

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

“Um novo modelo de transformadores trifásicos para análise harmônica trifásica em sistemas de distribuição”

Thiago de Martins de Moraes

Orientador:

Prof. Dr. Carlos Alberto Canesin

Co-orientador:

Dr. Fábio Toshiaki Wakabayashi

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.**

Ilha Solteira(SP), Março de 2005.

Dedicatória

*Porque d'Ele por Ele e para Ele
são todas as coisas,
Jesus Cristo.
Rm 11:36*

Agradecimentos

A Deus, porque sem Ele nada do que foi feito se fez.

À Instituição CAPES, pelo apoio financeiro de suma importância nesta etapa.

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Canesin, pela sua confiança e conhecimento compartilhado como orientador. Seus exemplos de dedicação e profissionalismo em muito contribuíram para a minha formação.

Ao Dr. Fábio Toshiaki Wakabayashi, co-orientador, pelas longas e incansáveis horas de discussões, as quais serviram de grande suporte para a conclusão deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Luis Carlos Origa de Oliveira, pela sua disposição em contribuir.

Aos meus amigos do LEP, Flávio Gonçalves, Fausto Dantas, Guilherme Melo e Jurandir Soares, pela lealdade e amizade demonstrada durante todo este tempo. Este período aqui se finda, mas a amizade perdura.

Aos amigos e companheiros, Fábio Durão, Jean Marcos, Ricardo Gouveia e Wilson Martins, pela mão amiga nas horas de dificuldades. Ao grande amigo Rogério M. Silva, pelo seu incentivo desde o início, você é um dos grandes responsáveis por tal feito.

À Família CNA, pelos grandes e bons momentos vividos.

À Família Soares. Vocês com certeza conquistaram meu coração. Obrigado pelas inúmeras bênçãos recebidas através de vós, pois minha vida não teria sido completa se não fosse pelos momentos compartilhados dia a dia, momentos estes, os quais simplesmente serviram de “prefácio” para muitos outros no porvir.

E, a meus pais, David M. Morais e Elizete A. Morais, e aos meus irmãos, Thatiane M. de Morais e David M. Morais Filho, que mesmo estando distantes sempre se fizeram presentes; às vezes em corpo, porém muito mais em espírito e orações. Dedico-lhes este, com todo o amor.

Abstract

The development of new technologies implemented in most part of the loads present nowadays in the electrical network has brought along significant changes in Brazilian electrical networks. The non linearity loads characteristic present in such loads has contributed to the power quality degradation. Thus, one of the topics that has become evident since then is the “Power Quality” concept which is related to loads, equipment and devices, and Generation, Transmission and Distribution networks.

Several studies have been developed searching to understand the phenomena caused by the presence of high harmonic contents and its interaction with the network, as well as its origins and consequences. So, many network modeling techniques have been used which varies in terms of data acquisition, modeling complexity, formulation problems and solution of algorithms.

This work presents a new four wires electrical distribution network modeling, enabling the simulation of unbalanced systems in time domain, and also a harmonic flow analysis.

On this context, it is remarkable in this work, an important Delta-Wye transformer modeling, enabling the real distribution network representation (three wires on primary side and four wires on secondary one).

With the new modeling proposed on this work, it is also possible to carry out a wide analysis, in a precise way, on time domain, of processed voltage and currents in the networks, permitting the harmonic flow analysis, and also foreseeing future problems and proposing solutions to them.

Resumo

O desenvolvimento de novas tecnologias implementadas na maioria das cargas presentes hoje no sistema elétrico tem trazido consigo significativas mudanças no comportamento do sistema elétrico brasileiro. A característica de não linearidade das cargas atuais tem contribuído para a degradação da qualidade da energia utilizada. Assim, um dos fatores que tem se tornado evidente a partir de então é a questão da “Qualidade da Energia”, a qual envolve conceitos que estão relacionados às cargas, equipamentos e sistemas de distribuição, transmissão e geração.

Muitos estudos têm sido desenvolvidos na busca de se entender os fenômenos causados pela presença de elevados conteúdos harmônicos e sua interação com o sistema, bem como suas causas e conseqüências. Para isso tem se utilizado de várias técnicas de modelagem dos sistemas, as quais variam em termos da aquisição de dados, da complexidade da modelagem, dos problemas de formulação e dos algoritmos de solução.

Este trabalho apresenta uma modelagem de sistemas elétricos de distribuição de forma multifilar, possibilitando a simulação de sistemas trifásicos desequilibrados no domínio do tempo, bem como a análise de fluxo harmônico no sistema.

Desta forma, destaca-se neste trabalho uma importante proposta de modelagem para transformadores trifásicos com conexão $\Delta - Y$, permitindo a representação real dos sistemas de distribuição (três fios do lado primário e quatro fios do lado secundário).

Com a nova modelagem proposta neste trabalho, torna-se possível uma ampla análise no domínio do tempo, de forma mais precisa, das tensões e correntes processadas nos sistemas elétricos, permitindo análises do fluxo harmônico, e ainda prevendo possíveis problemas e propondo soluções.

 Lista de figuras

	Descrição	Pág.
Capítulo 3		
Figura 3.1 (a)	– <i>Retificador monofásico à diodo</i>	7
Figura 3.1 (b)	– <i>Principais formas de onda</i>	7
Figura 3.2 (a)	– <i>Carga puramente resistiva</i>	11
Figura 3.2 (b)	– <i>Carga em associação RLC</i>	11
Figura 3.3	– <i>Exemplo de carga não linear</i>	12
Figura 3.4	– <i>Composição da forma de onda distorcida</i>	13
Figura 3.5	– <i>Variação da corrente de pico em função do ângulo θ</i>	23
Capítulo 4		
Figura 4.1	– <i>Circuito de Thévenin</i>	37
Figura 4.2	– <i>Circuito de Norton</i>	38
Figura 4.3	– <i>Exemplo da variação de correntes harmônicas no sistema elétrico</i>	38
Figura 4.4	– <i>Modelo de Norton</i>	39
Figura 4.5	– <i>Modelo de Norton – modificações comportamentais</i>	41
Figura 4.6	– <i>Exemplo de sistema de distribuição modelado</i>	44
Figura 4.7	– <i>Alimentadores residenciais monofásicos</i>	45
Figura 4.8 (a)	– <i>Modelagem dos consumidores residenciais – Carga linear</i>	46
Figura 4.8 (b)	– <i>Modelagem dos consumidores residenciais – Carga não linear</i>	46
Figura 4.9	– <i>Modelo monofásico para as unidades transformadoras, considerando-se filtro para terceira harmônica</i>	46
Capítulo 5		
Figura 5.1	– <i>Diagrama unifilar da rede primária tomada como exemplo</i>	56
Figura 5.2	– <i>Diagrama esquemático simplificado do sistema de distribuição para simulação em ambiente Pspice</i>	57

 Lista de figuras

	Descrição	Pág.
Figura 5.3	– <i>Representação gráfica de conjuntos de cargas lineares, empregadas em pontos de concentração de carga equivalente no primário</i>	58
Figura 5.4	– <i>Representação da carga linear no secundário</i>	59
Figura 5.5	– <i>Representação das cargas monofásicas não lineares no secundário</i>	59
Figura 5.6	– <i>Representação das cargas trifásicas não lineares no secundário</i> ..	59
Figura 5.7	– <i>Modelo de transformador monofásico do Pspice</i>	61
Figura 5.8	– <i>Modelo convencional de transformador trifásico, composto por um banco de transformadores monofásicos do Pspice</i>	61
Figura 5.9	– <i>Acoplamentos entre as indutâncias</i>	62
Figura 5.10	– <i>Fonte de tensão controlada por tensão</i>	63
Figura 5.11	– <i>Modelo proposto de transformador monofásico</i>	64
Figura 5.12 (a)	– <i>Modelo proposto de transformador trifásico composto por um banco de transformadores monofásicos</i>	65
Figura 5.12 (b)	– <i>Representação gráfica</i>	65
Figura 5.13	– <i>Formas de onda das tensões e correntes no lado primário do transformador</i>	69
Figura 5.14	– <i>Formas de onda das tensões e correntes no lado secundário do transformador</i>	69
Figura 5.15	– <i>Corrente de neutro, segmento secundário-S_0</i>	71
Figura 5.16	– <i>Formas de onda de tensões e correntes no ponto “S_1”</i>	72
Figura 5.17	– <i>Formas de onda de tensões e correntes no ponto “S_2”</i>	73

Capítulo 6

Figura 6.1	– <i>Crescimento das cargas eletrônicas (não lineares)</i>	78
Figura 6.2	– <i>Formas de onda no primário do transformador</i>	80
Figura 6.3	– <i>Formas de onda no secundário do transformador</i>	80
Figura 6.4	– <i>Detalhes das formas de onda das correntes no ponto “S_0”</i>	83

 Lista de figuras

	Descrição	Pág.
Figura 6.5	– Formas de onda das tensões e correntes no ponto de concentração “ S_1 ”	83
Figura 6.6	– Detalhes das formas de onda das correntes no ponto “ S_1 ”	84
Figura 6.7	– Formas de onda das tensões e correntes no ponto de concentração “ S_2 ”	85
Figura 6.8	– Detalhes das formas de onda das correntes no ponto “ S_2 ”	86
Figura 6.9	– Comparação das tensões nos pontos (S_0, S_1, S_2) da fase r	86
Figura 6.10	– Comparação das correntes nos pontos (S_0, S_1, S_2) da fase r	87
Figura 6.11	– Comparação da corrente no neutro nos pontos (S_0, S_1, S_2) fase r ..	87
Figura 6.12	– Valor eficaz da corrente de neutro	89
Figura 6.13	– Instante da ruptura do condutor neutro	90
Figura 6.14	– Comparação das tensões e correntes no ponto “ S_0 ” antes e após a ruptura do neutro	91
Figura 6.15	– Detalhe do valor eficaz da corrente na fase r , antes e após a ruptura do neutro	93
Figura 6.16	– Comparação das tensões e correntes no ponto “ S_1 ” antes e após a ruptura do neutro	94
Figura 6.17	– Comparação das tensões e correntes no ponto “ S_2 ” antes e após a ruptura do neutro	97
Figura 6.18	– Formas de onda das correntes no neutro nos seguimentos “ S_0 ”, “ S_1 ” e “ S_2 ”	99
Figura 6.19	– Comparação entre os valores eficazes das tensões, nos diferentes pontos de concentração, antes e depois da ruptura do condutor neutro	100

Capítulo 7

Figura 7.1	– Circuito equivalente do transformador – ATP	109
Figura 7.2	– Formas de onda da tensão fase “ r ”	111
Figura 7.3	– Formas de onda das tensões no secundário do transformador	112

Lista de figuras

	Descrição	Pág.
Figura 7.4	– <i>Correntes no primário do transformador.....</i>	114
Figura 7.5	– <i>Esquema de montagem para ensaios laboratoriais.....</i>	116
Figura 7.6	– <i>Formas de onda das correntes no secundário.....</i>	117
Figura 7.7	– <i>Corrente de neutro, Medição – Simulação.....</i>	119
Figura 7.8	– <i>Correntes no primário - Simulação em Pspice.....</i>	120
Figura 7.9	– <i>Correntes no primário - Resultados de laboratório.....</i>	120

 Lista de Tabelas

	Descrição	Pág.
Capítulo 3		
Tabela 3.1	– <i>IEC-61000-3-2 Limites para correntes harmônicas, classe A</i>	21
Tabela 3.2	– <i>IEC-61000-3-2 Limites harmônicos de corrente, classe C</i>	23
Tabela 3.3	– <i>IEC-61000-3-2 – Limites harmônicos de corrente, classe D</i>	24
Tabela 3.4	– <i>IEEE – 519 Máximo limite para harmônicos ímpares em sistemas de distribuição em geral, de 120V até 69kV</i>	25
Tabela 3.5	– <i>IEEE – 519 Máximo limite para harmônicos ímpares em sistemas de distribuição, de 69,001kV até 161kV</i>	25
Tabela 3.6	– <i>IEEE – 519 Máximo limite para harmônicos ímpares em sistemas de distribuição de alta tensão (> 161kV) e sistemas de geração e co-geração isolados</i>	25
Tabela 3.7	– <i>IEEE – 519 Limites de distorção da tensão</i>	25
Capítulo 5		
Tabela 5.1	– <i>Valores de base utilizados como base para as Tabela 2 a 5</i>	66
Tabela 5.2	– <i>Parâmetros da linha primária “SE” – “P₇”</i>	66
Tabela 5.3	– <i>Parâmetros da linha secundária “S₀” – “S₂”</i>	66
Tabela 5.4	– <i>Parâmetros das cargas lineares concentradas conectadas à linha primária</i>	67
Tabela 5.5	– <i>Parâmetros das cargas lineares conectadas à linha Secundária.</i>	67
Tabela 5.6	– <i>Parâmetros das cargas não lineares conectadas à linha secundária</i>	68
Tabela 5.7	– <i>Espectro harmônico das tensões de fase no ponto S₀</i>	70
Tabela 5.8	– <i>Espectro harmônico das correntes de fase processadas no primário do transformador</i>	70
Tabela 5.9	– <i>Espectro harmônico das correntes de fase processadas no secundário do transformador</i>	71
Tabela 5.10	– <i>Espectro harmônico das tensões de fase no ponto “S₁”</i>	72

Lista de Tabelas

	Descrição	Pág.
Tabela 5.11	– <i>Espectro harmônico das tensões de fase no ponto “S₂”</i>	73
Capítulo 6		
Tabela 6.1	– <i>Crescimento de cargas não lineares nos E.U.A.</i>	78
Tabela 6.2	– <i>Valores de base utilizados</i>	79
Tabela 6.3	– <i>Parâmetros das cargas lineares conectadas à linha secundária</i> .	79
Tabela 6.4	– <i>Parâmetros das cargas não lineares conectadas à linha secundária</i>	79
Tabela 6.5	– <i>Espectro harmônico das tensões de fase no secundário do transformador “S₀”</i>	81
Tabela 6.6	– <i>Espectro harmônico das correntes processadas no primário do transformador</i>	82
Tabela 6.7	– <i>Espectro harmônico das correntes processadas no secundário do transformador “S₀”</i>	82
Tabela 6.8	– <i>Espectro harmônico das tensões no ponto de concentração “S₁”</i> ...	84
Tabela 6.9	– <i>Espectro harmônico das tensões no ponto de concentração “S₂”</i> ...	85
Tabela 6.10	– <i>Fatores de correção aplicáveis a circuitos trifásicos a 4 condutores com presença de correntes harmônicas de 3^a ordem</i>	88
Tabela 6.11	– <i>Espectro harmônico no secundário do transformador “S₀” – Fase “r”</i>	92
Tabela 6.12	– <i>Espectro harmônico no secundário do transformador “S₀” – Fase “s”</i>	92
Tabela 6.13	– <i>Espectro harmônico no secundário do transformador “S₀” – Fase “t”</i>	93
Tabela 6.14	– <i>Espectro harmônico das tensões e correntes no ponto de concentração “S₁” antes e após ruptura do neutro – Fase “r”</i>	95
Tabela 6.15	– <i>Espectro harmônico das tensões e correntes no ponto de concentração “S₁” antes e após ruptura do neutro – Fase “s”</i>	95

Lista de Tabelas

	Descrição	Pág.
Tabela 6.16	– <i>Espectro harmônico das tensões e correntes no ponto de concentração “S₁” antes e após ruptura do neutro – Fase “t”</i>	96
Tabela 6.17	– <i>Espectro harmônico das tensões e correntes no ponto de concentração “S₂” antes e após ruptura do neutro – Fase “r”</i>	98
Tabela 6.18	– <i>Espectro harmônico das tensões e correntes no ponto de concentração “S₂” antes e após ruptura do neutro – Fase “s”</i>	98
Tabela 6.19	– <i>Espectro harmônico das tensões e correntes no ponto de concentração “S₂” antes e após ruptura do neutro – Fase “t”</i>	99
Tabela 6.20	– <i>Tensões eficazes nominais padronizadas</i>	102
Tabela 6.21	– <i>Valores das tensões eficazes antes e após o rompimento do condutor neutro</i>	102

Capítulo 7

Tabela 7.1	– <i>Limites de distribuição de dispositivos</i>	108
Tabela 7.2	– <i>Dados de entrada no modelo do transformador saturável</i>	110
Tabela 7.3	– <i>Espectro harmônico das tensões no secundário do transformador “S₀” – Fase “r”</i>	111
Tabela 7.4	– <i>Espectro harmônico das tensões no secundário do transformador “S₀” – Fases “s” e “t”</i>	112
Tabela 7.5	– <i>Espectro harmônico das correntes no primário do transformador.....</i>	114
Tabela 7.6	– <i>Conteúdo harmônico percentual das correntes no primário do transformador</i>	115
Tabela 7.7	– <i>Valores das impedâncias de linha</i>	116
Tabela 7.8	– <i>Valores das cargas RC</i>	117
Tabela 7.9	– <i>Espectro harmônico das correntes medidas no secundário</i>	118
Tabela 7.10	– <i>Espectro harmônico da corrente no primário do transformador – Fase “a”.....</i>	120

Lista de Tabelas

	Descrição	Pág.
Tabela 7.11	– <i>Espectro harmônico da corrente no primário do transformador – Fase “b”</i>	120
Tabela 7.12	– <i>Espectro harmônico da corrente no primário do transformador – Fase “c”</i>	121

