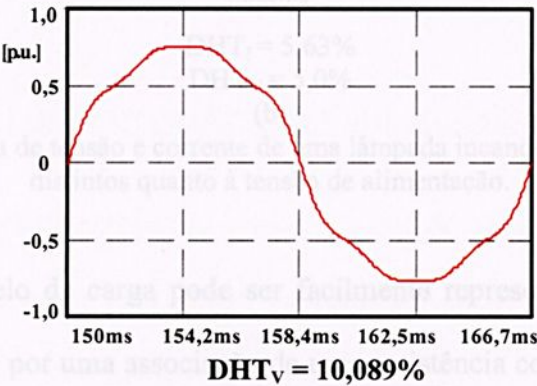
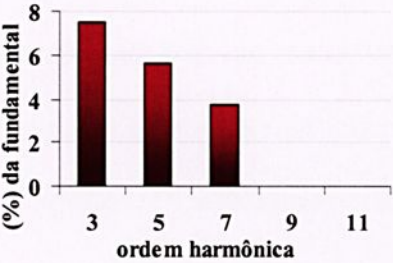


Figura 5.4 – Forma de onda da tensão com $DHT_V = 10\% \pm 0,1\%$.

Tabela 5.3 – Espectro harmônico da tensão com $DHT_V = 10\%$, utilizada na simulação.

Ordem Harmônica	Amplitude [p.u.]	% da fundamental
1	0,727	100,0
3	0,055	7,5
5	0,041	5,6
7	0,027	3,7
9	0,000	0,0
11	0,000	0,0

Conteúdo Harmônico Percentual



5.1.2 Carga com característica de Impedância Constante

Os resultados encontrados, para os ensaios feitos na lâmpada incandescente 60 W, podem ser observados na Figura 5.5. As formas de onda de corrente acompanham o comportamento das formas de onda de tensão, e apresentam uma variação similar na distorção harmônica percentual encontrada. Olhando-se para a Tabela 5.4, constata-se que as amplitudes das componentes harmônicas de corrente evoluem na mesma proporção encontrada para as componentes da tensão, fato este que reforça a característica de impedância constante em função da tensão, para a carga em questão.

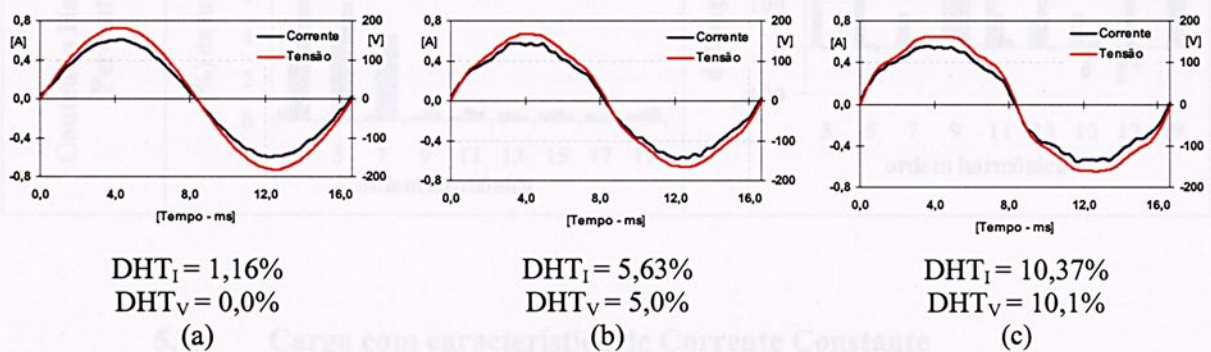


Figura 5.5 – Formas de onda de tensão e corrente de uma lâmpada incandescente frente a três cenários distintos quanto à tensão de alimentação.

Este tipo de modelo de carga pode ser facilmente representado, preservando-lhe as características intrínsecas, por uma associação de uma resistência com uma reatância em série ou em paralelo. A escolha do tipo de representação dar-se-á em razão das limitações impostas pelo software a ser utilizado para modelagem e simulação.

Tabela 5.4 – Espectro harmônico das correntes de uma lâmpada incandescente.

Ordem Harmônica	Tensão Senoidal			Tensão DHTv = 5%			Tensão DHTv = 10%		
	Amplitude [A]	% da fund.	Fase [°]	Amplitude [A]	% da fund.	Fase [°]	Amplitude [A]	% da fund.	Fase [°]
1	0,5986	100,0	1,4	0,5796	100,0	2,7	0,5767	100,0	2,3
3	0,0030	0,5	224,3	0,0167	2,9	-1,0	0,0436	7,6	-1,2
5	0,0004	0,1	171,0	0,0221	3,8	7,6	0,0322	5,6	-4,6
7	0,0014	0,2	72,7	0,0138	2,4	-3,4	0,0234	4,1	-4,9
9	0,0010	0,2	178,9	0,0019	0,3	190,9	0,0021	0,4	115,4
11	0,0007	0,1	220,4	0,0033	0,6	75,2	0,0023	0,4	19,7
13	0,0020	0,3	51,5	0,0019	0,3	118,8	0,0012	0,2	-7,7
15	0,0017	0,3	75,3	0,0024	0,4	-64,3	0,0019	0,3	13,6
17	0,0016	0,3	-71,0	0,0008	0,1	251,7	0,0020	0,3	-40,3
19	0,0019	0,3	1,2	0,0022	0,4	195,5	0,0032	0,6	180,5

Conteúdo Harmônico Percentual

ordem harmônica

defasagem (°)

ordem harmônica

5.1.3 Carga com característica de Corrente Constante

A lâmpada fluorescente compacta, quanto à forma de onda da corrente, apresenta um comportamento muito parecido para todos os cenários, demonstrando sua característica intrínseca de corrente constante (Figura 5.6).

O fato fica mais evidente ao analisar-se a Tabela 5.5, e constatar que para a componente fundamental e para as ordens harmônicas de maior significância (3ª, 5ª e 7ª), do conteúdo harmônico, não há variação relevante entre os valores apresentados.

Esse tipo de carga elétrica poderá ser facilmente representado como uma associação em paralelo de fontes “constantes” de corrente, do mesmo modo como as cargas elétricas não lineares foram definidas no capítulo anterior, mantendo a representatividade das características inerentes as essas cargas.

A modelagem de cargas elétricas, através de fontes de correntes harmônicas “constantes”, possui uma limitação de funcionalidade, para a representação de cargas, e um desempenho favorável apenas em sistemas que apresentem distorção harmônica inferiores a 10% [4]. Observa-se que, para a condição apresentada no cenário 2 ($DHT_V=5\%$), a distorção de corrente mostra uma pequena variação para as componentes harmônicas superiores a 9ª ordem; porém, a distorção harmônica total de corrente permanece praticamente inalterada.

Uma taxa de distorção elevada ($DHT_V=10\%$), na tensão de fornecimento, afeta o comportamento deste tipo de carga. Entretanto, tendo em vista que limites estabelecidos em norma regulamentares fixam que a distorção máxima de tensão não deva atingir este elevado valor, para redes de distribuição, esta situação “raramente” será encontrada em situações reais; fato este que valida a utilização do modelo de fontes de corrente, para a representação deste tipo de carga elétrica, nos estudos de penetração harmônica em sistemas elétricos.

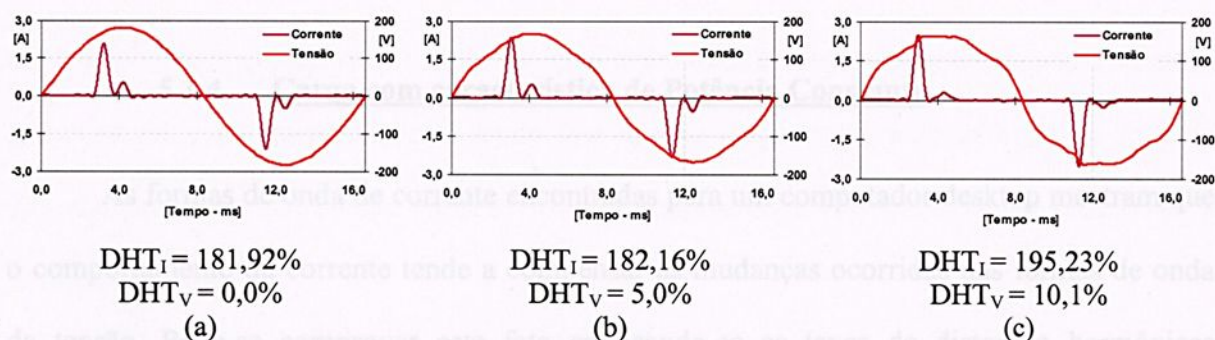
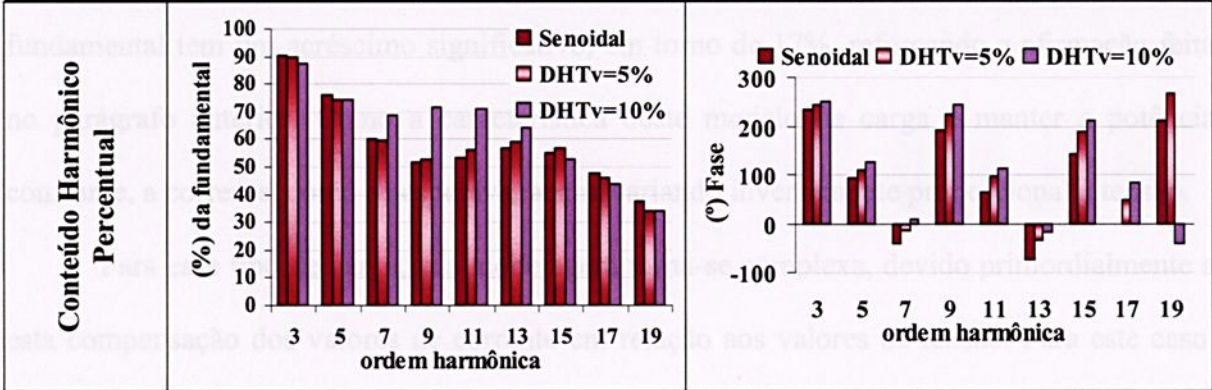


Figura 5.6 – Formas de onda de tensão e corrente de uma lâmpada fluorescente compacta frente a três cenários distintos quanto à tensão de alimentação.

Tabela 5.5 – Espectro harmônico das correntes de uma lâmpada fluorescente compacta.

Ordem Harmônica	Tensão Senoidal			Tensão DHTv = 5%			Tensão DHTv = 10%		
	Amplitude [A]	% da fund.	Fase [°]	Amplitude [A]	% da fund.	Fase [°]	Amplitude [A]	% da fund.	Fase [°]
1	0,3073	100,0	19,9	0,3415	100,0	22,0	0,3337	100,0	25,1
3	0,2774	90,3	233,2	0,3057	89,5	243,2	0,2925	87,6	250,6
5	0,2341	76,2	92,2	0,2542	74,4	109,5	0,2475	74,2	126,6
7	0,1851	60,2	-42,4	0,2045	59,9	-16,4	0,2300	68,9	7,4
9	0,1595	51,9	192,6	0,1810	53,0	223,5	0,2380	71,3	243,3
11	0,1648	53,6	63,5	0,1925	56,4	97,5	0,2374	71,1	112,7
13	0,1750	57,0	-73,9	0,2028	59,4	-34,8	0,2144	64,2	-19,1
15	0,1685	54,8	143,6	0,1937	56,7	187,6	0,1769	53,0	211,4
17	0,1468	47,8	-2,6	0,1568	45,9	47,0	0,1461	43,8	82,3
19	0,1144	37,2	210,3	0,1174	34,4	268,3	0,1135	34,0	-41,1



5.1.4 Carga com característica de Potência Constante

As formas de onda de corrente encontradas para um computador desktop mostram que o comportamento da corrente tende a compensar as mudanças ocorridas nas formas de onda da tensão. Pode-se comprovar este fato analisando-se as taxas de distorção harmônicas apresentadas na Figura 5.7. Percebe-se, então, que a distorção harmônica de corrente reduz à medida que a taxa de distorção da tensão aumenta.