Abreviaturas

ANEEL	–	<i>Agencia Nacional de Energia Elétrica</i>
ATP	–	<i>Alternative Transients Program</i>
AWG	–	<i>American Wire Gauge standard</i>
CC	–	<i>Corrente Contínua</i>
Cos	–	<i>Cosseno</i>
DHT	–	<i>Distorção harmônica total</i>
DNAEE	–	<i>Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica</i>
EMTP	–	<i>Electromagnetic Transient Program</i>
FP	–	<i>Fator de Potência</i>
h	–	<i>Ordem harmônica</i>
IEC	–	<i>International Electrotechnical Commission</i>
MOSFET	–	<i>Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor</i>
ONS	–	<i>Operador Nacional do Sistema elétrico</i>
P_{med}	–	<i>Potência média</i>
PWM	–	<i>Pulse Width Modulation – Modulação por largura de pulso</i>

Simbologia

Símbolo	Descrição	Un.
Σ	– Somatória	
$\sqrt{\quad}$	– Raiz quadrada	
∞	– Infinito	
\neq	– Diferente	
$<$	– Menor	
$>$	– Maior	
\leq	– Menor ou igual	
\geq	– Maior ou igual	
ω	– Frequência angular.....	rad/s
θ_n	– Ângulo da tensão harmônica de ordem n	°
ϕ_n	– Ângulo da corrente harmônica de ordem n	°
C	– Capacitor	F
D	– Diodo	
I_1	– Corrente fundamental	A
I_{CC}	– Corrente de curto circuito	A
I_{eficaz}	– Corrente eficaz	A
I_{in}	– Corrente de entrada.....	A
I_L	– Corrente da carga	A
I_n	– Corrente de ordem harmônica “ n ”	A
I_O	– Valor médio da corrente	A
L	– Indutor	H
R	– Resistor	Ω
V_{in}	– Tensão de entrada	V
V_n	– Tensão de ordem harmônica “ n ”	V
V_O	– Valor médio da tensão	V
Y	– Admitância	siemens
Z	– Impedância	Ohm

Grandezas Físicas

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

Símbolo	– Nome da unidade
W	– <i>Watt</i>
H	– <i>Hertz</i>
VARh	– <i>Energia Reativa</i>
Wh	– <i>Energia Ativa</i>
°	– <i>Graus Celsius</i>
A	– <i>Ampere</i>
F	– <i>Faraday</i>
Ω	– <i>Ohm</i>

Sumário

Dedicatória	i
Agradecimentos	ii
Abstract	iii
Resumo	iv
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	ix
Abreviaturas	xiii
Simbologia	xiv
Grandezas Físicas	xv
Sumário	xvi
CAPÍTULO 1	
1 – Introdução Geral	1
CAPÍTULO 2	
2 – Qualidade da Energia Elétrica	3
CAPÍTULO 3	
3 – Influência das Cargas Não-Lineares na Qualidade da Energia Elétrica	6
3.1 – Carga Linear	11
3.2 – Carga Não-Linear	11
3.3 – Distorção Harmônica	12

Sumário

3.3.1 – Distorção Harmônica de Tensão e Corrente.....	13
3.3.2 – Distorção Harmônica Total – DHT	14
3.4 – Fator de Potência.....	15
3.4.1 – Fator de Potência: Carga Resistiva Linear e Tensão Não-Senoidal	16
3.4.2 – Fator de Potência: Carga Não Linear e Tensão Senoidal	17
3.5 – Fator de Distorção	18
3.6 – Fator de Deslocamento.....	18
3.7 – Normas para Fator de Potência e Distorção Harmônica	19
3.7.1 - Norma Nacional – Portaria DNAEE 1569	19
3.7.2 - Norma IEC 61000-3-2.....	20
3.7.3 - Norma IEEE/ANSI – 519.....	24
3.8 – Conclusões	26

CAPÍTULO 4

4 – Métodos de Modelagem e Análises.....	28
4.1 – Modelagem Probabilística.....	29
4.2 – Modelagem Determinística.....	31
4.2.1 – Simulação no Domínio da Frequência.....	32
4.2.1.1 – Método Matriz Admitância	32
4.2.1.2 – Método de Iteração harmônica	34
4.2.1.3 – Método Algoritmo Newtoniano	36
4.2.1.4 – Modelo de Thévenin e Norton.....	37
4.2.1.4.1 – Teorema de Thévenin	37
4.2.1.4.2 – Teorema de Norton.....	38
4.2.2 – Simulação no Domínio do Tempo.....	42
4.2.2.1 – Exemplo de Modelagem de um Sistema de Distribuição urbana	44
4.2.2.2 – Considerações sobre o Modelo de Norton.....	47
4.3 – Conclusões	49

CAPÍTULO 5

5 – Modelagem Proposta para Análise no Domínio do Tempo	52
--	-----------

Sumário

5.1 – Modelagem do Sistema Exemplo a ser Simulado em Ambiente Pspice.....	55
5.1.1 – Modelagem Proposta do transformador trifásico para simulação no Pspice	61
5.1.2 – Dados utilizados para simulação exemplo.....	65
5.2 – Resultados de Simulação	69
5.3 – Conclusões	74

CAPÍTULO 6

6 – Análise do desequilíbrio das tensões eficazes em função da perda do condutor neutro	76
6.1 – Análise do Crescimento das Cargas Não lineares.....	76
6.2 – Análise dos Resultados Obtidos.....	80
6.2.1 – Análise antes da abertura do condutor neutro	80
6.2.1.1 – Análise no ponto de concentração “S ₁ ”	83
6.2.1.2 – Análise no ponto de concentração “S ₂ ”	85
6.2.1.3 – Comparação das tensões e correntes nos diferentes pontos de concentração na fase r.....	86
6.2.2 – Análise comparativa após a abertura do condutor neutro.....	88
6.2.2.1 – Comparação das formas de ondas de tensão e corrente no ponto “S ₀ ”	91
6.2.2.2 – Comparação das formas de ondas de tensão e corrente no ponto “S ₁ ”	94
6.2.2.3 – Comparação das formas de ondas de tensão e corrente no ponto “S ₂ ”	97
6.2.3 – Análise dos desequilíbrios dos valores eficazes das tensões após a perda do condutor neutro	100

Sumário

6.2.4 – Conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente – Resolução 505	101
6.3 – Conclusão	104
 CAPÍTULO 7	
7 – Confrontação e validação da modelagem proposta.....	106
7.1 – Confrontação dos resultados de simulação em Pspice e EMTP - ATP	106
7.1.1 – Transformador trifásico saturável EMTP - ATP	109
7.1.2 – Análise das tensões processadas através do transformador em ambas as modelagens (Pspice – ATP)	111
7.1.3 – Análise das correntes processadas através do transformador em ambas as modelagens (Pspice – ATP).....	114
7.2 – Confrontação a partir de resultados obtidos com a modelagem e através de resultados experimentais	116
7.3 – Conclusão	122
 CAPÍTULO 8	
8 – Conclusão geral e proposta de continuidade.....	123
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127
 ANEXOS	
Anexo A – Concentração de cargas e redução do circuito – Rede Primária	130
Anexo B – Ramal Secundário utilizado como base para as simulações em Pspice	131
Anexo C – Diagramas do transformador (Δ - Y) modelado e ramal secundário.....	133
Anexo D – Diagrama do ramal modelado no programa EMTP – ATP (Draw)	135

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

O setor elétrico brasileiro experimenta nos últimos anos um crescimento a uma taxa de 4,5% anual. Este crescimento teve reflexo na indústria de energia elétrica onde o parque gerador de eletricidade foi aumentado de 11GW em 1970, para 30,2 GW em 1979 e para 82,5 GW em 2002 (a capacidade instalada hidráulica, de 65,3 GW em 2002, representava um pouco mais de 25% do potencial total brasileiro) [1]. Porém, este crescimento não tem acompanhado o crescimento da demanda no país, pois a abertura do comércio nacional para o exterior ampliou a escala de produção industrial e o cenário de cargas do país também sofreu uma forte influência deste fato.

Todo este crescimento seria muito mais animador se o setor elétrico não tivesse que enfrentar sérios dilemas para sua ampliação. Como a fonte primária, abundante no país, para a produção de energia elétrica é hídrica, discussões vêm acontecendo devido aos impactos ambientais causados pela construção de novos grandes lagos para o armazenamento de água.

Devido à escassez de algumas fontes primárias para a produção de energia, além das dificuldades e do alto custo para os investimentos na ampliação do setor elétrico brasileiro, um novo conceito de *Eficiência Energética* tem sido considerado, buscando um melhor aproveitamento de todo o parque energético nacional, incluindo a geração, transmissão e distribuição.

Além disto, o termo *Qualidade* tem sido aplicado em muitas áreas da sociedade atual. Este termo está intimamente relacionado com eficiência, ou seja, produzir mais em menor tempo e com resultados cada vez melhores. Este conceito vem sendo também perseguido no setor elétrico brasileiro, buscando uma melhor utilização da energia elétrica já disponível,

tendo em vista a grande dificuldade financeira do país para a expansão do parque de geração e transmissão, assim como o fator tempo para tal expansão.

Neste contexto, se justifica ainda mais a busca da racionalização na utilização da energia, aplicando-se também os conceitos de Qualidade de Energia.

Os conceitos de qualidade de energia envolvem os seguintes e principais índices de análise: eficiência (rendimento), distorções harmônicas (de tensões e correntes), fator de potência, variações transitórias (de tensão e frequência), variações de longa duração (de tensão), interrupções, afundamentos (de tensões), flicker, dentre outros.

Um outro fator que causa preocupação no setor elétrico brasileiro são as perdas, as quais são agravadas devido às extensas linhas de transmissão, sendo necessários estudos com o intuito de minimizá-las. Uma opção de solução para tais problemas foi a reconfiguração e interligação dos sistemas de transmissão. Contudo, a grande preocupação voltou-se para o novo perfil de carga presente no sistema brasileiro atual. Tais cargas, devido à característica não linear dos dispositivos utilizados na sua composição, provocam distorções nas tensões e correntes das barras de alimentação, desta forma causando grandes perturbações no sistema.

Portanto, este trabalho apresenta um novo modelo de transformador trifásico para simulação em ambiente Pspice, possibilitando analisar o fluxo harmônico e o comportamento de sistemas de distribuição em média e baixa tensão, utilizando uma modelagem multifilar, considerando-se a presença de carregamento fortemente não linear, devido ao elevado índice de crescimento das cargas não lineares, avaliando-se as distorções harmônicas de tensão em diversos pontos de acoplamento de cargas e os desequilíbrios das tensões trifásicas em baixa tensão quando da interrupção do condutor de neutro (perda do condutor neutro por acidente, operação indevida, excesso de carregamento ou deterioração natural).

CAPÍTULO 2

QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

A qualidade da energia elétrica é um assunto recente que foi introduzido no início da década de 80. Um alto nível de diferenças com respeito aos conceitos e índices para a qualidade da energia ainda existe, devido às diferentes normas da Comunidade Européia e Americana utilizarem diferentes índices, definições e níveis de perturbações aceitáveis.

O termo “qualidade” da energia, como em outras áreas e serviços, é difícil de se quantificar. Não há uma única definição específica para o termo “qualidade da energia”. Existem normas para tensões, correntes, interferências eletromagnéticas e outros critérios técnicos que podem ser medidos, mas a medição quantitativa da “qualidade da energia” é determinada pelo desempenho e produtividade do consumidor final. Se a energia elétrica não está adequada para utilização, então há falta de “qualidade” [2].

A falta ou a má qualidade, também conhecida como perturbações presentes no sistema elétrico, afetam distintamente as companhias energéticas, os consumidores, fabricantes de equipamentos e as agências de regulamentação governamentais. O novo conceito de “fluxo de poluição” é definido quando uma fonte pode poluir o sistema sem ser afetada, ao passo que uma outra que não causa nenhuma perturbação é afetada.

Os níveis de poluição e perturbação são altamente variáveis dependendo da hora do dia, o dia da semana, estação climática e condições ambientais, devido ao perfil de carga predominante em cada período. Um outro conceito importante é a *zona vulnerável*, dentro da qual, problemas de qualidade da energia podem ser detectados, talvez a quilômetros de distância da fonte poluidora.

Distúrbios causados por sistemas de iluminação, curtos-circuitos e sobrecargas bruscas, sempre existiram no sistema elétrico, porém, os equipamentos do passado eram geralmente mais simples e assim mais robustos, sendo ainda menos sensíveis à pequenas variações da alimentação. Hoje, com o grande avanço da eletrônica, os equipamentos tornaram-se mais sensíveis e para que tenham seu desempenho pleno, se faz necessário garantir uma alimentação com uma energia de boa qualidade ou investir em melhorias dos equipamentos, tornando-os mais robustos, logo, podendo admitir uma alimentação de pior qualidade.

A poluição da energia tem sido inserida no sistema elétrico através de cargas não lineares, como por exemplo, transformadores com núcleos saturados. Porém, a taxa de perturbação jamais alcançou os níveis atuais (2005). A maior parte dos fenômenos de poluição são causados por características não lineares e elevadas frequências de chaveamento em dispositivos da eletrônica de potência.

Hoje em dia, mais de 20% da energia é processada pela eletrônica de potência. Estima-se que esta porcentagem alcance de 50% a 60% até o ano de 2010, devido principalmente ao rápido crescimento da capacidade de processamento em frequências cada vez mais elevadas [3].

O termo qualidade da energia está se tornando mais forte no mercado porque os equipamentos sensíveis à qualidade da energia estão mais abertos à competição de mercado. Além deste fato, os equipamentos continuam poluindo o sistema mais e mais, devido ao custo adicional conseqüente do projeto de compensação e também devido à falta de regulamentações mais rigorosas. Estes equipamentos, sensíveis à poluição e ao mesmo tempo causadores de “poluição”, estão sendo usados em muitas aplicações não somente na indústria, mas praticamente em todas as áreas das atividades humanas. Sendo assim, eficiência e custo são analisados quase ao mesmo nível de significância nos dias atuais.

Diante deste contexto, conforme [2], podemos resumir algumas razões para a crescente preocupação sobre a qualidade da energia presente no sistema elétrico:

- Os equipamentos estão mais sensíveis às variações da qualidade da energia por conterem controladores microprocessados e dispositivos da eletrônica de potência, diferentes daqueles equipamentos do passado;
- A crescente ênfase da eficiência de um modo geral no sistema elétrico vem resultando em um crescimento contínuo na aplicação de dispositivos tais como os controladores de velocidade de motores de alta eficiência e capacitores shunt, colocados para a correção do fator de potência, com a finalidade de reduzir os custos da energia. Isto faz com que os níveis harmônicos sejam cada vez maiores, levando à necessidade de se realizar estudos sobre futuros impactos na capacidade do sistema;
- Os consumidores finais têm adquirido uma maior ciência sobre as questões da qualidade de energia, tornando-se mais bem informados sobre itens como interrupções, sags e transitórios de chaveamento. Com estes conhecimentos, estão exigindo das companhias distribuidoras de energia, uma melhora na qualidade da energia por elas entregue;
- Existem muitas interconexões no sistema. Esta integração significa que a falha de qualquer componente tem consequência muito mais importante no sistema interligado.

Neste contexto, no capítulo a seguir, analisar-se-ão os principais efeitos nos sistemas elétricos, devido à presença de cargas não lineares, e, como estes efeitos deterioram a qualidade da energia.

CAPÍTULO 3

A INFLUÊNCIA DAS CARGAS NÃO LINEARES NA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

A qualidade da energia elétrica é definida através de índices diversos, sendo estes devido a qualquer ocorrência de anormalidade manifestada nas amplitudes da tensão, corrente ou na frequência que resulte em danos, perturbações, falhas ou má operação dos equipamentos conectados ao mesmo barramento de suprimento de energia. Muitas das questões de qualidade da energia estão intimamente ligadas aos dispositivos e estruturas que se utilizam da eletrônica de potência.

Com a disponibilização comercial dos semicondutores de estado sólido em meados de 1950, foi possível o desenvolvimento de uma ampla família de dispositivos de condução controlada. Os elementos semicondutores têm propriedades de condução gradual e outros de controle de entrada em condução e bloqueio (on/off), que têm permitido a possibilidade de utilização de elevadas frequências, em função de suas elevadas velocidades de comutação. Estes dispositivos têm possibilitado um vasto número de aplicações residenciais, comerciais e industriais. As famílias dos dispositivos semicondutores de potência, a partir dos diodos e tiristores, tiveram grande evolução não somente com relação aos níveis de tensão e corrente suportáveis/processáveis, como também na compactação, redução de perdas em condução, operação em elevadas temperaturas e frequências de chaveamento de centenas de kHz (MOSFETs de potência).

Na figura 3.1 apresenta-se um exemplo de uma estrutura muito simples, retificador monofásico de meia onda a diodo e com filtro capacitivo, para ilustrar os aspectos de qualidade da corrente elétrica drenada da fonte de alimentação.

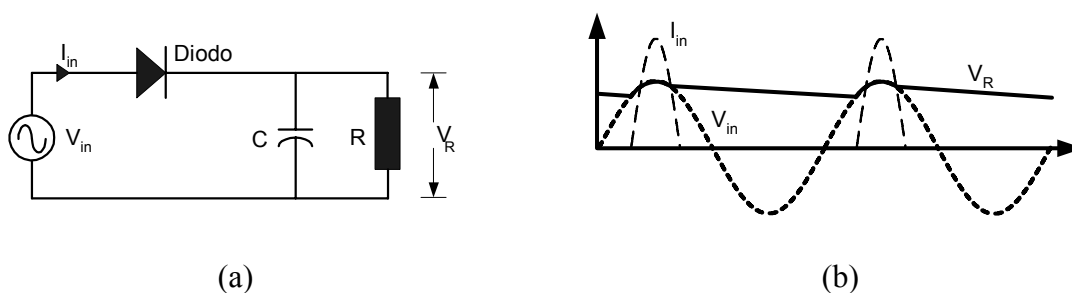


Fig. 3.1 (a) Retificador monofásico a diodo, (b) principais formas de onda.