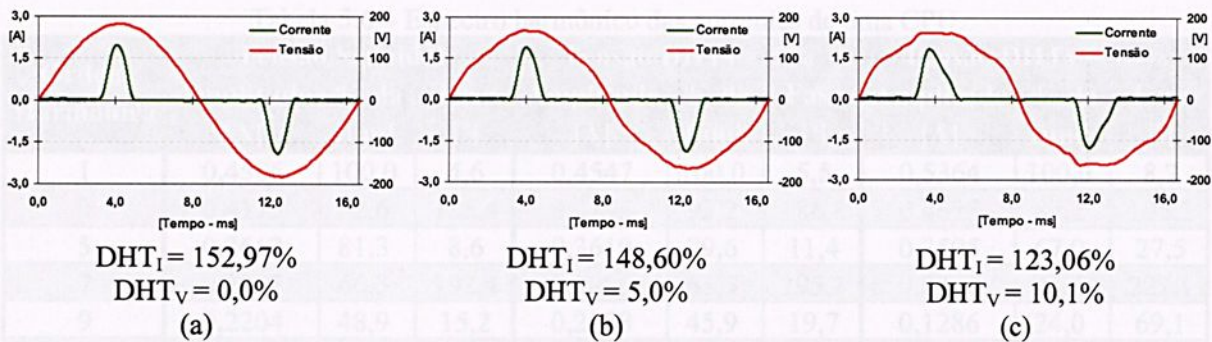


Figura 5.7 – Formas de onda de tensão e corrente de um computador desktop frente a três cenários distintos quanto à tensão de alimentação.

Percebe-se, na Tabela 5.6, que para o cenário mais crítico (DHT_V=10%) a componente fundamental tem um acréscimo significativo, em torno de 17%, reforçando a afirmação feita no parágrafo anterior. Como a característica deste modelo de carga é manter a potência constante, a corrente, como se esperava, acaba variando inversamente proporcional à tensão.

Para esse tipo de carga, sua modelagem torna-se complexa, devido primordialmente a esta compensação dos valores de corrente em relação aos valores de tensão. Para este caso, um estudo mais aprofundado deverá ser feito para identificar-se, dentre as técnicas de modelagem apresentadas no Capítulo III, qual representará adequadamente as cargas elétricas que possuam essas características, sendo este tipo de carga constituído pela grande maioria dos equipamentos eletrônicos encontrados nas residências e estabelecimentos comerciais e industriais.

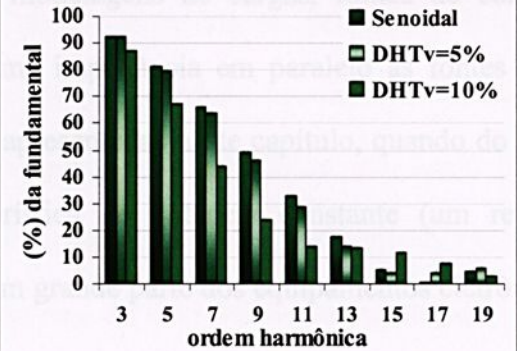
A modelagem ou representação dos modelos de cargas de impedância constante – como uma associação R/L – e corrente constante – como fontes de corrente constante – tornam-se de fácil implementação. Em ambos os casos, serão respeitadas as características intrínsecas dessas cargas, como comprovado através dos dados apresentados neste capítulo e no anterior.

Resultados interessantes puderam ser obtidos, evidenciando a importância da avaliação da distorção harmônica encontrada na tensão de alimentação, no instante em que

Tabela 5.6 – Espectro harmônico das correntes de uma CPU.

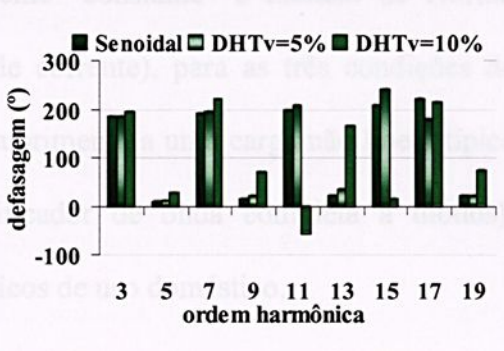
Ordem Harmônica	Tensão Senoidal			Tensão DHTv = 5%			Tensão DHTv = 10%		
	Amplitude [A]	% da fund.	Fase [°]	Amplitude [A]	% da fund.	Fase [°]	Amplitude [A]	% da fund.	Fase [°]
1	0,4506	100,0	4,6	0,4547	100,0	5,5	0,5364	100,0	8,2
3	0,4173	92,6	185,4	0,4195	92,2	186,8	0,4675	87,2	195,3
5	0,3662	81,3	8,6	0,3619	79,6	11,4	0,3595	67,0	27,5
7	0,2987	66,3	192,4	0,2886	63,5	195,1	0,2337	43,6	222,1
9	0,2204	48,9	15,2	0,2088	45,9	19,7	0,1286	24,0	69,1
11	0,1463	32,5	199,0	0,1309	28,8	207,5	0,0755	14,1	-56,6
13	0,0791	17,6	22,8	0,0635	14,0	35,0	0,0727	13,6	166,2
15	0,0246	5,5	207,3	0,0192	4,2	242,2	0,0632	11,8	16,4
17	0,0035	0,8	222,3	0,0192	4,2	179,6	0,0396	7,4	214,0
19	0,0215	4,8	20,3	0,0269	5,9	19,7	0,0145	2,7	73,0

Conteúdo Harmônico Percentual



ordem harmônica

defasagem (°)



ordem harmônica

5.2 Conclusões

Neste capítulo, foram apresentados o comportamento de três tipos de cargas elétricas, de impedância constante, de corrente constante e de potência constante, frente a variações quanto ao conteúdo harmônico da tensão de alimentação.

A modelagem ou representação dos modelos de cargas de impedância constante – como uma associação R/L – e corrente constante – como fontes de corrente constante – tornam-se de fácil implementação. Em ambos os casos, serão respeitadas as características intrínsecas dessas cargas, como comprovado através dos dados apresentados neste capítulo e no anterior.

Resultados interessantes puderam ser obtidos, evidenciando a importância da avaliação da distorção harmônica encontrada na tensão de alimentação, no instante em que

medições sejam feitas para se determinar a circulação de harmônicas de corrente através da rede de distribuição de energia elétrica.

Entretanto, para a escolha da modelagem a ser adotada para a representação de cargas tipo potência constante, necessita-se de uma análise mais rigorosa para identificar, dentre as técnicas de modelagem, qual apresentará um melhor desempenho quanto à reprodução das características próprias destas cargas elétricas não lineares.

Nesse sentido, no próximo capítulo, será feita uma análise comparativa entre os métodos de modelagens de cargas, fontes de corrente “constante” e modelo de Norton (incluindo uma impedância em paralelo às fontes de corrente), para as três condições de alimentação apresentadas neste capítulo, quando do suprimento a uma carga não linear típica com característica de potência constante (um retificador de onda completa a diodos), encontrada em grande parte dos equipamentos eletrônicos de uso doméstico.

Para a análise de dispositivos de compensação de reativos instalados no sistema, quer seja do lado de baixa quer de média tensão do sistema de distribuição em análise, os quais podem provocar mudanças nas características do sistema e nas correntes e tensões harmônicas presentes, conforme discutido no item 3.1, necessita-se de uma modelagem para as cargas não lineares que seja capaz de representar as mudanças na injeção de corrente em função das mudanças nas tensões de alimentação.

Para que o potencial da modelagem trifásica possa ser totalmente aproveitado, representando diversas situações de cargas e condições operativas, necessita-se avaliar qual método de modelagem pode melhor adaptar-se e representar as características elétricas das

CAPÍTULO VI

6 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MODELAGENS PARA CARGAS NÃO-LINEARES NO DOMÍNIO DO TEMPO

No capítulo IV, foi apresentada uma proposta de modelagem trifásica, no domínio do tempo, para análise e estudo da penetração harmônica nos sistemas de distribuição. A representação trifásica permite a avaliação de situações reais de operação, de desequilíbrio de carga e de propagação das harmônicas, representando com maior fidelidade as características encontradas frente a situações de desequilíbrio. Uma análise mais próxima do comportamento real de um sistema de distribuição representando, com maiores detalhes, o lado secundário dos transformadores trifásicos de distribuição, pode ser feita. Então, tem-se a possibilidade de estudar em detalhes um determinado ramal secundário, o carregamento das unidades transformadoras e as capacidades de condução dos cabos de alimentação, desde que o cenário de cargas seja bem definido.

Para a análise de dispositivos de compensação de reativos instalados no sistema, quer seja do lado de baixa quer de média tensão do sistema de distribuição em análise, os quais podem provocar mudanças nas características do sistema e nas correntes e tensões harmônicas presentes, conforme discorrido no item 3.1, necessita-se de uma modelagem para as cargas não lineares que seja capaz de representar as mudanças na injeção de corrente em função das mudanças nas tensões de alimentação.

Para que o potencial da modelagem trifásica possa ser totalmente aproveitado, representando diversas situações de cargas e condições operativas, necessita-se avaliar qual método de modelagem pode melhor adaptar-se e representar as características elétricas dos

diversos modelos de cargas não lineares, respeitando os comportamentos apresentados no capítulo anterior.

Neste capítulo avaliar-se-á o efeito que três cenários distintos, quanto às tensões de alimentação, têm sobre a forma de onda da corrente e harmônicas geradas por um retificador monofásico onda completa a diodos com elevada capacitância de filtro, o qual constitui parte integrante da grande maioria dos equipamentos eletrônicos residenciais e comerciais (microcomputadores e monitores).

Nesse contexto, apresentar-se-á um comparativo entre as duas principais técnicas de modelagem propostas para a representação de cargas não lineares de potência constante. Os modelos são simulados a partir da representação de uma determinada carga não linear, através do modelo de fontes de correntes “constantes” e do modelo de Norton, apresentando o desempenho destas como técnicas de modelagem para simulações por meio do PSpice, no domínio do tempo.

Esse fato se justifica, uma vez que, no sistema elétrico de distribuição, pode-se encontrar uma distorção na forma de onda da tensão de alimentação, devido, principalmente, à presença das cargas não lineares, assim como, mudanças na alimentação devidas a variações da concentração de cargas encontradas, o que poderia acarretar na mudança dos valores de corrente injetados no sistema, como analisado no capítulo anterior.

6.1 Análise de um Retificador Monofásico Onda Completa a Diodos

A escolha de um retificador monofásico de onda completa a diodos deve-se, primordialmente, ao fato deste compor a quase totalidade das fontes chaveadas encontradas em computadores pessoais e monitores. Outro fator seria a interação que ocorre entre a corrente requerida e a tensão de alimentação, devida a sua característica intrínseca de potência constante. Neste caso, optou-se por analisar uma carga não linear mais usual do que a



escolhida para os testes no Capítulo V, a qual não fosse fortemente influenciada pelas indutâncias do lado DC.

Como demonstrado anteriormente, sabe-se que a tensão de alimentação possui efeitos diferenciados nas formas de onda da corrente e nas harmônicas produzidas por cargas elétricas não lineares. Foram feitas simulações, no software PSpice, analisando-se o efeito da tensão sobre a distorção harmônica de corrente de um retificador monofásico onda completa a diodos, mostrado na Figura 6.1. Os dados construtivos utilizados na confecção do circuito representativo estão apresentados na Tabela 6.1.

Em um primeiro momento, foi aplicada uma tensão praticamente senoidal, com um $DHT_V < 0,1\%$, e depois, para que se pudesse avaliar por completo o comportamento da carga, esta foi submetida a duas situações em que o retificador era alimentado por tensões não senoidais, apresentando uma distorção harmônica de tensão total de $5\% \pm 0,1\%$ e $10\% \pm 0,1\%$, respectivamente, idênticos aos definidos no Capítulo V (item 5.1.1).

As simulações efetuadas, para análise das harmônicas de corrente geradas, foram feitas em um circuito específico, na qual a forma de onda de tensão era cuidadosamente controlada, não sofrendo influências das correntes harmônicas injetadas no sistema.

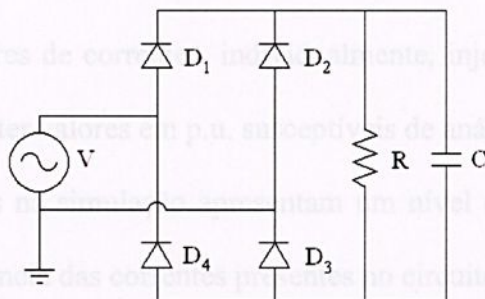


Figura 6.1 – Retificador Monofásico a Diodos com capacitância de filtro.

Tabela 6.1 – Componentes Harmônicas do Retificador Monofásico Convencional utilizado como carga não linear.

Componentes	Característica
Fonte de tensão	senoidal (com e sem distorção)
Diodos	MUR1540
Resistência	50 ohm
Capacitância	0,150 mF

Os dados obtidos e utilizados nas confecções dos modelos de cargas, bem como, na análise das características da carga, a ser analisada por meio de simulações no software PSpice, são apresentados em p.u., tomando como base as tensões e potências de um sistema real. A Tabela 6.2 apresenta os valores de base para o cálculo em p.u. das tensões, impedâncias e correntes.

Tabela 6.2 – Valores utilizados como base para cálculos.

Lado	Primário (MT)	Secundário (BT)
Potência Base – Sb (kVA)	10	10
Tensão Base – Vb (kV)	13,8	0,22

Com os valores dados acima obtemos:

Lado	Primário (MT)	Secundário (BT)
Impedância Base – Zb (Ohm)	19044	4,8
Corrente Base – Ib (A)	0,42	26,24

Utilizou-se uma potência de base de 10 kVA, diferente da usualmente utilizada (1 MVA), por tratar-se de um estudo específico para análise de cargas não lineares, as quais apresentam pequenos valores de correntes, individualmente, injetadas no sistema. Com esse procedimento consegue-se ter valores em p.u. susceptíveis de análise.

As fontes utilizadas na simulação apresentam um nível de curto-circuito infinito, ou seja, elas não sofrem influência das correntes presentes no circuito.

Depois de definidas as condições de suprimento, para ilustrar o comportamento da geração de corrente harmônica da carga escolhida, sobre várias condições diferentes de operação do sistema, foram feitas simulações no software PSpice. O circuito e a carga estudados serão mostrados e discutidos a seguir.

6.1.1 Características intrínsecas do Retificador frente à tensão de alimentação

Para obterem-se as características de injeção de corrente de um retificador monofásico ponte completa a diodos com alta capacitância de filtro, em relação a mudanças na tensão de alimentação (quanto à distorção na forma de onda), e para a elaboração e avaliação das técnicas de modelagem de cargas não lineares, simulou-se a carga não linear escolhida, nos três cenários de alimentação, descritos anteriormente. Os dados obtidos mostram as características intrínsecas da carga a ser analisada.

O retificador foi submetido a condições de suprimento que variavam desde uma condição em que se apresenta uma onda de tensão puramente senoidal (cenário 01), passando por uma condição intermediária em que a tensão de alimentação se encontra levemente distorcida (cenário 02), até a condição em que se apresenta elevada distorção harmônica de tensão, conforme descrito nas condições do cenário 03. Os resultados obtidos serviram para confrontação do desempenho esperado dos modelos, a serem analisados, em uma situação distinta das condições ideais.

Conforme salientado anteriormente, para a avaliação do desempenho das modelagens de cargas, mostradas no Capítulo III, necessita-se da avaliação da influência na corrente, do retificador monofásico, frente a cenários de alimentação por tensões com distorções preexistentes.

A Figura 6.2 mostra as formas de onda de corrente geradas, simuladas no estudo, junto com a tensão de linha aplicadas e seu DHT_V percentual medido. Através desta pode-se observar a característica fortemente não linear.

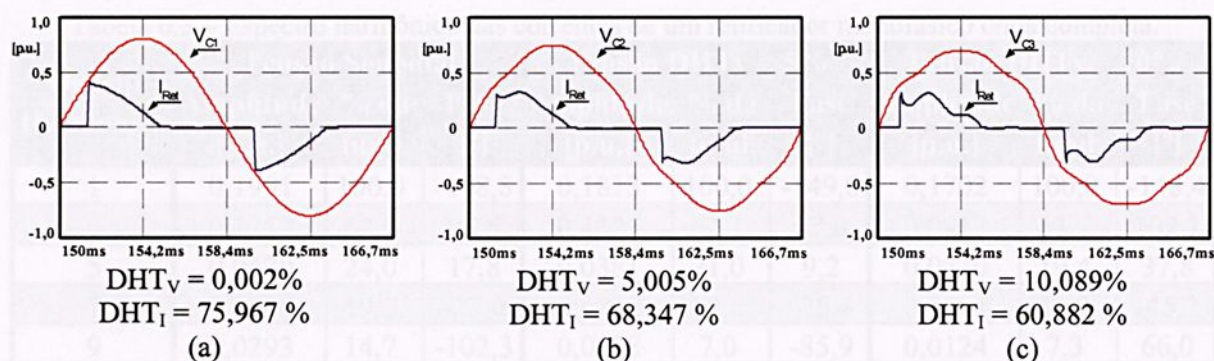


Figura 6.2 – Formas de ondas de um retificador monofásico onda completa.

Para a obtenção dos dados necessários nas técnicas de modelagem, cada corrente foi decomposta em sua série de Fourier, até a 48ª ordem, utilizando-se para isso a ferramenta disponível no software PSpice. O programa forneceu os dados relativos à amplitude e fase até a 48ª ordem harmônica, para cada forma de onda da corrente. A Tabela 6.3, a título de análise e apresentação, mostra os resultados para os nove primeiros espectros, sem perdas significativas na avaliação dos resultados. Foi observado que a variação das magnitudes das componentes harmônicas, superiores a 19ª ordem, não eram significativas em relação à mudança de cenário de alimentação. Não foi encontrada nenhuma harmônica de ordem par, como era esperado.

Para as simulações no PSpice, utilizaram-se, para representar esta carga não-linear, os dados até a quadragésima oitava ordem harmônica, obtidos através dos arquivos de saída das simulações. Fato este, que foi considerado um compromisso aceitável entre exatidão computacional, exigência de memória computacional e tempo exigido.

Observa-se que ocorre uma redução gradual na distorção harmônica total da corrente, nos cenários com distorção na forma de onda da tensão, em relação ao cenário de tensão senoidal. As formas de onda da corrente tendem a ficar cada vez menos distorcidas, em um movimento de compensação da distorção encontrada nas formas de onda da tensão, reforçando as observações feitas no capítulo anterior.

Tabela 6.3 – Espectro harmônico das correntes de um retificador monofásico onda completa.

Ordem Harmônica	Tensão Senoidal			Tensão DHTv = 5%			Tensão DHTv = 10%		
	Amplitude [p.u.]	% da fund.	Fase [°]	Amplitude [p.u.]	% da fund.	Fase [°]	Amplitude [p.u.]	% da fund.	Fase [°]
1	0,1991	100,0	-148,8	0,1813	100,0	-149,0	0,1702	100,0	-148,4
3	0,1252	62,9	98,6	0,1125	62,1	97,0	0,0913	53,7	102,1
5	0,0479	24,0	17,8	0,0381	21,0	9,2	0,0330	19,4	37,8
7	0,0388	19,5	-27,0	0,0232	12,8	-25,4	0,0191	11,2	-45,2
9	0,0293	14,7	-102,3	0,0128	7,0	-85,9	0,0124	7,3	66,0
11	0,0225	11,3	-154,2	0,0150	8,3	-109,1	0,0188	11,0	-55,4
13	0,0208	10,4	137,4	0,0140	7,7	174,1	0,0096	5,7	-99,2
15	0,0162	8,1	78,9	0,0108	5,9	129,5	0,0132	7,7	-154,8
17	0,0157	7,9	16,2	0,0114	6,3	65,5	0,0085	5,0	157,7
19	0,0129	6,5	-46,6	0,0088	4,8	11,7	0,0100	5,9	109,2

Conteúdo Harmônico Percentual



Para refinamento da análise, faz-se necessária a análise do comportamento da carga frente ao um cenário mais severo (cenário 03), em termos de distorção preexistente da fonte de alimentação. Principalmente, pela necessidade de uma análise do desempenho, do retificador, no limiar da taxa de distorção aceita como ideal, para utilização da técnica de modelagem das cargas não lineares, como fonte de corrente “constante”.

Esses resultados servirão para a avaliação dos tipos de modelagem de cargas em uma situação de distorção elevada, acima dos limites recomendados pelas normas internacionais (IEEE/ANSI – 519).

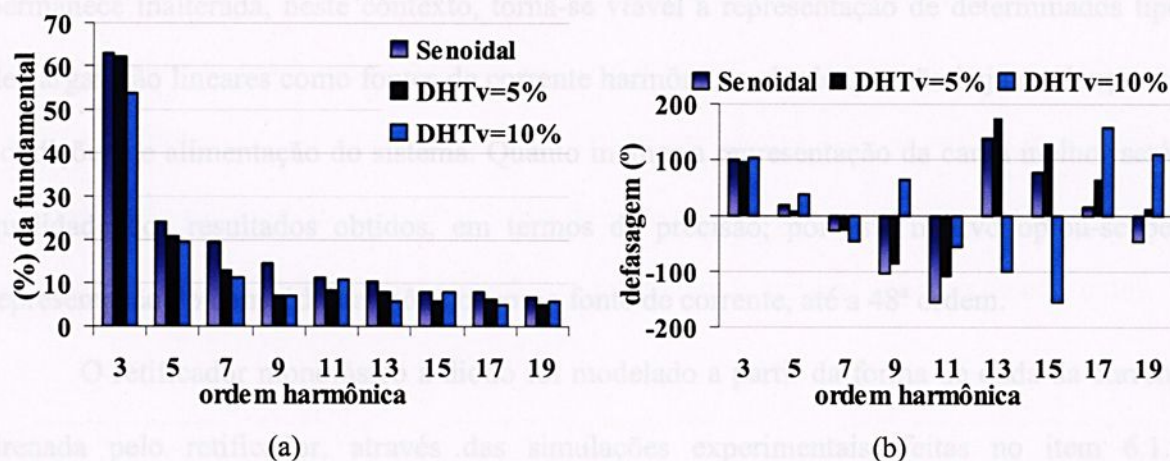
6.1.2 Comparação dos resultados do Retificador frente aos Cenários

Este tipo de carga não linear (retificadores a diodo) mostrou-se sensível a distorções de tensão, fato este que ocasionou uma redução de 7,6 e 15,1 pontos percentuais na DHT₁ encontrada frente aos cenários analisados. As mudanças nos ângulos de fase, para ordens

harmônicas superiores a 7ª, foram bastante acentuadas, indicando uma conjuntura de possível cancelamento em uma condição de um sistema real, onde várias destas cargas estão conectadas ao longo das redes de distribuição, em baixa tensão.