Pode-se observar na figura 3.1 (b) a forma de onda da corrente de entrada “ I_{in} ” com característica não senoidal, o que pode produzir uma queda de tensão no barramento de alimentação, no ponto de acoplamento, afetando outros consumidores que estejam conectados ao mesmo barramento. Além disso, a distorção da corrente e da tensão dependerá da carga conectada, a qual poderá ser amplamente variável.

A extensão do mesmo fenômeno a equipamentos mais complexos e de alta potência, utilizados nos dispositivos controladores de velocidade, modulados por largura de pulso (PWM), dentre outras aplicações, explicam as distorções das tensões geradas nos sistemas elétricos, atualmente. Um outro aspecto fundamental é que estes dispositivos/equipamentos que se utilizam da eletrônica de potência são normalmente projetados para trabalhar em sistemas com “energia limpa”, uma vez que poderá ocorrer um mau funcionamento quando a tensão de alimentação dos mesmos não é puramente senoidal.

Os equipamentos listados a seguir representam alguns dos muitos tipos de equipamentos presentes no cenário elétrico brasileiro, que se utiliza de dispositivos de eletrônica de potência.

- **Equipamentos residenciais:**

Baixa potência: *Televisores, aparelhos de som, vídeo cassetes, fornos de microondas, microcomputadores, sistemas iluminação, máquinas de lavar roupas (sem aquecimento), refrigeradores, etc...*

Média potência: *Condicionadores de ar, máquinas de lavar (pratos, roupas/com aquecimento), aquecedores, secadora de roupas, etc...*

- **Equipamentos comerciais:**

Baixa potência: *Estações de trabalho, microcomputadores, fotocopiadoras, impressoras, sistemas de iluminação, etc...*

Média potência: *Sistemas de aquecimento e refrigeração, etc...*

- **Equipamentos Industriais:**

Baixa potência: *Estações de trabalho, microcomputadores, Controladores Lógicos programáveis (CLPs), sistemas de automação e processadores de dados.*

Média e Alta potência: *Acionamentos elétricos controlados, Soft-starters, retificadores, inversores, fontes de alimentação, carregadores de baterias, sistemas de soldagem, etc...*

- **Outros equipamentos:**

Média potência: *Equipamentos médicos de alta tecnologia (máquinas de tomografia computadorizada, máquinas de raio-X), aparelhos de som profissionais, iluminação pública (Lâmpadas a vapor de Mercúrio ou Sódio), etc...*

Tais equipamentos, para que seus custos de produção se tornem menores e mais competitivos, muitas vezes, são produzidos sem dispositivos que minimizem o conteúdo

harmônico das correntes drenadas do sistema de energia em corrente alternada (filtros harmônicos).

Com o grande avanço da tecnologia de dispositivos de eletrônica de potência e sua grande difusão no sistema elétrico, como exemplificado através das cargas anteriormente relacionadas, a eletrônica de potência possibilitou um maior conforto e eficiência. Porém, esse avanço tem se tornado um dos principais responsáveis por fontes harmônicas e inter-harmônicas, notches de tensão, correntes de neutro, dentre outros problemas nos sistemas elétricos [4].

Neste contexto, são apresentados a seguir, alguns dos principais tipos de “poluições” (perda de qualidade) presentes nos sistemas elétricos, em função da atuação/funcionamento de cargas não lineares que envolvem dispositivos de eletrônica de potência.

- **Harmônicas**

Consistem em componentes senoidais de uma forma de onda periódica com frequências múltiplas e inteiras da frequência fundamental. Normalmente, são geradas por cargas não lineares tais como: retificadores, controladores de velocidade, soft-starters, lâmpadas com reatores eletrônicos, fontes chaveadas e transformadores saturados.

Os principais equipamentos afetados pelas harmônicas são transformadores, motores, cabos, interruptores, capacitores (ressonância), equipamentos eletro-eletrônicos, etc....

- **Inter-harmônicas**

Componentes senoidais de uma forma de onda periódica as quais não são múltiplos inteiros da frequência fundamental. As inter-harmônicas são produzidas por conversores de frequência estáticos, ciclo-conversores, motores de indução, dispositivos de solda a arco, etc...

- **Afundamento de Tensão - “Notch”**

Distúrbio de chaveamento na forma de onda da tensão de alimentação, com duração menor de 0,5 ciclo, o qual inicialmente tem polaridade oposta à tensão na carga e assim se

subtrai da tensão de pico, causando uma momentânea queda no valor instantâneo da tensão. Dispositivos da eletrônica de potência, principalmente retificadores a tiristores, são causadores de “notch”, quando a corrente é comutada de uma fase para a outra, caracterizando-se como um curto-circuito momentâneo entre as duas fases envolvidas. Afetam principalmente os dispositivos de controle eletrônico.

- **Voltage Sag – Afundamento de tensão**

Redução do valor eficaz da tensão, na frequência do sistema com duração de 0,5 ciclo a 3600 ciclos. Estes afundamentos de tensão são originados devido a partidas de reatores para iluminação, fontes chaveadas, curtos-circuitos, sobrecargas repentinas, etc.

- **Correntes de neutro**

São produzidas por equipamentos que utilizam fontes chaveadas, tais como impressoras, fotocopiadoras, microcomputadores, etc. Devido estes equipamentos terem na entrada uma fonte de alimentação chaveada a qual gera significantes níveis de harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordens; as harmônicas *Triplens* (triplas), que são ordens harmônicas ímpares múltiplas de três vezes a fundamental, por serem de seqüência zero, e, considerando um sistema trifásico equilibrado, se somam no condutor neutro, provocando sobrecarregamento neste condutor. Este sobrecarregamento afeta seriamente a temperatura do condutor neutro, podendo levar ao seu rompimento.

A corrente de neutro será um dos itens de maior relevância de análise neste trabalho, pois, o principal objetivo desta pesquisa é verificar a influência das cargas não lineares nos sistemas de distribuição a quatro fios, contemplando a análise do carregamento do condutor neutro.

Como o sistema elétrico é composto de cargas lineares e não lineares, apresenta-se a seguir uma definição, em função das formas de onda destas cargas e exemplos para as mesmas [5].

3.1 - Carga Linear

Carga elétrica a qual, em regime de operação, apresenta uma impedância de carga essencialmente constante à alimentação durante o ciclo da tensão aplicada. As cargas lineares são compostas por elementos passivos tais como resistores, capacitores e indutores ou a associação dos mesmos. Estes elementos não deformam a forma de onda da tensão, ou seja, a forma de onda da corrente é um espelho da forma de onda da tensão, podendo haver uma defasagem angular quando da presença de elementos indutivos e/ou capacitivos, porém, não há distorção harmônica.

Na figura 3.2 apresentam-se exemplos de cargas lineares e suas formas de onda de correntes drenadas do sistema de alimentação, verificando-se as distorções nulas nas mesmas.

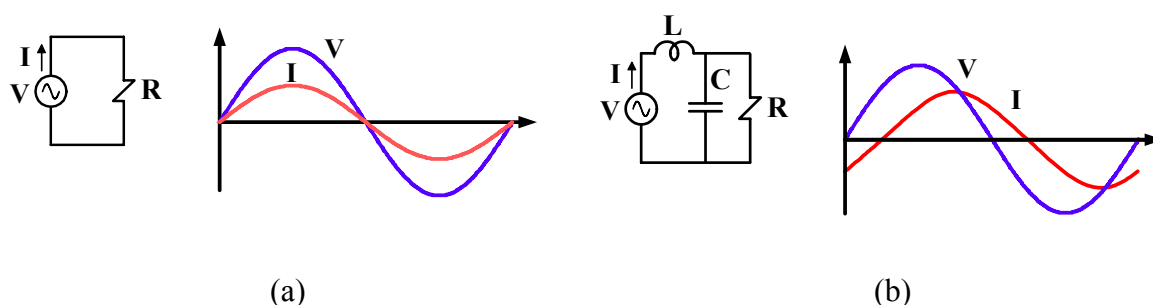


Fig. 3.2 – Cargas Lineares: (a) carga puramente resistiva, (b) carga em associação RLC.

3.2 - Carga Não Linear

Carga elétrica que drena 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 alternada de entrada. As cargas não lineares são constituídas de dispositivos de eletrônica de potência, elementos interruptores, compostas por elementos “semicondutores” ativos (interruptores comandados) e/ou passivos (diodos) e/ou elementos R–L–C passivos (armazenadores de energia, ou, não).

Na figura 3.3 apresenta-se um exemplo de carga não linear, retificador, monofásico de onda completa a diodos e filtro capacitivo, assim como a forma de onda da corrente drenada do sistema de alimentação, verificando-se o comportamento não senoidal da mesma e sua elevada distorção em relação à tensão senoidal de alimentação.

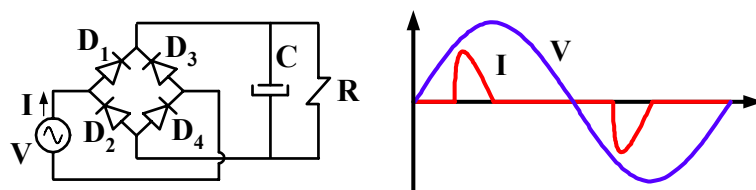


Fig. 3.3 – Exemplo de carga não linear

3.3 - Distorção harmônica

Dentre os distúrbios e a qualificação de um padrão de qualidade de energia, a sub-área *harmônicos* encontra-se numa posição de destaque. De fato, em se tratando de um sistema elétrico, as tensões de alimentação devem, por contrato, serem perfeitamente senoidais. No entanto, esta condição ideal jamais será encontrada na prática, visto que as tensões e as correntes encontram-se distorcidas. Este desvio é usualmente expresso em termos das *distorções harmônicas* de tensão e corrente, as quais são normalmente causadas pela operação de cargas com características não lineares [6].

Qualquer forma de onda distorcida, periódica, pode ser expressa como uma somatória de senoides. Ou seja, quando uma forma de onda é idêntica a cada ciclo, ela pode ser representada como uma somatória de ondas senoidais puras na qual a frequência de cada senoide é um múltiplo inteiro da frequência fundamental da onda distorcida. A este múltiplo dá-se o nome de *harmônica* da fundamental [2].

A figura 3.4 ilustra uma forma de onda distorcida e sua composição através da série de Fourier.

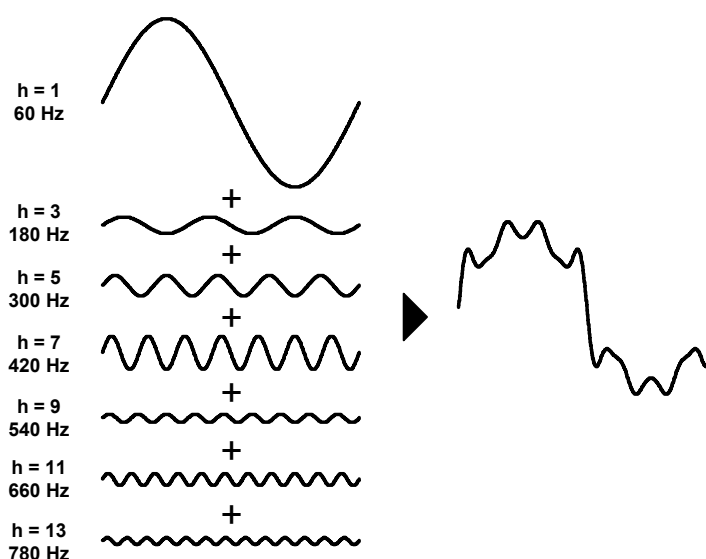


Fig. 3.4 – Composição da forma de onda distorcida

Através da figura 3.4 observa-se que fazendo a somatória das harmônicas ímpares, da 1ª até a 13ª, e, considerando nulo o defasamento entre as senoides, obtém-se a forma de onda distorcida à direita. Quando ambos os ciclos, positivo e negativo, de uma forma de onda têm formas idênticas, a série de Fourier contém somente harmônicas *ímpares*. Este conceito resulta em uma maior simplificação na análise da maior parte dos sistemas elétricos, pois, a maioria dos equipamentos causadores de distorção possui a mesma forma tanto para o ciclo positivo quanto para o negativo.

3.3.1 - Distorção harmônica de tensão e corrente

Cargas não lineares, devido às suas características intrínsecas, podem ser representadas como fontes de correntes harmônicas em paralelo com o sistema elétrico. A distorção da tensão é o resultado das correntes distorcidas fluindo pelas impedâncias séries, lineares, do

sistema elétrico e a quantidade de distorção da tensão é resultante destas impedâncias e da corrente.

Como as correntes harmônicas são as causadoras de distorções na tensão, observa-se que a carga não tem controle sobre a distorção da tensão. A mesma carga, em pontos de acoplamento diferentes, resulta em valores de distorções de tensão diferentes. Devido a este fato, a norma IEEE 519-1992 divide as responsabilidades do controle harmônico, considerando [7]:

(a) – O controle da quantidade de corrente harmônica injetada no sistema é feito no ponto de acoplamento da carga.

(b) – Se a injeção de corrente harmônica está dentro de limites aceitáveis, o controle sobre a distorção da tensão é exercido pela companhia elétrica responsável pelo sistema elétrico, fazendo-se o controle sobre a impedância do sistema.

3.3.2 - Distorção Harmônica Total - DHT

Uma das formas mais conhecidas de se indicar o conteúdo harmônico de uma forma de onda, através de uma unidade quantitativa, é a DHT (Distorção Harmônica Total), a qual pode ser calculada para tensão ou corrente. A DHT é a relação entre o valor eficaz da forma de onda sem a componente fundamental, pelo valor eficaz da fundamental. O cálculo da DHT de uma forma de onda de corrente pode ser efetuado através da equação (3.1).

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n_{\max}} I_n^2}}{I_1} \quad (3.1)$$

Onde:

I_n é o valor eficaz da componente de corrente harmônica de ordem n .

A DHT é uma medida de valor *efetivo* das componentes harmônicas de uma forma de onda distorcida, relativo à componente fundamental, sendo um índice muito útil para muitas aplicações, mas devem-se observar suas limitações.

As tensões harmônicas são quase sempre referenciadas ao valor fundamental da forma de onda no momento da amostra. Devido à faixa de variação de tensão estabelecida pela norma IEEE-519 variar em poucos porcentos (5%), a DHT da tensão é quase sempre um número significativo quanto sua influência no sistema elétrico [7]. No entanto, uma corrente de pequena amplitude poderá ter uma elevada DHT, mas não ser uma “ameaça” para o sistema elétrico [2, 8, 9].

3.4 - Fator de Potência

Para uma eficiente transmissão de energia da fonte para a carga, é desejável maximizar a Potência Média, com a minimização dos valores eficazes de tensão e corrente (portanto, minimizando-se as perdas) [8, 9].

O fator de potência é uma figura de mérito que avalia a eficiência na transmissão de energia entre a fonte e a carga. Ele é definido como:

$$\text{Fator de Potência} = \frac{(\text{Potência Média})}{(\text{Tensão Eficaz}) \cdot (\text{Corrente Eficaz})} \quad (3.2)$$

O fator de potência sempre terá um valor entre zero e um. O caso ideal, fator de potência unitário, ocorre para uma carga que obedeça a lei de Ohm. Neste caso, as formas de ondas de tensão e corrente têm o mesmo formato, contêm o mesmo espectro harmônico e estão em fase.

3.4.1 - Fator de Potência: Carga Resistiva Linear e Tensão Não-Senoidal

No caso de carga resistiva e tensão não-senoidal, as correntes harmônicas estão em fase e são proporcionais às tensões harmônicas. Portanto, todas as harmônicas contribuem para a energia transmitida para a carga, como mostram as equações (3.3) até (3.10).

$$I_n = \frac{V_n}{R} \quad (3.3)$$

$$\theta_n = \varphi_n \quad \text{assim} \quad \cos(\theta_n - \varphi_n) \quad (3.4)$$

$$\text{Tensão Eficaz} = \sqrt{V_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_n^2}{2}} \quad (3.5)$$

$$\text{Corrente Eficaz} = \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_n^2}{2}} = \sqrt{\frac{V_0^2}{R^2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_n^2}{2R^2}} \quad (3.6)$$

$$\text{Corrente Eficaz} = \frac{1}{R} (\text{Tensão Eficaz}) \quad (3.7)$$

Onde: V_0 e I_0 são possíveis valores médios existentes na tensão e corrente, respectivamente.

Assim, a potência média é:

$$P_{med} = V_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_n I_n}{2} \cos(\varphi_n - \theta_n) \quad (3.8)$$

$$P_{med} = \frac{V_0^2}{R} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_n^2}{2R} \quad (3.9)$$

$$P_{med} = \frac{1}{R} (\text{Tensão Eficaz})^2 \quad (3.10)$$

Ao substituímos as equações (3.7) e (3.10) na equação (3.2), o fator de potência será unitário, independente do conteúdo harmônico da tensão. A equação da Potência Média também pode ser obtida através da equação (3.11).

$$P_{med} = V_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_n I_n}{2} \cos(\varphi_n - \theta_n) \quad (3.11)$$

3.4.2 - Fator de Potência: Carga Não Linear, Tensão Senoidal

Se a tensão não possui componente CC (valor médio) ou harmônicas, sendo $V_0 = V_2 = V_3 = \dots = 0$, então as harmônicas de corrente não contribuem para a Potência Média, assim:

$$P_{med} = \frac{V_1 I_1}{2} \cos(\varphi_1 - \theta_1) \quad (3.12)$$

Porém, as harmônicas de corrente afetam o valor *eficaz* da corrente, como mostra a equação a seguir (3.13).

$$I_{eficaz} = \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_n^2}{2}} \quad (3.13)$$

Assim, as harmônicas de corrente aumentam o valor da Eficaz da Corrente, mas não a Potência Média, reduzindo o fator de potência. As correntes harmônicas não contribuem para a energia na carga, mas causam perdas adicionais nos elementos resistivos em série. A presença de cargas dinâmicas e elementos reativos, os quais causam defasamento entre as componentes fundamentais da tensão e corrente ($\theta_1 \neq \varphi_1$), resultam também numa redução do fator de potência.

Substituindo-se as equações (3.12) e (3.13) na equação (3.2), tem-se o fator de potência para o caso de tensão puramente senoidal e carga não-linear, conforme a equação (3.14).

$$\text{Fator de Potência} = \left(\frac{\frac{I_1}{\sqrt{2}}}{\sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_n^2}{2}}} \right) \cdot (\cos(\varphi_1 - \theta_1)) \quad (3.14)$$

$$\text{Fator de Potência} = \text{Fator de distorção} \cdot \text{Fator de deslocamento}$$

3.5 - Fator de Distorção

É a relação entre o valor eficaz da componente fundamental pelo valor eficaz (total) da corrente, como mostra a equação (3.15).

$$\text{Fator de distorção} = \left(\frac{\frac{I_1}{\sqrt{2}}}{\sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_n^2}{2}}} \right) = \frac{(\text{Valor Eficaz da Fundamental da corrente})}{(\text{Valor Eficaz da Corrente})} \quad (3.15)$$

3.6 - Fator de Deslocamento

É a defasagem entre as tensões e correntes, ou seja, é o cosseno do ângulo entre as componentes fundamentais das formas de onda das tensões e correntes, conforme equação (3.16).

$$\cos = (\varphi_1 - \theta_1) \quad (3.16)$$

3.7 - Normas para Fator de Potência e Distorção Harmônica

Em função do elevado incremento do processamento eletrônico da energia elétrica, principalmente nos países mais desenvolvidos, normas foram elaboradas para impor limites aos conteúdos harmônicos de correntes e tensões do sistema elétrico. Algumas organizações adotam padrões que limitam as magnitudes de correntes harmônicas que uma carga pode injetar (drenar) no sistema. Dentre os padrões adotados, destacam-se aqueles da IEC (International Electrotechnical Commission) e do IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), por serem adotados a nível internacional.

3.7.1 - Norma Nacional – Portaria DNAEE 1569

É importante observar que uma considerável quantidade de cargas, atualmente presentes nos sistemas de distribuição do país, apresenta um reduzido fator de potência e uma elevada taxa de distorção harmônica para as correntes.

A regulamentação Nacional – Portaria DNAEE 1569, estabelece para o Fator de Potência das instalações elétricas consumidoras um valor mínimo de 0,92 ($FP_{min} = 0,92$), sendo que não há limites para as harmônicas individuais de corrente em circulação através do sistema elétrico. Esta regulamentação estabelece que o cálculo para o Fator de Potência deve ser realizado por Média Horária (ou mensal). O limite para o consumo de Reativos é de 0,425VARh por cada Wh, e a sobretaxa sobre o consumo ocorrerá se no intervalo das 6hr até às 24hr a energia reativa consumida for indutiva, e, das 0hr até às 6hr se for capacitiva.

Como analisado, as harmônicas contribuem para o aumento da corrente eficaz, elevando a potência aparente, sem produzir potência ativa (considerando-se tensões de alimentação senoidais). Desta forma, a correta medição do FP deve levar em conta a DHT

(Distorção Harmônica Total) da corrente, e não apenas a componente reativa na frequência fundamental [8].

3.7.2 – Norma IEC 61000-3-2

O primeiro projeto de normas adotado pela IEC foi em 1982 (IEC 555-2), as quais têm passado por algumas revisões, sendo atualmente denominadas de IEC 61000-3-2, para aplicações em dispositivos com correntes, por fase, inferiores a 16A(eficazes), e, IEC 61000-3-12₁, para correntes inferiores a 75A(eficazes) por fase. As IECs são normas utilizadas na Europa (toda a comunidade europeia), sendo um padrão para equipamentos comerciais, residenciais e industriais a serem vendidos mundialmente. Diversos outros países também adotam as IECs, tais como a Austrália, Japão e Canadá. Infelizmente, o Brasil, apesar de adotar algumas IECs, especificamente para conteúdos harmônicos nas correntes drenadas dos sistemas de corrente alternada, não adota as IEC61000-3-2 e IEC61000-3-12₁, como informado anteriormente.

A norma IEC 61000-3-2, versão ano 2000 [10], atualmente em vigência, cobre um número de diferentes tipos de equipamentos de baixa potência, com diferentes limites harmônicos. Ela limita especificamente harmônicas para equipamentos com correntes de até 16A(eficazes), por fase, conectados em redes de 50Hz ou 60 Hz, monofásicos ou trifásicos e conectados à rede pública de baixa tensão.

Existem quatro classes de equipamentos onde seus conteúdos harmônicos de correntes são restringidos em diferentes limites.

Classe A:

- Equipamentos com alimentação trifásica equilibrada;

- Equipamentos de uso residencial (exceto Classe D);
- Ferramentas (não portáteis);
- “Dimmers” para lâmpadas incandescentes;
- Equipamento de áudio.
- Todos os equipamentos não especificados em uma das outras três classes devem ser considerados como equipamentos de Classe A.

Os limites para os componentes harmônicos para esta classe são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1
IEC-61000-3-2 Limites para Correntes Harmônicas, Classe A (obs. Classe B x 1,5)

Harmônicas ímpares		Harmônicas pares	
Ordem (<i>n</i>)	Máxima corrente	Ordem (<i>n</i>)	Máxima corrente
3	2,30 A	2	1,08 A
5	1,14 A	4	0,43 A
7	0,77 A	6	0,30 A
9	0,40 A	$8 \leq n \leq 40$	$0,23 \text{ A} \cdot (8/n)$
11	0,33 A		
13	0,21 A		
$15 \leq n \leq 39$	$0,15 \text{ A} \cdot (15/n)$		

Classe B: Equipamentos portáteis. Os limites para esta classe são os da tabela 3.1, multiplicados por 1,5.

Classe C: Equipamentos para iluminação.

- a) Equipamentos com potência de entrada maior do que 25 W:

As correntes harmônicas não podem exceder os limites apresentados na tabela 3.2.

Se o sistema de iluminação (com lâmpadas à descarga) tem um dispositivo “dimmer” (dispositivo que causa variação da intensidade luminosa emitida), aplica-se as seguintes condições:

- Os valores de corrente harmônica para a condição de carga máxima, obtidos a partir dos limites em porcentagem dados na tabela 3.2, não devem ser excedidos;
- Em qualquer posição de variação do “dimmer”, a corrente harmônica não deve exceder o valor da corrente permitida na condição de carga máxima.
- Os equipamentos devem ser testados de acordo com as condições estabelecidas pela norma no item C.5 (Test conditions for Lighting Equipment).

Estas condições também se aplicam para lâmpadas de descarga com “dimmers” independentes ou inclusos no equipamento.

b) Equipamentos com potência de entrada menor ou igual a 25 W:

Equipamentos de iluminação com potência de entrada menor ou igual a 25 W devem atender umas das duas seguintes exigências:

- As correntes harmônicas não devem exceder os limites de potência da tabela 3.3, coluna 2 (os limites mínimos de 75W, ou 50W, da Classe D não se aplicam), ou;
- A corrente de terceira harmônica, expressa em porcentagem da corrente fundamental, não deve exceder 86% e a quinta não deve exceder 61%; ainda, a corrente de entrada não deve ser tal que comece a fluir antes ou em 60° , tenha seu último pico (se existir vários picos a cada meio período) antes ou em 65° e não pare de fluir antes de 90° , onde o cruzamento pelo zero da tensão de alimentação é considerado como 0° .

Se o equipamento possui um dispositivo “dimmer” intrínseco, a medição é feita somente para carga nominal.

Tabela 3.2
IEC-61000-3-2 Limites Harmônicos de Corrente, Classe C

Ordem (n)	Máxima corrente, em % da fundamental
2	2 %
3	(30%) · (Fator de Potência)
5	10 %
7	7 %
9	5 %
$15 \leq n \leq 39$ (somente ordens ímpares)	3 %

Classe D: Equipamentos com uma forma de onda de corrente de entrada “especial” e contida na envoltória da figura 3.5, com uma potência ativa de entrada menor ou igual a 600W. Nesta classe estão os computadores pessoais, monitores e equipamentos de televisão. Para classificar como classe D, a corrente de entrada, em cada semiperíodo, deve se encontrar dentro da envoltória em pelo menos 95% do semiperíodo. Observa-se que o centro desta envoltória coincide com o pico da forma de onda da corrente de entrada.

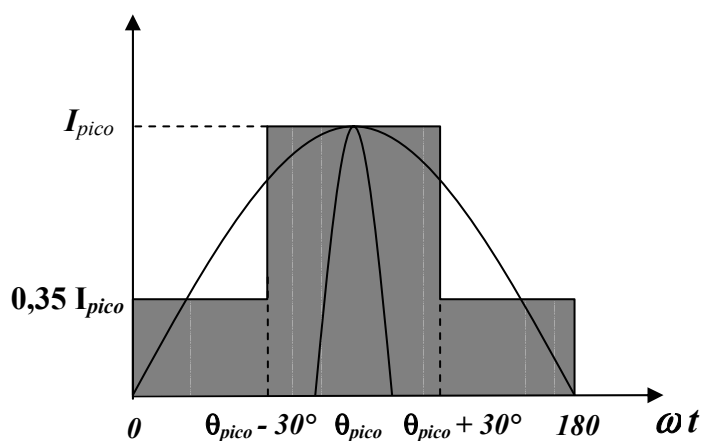


Fig. 3.5 Variação da corrente de pico em função do ângulo θ

Os limites para os equipamentos da Classe D são definidos para condição de carga nominal. As harmônicas da corrente de entrada não devem exceder os valores da tabela 3.3.

Os limites dados na tabela 3.3 são válidos para todas as aplicações com potência de entrada maior do que 75 W. Não há limites para equipamentos com potências de entrada menores do que 75 W. Este limite mínimo deve ser reduzido para 50 W, após quatro anos de vigência desta norma [9].

Tabela 3.3
IEC-61000-3-2 – Limites harmônicos de corrente, Classe D

Ordem harmônica (n)	Corrente harmônica máx. permitida por watt (mA/W)	Corrente harmônica máx. permitida (A)
3	3,4	2,30
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,5	0,40
11	0,35	0,33
$13 \leq n \leq 39$ (somente ordens ímpares)	$3,85/n$	Vide Tabela 3.1

3.7.3 – Norma IEEE/ANSI – 519

A norma IEEE/ANSI – 519 traz limites de amplitudes para harmônicas das correntes os quais são baseados em relação entre a fundamental da corrente de carga e a corrente de curto-circuito no Ponto Comum de Acoplamento (PAC).

A filosofia é distinta da IEC e fundamenta-se em que não interessa ao sistema o que ocorre dentro de uma instalação, mas sim, o que ela reflete para o exterior, ou seja, para os demais consumidores conectados à mesma rede de alimentação. Os limites diferem de acordo com o nível de tensão e com o nível de corrente de curto-circuito (I_{CC}). Obviamente, quanto maior a corrente de curto-circuito (I_{CC}) em relação à corrente da carga (I_L), maiores serão os limites admissíveis, pois os mesmos afetarão menos a tensão no PAC. Os limites de corrente estabelecidos pela IEEE – 519 são apresentados na tabela 3.4 para níveis de tensão até 69kV, na tabela 3.5 para níveis de tensão de 69,001kV até 161kV e na tabela 3.6 para níveis de tensão maiores do que 161kV, respectivamente [6].

Tabela 3.4

IEEE – 519 Máximo Limite para Harmônicos ímpares em Sistemas de Distribuição em geral, de 120V até 69kV

I_{CC}/I_L	$n = \text{ordem harmônica}$					
	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n$	DHT
< 20	4,0%	2,0%	1,5%	0,6%	0,3%	5,0%
20 – 50	7,0%	3,5%	2,5%	1,0%	0,5%	8,0%
50 – 100	10,0%	4,5%	4,0%	1,5%	0,7%	12,0%
100 - 1000	12,0%	5,5%	5,0%	2,0%	1,0%	15,0%
1000	15,0%	7,0%	6,0%	2,5%	1,4%	20,0%

Tabela 3.5

IEEE – 519 Máximo Limite para Harmônicos ímpares em Sistemas de Distribuição, de 69,001kV até 161kV

I_{CC}/I_L	$n = \text{índice harmônico}$					
	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n$	DHT
<20	2,0%	1,0%	0,75%	0,3%	0,15%	2,5%
20-50	3,5%	1,75%	1,25%	0,5%	0,25%	4,0%
50-100	5,0%	2,25%	2,0%	0,75%	0,35%	6,0%
100-1000	6,0%	2,75%	2,5%	1,0%	0,5%	7,5%
>1000	7,5%	3,5%	3,0%	1,25%	0,7%	10,0%

Tabela 3.6

IEEE – 519 Máximo Limite para Harmônicos ímpares em Sistemas de Distribuição de Alta Tensão (> 161kV) e Sistemas de Geração e Co-geração isolados.

I_{CC}/I_L	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n$	DHT
< 50	2,0 %	1,0 %	0,75 %	0,3 %	0,15 %	2,5 %
≥ 50	3,0 %	1,5 %	1,15 %	0,45 %	0,22 %	3,75 %

Observação: As componentes PARES são limitadas a 25 % dos valores das Tabelas 3.4, 3.5 e 3.6.

A IEEE 519 estabelece ainda limites de Distorção Harmônica de Tensão listados na tabela 3.7.

Tabela 3.7

IEEE – 519 Limites de Distorção da Tensão

Tensão no PAC	Harmônicas Individuais	DHT _V
69kV e abaixo	3,0 %	5,0 %
69,001kV – 161kV	1,5 %	2,5 %
Acima de 161kV	1,0 %	1,5 %

A norma designa às Companhias de Energia Elétrica a responsabilidade do cumprimento das restrições impostas pela Tabela 3.7.

3.8 – CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou uma breve introdução sobre dispositivos do domínio da eletrônica de potência, no contexto da qualidade de energia. Destacou-se a forte influência destes dispositivos processadores de energia elétrica nos conteúdos harmônicos de correntes e tensões do sistema elétrico. Um fator relevante a ser destacado é que devido à forma operacional do processamento da energia através dos dispositivos de eletrônica de potência, quase sempre resulta em distorções harmônicas de correntes e tensões nos sistemas de corrente alternada (“fontes de poluição”), e, adicionalmente, tais dispositivos, para seu bom desempenho, necessitam de uma alimentação isenta de distorções (“de boa qualidade”), devido suas sensibilidades às variações das tensões e/ou frequências do sistema.

Foram apresentadas algumas das principais cargas presentes nos sistemas elétricos de distribuição, os diversos tipos de “poluições” por elas causadas, bem como seus efeitos no sistema elétrico. Um dos problemas que se destaca, e que será ênfase deste trabalho, é a presença de correntes circulando pelo condutor neutro dos sistemas, devido à grande quantidade de cargas não lineares, conectada ao sistema de distribuição a quatro fios. Observa-se que as harmônicas ímpares múltiplas de três (triplens), se somam no condutor neutro, podendo se verificar elevadas correntes eficazes circulando pelo mesmo, o que, além de causar perdas adicionais, podem levar ao rompimento do condutor.

Para que se possa analisar um sistema elétrico de distribuição em BT (baixa tensão), torna-se necessário o conhecimento das cargas presentes no sistema elétrico, bem como suas características. Tais cargas são divididas em duas classes distintas, *cargas lineares* e *cargas não lineares*. Em busca de uma melhor compreensão de suas influências independentes, e, em associação, as formas de onda das correntes drenadas pelas cargas são decompostas em série

de Fourier, o que proporciona uma simplificação em sua análise, através do conteúdo harmônico, podendo-se assim estabelecer limites para cada ordem harmônica.

Foram apresentados também os equacionamentos utilizados nos cálculos de alguns dos índices para a análise de conformidade aos padrões estabelecidos por normas. As normas de maior destaque em âmbito internacional são as normas IEC 61000-3-2 e a IEEE 519, as quais estabelecem limites de distorção harmônica para diversas classes de equipamentos, níveis de corrente e tensão.

Para que análises dos sistemas elétricos possam ser executadas, incluindo-se a verificação de sua performance dinâmica e dos distúrbios causados pela presença de cargas não lineares, vários métodos de simulações numéricas/computacionais têm sido desenvolvidos. Tais métodos são apresentados, discutidos e comparados no capítulo que se segue.

CAPÍTULO 4

MÉTODOS DE MODELAGEM E ANÁLISES

Nos últimos anos o sistema elétrico brasileiro vem passando por algumas mudanças, dentre as quais se destacam as privatizações (geração, transmissão e distribuição), as reconfigurações do sistema, novos perfis de cargas, dentre outras.

Como o número de dispositivos de processamento eletrônico da energia elétrica, conectados ao sistema de potência tem aumentado de forma significativa, as conseqüentes correntes harmônicas injetadas/absorvidas e as resultantes distorções das tensões, podem se tornar um grande problema para a qualidade da energia. Assim sendo, a crescente ênfase na eficiência geral do sistema está causando um aumento contínuo na aplicação de capacitores shunt utilizados para a correção do fator de potência. Tais capacitores mudam as características da frequência do sistema no qual são inseridos, podendo resultar em ressonâncias que amplificam tensões harmônicas específicas e em significativas perturbações transitórias [11].