Para melhorar a análise, a observação e o comparativo entre os resultados apresentados, no item 6.1.1, foi elaborado um gráfico (Gráfico 6.1), em que se faz um comparativo entre as magnitudes dos componentes harmônicos encontrados, e os defasamentos angulares. Através da análise da magnitude e do defasamento angular, pode-se ter uma noção de como estão se comportando as potências requeridas em cada ordem harmônica, sendo que a soma destas potências formam a potência total requerida. Então, as potências de determinadas ordens podem sofrer alterações nos seus valores, dependendo de qual cenário a carga está sendo submetida, mantendo-se, assim, a potência total constante.

Gráfico 6.1 – Comparativo do espectro harmônico da corrente, de um retificador, frente aos cenários.
(a) Magnitude, (b) Defasagem angular.



Constatou-se, através das simulações, que as tensões distorcidas têm grande influência sobre a corrente gerada pelo retificador monofásico a diodo. Nota-se que este tipo de carga não linear tem uma forte interação com a tensão de suprimento, tendo uma compensação própria no efeito de suas correntes harmônicas, frente ao cenário de tensões distorcidas. Os

resultados mostram a tendência da queda da distorção harmônica da corrente frente ao acréscimo da distorção na forma de onda da tensão.

A partir dos dados apresentados, pode-se efetuar a modelagem dessa carga através dos métodos de modelagem de cargas não lineares, fontes de correntes constantes e modelo de Norton, e avaliar o desempenho de ambos, frente aos cenários distintos.

6.2 Método de Fontes de Corrente Constante

As correntes harmônicas, representadas pelo seu conteúdo harmônico (magnitude e ângulo), servirão como insumo para a elaboração do modelo de carga por fontes de corrente “constante”. As cargas não lineares são, então, consideradas como sendo associações de fontes de injeção de corrente, em paralelo com a fonte de tensão do sistema.

Analizando o comportamento da carga escolhida, em um determinado cenário e por um curto intervalo de tempo, pode-se observar que a forma de onda resultante da corrente permanece inalterada, neste contexto, torna-se viável a representação de determinados tipos de cargas não lineares como fontes de corrente harmônicas, desde que não haja mudanças nas condições de alimentação do sistema. Quanto melhor a representação da carga melhor será a qualidade dos resultados obtidos, em termos de precisão; por este motivo optou-se pela representação do conteúdo harmônico, como fonte de corrente, até a 48ª ordem.

O retificador monofásico a diodo foi modelado a partir da forma de onda da corrente drenada pelo retificador, através das simulações experimentais, feitas no item 6.1.1, considerando-se o sistema de alimentação praticamente senoidal. A forma de onda da corrente foi decomposta, obtendo-se o espectro harmônico da forma de onda original, considerada como a forma de onda característica desta carga. Assim, o retificador foi substituído por fontes de correntes “constantes” em paralelo, em que cada fonte de corrente representa uma determinada ordem harmônica, contendo amplitudes e defasagens correspondentes. Os

espectros das correntes drenadas pelas cargas se alteram em função da distorção de tensão no sistema, sendo então, necessárias alterações nestas fontes de corrente, ou a adoção de um modelo que consiga representar as cargas em diferentes condições do sistema de alimentação, como é o caso do Modelo de Norton.

A partir desses dados e constatações, foi elaborado o circuito mostrado na Figura 6.3, o qual foi implementado no PSpice para análise e simulações, frente aos três cenários propostos, em relação à tensão de alimentação.

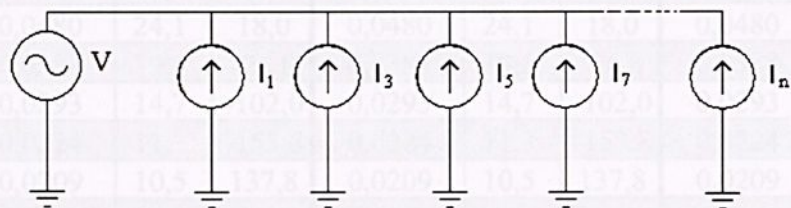


Figura 6.3 – Modelagem do retificador monofásico como fontes de corrente “constante”.

Através da Figura 6.4, pode-se observar as formas de onda das correntes obtidas para todos os cenários previstos, modelando-se o retificador monofásico a diodos através do método de fontes de corrente “constantes”. Os comportamentos apresentados, em todos os cenários, estão semelhantes apenas na forma de onda de corrente encontrada na Figura 6.2 (a), mostrando a incapacidade da representação da característica esperada para os demais casos.

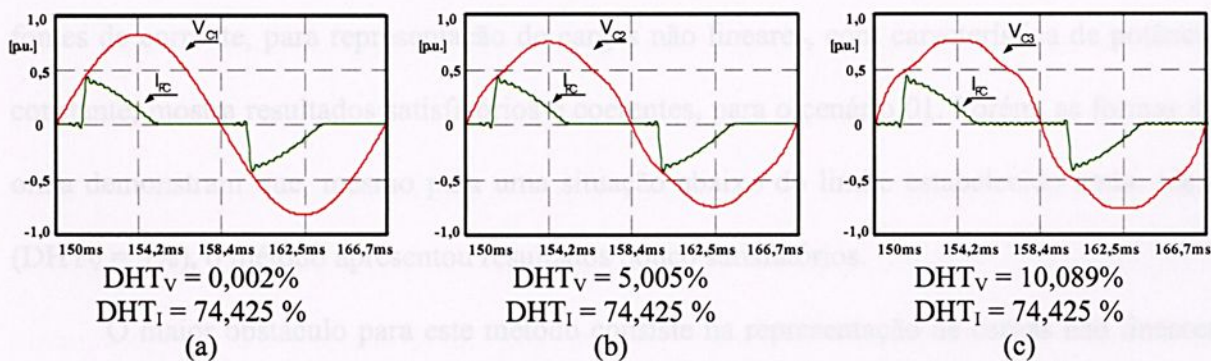


Figura 6.4 – Formas de ondas para o modelo de fontes de corrente “constante”.

A análise do conteúdo harmônico, obtida através da análise de Fourier das ondas de correntes, será apresentada até a 19ª ordem, sem perdas significativas na avaliação dos resultados. A Tabela 6.4 mostra o comportamento das componentes harmônicas, magnitudes e defasagem, em relação aos cenários distintos de alimentação.

Relevante notar que, as correntes mostradas estão referenciadas à forma da onda de

Tabela 6.4 – Espectro harmônico da corrente do modelo de fontes de corrente frente ao cenário 01.

Ordem Harmônica	Tensão Senoidal			Tensão DHTv = 5%			Tensão DHTv = 10%		
	Amplitude [p.u.]	% da fund.	Fase [°]	Amplitude [p.u.]	% da fund.	Fase [°]	Amplitude [p.u.]	% da fund.	Fase [°]
1	0,1993	100,0	-148,8	0,1993	100,0	-148,8	0,1993	100,0	-148,8
3	0,1253	62,9	98,7	0,1253	62,9	98,7	0,1253	62,9	98,7
5	0,0480	24,1	18,0	0,0480	24,1	18,0	0,0480	24,1	18,0
7	0,0388	19,5	-26,8	0,0388	19,5	-26,8	0,0388	19,5	-26,8
9	0,0293	14,7	-102,0	0,0293	14,7	-102,0	0,0293	14,7	-102,0
11	0,0224	11,3	-153,8	0,0224	11,3	-153,8	0,0224	11,3	-153,8
13	0,0209	10,5	137,8	0,0209	10,5	137,8	0,0209	10,5	137,8
15	0,0163	8,2	79,5	0,0163	8,2	79,5	0,0163	8,2	79,5
17	0,0156	7,8	16,1	0,0156	7,8	16,1	0,0156	7,8	16,1
19	0,0128	6,4	-46,7	0,0128	6,4	-46,7	0,0128	6,4	-46,7

Conteúdo Harmônico Percentual

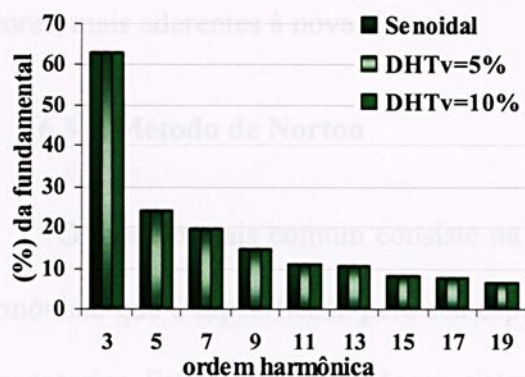
Ficou evidenciado que os resultados apresentados são semelhantes aos apresentados no item 6.1.1, para o cenário de alimentação puramente senoidal, e mostram que o método de fontes de corrente, para representação de cargas não lineares, com característica de potência constante, mostra resultados satisfatórios e coerentes, para o cenário 01. Porém, as formas de onda demonstram que, mesmo para uma situação abaixo do limite estabelecido como ideal ($DHT_v = 5\%$), o método apresentou resultados pouco satisfatórios.

O maior obstáculo para este método consiste na representação de cargas não lineares frente a mudanças no sistema de suprimento (tensão de alimentação) após o instante em que

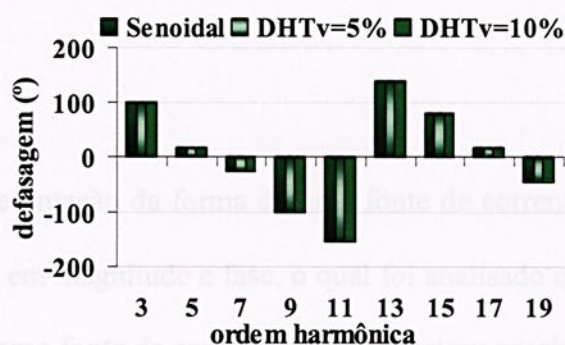
as medições foram feitas. Nota-se que os valores obtidos, para os cenários onde a DHT_V é diferente de zero, são idênticos aos apresentados no caso de tensão senoidal, mostrando a incapacidade deste método em representar cargas não lineares que estejam conectadas em sistema elétricos que sofram influência de cargas adjacentes.

Relevante notar que, as correntes mostradas estão referenciadas à forma de onda da tensão, a qual poderá estar deslocada em fase da tensão do sistema de potência devido às impedâncias do sistema. Como a tensão do sistema de distribuição deve ser a tensão de referência, na simulação do PSpice, a defasagem angular entre a tensão do sistema de distribuição e o encontrado, para cada ordem harmônica, deve ser levada em conta na representação harmônica da forma de onda da corrente.

Gráfico 6.2 – Comparativo do espectro harmônico de corrente do modelo de fontes de corrente constante. (a) Magnitude, (b) Defasagem angular.



(a)



(b)

Como era de se esperar, visto que a carga está sendo representada por fontes de corrente constante, a distorção harmônica total da corrente permanece inalterada, em todos os cenários, mesmo com a mudança da distorção encontrada na forma de onda da tensão, o que demonstra que esta modelagem não representa as características intrínsecas de um retificador monofásico a diodos (ponte completa), mesmo estando os limites de DHT_V dentro do recomendado para a utilização deste tipo de modelagem.

Esta técnica de modelagem permite, baseada em medições, especificar uma fonte de corrente harmônica representando a carga a ser estudada. Entretanto, ficou constatado que modelar uma rede de distribuição como fonte de corrente “constante”, não se faz suficiente quando as condições operativas, do sistema de distribuição, mudar razoavelmente do instante em que o espectro harmônico de corrente e tensão foi determinado. Por isso, faz-se necessário um modelo mais genérico para cargas não lineares.