Para que o sistema elétrico e suas novas concepções sejam adequadamente analisadas, vários programas (softwares) vem sendo elaborados, com intuito de representar o sistema, de tal forma a proporcionar análises das condições de operação atuais, simulando-se possíveis soluções/correções para os atuais problemas, bem como a previsão da ocorrência de futuros.

Atualmente, varias técnicas estão sendo utilizadas as quais variam em termos da aquisição de dados, da complexidade de modelagem, dos problemas de formulação e dos algoritmos de solução [12].

A maior parte dos estudos de análise harmônica utiliza-se de aproximações determinísticas, devido às dificuldades (precisão) de representação dos componentes e cargas do sistema. Porém, quando o modo de operação das cargas é flutuante (altamente variável) e a análise envolve operações de múltiplos chaveamentos, as aproximações determinísticas já não contemplam tais situações, desta forma, aproximações probabilísticas deverão ser usadas.

4.1 – Modelagem Probabilística

A aplicação dos métodos probabilísticos para análise da distorção harmônica começou entre o fim da década de 60, início da década de 70, com uma simples análise baseada nos valores instantâneos de corrente [13]. Uma das primeiras tentativas de se usar a notação fasorial foi aplicada por Rowe em 1974 [14], onde se considerou a soma de uma série de correntes modeladas como fasores com amplitude e ângulo aleatórios. A suposição foi feita onde a amplitude fosse variável com densidade de probabilidade uniforme de zero até um valor de pico e o ângulo de fase de cada componente fosse variável de 0 até 2π . A análise de Rowe foi limitada à derivação das propriedades da somatória de correntes de um grupo de cargas não lineares. As propriedades da somatória de correntes foram obtidas simplificando-se as análises através da distribuição de Rayleigh [15].

Um importante aspecto a se considerar é a real natureza de variação das componentes harmônicas das correntes. A variação pode não ser totalmente aleatória, podendo haver um grau de comportamento determinístico. Através de medições realizadas durante 24 horas, num sistema elétrico, demonstra-se claramente que uma grande quantidade de variação é devida à flutuação normal diária da carga e do perfil de carga conectada ao sistema, como por exemplo, residencial, comercial, etc, como apresenta [16]. Este fator complica a análise, pois provoca um grau de comportamento determinístico originando um processo não estacionário.

Considerando-se um processo não estacionário, sabe-se que o resultado é influenciado pelo tempo inicial e o período de tempo considerado para a análise.

Contudo, a análise harmônica só pode ser aplicada quando as correntes e tensões estão perfeitamente em regime, pois a transformada de Fourier de uma forma de onda distorcida, perfeitamente em regime, é uma série de impulsos. Assim, a relação de transferência entre corrente e tensão (impedância) é um valor único a cada componente de frequência (harmônica), embora impedâncias em frequências diferentes têm valores diferentes [17].

Quando existe somente uma fonte harmônica no sistema, o cálculo é simples e pode ser de natureza determinística. Quando muitas fontes são relacionadas, o cálculo é consideravelmente mais complicado especialmente quando os níveis de distorção não estão em regime. É neste problema específico que os métodos probabilísticos foram primeiramente aplicados [18].

Em geral, os estudos de penetração harmônica abrangem o cálculo das tensões nas barras do sistema, dadas as correntes harmônicas produzidas pelas cargas não lineares. Dado que a matriz admitância, em qualquer harmônica, pode ser derivada para o sistema e um vetor de corrente pode ser produzido para as cargas não lineares, o problema é reduzido à solução de um grupo de equações simultâneas conforme (4.1).

$$I = [Y] \cdot V \quad (4.1)$$

Estas equações são simplesmente resolvidas para “V” quando o vetor de corrente “I” é conhecido. Para muitas aplicações, o vetor de corrente pode ser considerado como uma quantidade determinística, permitindo o cálculo determinístico tradicional.

Muitos conversores do domínio da eletrônica de potência não alimentam cargas constantes, assim, estes conversores devem ser capazes de operar com um ângulo de disparo variável (ou, comando variável). Isto resulta em distorções harmônicas de correntes de várias amplitudes e fases [19]. O principal problema causado pelas variações das correntes é que as

distorções das tensões resultantes nas barras, as quais são devidas às várias fontes harmônicas, podem estar sujeitas a flutuações consideráveis. Assim, não é possível calcular um único nível representativo para a distorção em determinada barra, e, portanto, uma possível solução é a utilização de métodos probabilísticos [20].

Por outro lado, as aproximações probabilísticas podem refletir as mudanças variáveis nas condições de carga, mas não podem dar um quadro real do problema em estudo, pois tais aproximações não podem detectar o comportamento de todos os parâmetros envolvidos na questão das harmônicas [21].

4.2 – Modelagem Determinística

O método determinístico é utilizado para simulações as quais melhor representam o sistema e seus componentes. Ao utilizar-se do método de modelagem determinística, considera-se o sistema em uma condição de operação “determinada”, ou seja, não há grandes variações de cargas.

A partir de então, alguns tipos de simulações são realizadas, variando-se em termos da aquisição de dados, da complexidade de modelagem, dos problemas de formulação e dos algoritmos de solução.

O método de simulação mais utilizado pelas companhias de energia elétrica, assim como, em softwares comerciais para análise harmônica, é o método da matriz admitância. Uma forte razão para tal é que estes programas normalmente não exigem conhecimentos detalhados sobre as partes do sistema estudado. Estes programas normalmente permitem especificar uma fonte de corrente ou tensão harmônica baseado em medições realizadas no sistema físico real.

4.2.1 - Simulação no Domínio da Frequência

4.2.1.1 – Método Matriz Admitância

Simulação no domínio da frequência é a técnica mais simples e mais comumente utilizada para análise harmônica. As exigências dos dados de entrada são minimizadas. Este método calcula a resposta, em frequência, de um sistema visto de um ponto, ou barra, específica. Tipicamente, uma corrente (ou tensão) senoidal de 1 pu é injetada na barra em análise e a resposta da tensão (ou corrente) é calculada. Este cálculo é repetido utilizando-se passos de frequência discretos, através do intervalo de interesse. Matematicamente, o processo consiste em resolver a seguinte equação (4.2) do sistema, na frequência $n \cdot f_0$.

$$[Y_n] \cdot [V_n] = [I_n] \quad (4.2)$$

Onde: $[I_n]$ é o vetor de corrente conhecido e $[V_n]$ é o vetor da tensão nodal a ser encontrado.

Em uma análise de frequência típica, somente uma entrada de $[I_n]$ é diferente de zero. Em outras análises, um grupo de correntes de seqüência positiva ou zero podem ser injetadas respectivamente nas três fases de um barramento. Os resultados são impedâncias de seqüência positiva ou zero no ponto do sistema. A análise de varredura de frequência é a ferramenta mais efetiva para detectar condições de ressonância harmônica em um sistema, sendo também amplamente utilizada para projetos de filtros.

Se mais dados das características das fontes harmônicas são disponibilizados, a análise de frequência pode ser expandida para determinar informações de distorções harmônicas adicionais. Por exemplo, a injeção de uma corrente de 1 pu pode ser substituída por uma corrente harmônica específica. A corrente tem uma magnitude determinada a partir do espectro harmônico característico e da corrente nominal do equipamento gerador de harmônicos em análise, como apresentado na equação (4.3).

$$I_n = I_{Nom} \cdot \frac{I_{n-espectro}}{I_{1-espectro}} \quad (4.3)$$

Onde: n é a ordem harmônica e o sub-escrito “*espectro*” indica o espectro harmônico típico do equipamento.

Desta forma, a equação (4.2) é resolvida somente nas frequências harmônicas. Os resultados são as tensões harmônicas impostas pelo equipamento gerador de harmônicas. Para calcular os índices de distorção tais como DHT, é utilizada a tensão nominal na frequência fundamental. Esta aproximação é estendida a casos com múltiplas fontes harmônicas em alguns programas para análises harmônicas. Porém, a técnica resulta aproximada se os ângulos de fases das correntes injetadas são estabelecidos arbitrariamente. Dependendo do ângulo de fase utilizado, os efeitos de duas fontes harmônicas vistos por uma determinada barra podem ser tanto de adição ou de cancelamento, sendo que os resultados podem ser pessimistas ou otimistas.

Torna-se necessário a solução do fluxo de carga na frequência fundamental para estender a aproximação anterior a fim de se modelar mais adequadamente múltiplas fontes harmônicas. Relações típicas de fases entre a corrente na frequência fundamental e as correntes harmônicas das cargas não lineares também devem ser consideradas. O fluxo de carga, modelando os equipamentos geradores de harmônicas como cargas de potência constante, calcula a corrente de frequência fundamental injetada pela carga no sistema. Considerando-se que a corrente tem um ângulo de fase θ_1 , o ângulo de fase da corrente harmônica θ_n , correspondente àquela carga não linear, pode ser determinado pela equação (4.4).

$$\theta_n = \theta_{n-espectro} + n(\theta_1 - \theta_{1-espectro}) \quad (4.4)$$

Onde: θ_n é o ângulo de fase típico do espectro da fonte de corrente harmônica.

Esta aproximação é muito efetiva para analisar sistemas de potência compostos por dispositivos de eletrônica de potência. A solução do fluxo de carga na frequência fundamental também é útil para o fornecimento de informações mais precisas, tais como tensões de base que podem ser utilizadas para cálculos de índices de distorção. As magnitudes das fontes de correntes harmônicas também tendem a serem mais precisas desde que a corrente base, dependente do fluxo de carga, e não a corrente nominal, seja utilizada para determinar as magnitudes das correntes harmônicas.

A principal desvantagem destes métodos é o uso do espectro harmônico característico para representar as cargas geradoras de harmônicas. Isto impossibilita uma avaliação adequada de casos envolvendo condições de operações não típicas. Tais condições incluem, por exemplo, carregamento parcial de cargas geradoras de harmônicas, excessivas distorções harmônicas da tensão e condições de desequilíbrio no sistema. Mesmo sobre condições típicas, a característica de dependência da tensão em relação às cargas não lineares, geradoras de harmônicas, pode tornar a precisão dos métodos baseados em espectros típicos como sendo inaceitáveis. Para alguns equipamentos com relações de tensão-corrente não lineares, a dependência da tensão é tão grande que não existe espectro típico. Estas considerações levaram ao desenvolvimento de métodos de análises harmônicas mais avançadas.

4.2.1.2 - Método de Iteração harmônica

Neste método, uma carga geradora de harmônicos é modelada com uma fonte de corrente dependente da tensão, podendo ser expressa pela equação (4.5).

$$I_n = F(V_1, V_2, \dots, V_H, c) \quad n = 1 \dots H \quad (4.5)$$

Onde: ($V_I \dots V_H$) são os fasores das tensões harmônicas da tensão de alimentação e “ c ” é um grupo de variáveis tais como o ângulo de disparo dos conversores CA/CC, ou, a potência de saída.

Primeiramente, a equação (4.5) é resolvida utilizando-se uma tensão de alimentação estimada. Os resultados obtidos são utilizados como fontes de correntes na equação (4.2), da qual as tensões harmônicas são encontradas (para a frequência fundamental, as equações de fluxo de carga podem ser utilizadas). As tensões por sua vez são utilizadas para calcular fontes de correntes harmônicas mais precisas a partir da equação (4.5). Este processo iterativo é repetido até que a convergência seja alcançada.

Nos métodos de iteração harmônica, a carga geradora de harmônica é então modelada como uma fonte de corrente dependente da tensão. Isto faz com que este método exija um melhor conhecimento do equipamento gerador de harmônicas, do que os baseados no método de matriz admitância, pois, para que a convergência possa ser melhorada, precisa-se incluir a admitância equivalente das cargas não lineares na matriz de admitância [Y_n] da equação (4.2).

Em [22], a grande vantagem em se ter fontes de correntes dependentes da tensão de alimentação é destacada, pois, como apresentado em estudo baseado em medições, com uma variação de tensão de apenas 5%, limite este que se enquadra nas normas regulamentadoras [7], em determinadas cargas, cito computadores, fotocopiadoras, reatores eletrônicos, lâmpadas compactas, etc., existem grandes variações na amplitude da corrente drenada, e até deslocamento de fase.

4.2.1.3 - Método Algoritmo Newtoniano

Um outro método que leva em conta a natureza de dependência da tensão das cargas não lineares é obtido através das soluções da equação do sistema, equação (4.2), e da equação da carga, equação (4.5), de forma simultânea, usando algoritmos Newtonianos. Este método geralmente exige que o modelo da carga esteja disponível em uma forma fechada ou em uma forma que derivações possam ser eficientemente computadas. Na teoria, a convergência deste método é melhor do que a do método de iteração harmônica, se o ponto de início da iteração for próximo do ponto da solução. Uma variação deste método é a formulação da equação do sistema.

Os métodos apresentados têm sido estendidos aos casos de sistemas trifásicos desbalanceados reformulando-se a equação do sistema e as equações das cargas no domínio de multi fases. Uma aproximação multi fase (trifásica) para análise harmônica tem algumas vantagens:

- Primeiro, é a modelagem do fluxo das harmônicas de seqüência zero. Mesmo em condições de fases balanceadas, alguns equipamentos geradores de harmônicas tais como transformadores trifásicos podem gerar harmônicas de seqüência zero.

- Segundo, é a capacidade de avaliar a geração de harmônicas não características. Estas harmônicas, geradas em condições de desbalanço, pode ser prejudicial, pois as medidas de mitigação normalmente não são projetadas para elas. Além disso, a modelagem trifásica facilmente representa os efeitos dos defasamentos dos transformadores nas componentes harmônicas.

4.2.1.4 – Modelo de Thévenin e Norton

Modelar um sistema como fonte de corrente ou tensão pode não ser preciso o suficiente, se as condições de operação do sistema de alimentação variam muito em relação às condições em que o espectro harmônico da tensão, ou da corrente, foi determinado. Como os sistemas de distribuição geralmente consistem de varias impedâncias conectadas em paralelo (shunt), ao se mudar a condição de operação do sistema de alimentação pode-se mudar as correntes harmônicas injetadas nas barras onde as medições foram realizadas.

Desta forma, necessita-se de modelos mais abrangentes para grandes sistemas elétricos. Uma primeira aproximação neste sentido seria modelar o sistema de distribuição como um modelo de Thévenin ou Norton. Estes modelos são mais adequados para condições de operação com maiores variações do que os modelos de fonte de tensão ou “corrente constante” [23].

4.2.1.4.1 - Teorema de Thévenin

O teorema de Thévenin estabelece que qualquer circuito visto de um ponto pode ser representado por uma fonte de tensão V_o (igual à tensão do ponto em circuito aberto), em série com uma impedância Z (igual à impedância do circuito vista deste ponto).

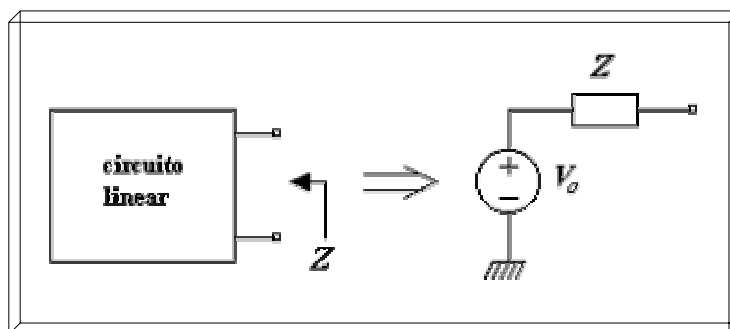


Fig. 4.1 – Circuito de Thévenin.

4.2.1.4.2 - Teorema de Norton

O teorema de Norton estabelece que qualquer circuito visto de um ponto pode ser representado por uma fonte de corrente I_S (igual à corrente no ponto em curto-circuito), em paralelo com uma impedância Z (igual à impedância do circuito vista deste ponto).

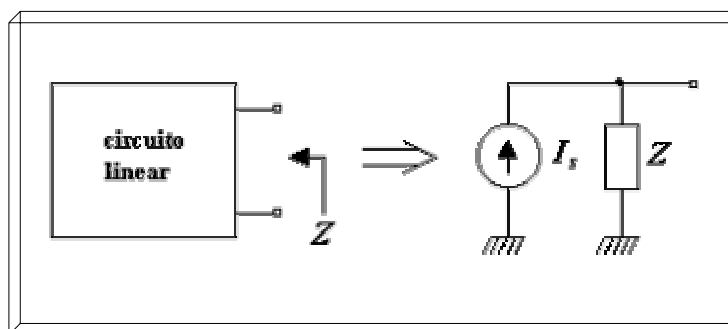


Fig. 4.2 – Circuito de Norton.

Com as mudanças da condição de operação de um sistema, como o exemplo apresentado na figura 4.3(a), pode-se observar na figura 4.3(b) a variação do conteúdo de correntes harmônicas injetadas no sistema. [24, 25, 26, 27].