Portanto esta técnica de modelagem não é satisfatória para a simulação e análise, de cargas elétricas ou sistema elétricos com característica de potência constante, em ambientes susceptíveis à mudança na tensão de alimentação, situação esta encontrada em redes de distribuição em baixa tensão. Uma solução seria a adoção de fontes de corrente dependentes da tensão, utilizando-se de métodos iterativos. Assim, quando a tensão de alimentação mudasse de uma situação para outra, as fontes de corrente seriam realimentadas com novos valores, mais aderentes à nova situação.

6.3 Método de Norton

O modelo mais comum consiste na representação da forma de uma fonte de corrente harmônica, que é especificada pelo seu espectro em magnitude e fase, o qual foi analisado no item anterior. Esta modelagem, de um sistema como fonte de corrente, não se mostrou precisa o suficiente, para o caso, em que as condições de operação do sistema de alimentação variavam muito em relação às condições em que o espectro harmônico fora determinado. Nos sistemas de distribuição, geralmente, ocorrem mudanças na condição de operação do sistema de alimentação; portanto, conforme demonstrado no item 6.1.2, as correntes harmônicas injetadas nas barras, onde as medições foram realizadas, sofrem mudanças nos valores apresentados.

Dessa forma, necessita-se de modelos mais abrangentes para grandes sistemas elétricos. Uma aproximação nesse sentido seria modelar o sistema de distribuição como um modelo de Norton, o qual é mais adequado para condições de operação com grandes variações.

Para estimar um modelo de Norton, como o representado na Figura 6.5, medições da corrente harmônica (I_h) e tensão harmônica (V_h) devem ser feitas em duas condições distintas de operação, como comentado anteriormente. Então é necessário que a tensão e corrente possam ser medidas, ou estimadas, onde o equipamento está sendo conectado.

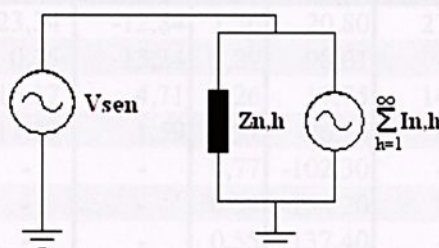


Figura 6.5 – Modelagem do retificador monofásico por meio do modelo de Norton.

A impedância de Norton para cada ordem harmônica ($Z_{N,h}$), foi determinada através da equação (3.20). Após a determinação da impedância, as fontes de correntes harmônicas de Norton foram calculadas através da equação (3.21).

Observa-se que, como as equações (3.20) e (3.21) são complexas, torna-se de vital importância que as medições sejam não somente para a magnitude, da tensão e da corrente, como também para o ângulo de fase. É importante que as medições estejam referenciadas ao ângulo de fase para uma barra comum, onde o valor do ângulo não mude com as condições do sistema. Para a simulação, o ângulo de fase adotado, como referência, será o da tensão fundamental.

A Tabela 6.5 mostra a corrente de Norton estimada (magnitude e ângulo de fase), bem como, a impedância de Norton (parte real e imaginária).

Para este caso, uma matriz admitância e a equação da rede são montadas para cada frequência de interesse, o qual relacionará o vetor de injeção de corrente (I) com o vetor de tensão na barra (V), sendo resolvida essa equação para cada frequência. Como o objetivo deste capítulo é a análise das técnicas de modelagem no domínio do tempo, foram feitas alterações na maneira de montar o modelo de Norton, adaptando-o para simulações no PSpice.

Tabela 6.5 – Fontes de corrente e Impedâncias de Norton calculadas.

Ordem Harmônica	Frequência (HZ)	Condição DHTv = 10%				Condição DHTv = 5%			
		Zn,h		In,h		Zn,h		In,h	
		R	X	Amp	Ang.	R	X	Amp	Ang.
1	60	23,34	-12,84	1,56	20,80	27,24	-17,88	0,36	64,91
3	180	0,15	-13,24	3,29	98,61	-	-11,86	3,29	98,61
5	300	16,17	4,71	1,26	17,75	14,00	-14,79	1,26	17,75
7	420	11,27	1,59	0,97	-26,13	6,13	3,45	1,02	-27,04
9	540	-	-	0,77	-102,30	-	-	0,77	-102,30
11	660	-	-	0,59	-154,20	-	-	0,59	-154,20
13	780	-	-	0,55	137,40	-	-	0,55	137,40
15	900	-	-	0,42	78,93	-	-	0,42	78,93
17	1020	-	-	0,41	16,23	-	-	0,41	16,23
19	1140	-	-	0,34	-46,63	-	-	0,34	-46,63
21	1260	-	-	0,33	-106,00	-	-	0,33	-106,00
23	1380	-	-	0,29	-170,70	-	-	0,29	-170,70
25	1500	-	-	0,27	130,70	-	-	0,27	130,70
27	1620	-	-	0,25	66,20	-	-	0,25	66,20
29	1740	-	-	0,23	6,85	-	-	0,23	6,85
31	1860	-	-	0,22	-56,43	-	-	0,22	-56,43
33	1980	-	-	0,20	-117,20	-	-	0,20	-117,20
35	2100	-	-	0,19	-179,00	-	-	0,19	-179,00
37	2220	-	-	0,18	119,00	-	-	0,18	119,00
39	2340	-	-	0,17	58,11	-	-	0,17	58,11
41	2460	-	-	0,16	-4,48	-	-	0,16	-4,48
43	2580	-	-	0,15	-65,03	-	-	0,15	-65,03
45	2700	-	-	0,15	-127,60	-	-	0,15	-127,60
47	2820	-	-	0,14	171,60	-	-	0,14	171,60

Para tornar possível a análise do modelo, foram montados circuitos independentes para cada frequência de interesse. Cada circuito era composto por uma fonte de tensão, alimentado uma carga composta, a qual era representada por um arranjo entre fontes de corrente e uma

impedância de Norton ligadas em paralelo. Esse processo foi repetindo para cada frequência específica. As fontes de corrente de ordens harmônicas que sofrem influência apenas da tensão fundamental foram conectadas em paralelo no circuito representativo da frequência fundamental. O arranjo adotado pode ser melhor compreendido através da Figura 6.6.

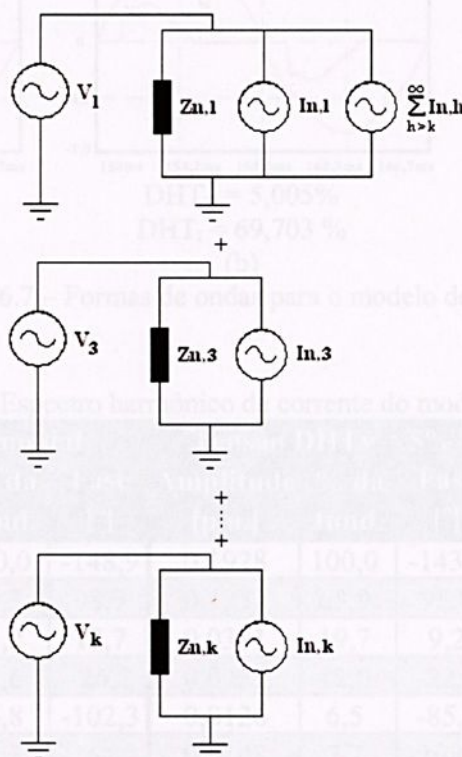


Figura 6.6 – Modelagem do retificador monofásico por meio do modelo de Norton adaptado.

A elaboração das formas de onda resultante e do conteúdo harmônico total foi feita através da soma geométrica dos resultados das correntes individuais, obtida em cada circuito. Com o intuito de agilizar o processo da composição dos dados, utilizou-se o software Matlab para a execução dos cálculos necessários, sendo os valores representados como vetores em sua forma complexa (magnitude e fase).

Após os cálculos e as considerações feitas, a performance do modelo de Norton foi testada, por meio do programa no domínio do tempo, o PSpice. As formas de onda resultante das correntes obtidas, para todos os cenários, são apresentadas através da Figura 6.7.

encontrados (Tabela 6.6) com os fornecidos na Tabela 6.3.

Efetuada-se a composição dos resultados individuais, provenientes da Análise de Fourier efetuada nas formas de onda de cada circuito, obtiveram-se os valores dos conteúdos harmônicos para as correntes resultantes, os quais estão representados através da Tabela 6.6.

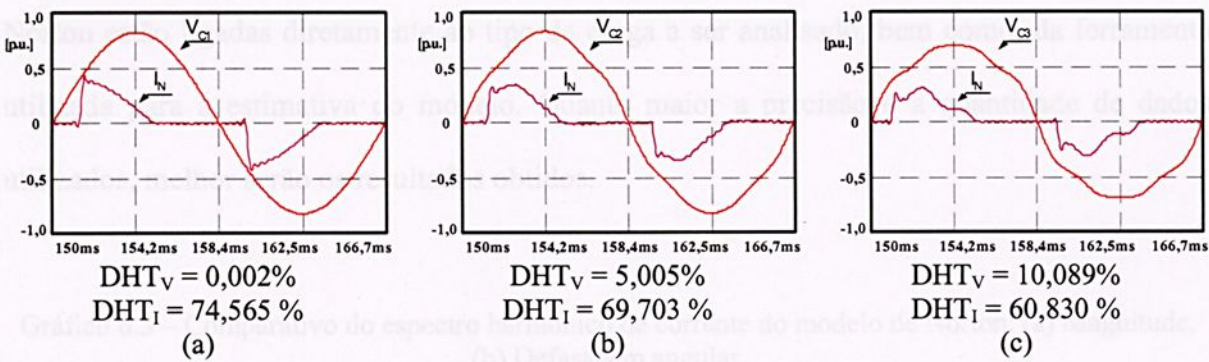


Figura 6.7 – Formas de ondas para o modelo de Norton.

Tabela 6.6 – Espectro harmônico da corrente do modelo de Norton.

Ordem Harmônica	Tensão Senoidal			Tensão $DHT_v = 5\%$			Tensão $DHT_v = 10\%$		
	Amplitude [p.u.]	% da fund.	Fase [°]	Amplitude [p.u.]	% da fund.	Fase [°]	Amplitude [p.u.]	% da fund.	Fase [°]
1	0,1981	100,0	-148,9	0,1928	100,0	-143,2	0,1703	100,0	-148,4
3	0,1253	63,3	98,7	0,1232	63,9	95,8	0,0914	53,7	102,0
5	0,0480	24,2	17,7	0,0381	19,7	9,2	0,0331	19,4	37,8
7	0,0369	18,6	-26,2	0,0232	12,0	-22,9	0,0189	11,1	-45,3
9	0,0293	14,8	-102,3	0,0126	6,5	-85,9	0,0122	7,1	65,9
11	0,0224	11,3	-154,2	0,0148	7,7	-108,9	0,0186	10,9	-55,6
13	0,0209	10,5	137,4	0,0140	7,3	174,2	0,0095	5,6	-99,1
15	0,0159	8,0	78,9	0,0106	5,5	129,5	0,0133	7,8	-154,7
17	0,0156	7,9	16,1	0,0114	5,9	65,3	0,0083	4,9	157,6
19	0,0128	6,5	-46,8	0,0087	4,5	11,5	0,0098	5,8	109,5

Conteúdo Harmônico Percentual

(%) da fundamental

ordem harmônica

(%) da fundamental

ordem harmônica

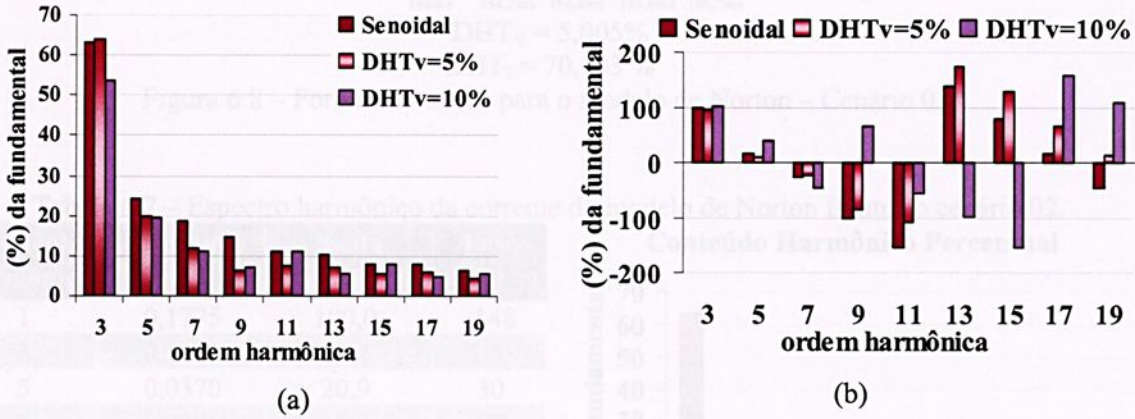
(%) da fundamental

ordem harmônica

As formas de ondas obtidas são aderentes às fornecidas pelo retificador monofásico, mostrando resultados similares aos das características intrínsecas da carga analisada (vide Figura 6.2). A mesma conclusão pode ser obtida ao comparar-se os espectros harmônicos encontrados (Tabela 6.6) com os fornecidos na Tabela 6.3.