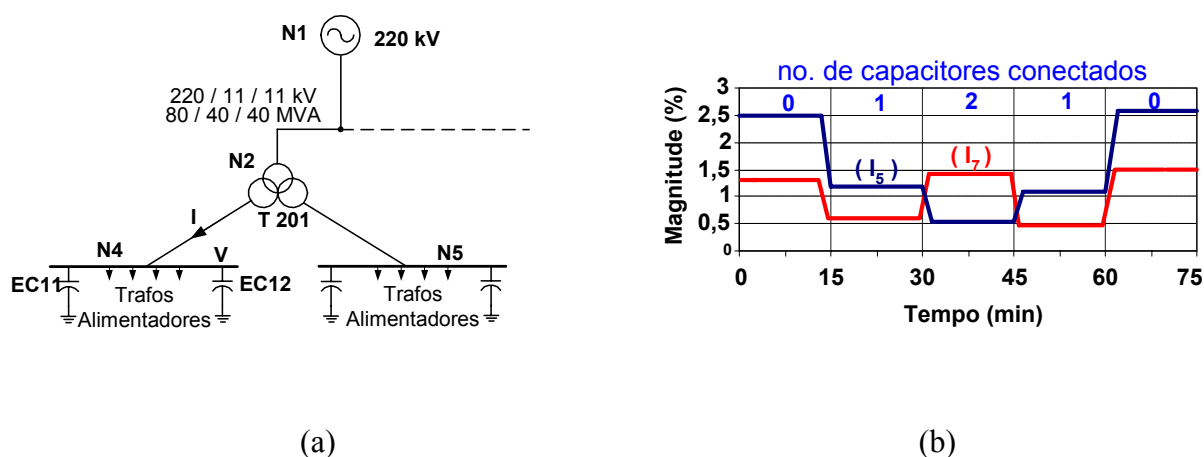


Fig. 4.3 – Exemplo da variação de correntes harmônicas no sistema elétrico.

Através da figura 4.3(b) podem-se observar as variações das correntes harmônicas de 5ª e 7ª ordem. Se este sistema fosse modelado como fonte de corrente constante, os resultados poderiam não ser incorretos, devido às mudanças ocorridas no sistema.

A partir da figura 4.3(a) pode-se representar um Modelo de Norton para o sistema, conforme figura 4.4.

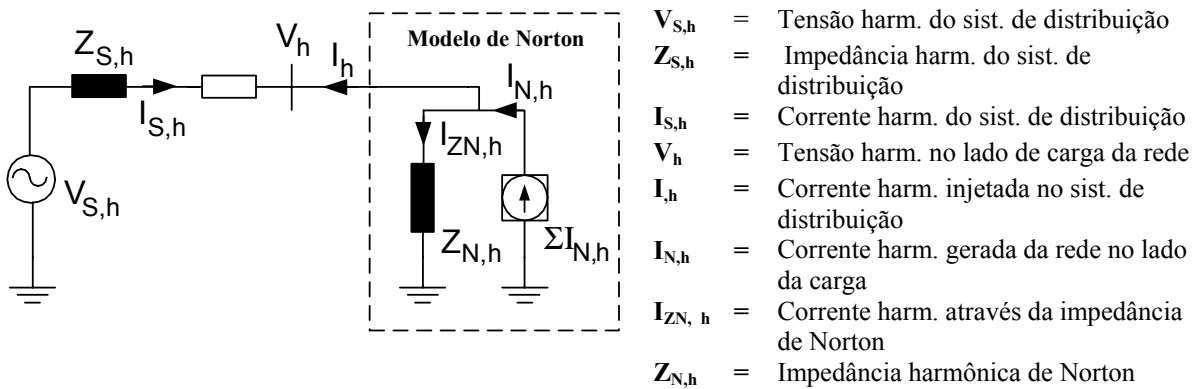


Fig. 4.4 – Modelo de Norton.

Para se estimar um Modelo de Norton, como este da figura 4.4, devem ser feitas medições da corrente harmônica, I_h , e da tensão, V_h , com duas condições de operação diferentes do sistema de alimentação. Porém, é necessário que a tensão e a corrente possam ser medidas, ou estimadas, em ambos os lados da carga a qual esta sendo “chaveada” (alterada).

Através da figura 4.4 observa-se que ao mudar a condição de operação do sistema de alimentação, conseqüentemente a tensão harmônica V_h , e as correntes harmônicas I_h e $I_{ZN,h}$ também mudarão.

A corrente harmônica, $I_{N,h}$, gerada pelo sistema do lado da carga encontra um caminho elétrico o qual consiste em uma combinação paralelo de $Z_{N,h}$ e a impedância total do sistema de alimentação. Como $Z_{N,h}$, normalmente é maior do que esta impedância, a maior parte de $I_{N,h}$ flui pelo sistema. Contudo, modificações nas condições de operação do sistema de alimentação força as correntes que fluem em ambas as impedâncias do sistema de alimentação e $Z_{N,h}$ a mudarem.

Considerando-se que não haja mudança nas condições de operação do sistema de distribuição, do lado da carga, já modelado com as duas medições, a partir da figura 4.4 pode-

se notar que para cada harmônica, as correntes $I_{h,1}$ e $I_{h,2}$ (sendo todas complexas) podem ser expressas pelas equações (4.6) e (4.7), respectivamente.

$$I_{h,1} = I_{N,h} - I_{ZN,h,1} \quad (4.6)$$

$$I_{h,2} = I_{N,h} - I_{ZN,h,2} \quad (4.7)$$

A corrente que flui através da impedância harmônica de Norton, $I_{ZN,h}$, pode ser calculada antes e depois da alteração da condição de operação do sistema pelas equações (4.8) e (4.9), respectivamente.

$$I_{ZN,h,1} = \frac{V_{h,1}}{Z_{N,h}} \quad (4.8)$$

$$I_{ZN,h,2} = \frac{V_{h,2}}{Z_{N,h}} \quad (4.9)$$

Utilizando-se as equações (4.8) e (4.9), nas equações (4.6) e (4.7), tem-se:

$$I_{h,1} = I_{N,h} - \frac{V_{h,1}}{Z_{N,h}} \quad (4.10)$$

$$I_{h,2} = I_{N,h} - \frac{V_{h,2}}{Z_{N,h}} \quad (4.11)$$

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

$$I_{h,2} - I_{h,1} = \frac{V_{h,1} - V_{h,2}}{Z_{N,h}} \quad (4.12)$$

Isolando-se $Z_{N,h}$ na equação (4.12), encontra-se a impedância de Norton para cada harmônica, conforme equação (4.13).

$$Z_{N,h} = \frac{(V_{h,1} - V_{h,2})}{(I_{h,2} - I_{h,1})} \quad (4.13)$$

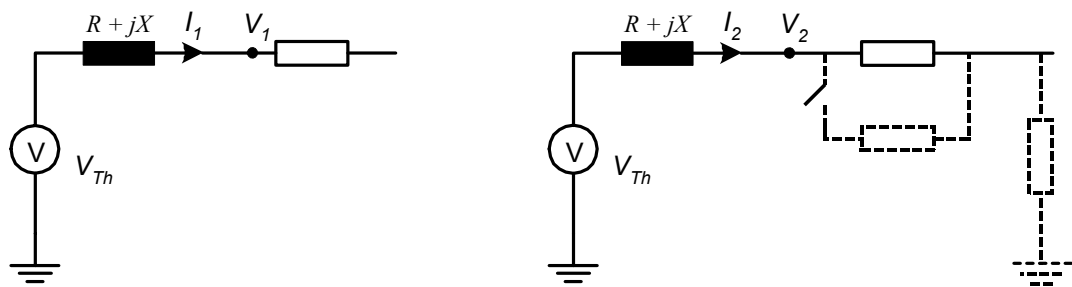
A fonte de corrente harmônica de Norton pode ser determinada pela equação (4.14).

$$I_{N,h} = I_{h,1} + \frac{V_{h,1}}{Z_{N,h}} \quad (4.14)$$

Como as equações (4.13) e (4.14) são complexas, é importante ter-se medições corretas não somente para as magnitudes das tensões e correntes harmônicas, mas também para os ângulos de fase. Também é importante que as medições das tensões e correntes estejam referidas a um ângulo de fase de uma barra em comum, que não mude com as condições do sistema ($V_{S,h}$).

Como normalmente há uma dificuldade em se fazer medições dos ângulos de fases em relação a uma barra remota, a defasagem angular entre as tensões medidas e a barra remota tem que ser estimada.

As figuras 4.5(a) e 4.5(b) mostram o sistema de alimentação antes e depois de se alterar a impedância do sistema da figura 4.4.



(a) (b)
Fig. 4.5 – Modelo de Norton – Modificações Comportamentais.

Considerando-se que o ângulo da tensão de Thévenin (V_{Th}) é zero, chegam-se às seguintes equações:

$$V_1 e^{j\theta_{V_1}} = V_{Th} - (R + jX)I_1 e^{j\theta_{I_1}} \quad (4.15)$$

$$V_2 e^{j\theta_{V_2}} = V_{Th} - (R + jX)I_2 e^{j\theta_{I_2}} \quad (4.16)$$

Considerando-se a defasagem entre as medições das tensões e correntes como ϕ_1 e ϕ_2 , reescrevem-se as equações (4.15) e (4.16), como:

$$V_1 = V_{TH} \cos \theta_{V_1} - RI_1 \cos \phi_1 + XI_1 \sin \phi_1 \quad (4.17)$$

$$0 = -V_{TH} \sin \theta_{V_1} - RI_1 \sin \phi_1 - XI_1 \cos \phi_1 \quad (4.18)$$

$$V_2 = V_{TH} \cos \theta_{V_2} - RI_2 \cos \phi_2 + XI_2 \sin \phi_2 \quad (4.19)$$

$$0 = -V_{TH} \sin \theta_{V_2} - RI_2 \sin \phi_2 - XI_2 \cos \phi_2 \quad (4.20)$$

Nas equações (4.17) até (4.20) os parâmetros V_1 , V_2 , ϕ_1 e ϕ_2 são conhecidos e V_{Th} , R , X , θ_{V1} e θ_{V2} , são desconhecidos, sendo assim, cinco variáveis são desconhecidas e têm-se somente quatro equações. A quinta equação pode ser obtida ao se considerar que a taxa X por R , X/R , é conhecida pela informação de curto-circuito do sistema.

$$X = \frac{X}{R} \cdot R \quad (4.21)$$

Resolvendo-se o sistema das equações não lineares (4.17) até (4.21), a defasagem entre a tensão da barra remota e as medições de tensões e correntes utilizadas nas equações (4.6) a (4.12) pode ser encontrada.

A partir então das equações (4.13) e (4.14), observa-se que todas as informações necessárias para os cálculos do modelo harmônico de Norton podem ser encontradas nas duas medições das tensões e correntes harmônicas, não sendo assim necessário qualquer informação sobre a impedância harmônica do sistema de alimentação ou do sistema modelado do lado da carga, o que torna a estimativa simples e os cálculos rápidos.

4.2.2 – Simulação no Domínio do Tempo

Comparada com cálculos no domínio do tempo, uma simulação no domínio da frequência é mais robusta devido à solução do sistema ser encontrada pra cada frequência, individualmente, e os erros de truncamento não são acumulados.

Os programas que se utilizam deste método de solução, freqüentemente tratam a não linearidade de um determinado sistema através de fontes de correntes harmônicas. Para uma avaliação harmônica, uma solução no domínio da frequência exige menos tempo de

computação comparado com uma solução no domínio do tempo. Porém, a maior parte dos programas de soluções no domínio da frequência disponível tem dificuldades em trabalhar com sistemas dinâmicos, interfaces de controle e transientes.

A solução no domínio do tempo é baseada em uma integração sobre um intervalo de tempo discreto. Os métodos numéricos aplicados em diferentes programas podem utilizar tanto técnicas iterativas ou métodos de solução direta. A estabilidade e precisão da solução alcançada estão intimamente relacionadas ao passo de tempo utilizado na simulação. Devido os erros de truncamento se acumular de um passo para o outro, a solução pode divergir da solução verdadeira se um passo de tempo impróprio for escolhido.

A simulação no domínio do tempo tem grandes vantagens no que se trata de dinâmica do sistema, interfaces da eletrônica de potência e transientes [28].

Os programas mais conhecidos que realizam as simulações no domínio do tempo são o Pspice, o qual tem passado por várias evoluções, e o EMTP (Electromagnetic Transients Program).

Ao se trabalhar com tais programas de simulação no domínio do tempo, é de suma importância o critério adotado na modelagem do sistema a ser simulado, pois, nos programas Pspice ou EMTP, não se trabalha com as equações do sistema, mas sim com os componentes do sistema modelados. Para isso, todas as cargas e outros parâmetros tais como impedância de linha, transformadores, etc., devem ser modelados apropriadamente para que se obtenha um resultado confiável.

Os programas Pspice e EMTP se destacam também pela facilidade na interação, sendo possível visualizar esquematicamente o sistema a ser simulado bem como os pontos a serem analisados. Além de uma correta modelagem do sistema, é interessante sempre que possível reduzir o circuito a ser modelado através de concentração de cargas, pois quanto menor o

numero de nós presentes no circuito, menor quantidade de cálculos o programa efetuará, levando a uma redução no tempo de simulação.

O passo de tempo adotado também se torna uma condição importante, pois quanto maior o passo de cálculo, menos iterações o programa realizará tornando a simulação mais rápida e um com um menor acúmulo de erros de truncamento, como já mencionado anteriormente. Porém, quanto maior o passo de cálculo, menor será a precisão dos resultados obtidos.

4.2.2.1 – Exemplo de Modelagem de um Sistema de Distribuição Urbana

Em [29], é apresentada a modelagem de um sistema de distribuição para a previsão e análise da distorção da tensão, causada por cargas não lineares, para análise e simulação no domínio do tempo através do Pspice. O primeiro passo proposto foi a modelagem do sistema alimentado por uma subestação de 34,5kV como mostrado na figura 4.6.

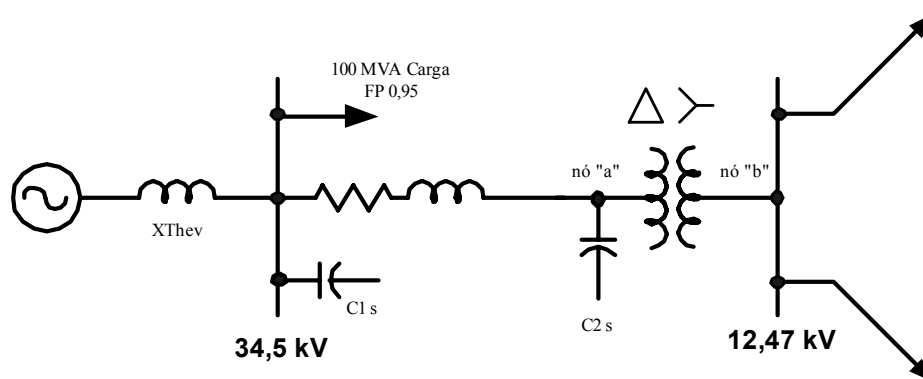


Fig. 4.6 – Exemplo de Sistema de Distribuição Modelado.

O circuito exemplo consiste em dois ramais principais onde um representa uma subestação de 12,47kV e seus dois alimentadores, sendo que os dois contêm cargas não lineares do domínio da eletrônica de potência, e o segundo representa o restante do sistema alimentado pela subestação principal de 34,5 kV. Este ramal foi considerado na simulação

como não tendo cargas não lineares, sendo representado por uma carga linear típica de 100MVA com um fator de deslocamento de 0,95.

A figura 4.7 também mostra que cada um dos alimentadores de distribuição de 12,47kV (fase-fase) consiste em 11 pontos de acoplamento de carga, nos quais são conectados três ramais monofásicos de 7,2kV (fase-neutro). Todos os três ramais monofásicos alimentam 32 residências, através de quatro transformadores 7,2kV/240 V, como mostrado na figura 4.7.

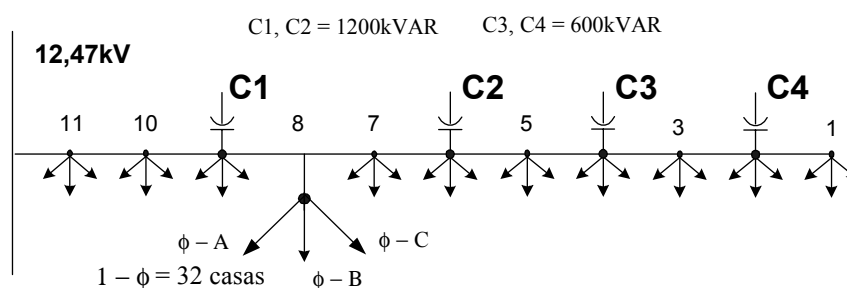
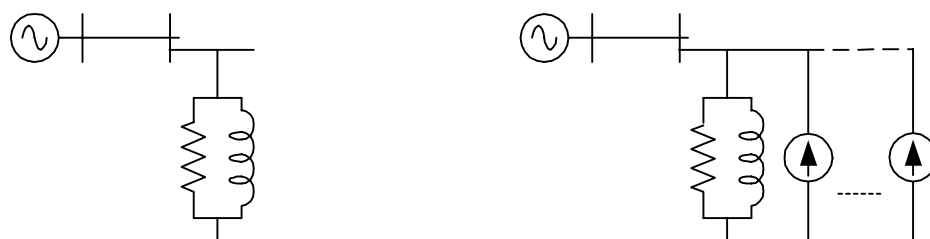


Fig. 4.7 – Alimentadores residenciais monofásicos.

Para diminuir os nós do circuito a ser simulado, foi considerado um “sistema trifásico balanceado” reduzindo-se o circuito a um modelo “unifilar”. Assim, somente um dos três ramais monofásicos conectados em cada ponto de acoplamento foi incluído no modelo do Pspice, reduzindo-se o número de residências a 704. Tais residências foram divididas em duas classes, com ou sem cargas não lineares. A parcela com cargas lineares foi representada por uma demanda de 6,9kVA, com um fator de deslocamento de 0,85, sendo modelada através de uma combinação R-L em paralelo.

As residências consideradas com cargas não lineares, uma parte foi representada como carga linear, com uma demanda de 1kVA e um fator de deslocamento de 0,85, também modelada por uma combinação R-L apropriada, mais uma parte não linear de 5,9kVA. Esta parte não linear foi modelada por um grupo de fontes de corrente em paralelo com a parte linear como é mostrado nas figuras 4.8(a) e 4.8(b).



(a) Carga Linear

(b) Carga Não Linear

Fig. 4.8 – Modelagem dos consumidores residenciais.

Como o sistema de distribuição geralmente é projetado do lado de alta tensão com o transformador em configuração delta (Δ) e do lado de baixa tensão com configuração em estrela (Y), necessita-se de um quarto condutor (neutro) para que os consumidores monofásicos (fase-neutro) possam ser representados do lado de baixa tensão, sendo então necessário modelar o transformador Δ -Y.

Em [29], como o sistema foi considerado balanceado e assim reduzido a um circuito unifilar, o transformador trifásico foi representado por um “modelo monofásico”, conforme figura 4.9. Considerando-se o sistema balanceado, sabe-se que tais transformadores trifásicos de conexão Δ -Y confinam as harmônicas triplas (*triplens*) no secundário. Uma vez que das harmônicas triplas, a de terceira ordem se destaca em sua amplitude, comparadas com as demais, foi projetado um filtro shunt sintonizado na terceira harmônica, mais uma combinação R-L série alocada entre os nós “a” e “b”, impedância equivalente de dispersão do transformador, como apresentado na figura 4.9.

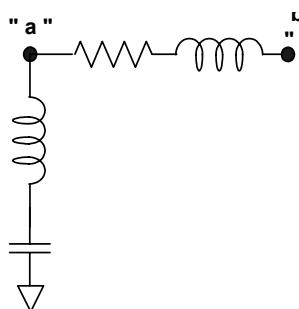


Fig. 4.9 – Modelo Monofásico para as Unidades Transformadoras, considerando-se Filtro para terceira harmônica.

Este filtro simula o efeito de confinamento do transformador trifásico Δ -Y em um sistema balanceado, onde a terceira harmônica é confinada no secundário, não sendo transferida para o primário.

Com esta modelagem simplista e aproximada, em [29] é analisado o sistema exemplo da figura 4.6 através da simulação no domínio do tempo com a utilização do Pspice.

4.2.2.2 – Considerações sobre o Modelo de Norton

A presença de correntes harmônicas no sistema de distribuição provoca distorções harmônicas na tensão, que por sua vez perde a característica puramente senoidal. Essas distorções são originadas pela impedância da linha.

O problema pode se agravar quando essas tensões distorcidas alimentam outras cargas. Mesmo uma carga puramente resistiva drena correntes distorcidas se alimentadas por tais tensões.

Por outro lado, o fator de distorção presente na linha pode ser minimizado se uma carga não linear alimentada por essa tensão gerar componentes harmônicas defasadas em 180° das presentes no sistema, gerando um panorama de cancelamento ou minimização de algumas ordens de harmônicas. Este fator depende então das amplitudes e dos ângulos de fase das tensões harmônicas da alimentação como exemplificado em [30].

O modelo de Norton (injeção de corrente) apresenta uma restrição de aplicação apenas para sistemas onde a DHT da tensão seja inferior a 10%, no ponto onde as fontes de correntes harmônicas estejam conectadas. Esta restrição é devido ao fato de que as fontes de correntes modeladas não possuem qualquer tipo de realimentação em função da DHT da tensão de alimentação.

Como o aumento da DHT da tensão pode acarretar alterações significativas nos valores de DHT da corrente drenada do sistema de distribuição, para a simulação de sistemas com DHT da tensão superior a 10%, se faz necessário atualizar os valores das fontes de correntes harmônicas.

4.3 – CONCLUSÕES

Neste capítulo foi apresentada a necessidade de se modelar os sistemas de energia elétrica para previsão e simulação de possíveis problemas devido a presença de harmônicas oriundas das cargas não lineares, podendo-se então propor soluções para estes problemas de forma antecipada.

Foram discutidos os métodos de modelagens probabilística e determinística, bem como as adequações de cada um destes métodos aos diferentes cenários de cargas presentes nos sistemas elétricos, suas vantagens e desvantagens. Ao se tratar/analisar um sistema elétrico de distribuição urbana, caso as características das cargas acopladas ao sistema sejam consideradas em regime constante, sem grandes variações, o método determinístico se torna mais adequado, principalmente devido aos diferentes métodos de simulações.

Dentre os tipos de simulações através do método determinístico, foram destacadas as simulações no domínio da frequência e no domínio do tempo.

No domínio da frequência apresentaram-se os seguintes métodos:

- *Matriz Admitância*: cuja vantagem é não requerer qualquer conhecimento detalhado da modelagem do sistema, sendo baseado apenas em medições de tensões e correntes. Por utilizar espectros harmônicos característicos das cargas, este método se torna falho ao simular sistemas com grandes variações da condição de operação, ou, carregamentos parciais das cargas geradoras de harmônicas. Para a interpretação dos dados, das tensões e correntes, coletados através das medições realizadas, foi também analisado o Método de Norton e seu equacionamento.

- *Iteração Harmônica*: necessita de um maior conhecimento da carga a ser modelada, pois, para melhorar a convergência é necessário incluir as admitâncias equivalentes das cargas

não lineares na matriz de admitância, porém, os resultados obtidos são mais precisos que o método de *Matriz Admitância*.

- *Algoritmo Newtoniano*: por resolver simultaneamente a equação do sistema e a equação da carga, geralmente exige que o modelo (equação) da carga esteja disponível em uma forma pronta, ou, em uma forma que derivações possam ser eficientemente computadas. Este método se torna um pouco mais restrito, pois os modelos (equacionamentos matemáticos) das cargas não são de domínio público, sendo reservados aos fabricantes das mesmas.

Por outro lado, destacou-se que a grande vantagem do método de simulação no “domínio do tempo” está na possibilidade de se observar a dinâmica de um sistema, bem como transientes. Como os programas de simulação no domínio do tempo (Pspice, EMTP, etc.) utilizam componentes do sistema modelados, para que os resultados obtidos através deste método de simulação sejam confiáveis torna-se de suma importância uma modelagem apropriada que represente adequadamente todas as cargas e demais parâmetros do sistema, tais como: impedância de linha, transformadores, etc.

Neste contexto, apresentou-se um exemplo de modelagem para posterior simulação no domínio do tempo, através do Pspice, onde o autor propôs uma representação “monofásica” para o sistema, admitindo-o balanceado. Observa-se que esta representação não reflete os sistemas “reais” de distribuição de energia elétrica. Por outro lado, com a consideração de sistema balanceado, o autor ainda propôs uma representação simplista para as unidades transformadoras, também de forma monofásica, representando-se o confinamento das *triplens* apenas por um filtro de terceira ordem. Esta representação também é inadequada, uma vez que tal filtro é dependente da carga/carregamento, e, o modelo monofásico admitido somente possui validade para operação balanceada/equilibrada, inexistente nos ramais de distribuição físicos (reais).

Neste sentido, no capítulo a seguir, apresentar-se-á uma proposta de modelagem trifásica para um ramal de distribuição urbana, a quatro fios, destacando uma proposição inédita para a modelagem de unidades transformadoras trifásicas, através da análise por simulação no domínio do tempo utilizando-se o Pspice.

CAPÍTULO 5

MODELAGEM PROPOSTA PARA ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO

As simulações de sistemas de distribuição de energia elétrica, realizadas no domínio do tempo, na maior parte presente na literatura, normalmente são baseadas em diagramas “unifilares”, considerando-se com cargas lineares e não lineares “equilibradas”. Entretanto, com o grande avanço da eletrônica de potência, disponibilizando no mercado atual grande quantidade de cargas com processamento eletrônico da energia, o perfil das cargas presentes no sistema elétrico brasileiro tem mudado rapidamente nos últimos anos.

As aplicações de cargas com processamento eletrônico da energia, inerentemente não lineares, têm sido intensificadas, tanto nos ambientes residenciais e comerciais, quanto nos ambientes industriais. Estas cargas não lineares provocam a circulação de correntes distorcidas através do sistema de distribuição, mesmo quando alimentadas por tensões puramente senoidais. Contudo, estas correntes distorcidas e, possivelmente, com um elevado conteúdo harmônico (elevada taxa de distorção harmônica), provocam distorções nas tensões em seus pontos de acoplamento e distorções harmônicas adicionais nas correntes drenadas por outros equipamentos alimentados pelas mesmas tensões. Estas distorções de corrente resultam em aquecimentos e perdas nos dispositivos do sistema de distribuição, chaveamento indevido do sistema, atuação indevida de fusíveis, elevada circulação de corrente pelo condutor neutro, interferências em sistemas de comunicação, dentre outros efeitos.

Portanto, a análise dos sistemas de distribuição quando da presença de cargas não lineares, envolve a necessidade da modelagem das mesmas e dos principais dispositivos

pertencentes a este sistema, para que os resultados das simulações possam ser mais confiáveis e com uma melhor precisão.

Entretanto, é comum encontrar na literatura o desenvolvimento de estudos de sistemas de distribuição trifásicos através de representações unifilares. Neste 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. Além disso, as correntes totais drenadas pelas cargas em cada uma das fases são consideradas exatamente iguais (as correntes totais de cada uma das fases apresentam o mesmo espectro harmônico, tanto em termos de magnitude quanto de defasagem angular).

A consideração de equilíbrio pleno do carregamento trifásico permite ainda que os transformadores com conexão tipo Δ/Y -aterrado sejam admitidos como elementos capazes de impedir a propagação das ordens triplas (*triplens*) do secundário para o primário. Nesta idealização, as *triplens* não circularão no primário das redes de distribuição [29].

É fato que um cenário de pleno equilíbrio de cargas somente será obtido em condições muito especiais, ou em situações hipotéticas. Portanto, a adoção da representação unifilar do sistema de distribuição pode acarretar sérios problemas de imprecisão, caso o resultado seja confrontado com medições experimentais (medições no sistema físico real). Adicionalmente, sabe-se que o desequilíbrio de cargas no sistema trifásico compõe a situação mais comum para análise. 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 (fases + condutor neutro). Para tanto, é preciso que sejam adotados modelos adequados para as representações das cargas não lineares e dos transformadores conectados ao sistema [31].

Modelando-se um sistema de distribuição trifásico com conexões Δ/Y -aterrado (fases + condutor neutro), torna-se então possível, dentre outras, a análise sobre um dos grandes

problemas enfrentado hoje pelas concessionárias de energia, a perda do condutor neutro e os resultantes desequilíbrios de tensões. Para muitas concessionárias de energia elétrica este fato tem sido cada vez mais evidente, uma vez que o índice de ocorrência de perda ou rompimento do condutor neutro tem sido bastante freqüente. Além de trazer grandes problemas em relação à qualidade da energia, deslocamento de pessoal para manutenção e outros, a perda do neutro tem causado ônus extras devido aos inúmeros processos de ressarcimento originados de consumidores, devido perdas/queimas/danificação de seus equipamentos, resultando em perdas totais ou parciais de seus equipamentos e/ou perdas de faturamento (interrupções em processos produtivos).

Desta forma, torna-se de grande importância para as concessionárias o estudo sobre as conseqüências da perda do condutor neutro, bem como a possível previsão de tal ocorrência, podendo-se então estabelecer medidas preventivas, tais como a troca do condutor por um de maior bitola, e/ou, o remanejamento da demanda entre os circuitos vizinhos do ponto em condição crítica. Assim, um estudo adequado de tal situação poderá fornecer às concessionárias e aos consumidores uma maior confiabilidade da entrega de energia, evitando-se problemas de relacionamento e/ou jurídicos com os consumidores, podendo desonerar as concessionárias de prováveis pedidos de indenizações.

Neste contexto, este capítulo traz uma modelagem inovadora em relação às existentes na literatura, 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-se também como uma importante contribuição para as técnicas de modelagem de unidades transformadoras trifásicas para simulações através do Pspice.

5.1 – Modelagem do Sistema Exemplo a ser Simulado em Ambiente

Pspice

Neste item é apresentada a modelagem de um ramal de distribuição urbana tomado como base para as simulações, situado na cidade de Campo Grande (MS), para a análise da influência dos conteúdos harmônicos decorrentes da forte presença de cargas não lineares. Apresenta-se a modelagem de um sistema trifásico onde o transformador, as linhas de distribuição, as cargas lineares e não lineares, bem como suas associações, serão representados através de elementos disponíveis no software de simulação Pspice. As cargas lineares serão modeladas através de impedâncias (associação R//L) constantes e as cargas não lineares são modeladas através de fontes de correntes harmônicas. Tais fontes de correntes são determinadas a partir dos espectros harmônicos característicos das correntes drenadas pelas cargas nos pontos de acoplamento. A figura 5.1 apresenta o diagrama unifilar da rede primária em estudo, a qual alimenta o ramal secundário a ser analisado.

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 alternadas senoidais, com tensões eficazes e frequências constantes.

A partir do diagrama da figura 5.1 procedeu-se a algumas simplificações do circuito, desde que o principal interesse deste trabalho é analisar o ramal secundário escolhido, com uma forte presença de cargas não lineares. Assim, foram feitas concentrações de cargas das (86) unidades transformadoras em pontos escolhidos, sendo totalizadas as potências nominais de todos os transformadores conectados a estes pontos, acrescentando-se ainda as perdas nos cabos.

Tais simplificações foram realizadas com o intuito de se reduzir o número de nós do circuito a ser simulado. As áreas de concentrações de cargas, tanto do ramal primário, quanto do ramal secundário, são apresentadas nos Anexos A e B.

A partir das simplificações apresentadas no Anexo A, realizou-se a modelagem do sistema para simulação no Pspice, obtendo-se o circuito simplificado da figura 5.2, representado pela subestação e sete barras, sendo: as barras P_1 , P_2 , P_3 , P_4 , P_5 e P_7 , onde se consideraram neste exemplo apenas cargas concentradas e lineares; e a barra P_6 , barra a ser analisada em detalhes, onde se encontra o ramal secundário a ser analisado, com forte carregamento não linear.

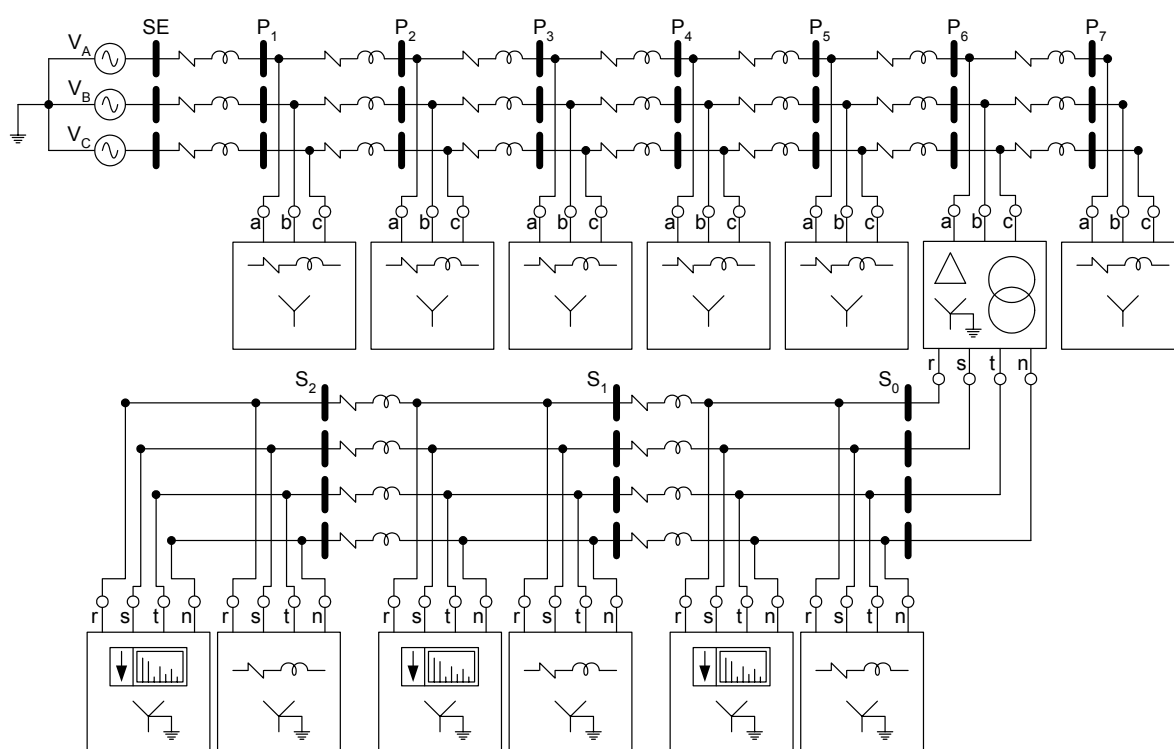


Fig. 5.2 - Diagrama esquemático simplificado do sistema de distribuição para simulação em ambiente Pspice.

Nas barras P_1 , P_2 , P_3 , P_4 , P_5 e P_7 foram conectadas cargas lineares equilibradas, ligadas em Y. Tal simplificação foi feita levando-se em consideração o fato de que não se deseja realizar uma análise detalhada no secundário dos transformadores conectados nestes pontos. As representações destas cargas lineares são compostas por conjuntos R-L série, ligadas em

Y, conforme mostra a figura 5.3, onde os valores de R e de L devem ser determinados de acordo com a concentração de cargas a ser representada.

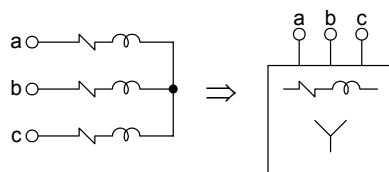


Fig. 5.3 – Representação gráfica de conjuntos de cargas lineares, empregadas em pontos de concentração de carga equivalente no primário.