Os modelos baseados no método de Norton mostram-se mais apropriados, para a representação de cargas não lineares, em uma maior gama de condições operativas, do que os métodos tradicionais de fontes de corrente “constante”, e a qualidade e eficácia do método de Norton estão ligadas diretamente ao tipo da carga a ser analisado, bem como, da ferramenta utilizada para a estimativa do modelo. Quanto maior a precisão e a quantidade de dados utilizados, melhor serão os resultados obtidos.

Gráfico 6.3 – Comparativo do espectro harmônico de corrente do modelo de Norton. (a) Magnitude, (b) Defasagem angular.



Foram feitos estudos e simulações para se avaliar o desempenho do Modelo de Norton em um determinado cenário, quanto à tensão de alimentação, diferente dos encontrados nos instantes em que as medições ou obtenção de dados foi efetuada. No exemplo, utilizaram-se os valores, para fonte de corrente e impedância de Norton, calculados para o cenário 03 ($DHT_v = 10\%$). Entretanto, o circuito foi simulado com uma tensão de alimentação com uma distorção total de 5%.

A razão desse teste foi a análise do comportamento do modelo ao ser submetido a um cenário intermediário de alimentação, em relação às medições feitas para dimensionamento do modelo da carga.

Comparando-se a forma de onda obtida (Figura 6.8), com as mostradas na Figura 6.7, nota-se que esta se assemelha mais com a apresentada no item (c), do que a do item (b). Contudo, o conteúdo harmônico e a distorção harmônica total da corrente mostram-se mais compatíveis com o resultado apresentado pelo retificador monofásico (cenário02), do que os resultados obtidos através do método de fontes de corrente “constante”.

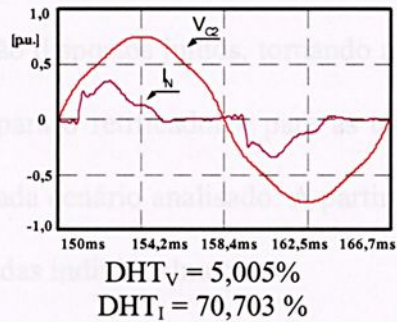
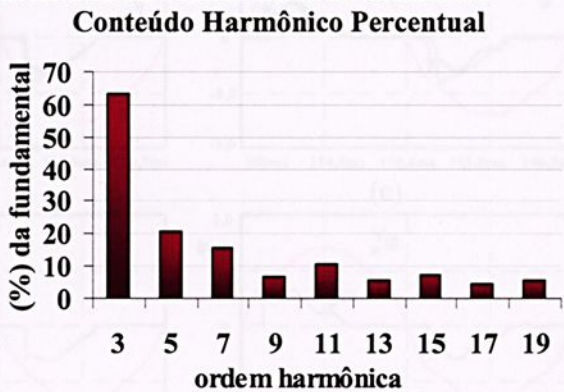


Figura 6.8 – Formas de ondas para o modelo de Norton – Cenário 02.

Tabela 6.7 – Espectro harmônico da corrente do modelo de Norton frente ao cenário 02.

Ordem Harmônica	Amplitude [p.u.]	% da fundamental	Fase [°]
1	0,1775	100,0	-148
3	0,1125	63,4	100
5	0,0370	20,9	30
7	0,0279	15,7	-33
9	0,0122	6,9	66
11	0,0186	10,5	-56
13	0,0095	5,4	-99
15	0,0133	7,5	-155
17	0,0083	4,7	158
19	0,0098	5,5	109

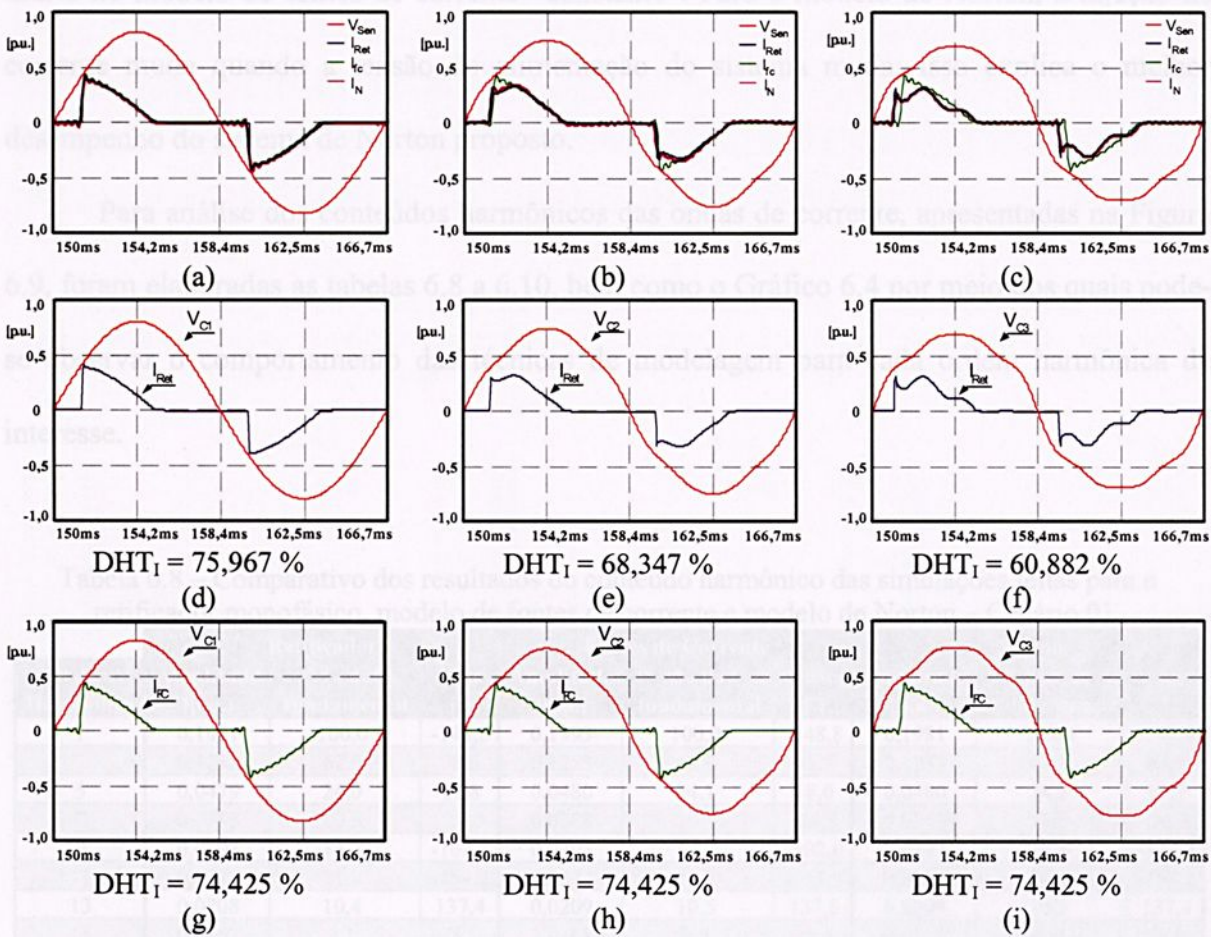


Estes fatos supracitados mostram a vantagem do modelo de Norton como técnica de modelagem de cargas. Entretanto, retratam a necessidade do desenvolvimento de um modelo mais apropriado para simulações no domínio do tempo, visto que medições nem sempre são fáceis de serem efetuadas, envolvendo custos e equipamentos específicos. Portanto o modelo de Norton, apesar de mostrar-se mais eficiente, não conseguiu representar por completo as características da carga escolhida em uma condição restritiva, quanto a dados de medição e resultados.

6.4 Análise Comparativa entre as Técnicas de Modelagem

Para cada cenário, o desempenho foi comparado entre os métodos comumente utilizados, de fontes de corrente “constante” e modelo de Norton. Para o circuito-teste foi, então, possível obter as correntes para a carga-teste e para os métodos.

Para melhor visualização dos fatos supracitados, foi elaborada a Figura 6.9, em que todos os resultados obtidos estão dispostos juntos, tornando a análise mais fácil. Nos itens de (a) a (c), as formas de onda, para o retificador e para as técnicas de modelagem, estão no mesmo gráfico, representado cada cenário analisado. A partir do item (d), as formas de ondas de corrente e tensão são mostradas individualmente.



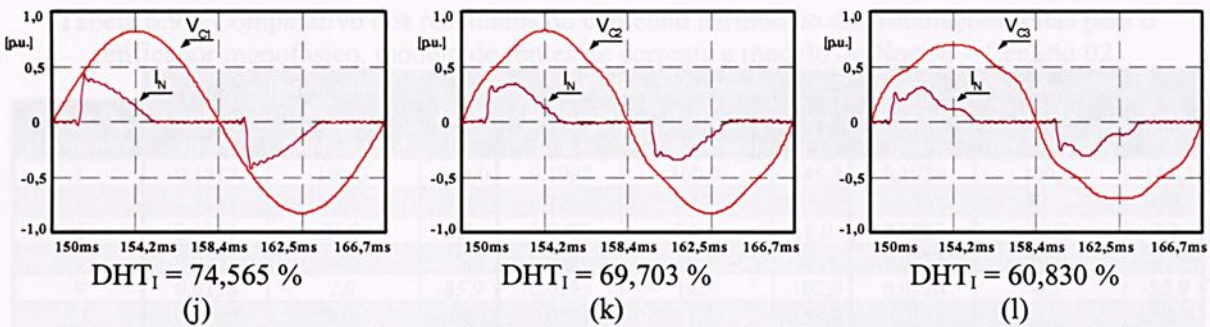


Figura 6.9 – Comparativo dos resultados das formas de onda das correntes obtidas através das simulações, (a) Todos – cenário 01, (b) Todos – cenário 02, (c) Todos – cenário 03, (d) Retificador – cenário 01; (e) Retificador – cenário 02, (f) Retificador – cenário 03, (g) Fontes de Corrente – cenário 01, (h) Fontes de Corrente – cenário 02, (i) Fontes de Corrente – cenário 03, (j) Norton – cenário 01, (k) Norton – cenário 02, (l) Norton – cenário 03.

Comparado o resultado recebido do modelo de fonte de corrente “constante” com o modelo de Norton, observa-se que este último fornece resultados mais precisos, especialmente, para harmônicas de baixa ordem. A corrente harmônica injetada não muda muito no modelo de fontes de corrente “constante”. Para o modelo de Norton, a injeção de corrente muda quando a tensão de alimentação do sistema muda; isso explica o melhor desempenho do sistema de Norton proposto.

Para análise dos conteúdos harmônicos das ondas de corrente, apresentadas na Figura 6.9, foram elaboradas as tabelas 6.8 a 6.10, bem como o Gráfico 6.4 por meio dos quais pode-se observar o comportamento das técnicas de modelagem para cada ordem harmônica de interesse.

Tabela 6.8 – Comparativo dos resultados do conteúdo harmônico das simulações feitas para o retificador monofásico, modelo de fontes de corrente e modelo de Norton – Cenário 01.

Ordem Harmônica	Retificador			Fontes de Corrente			Norton		
	Amplitude [p.u.]	% da fundamental	Fase [°]	Amplitude [p.u.]	% da fundamental	Fase [°]	Amplitude [p.u.]	% da fundamental	Fase [°]
1	0,1991	100,0	-148,8	0,1993	100,0	-148,8	0,1981	100,0	-148,9
3	0,1252	62,9	98,6	0,1253	62,9	98,7	0,1253	63,3	98,7
5	0,0479	24,0	17,8	0,0480	24,1	18,0	0,0480	24,2	17,7
7	0,0388	19,5	-27,0	0,0388	19,5	-26,8	0,0369	18,6	-26,2
9	0,0293	14,7	-102,3	0,0293	14,7	-102,0	0,0293	14,8	-102,3
11	0,0225	11,3	-154,2	0,0224	11,3	-153,8	0,0224	11,3	-154,2
13	0,0208	10,4	137,4	0,0209	10,5	137,8	0,0209	10,5	137,4
15	0,0162	8,1	78,9	0,0163	8,2	79,5	0,0159	8,0	78,9
17	0,0157	7,9	16,2	0,0156	7,8	16,1	0,0156	7,9	16,1
19	0,0129	6,5	-46,6	0,0128	6,4	-46,7	0,0128	6,5	-46,8

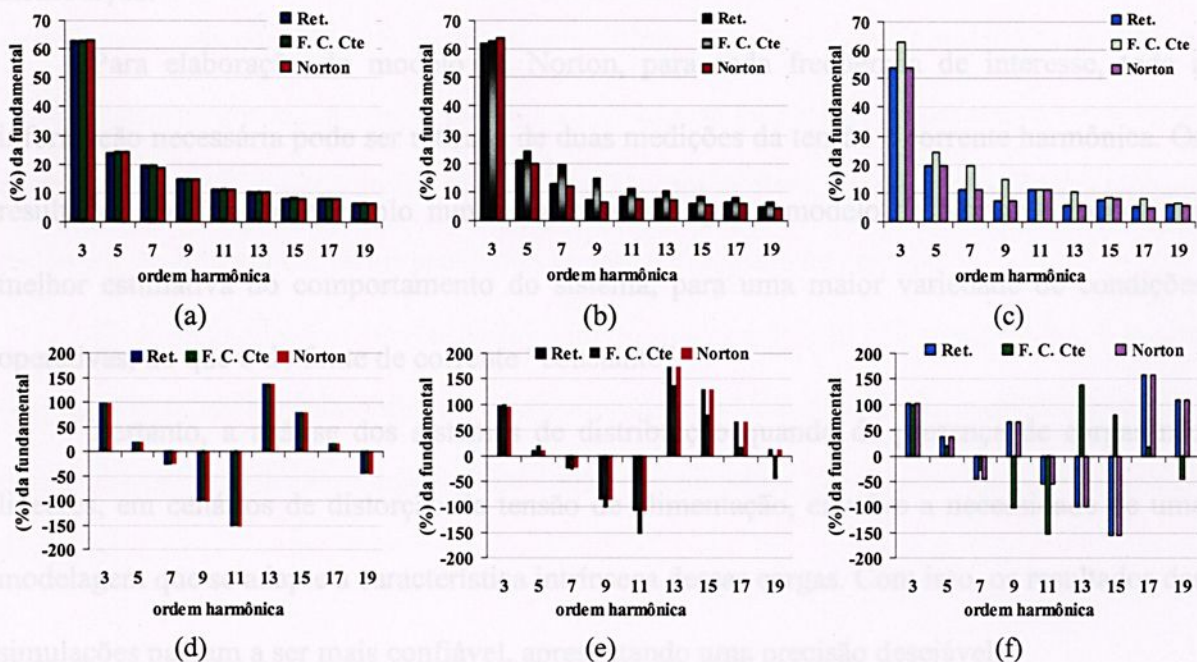
Tabela 6.9 – Comparativo dos resultados do conteúdo harmônico das simulações feitas para o retificador monofásico, modelo de fontes de corrente e modelo de Norton – Cenário 02.

Ordem Harmônica	Retificador			Fontes de Corrente			Norton		
	Amplitude [p.u.]	% da fundamental	Fase [°]	Amplitude [p.u.]	% da fundamental	Fase [°]	Amplitude [p.u.]	% da fundamental	Fase [°]
1	0,1813	100,0	-149,0	0,1993	100,0	-148,8	0,1928	100,0	-143,2
3	0,1125	62,1	97,0	0,1253	62,9	98,7	0,1232	63,9	95,8
5	0,0381	21,0	9,2	0,0480	24,1	18,0	0,0381	19,7	9,2
7	0,0232	12,8	-25,4	0,0388	19,5	-26,8	0,0232	12,0	-22,9
9	0,0128	7,0	-85,9	0,0293	14,7	-102,0	0,0126	6,5	-85,9
11	0,0150	8,3	-109,1	0,0224	11,3	-153,8	0,0148	7,7	-108,9
13	0,0140	7,7	174,1	0,0209	10,5	137,8	0,0140	7,3	174,2
15	0,0108	5,9	129,5	0,0163	8,2	79,5	0,0106	5,5	129,5
17	0,0114	6,3	65,5	0,0156	7,8	16,1	0,0114	5,9	65,3
19	0,0088	4,8	11,7	0,0128	6,4	-46,7	0,0087	4,5	11,5

Tabela 6.10 – Comparativo dos resultados do conteúdo harmônico das simulações feitas para o retificador monofásico, modelo de fontes de corrente e modelo de Norton – Cenário 03.

Ordem Harmônica	Retificador			Fontes de Corrente			Norton		
	Amplitude [p.u.]	% da fundamental	Fase [°]	Amplitude [p.u.]	% da fundamental	Fase [°]	Amplitude [p.u.]	% da fundamental	Fase [°]
1	0,1702	100,0	-148,4	0,1993	100,0	-148,8	0,1703	100,0	-148,4
3	0,0913	53,7	102,1	0,1253	62,9	98,7	0,0914	53,7	102,0
5	0,0330	19,4	37,8	0,0480	24,1	18,0	0,0331	19,4	37,8
7	0,0191	11,2	-45,2	0,0388	19,5	-26,8	0,0189	11,1	-45,3
9	0,0124	7,3	66,0	0,0293	14,7	-102,0	0,0122	7,1	65,9
11	0,0188	11,0	-55,4	0,0224	11,3	-153,8	0,0186	10,9	-55,6
13	0,0096	5,7	-99,2	0,0209	10,5	137,8	0,0095	5,6	-99,1
15	0,0132	7,7	-154,8	0,0163	8,2	79,5	0,0133	7,8	-154,7
17	0,0085	5,0	157,7	0,0156	7,8	16,1	0,0083	4,9	157,6
19	0,0100	5,9	109,2	0,0128	6,4	-46,7	0,0098	5,8	109,5

Gráfico 6.4 – Comparativo dos resultados do conteúdo harmônico das simulações feitas para o retificador monofásico, modelo de fontes de corrente e modelo de Norton, (a) magnitude – cenário 01; (b) magnitude – cenário 02, (c) magnitude – cenário 03, (d) fase – cenário 01, (e) fase – cenário 02, (f) fase – cenário 03.



6.5 Conclusões

Constata-se que as correntes harmônicas geradas por pontes retificadoras a diodo com elevada capacitância de filtro têm grande dependência da tensão aplicada. Essas correntes tendem a interagir com a impedância do sistema e provocam tensões distorcidas; em contrapartida, as pontes tentam compensar as distorções apresentadas na tensão, através de um efeito redutor nas correntes geradas, as quais tendem a se ajustar às novas situações mantendo a potência média constante.

O processo de modelagem de fontes de corrente “constante”, descrito no capítulo III, poderá ser aplicável em um sistema residencial de distribuição, que contenha cargas lineares e eletrônicas não-lineares, com características, em relação à potência requerida, de corrente constante, ou que apresente distorção harmônica de tensão com valores próximos de zero.

Neste capítulo, foi mostrado que, ao se mudar a condição operativa do sistema, mudar-se-á a injeção de corrente de uma carga de potência constante não linear. Os resultados obtidos, através da análise do comportamento da carga frente à mudança da tensão de alimentação, foram usados para estimar-se o modelo harmônico de Norton, para o sistema de distribuição.

Para elaboração do modelo de Norton, para cada frequência de interesse, toda a informação necessária pode ser retirada de duas medições da tensão e corrente harmônica. Os resultados obtidos, do exemplo numérico, mostram que o modelo de Norton fornece uma melhor estimativa do comportamento do sistema, para uma maior variedade de condições operativas, do que o de fonte de corrente “constante”.

Portanto, a análise dos sistemas de distribuição quando da presença de cargas não lineares, em cenários de distorção da tensão de alimentação, envolve a necessidade de uma modelagem que se adapte à característica intrínseca dessas cargas. Com isso, os resultados das simulações passam a ser mais confiável, apresentando uma precisão desejável.



CAPÍTULO VII

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O setor elétrico brasileiro está atravessando fortes mudanças quanto à responsabilidade, em relação à qualidade do produto a ser entregue ao consumidor final, e quanto ao aumento da competitividade no fornecimento e venda da energia. Por isso, manter a qualidade do produto e dos serviços ganha uma maior importância, sendo que os preços praticados são fixados, como é o caso das empresas distribuidoras de energia elétrica.

A permanência no mercado e o aumento na lucratividade constituem um grande desafio para as empresas prestadoras de serviço. A exigência por ferramentas de análise específicas e confiáveis torna-se cada vez mais imprescindível. A adoção de simplificações e considerações, baseadas em conceitos antes firmados, pode resultar em resultados insatisfatórios e gerar decisões errôneas.

A mudança no perfil de carga e na forma de onda da corrente injetada no sistema elétrico tem sido considerável ao longo das últimas décadas. Com a ampliação do uso de cargas elétricas, que utilizam dispositivos de eletrônica de potência, conectados no sistema, correntes distorcidas estão sendo injetadas no sistema e, por conseguinte, a tensão torna-se distorcida, resultando em sérios problemas quanto à qualidade de energia.

Considerando os efeitos adversos provocados por cargas não lineares, sobre outros equipamentos dos consumidores ou em outras unidades consumidoras, o conhecimento da magnitude das tensões harmônicas, bem como, das correntes harmônicas torna-se de grande interesse.



Em face desses dados, o estudo da qualidade de energia elétrica tem ganhado uma forte representatividade nos estudos desenvolvidos dentro do setor elétrico. Atenção especial tem sido dada à análise da penetração harmônica, avaliando-se as origens e as conseqüências de tensões e correntes harmônicas através do sistema de suprimento e distribuição. As correntes harmônicas em circulação trazem, como conseqüência, o aumento das perdas elétricas no sistema e, por conseguinte, a diminuição dos ganhos das empresas do setor.

Ficou comprovada a importância de se analisar os sistemas de distribuição de energia elétrica na presença de carregamento não linear. Para tanto, necessita-se de um método de modelagem eficaz para simulações de estudo de propagação harmônica. Os resultados são usados para se avaliar as distorções encontradas na forma de onda da corrente e da tensão, ao longo dos sistemas de distribuição.

Para a elaboração de uma análise confiável de um sistema elétrico de distribuição, quanto à influência de distorções harmônicas, torna-se necessário o conhecimento das cargas presentes no sistema elétrico, e de suas características de funcionamento. Então, a utilização de um eficiente método de modelagem destas recebe forte atenção por parte de pesquisadores do setor.

Com a entrada de novas cargas não lineares no sistema, o desempenho e as características do sistema podem alterar-se significativamente; portanto, as simulações têm papel fundamental para a verificação de problemas advindos da circulação de harmônicas nas redes.

Este trabalho apresentou uma breve avaliação das principais técnicas desenvolvidas para a modelagem dos sistemas elétricos de distribuição e das cargas não lineares. As técnicas de modelagem abordadas contemplam simulações probabilísticas e determinísticas, tanto no domínio do tempo, como no domínio da frequência.



A apresentação de um modelo para simulação de sistemas trifásicos “completos”, representando todos os equipamentos e cargas envolvidas por fase, torna possível a redução, significativa, de uma das maiores fontes de “imprecisão” das simulações baseadas em diagramas unifilares: a admissão da condição de equilíbrio pleno de carga.

Resultados importantes foram obtidos, ressaltando a importância e a necessidade de se considerar a condição de desequilíbrio de cargas, especialmente, para a análise de circulação de harmônicas através de redes de distribuição. Destaca-se que a condição de operação, com desequilíbrio de carga, é a que melhor retrata a condição “real”, encontrada nos sistemas de distribuição trifásicos.

A análise dos sistemas de distribuição, quando da presença de cargas não lineares, em cenários de distorção da tensão de alimentação, envolve a necessidade de uma modelagem, que se adapte às características intrínsecas dessas cargas, para a obtenção de resultados mais confiáveis. Dentre as modelagens analisadas, a técnica do modelo de Norton apresentou-se mais aderente e precisa na representação dos resultados referentes às características da carga não linear analisada: um retificador monofásico a diodos com elevada capacitância de filtro.

Como proposta de continuidade, torna-se importante o desenvolvimento de uma representação das cargas não lineares, compostas por uma composição de impedâncias harmônicas, no domínio do tempo. A modelagem proposta deverá ser dependente da variação e distorção encontrada na forma de onda da tensão de alimentação, para vários cenários distintos de suprimento. Essa técnica de modelagem deve adaptar-se às mudanças operativas inerentes a um sistema de distribuição, como a entrada em operação de banco de capacitores, mudando a impedância do sistema e criando um novo caminho para a circulação das correntes harmônicas de seqüência zero, especialmente, quando os resultados fornecidos forem distintos dos obtidos no momento em que as medições, para especificação do modelo, foram realizadas.



REFERÊNCIAS

- [1] Mack Grady, W., Jakwani, A., *et alli*, "The Effect of Distorted Voltage on the Current Harmonics of Typical Single-Phase Commercial Office Building Loads", ICHQP Proc., 7th International Conference on Harmonics and Quality of Power, pp. 734 – 739, October, 1996;
- [2] Deflandre, T., Lachaume, J. e Leonardi, O., "Modeling Harmonic Injection by Domestic Costumers", ICHQP Proc., 7th International Conference on Harmonics and Quality of Power, pp. 675 – 680, October, 1996.
- [3] Gole, A. M., Albert Keri, Nwankpa, C. e Gunther, E. W., "Guidelines for Modeling Power Electronics in Electric Power Engineering Applications", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, January, pp. 505 – 514, 1997;
- [4] Williams, S. M.; Brownfield, G. T. e Duffus, J. W., "Harmonic Propagation on the Electric Distribution System: Field Measurements Compared With Computer Simulation", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, nº. 2, January, pp. 547 – 552, 1993;
- [5] Essah, D.; Feiste, R.; O'Connell, R.; Hoft, R. G. e Brownfield, G., "Harmonic Effect of Variable Speed Air Conditioners on a Single-Phase Lateral and on the Distribution Feeders in a Typical Residential Power Ststem I", IEEE Transactions on Power Delivery, pp. 622 – 627, 1994;
- [6] Wang, Y.-J, O'Connell, R. M. e Brownfield, G., "Modeling and Prediction of Distribution System Voltage Distortion Caused by Nonlinear Residential Loads", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, nº. 4, October, pp. 744 – 751, 2001;
- [7] Hansen, S.; Nielsen, P. e Blaabjerg, F., "Harmonic Cancellation by Mixing Nonlinear Single-Phase and Three-Phase Loads", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 36, No. 1, January, pp. 152 – 159, 2000;
- [8] Thunberg, E. e Söder, L., "A Norton Approach to Distribution Network Modeling for Harmonic Studies", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, nº. 1, January, pp. 272 – 277, 1999;
- [9] Thunberg, E. e Söder, L., "A Harmonic Norton Model of a Real Distribution Network", Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, Vol. 3, October, pp. 932 – 937, 2000;
- [10] Thunberg, E. e Söder, L., "Influence of the Network Impedance on Distribution System Harmonic Norton Models" International Conference on Power System Technology, Vol.3, December, pp. 1143 – 1148, 2000;

- [11] Thunberg, E. e Söder, L., "On the Performance of a Distribution Network Harmonic Norton Model", Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, Vol. 3, October, pp. 932 – 937, 2000;
- [12] Thunberg, E. e Söder, L., "On the Estimation of Harmonic Power Losses in Distribution System", IEEE Transactions on Power Delivery, pp. 852 – 857, 2000;
- [13] Schelb, A. J. H. C. e Samesima, M. I., "Modelagem de Cargas Não Lineares: Lâmpadas de Descarga e Máquinas de Solda", XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 94-100, 2001;
- [14] BaSudan, O. e Hegazy, Y. G., "Probabilistic Modeling of Distribution System Loads for Harmonic Studies", IEEE Transactions on Power Delivery, pp. 1778 – 1781, 2001;
- [15] Czarnecki, L. S. e Staroszczyk, Z., "On-Line Measurement of Equivalent Parameters of Distribution System and its Load for Harmonic Frequencies", IEEE Transactions on Instrument and Measurement, pp. 692 – 696, 1995;
- [16] Czarnecki, L. S. e Staroszczyk, Z., "On-Line Measurement of Equivalent Parameters for Harmonic Frequencies of Power Distribution System and Load", IEEE Transactions on Instrument and Measurement, Vol. 45, No. 2, April, pp. 467 – 472, 1996;
- [17] Mansoor A.; Grady W.; Thallam R.; Doyle M.; Krein S.; "Effect of Supply Voltage Harmonics on the Input Current of Single-Phase Diode Bridge Rectifier Loads", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, nº. 3, July, pp. 1416 – 1422, 1995;
- [18] Dugan, R. C.; McGranaghan, M. F. e Beaty, H. W., "Electrical Power Systems Quality" McGraw-Hill, 265 pg., 1996;
- [19] IEC 61000-3-2 – International Electrotechnical Commission, second edition, "Limits for harmonic current emissions (equipment input current $\leq 16\text{A}$), final draft EN 61000-3-2, March 2000;
- [20] IEEE Task Force, "Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, January 1996;
- [21] Caldon, R., Fauri, M., Fellin, L., "Harmonic Modelling of Household and Commercial Aggregate Loads", ICHQP Proc., 7th International Conference on Harmonics and Quality of Power, pp. 681 – 686, October, 1996.
- [22] Morrison, R. E., "Probabilistic Analysis of Harmonic Currents in Power Systems", Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE, Vol. 2, pp. 1082-1083, January 2002;
- [23] Morrison, R. E. e Duggan, E., "Probabilistic methods applied to harmonic distortion", Probabilistic Methods Applied to Electric Power Systems, Third International Conference, 3-5 Jul, pp. 43 – 46, 1991;

- [24] Morrison, R. E. e Clark A. D., "A Probabilistic Representation of Harmonic Currents in AC Traction Systems", IEE Proc (B), Vol 131, No. 5, September, 1984;
- [25] Hegazy, Y. G. e Salama, M. M. A., "Probabilistic Modeling of Distribution Systems Loads for Harmonic Studies" Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, Vol.3, 15-19 July, pp. 1778 – 1781, 2001;
- [26] Hegazy, Y. G. e Salama, M. M. A., "Probabilistic representation of harmonic currents produced by AC/DC Static Power Converters. Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS '95, Conference Record of the 1995 IEEE, Vol.2 , 8-12 Oct. pp. 1689 – 1695, 1995;
- [27] Fauri, M, "Harmonic Modeling of Non-Linear load by Means of Crossed Frequency Admittance Matrix", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, November, pp. 1632 – 1638, 1997;
- [28] Ribeiro, P. F. e Carpinelli, G., "IEEE Std 519 Revision: The Need for Probabilistic Limits of Harmonic", IEEE, pp. 809 – 812, 2001;
- [29] Ward, Daniel J., "A Rational Approach to Dealing with Harmonics", 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, pp. 878 – 882, October, 1998;
- [30] Ribeiro, P. F., "Guidelines on Distribution System and Load Representation for Harmonic Studies", ICHPS V International Conference on, pp. 272 – 280, September, 1992;
- [31] Delaiba, A. C.; Oliveira, J. C.; Cardoso, J. R. e Ribeiro, P. F., "Practical Validation for the Frequency Domain Approach to Study the Thermal Behavior of Transformers Under Nonsinusoidal Operation Conditions", 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, pp. 946 – 951, October, 1998;
- [32] Ribeiro, P. F. e Fonseca, L. C., "Considerations on the Accuracy of Three-Phase Harmonic Penetration Studies in Transmission System: a Case Study", ICHPS V International Conference on, pp. 57 – 64, September, 1992;
- [33] Jun, Z. e Maswood, A. I., "Typical Industrial LV System for Harmonic Propagation Study Under Balanced and Unbalanced Conditions Using Pspice Models", IEEE International conference on Power electronics and drives system PEDES'99, 26-29, 1999;
- [34] Chambi, R. L. L. e Vasquez-Arnez, R. L., "A Study of the Harmonic Perturbation within the Power Quality in the Bolivian Distribution System", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, 1-4 Oct., pp. 828 – 833, 2000;
- [35] Manjure, D. P. e Makram, E. B., "Effect of Nonlinearity and Unbalance on Power Factor", IEEE Transactions on Power Delivery", Vol. 2, 16-20 July, pp. 956 – 962, July, 2000;
- [36] Figueiredo, A. A. C., *et alli*, "Model of Δ/Y Three-Phase Distribution Transformer, Suitable for Simulations in Pspice and Analyses of Harmonic Currents, Considering Unbalanced Nonlinear Loads", VI INDUSCON, Joinville (SC), October, 2004;

- [37] IEEE Std 519 – IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, Institute of Electrical and Electronics Engineers – 1992;
- [38] Canesin, C. A.; Oliveira, L. C. O. e Rossi, J. C., “Relatório Final de Etapas: Levantamento Bibliográfico”, Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento Ciclo 2002/2003, Enersul / Fepisa, Outubro, 2003;
- [39] Moraes, T. M. de, “Um novo modelo de transformadores trifásicos para análise harmônica trifásica em sistemas de distribuição”, Dissertação de Mestrado, UNESP, Ilha Solteira/SP, 2005.





unesp

**,UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**

Câmpus de Ilha Solteira

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Av. Brasil Centro, 56

15385-000 Ilha Solteira - SP

www.dee.feis.unesp.br