Na barra P_6 , onde se encontra o ramal secundário a ser analisado em detalhes, faz-se necessária a adequada modelagem do transformador trifásico, em conexão Δ/Y -aterrado, de tal forma a representar plenamente as características elétricas do mesmo. Neste contexto, neste capítulo, far-se-á a proposição de um novo modelo de unidade transformadora trifásica, para simulação no Pspice, de tal forma a suprir as características elétricas reais destes dispositivos.

O ramal de distribuição secundário a quatro fios a ser analisado, apresentado no Anexo B, 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). Em cada um destes pontos, foram conectadas associações paralelas de cargas lineares, representadas pela figura 5.4, e, cargas não lineares monofásicas, conforme modelo da figura 5.5, associadas nas três fases secundárias, estabelecendo-se carregamento desequilibrado trifásico com conexão em Y, conforme figura 5.6. Para as cargas não lineares, destacam-se suas composições através do Método de Norton, como se analisou no capítulo 4 e conforme representação da figura 5.5.

As cargas são modeladas a partir da forma de onda da corrente drenada pelas mesmas, através de ensaios experimentais, considerando-se um sistema de alimentação praticamente senoidal (fonte de alimentação California Instruments). A forma de onda da corrente é então decomposta, obtendo-se o espectro harmônico da forma de onda original. Assim, as cargas não lineares são substituídas por fontes de correntes em paralelo, onde cada fonte de corrente

representa uma ordem harmônica do espectro da corrente drenada, contendo amplitudes e defasagens correspondentes, inclusive para a componente fundamental. Conforme análise já apresentada, a restrição desta modelagem para as cargas se encontra no fato de que sua aplicação é somente válida para sistemas onde as distorções harmônicas das tensões são inferiores a 10%. A partir deste índice, os espectros das correntes drenadas pelas cargas se alteram, sendo então necessárias alterações nestas fontes de corrente.

O modelo de Norton para as cargas monofásicas é apresentado na figura 5.5 e sua associação trifásica em Y é representada através da figura 5.6. V_r , V_s , V_t e V_n são fontes CC auxiliares de tensão, declaradas com 0V, para que possam ser usadas como sensores de corrente através da carga.

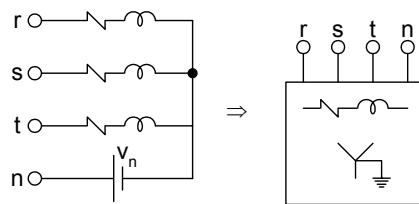


Fig. 5.4 – Representação da carga linear no secundário.

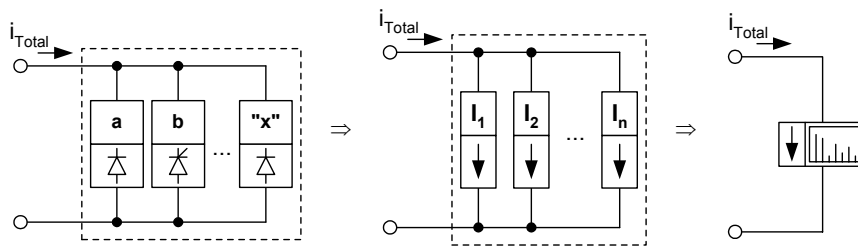


Fig. 5.5 – Representação das cargas monofásicas não lineares no secundário.

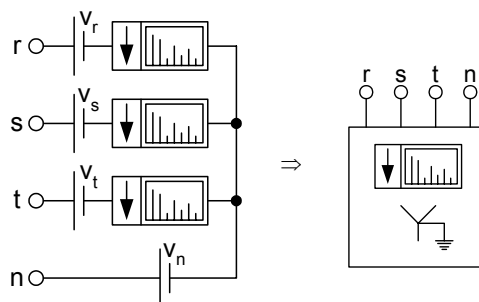


Fig. 5.6 – Representação das cargas trifásicas não lineares no secundário.

As perdas nos cabos, tanto da rede primária quanto secundária, são representadas através da associação série de resistências e indutâncias onde seus valores são especificados tomando como base a bitola do condutor e a distância em cada trecho.

5.1.1 – Modelagem Proposta do transformador trifásico para simulação no Pspice

Para simulações em ambiente Pspice, os transformadores normalmente são modelados através de indutâncias, como representado através da figura 5.7. A relação de transformação do transformador é então determinada através dos valores das indutâncias do primário e do secundário, sendo que o acoplamento magnético destas duas indutâncias é realizado através da definição de um fator “k” (variando entre 0 e 1), o qual representa os efeitos de não linearidade da curva B x H (Densidade de Campo Magnético x Intensidade de Campo Magnético) do núcleo do transformador. Entretanto, como o Pspice é um software originalmente desenvolvido para simulações de circuitos eletrônicos de baixa potência, este fator “k” pode não representar adequadamente os acoplamentos correspondentes aos núcleos dos transformadores trifásicos de potência.

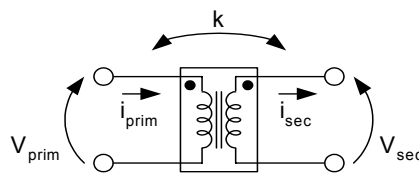


Fig. 5.7 – Modelo de transformador monofásico do Pspice.

Neste contexto, a modelagem convencional de um transformador trifásico, no Pspice, é então composta por um banco de transformadores monofásicos, conforme apresenta a figura 5.8.

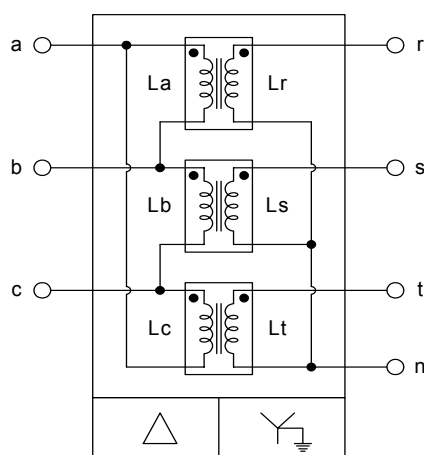


Fig. 5.8 – Modelo convencional de transformador trifásico, composto por um banco de transformadores monofásicos do Pspice.

Um dos problemas da configuração apresentada na figura 5.8 está em que o Pspice não permite a declaração de “loop” de indutâncias formado pela conexão em delta (Δ) do primário. Para que isto seja contornado, faz-se necessária a inserção de uma pequena resistência em série com cada uma das indutâncias para que este “loop” seja “quebrado”. Todavia, ao inserir as resistências, problemas relacionados à convergência computacional surgem, dificultando o sucesso da simulação, exigindo então um “relaxamento” das restrições de simulação e ainda um maior esforço computacional e maior tempo de simulação, devido às grandes derivadas presentes nos algoritmos de solução de equações diferenciais do circuito. Tais problemas são ainda mais intensificados ao simular um sistema com diversos transformadores trifásicos, o que pode levar ao truncamento de erros, impossibilitando o sucesso da simulação. Ainda, para uma fiel modelagem de um transformador trifásico de três colunas, torna-se necessária a representação dos acoplamentos entre todas as bobinas, originando não apenas três acoplamentos magnéticos, mas 15 como se mostra na figura 5.9, levando à problemas ainda mais rigorosos de convergência.

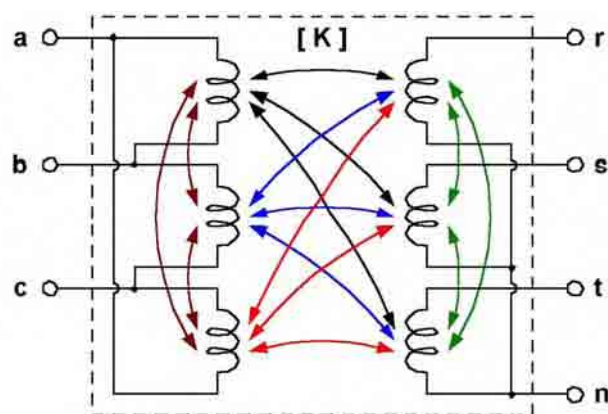


Fig. 5.9 – Acoplamentos entre as indutâncias.

Diante das dificuldades encontradas para a implementação do modelo de transformador trifásico, apresentado anteriormente, um novo modelo de transformador é apresentado, baseado em fontes de tensão e corrente controladas, disponibilizadas como dispositivos do Pspice. Porém, uma restrição encontrada com relação ao emprego das fontes

controladas se encontra na característica de unidirecionalidade das mesmas, pois estas fontes são capazes de “transferir” os efeitos da entrada para a saída, mas não realizam o inverso. Além disso, as fontes são plenamente isoladas, o que significa que não há interligação entre as energias processadas na entrada e na saída da fonte.

Considerando-se o transformador da figura 5.7 pode-se escrever:

$$V_{prim} \cdot I_{prim} = V_{sec} \cdot I_{sec} \quad (5.1)$$

É possível então se propor um modelo de transformador, adotando-se uma fonte de tensão controlada por tensão do Pspice, conforme mostra a figura 5.10, declarada do primário para o secundário, assim a tensão V_{sec} é função da tensão V_{prim} . Logo, caso ocorram alterações em V_{prim} , então V_{sec} será automaticamente atualizada. Entretanto, caso ocorram alterações em V_{sec} , em função da corrente secundária, devido à isolação inerente do dispositivo, não há meios de refleti-las para V_{prim} .

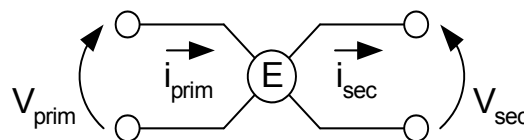


Fig. 5.10 – Fonte de tensão controlada por tensão.

Além disso, sabe-se ainda que este tipo de fonte não possibilita o relacionamento dos valores de I_{prim} e I_{sec} , ou seja, os valores de I_{sec} nada têm a ver com I_{prim} . Desta forma, tem-se que:

$$V_{prim} \cdot I_{prim} \neq V_{sec} \cdot I_{sec} \quad (5.2)$$

Assim, tal equação não representa adequadamente um transformador.

Para que este problema fosse contornado, foi concebida a estrutura apresentada na figura 5.11. Esta estrutura é composta por duas fontes controladas, sendo uma fonte E (Fonte de tensão controlada por tensão) e uma fonte F (fonte de corrente controlada por corrente).

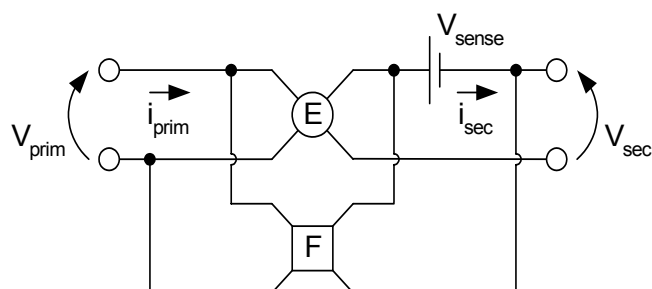


Fig. 5.11 - Modelo proposto de transformador monofásico.

Nesta estrutura, a fonte E é declarada do primário para o secundário, o que significa que V_{sec} é função de V_{prim} . Já a fonte F é declarada do secundário para o primário, ou seja, I_{prim} é função de I_{sec} , com este arranjo, onde a fonte de tensão está em antiparalelo com a fonte de corrente, obtém-se a característica de bi-direcionalidade de um transformador. A fonte CC de tensão V_{sense} é declarada como possuindo valor 0V, servindo apenas como sensor de corrente para os pontos de entrada da fonte F. Os ganhos relacionados às fontes E e F são decorrentes da relação de transformação do circuito mostrado na Figura 5.7.

Assim, com base na Figura 5.10, torna-se possível afirmar que alterações em V_{prim} serão diretamente transferidas a V_{sec} , enquanto que variações em I_{sec} serão imediatamente computadas em I_{prim} , respeitando-se a relação descrita pela equação (5.1). Tal fato significa que as características elétricas do transformador monofásico da Figura 5.7 podem ser perfeitamente reproduzidas através do modelo apresentado na Figura 5.10.

A vantagem desta proposta reside na eliminação das indutâncias primária e secundária, além do coeficiente de acoplamento “k”, levando à possibilidade de composição de um transformador trifásico com menores restrições de simulação relacionadas a problemas de convergência e esforço computacional.

A partir do modelo monofásico apresentado na figura 5.11, é possível compor um novo modelo de transformador trifásico com conexão Δ/Y -aterrado, adotando-se uma configuração equivalente a um banco de transformadores monofásicos, conforme a figura 5.12(a), sendo representado graficamente pela figura 5.11(b).

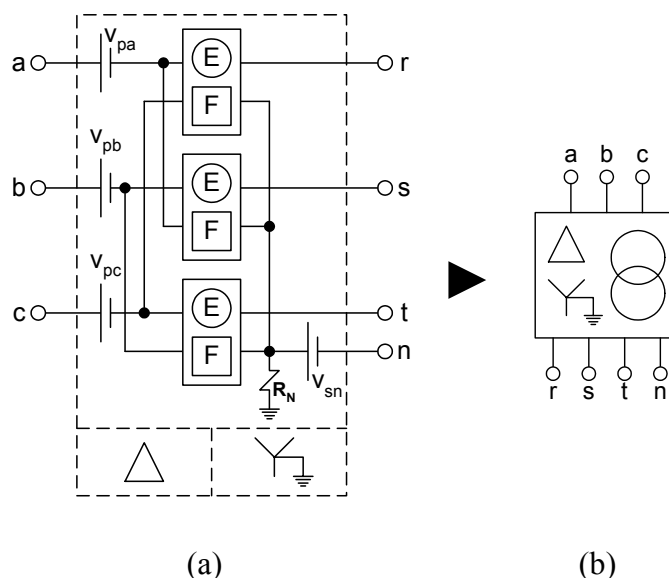


Fig. 5.12 – (a) Modelo proposto de transformador trifásico composto por um banco de transformadores monofásicos. (b) Representação gráfica.

Como as fontes controladas de tensão (E) e corrente (F) são independentes, deve-se observar a relação de ganho a ser imposto nas linhas de comando das declarações das fontes E e F, devendo este ser apropriadamente ajustado ao executar simulações com diferentes relações de transformação. As fontes CC de tensão V_{pa} , V_{pb} , V_{pc} e V_{sn} são usadas como sensores de corrente, sendo então declaradas com 0V.

5.1.2 – Dados utilizados para simulação exemplo

Para que o sistema fosse simulado, foram adquiridos alguns dados os quais são relatados através das tabelas 5.1 a 5.6. Os dados são apresentados em p.u. tomando como base as tensões e potências do sistema real nos respectivos pontos relatados.

A tabela 5.1 apresenta os valores de base para o cálculo em p.u. dos valores das impedâncias do ramal primário e secundário bem como as concentrações de cargas, no lado de alta e baixa tensão do transformador no ponto P6.

Lado	Primário (MT)	Secundário (BT)
Potência Base – Sb (MVA)	1	1
Tensão Base – Vb (kV)	13,8	0,22

Com os valores dados acima obtemos		
Lado	Primário (MT)	Secundário (BT)
Impedância Base – Zb (Ω)	190,44	0,0484
Corrente Base – Ib (A)	41,837	2624,319

As tabelas 5.2 e 5.3 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.

Distância \ Parâmetro	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.]	0,403 μ	1,044 μ	1,015 μ	0,176 μ	0,684 μ	0,513 μ	0,452 μ

Distância \ Parâmetro	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 representação completa do sistema não foi realizada, pois, o intuito do trabalho é analisar em detalhes um ramal secundário específico do sistema trifásico, sendo assim, os pontos de concentração de cargas P₁, P₂, P₃, P₄, P₅ e P₇ foram representados através de impedâncias, considerando-se em cada ponto uma carga linear equilibrada e concentrada. Esta consideração reduziu bastante o circuito a ser simulado, tornando-o mais rápido e com resultados satisfatórios.

A tabela 5.4 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 5.4
Parâmetros das Cargas Lineares Concentradas Conectadas à Linha Primária

Barra \ Parâmetro	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 uma análise mais detalhada, devido ser um ramal com um carregamento fortemente não linear, é representado através da associação de cargas lineares e não lineares e desequilibradas concentradas em três pontos, sendo estes S₀, S₁ e S₂ (Anexo A.2). A parte linear é representada através dos parâmetros apresentados na tabela 5.5, já a parte não linear, tabela 5.6, é representada através de fontes de correntes associadas em paralelo com a parte linear. As fontes de correntes são especificadas nas ordens da 1^a até a 7^a harmônica, pois estas ordens já representam satisfatoriamente a parte não linear, não sendo necessária a utilização de fontes adicionais com ordens superiores. Todos estes valores em p.u. são baseados em estimativas de consumo tanto da parte linear quanto da não linear.

Tabela 5.5
Parâmetros das Cargas Lineares Conectadas à Linha Secundária

Ponto \ Parâmetro	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 5.6
Parâmetros das Cargas Não Lineares Conectadas à Linha Secundária

Ponto de concentração de carga	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	0,003480	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	0,004480	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	0,022900	-120
	3	0,002740	-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

5.2 – Resultados de Simulação

A partir dos dados apresentados nas tabelas de 5.1 a 5.6 foi realizada uma simulação, através do Pspice, onde são apresentadas as formas de onda de tensões e correntes para a validação do modelo do sistema, 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.

Analisando-se a performance da modelagem do transformador Δ/Y aterrado, são apresentadas nas figuras 5.13 e 5.14 as formas de onda das tensões e correntes processadas pelo mesmo.

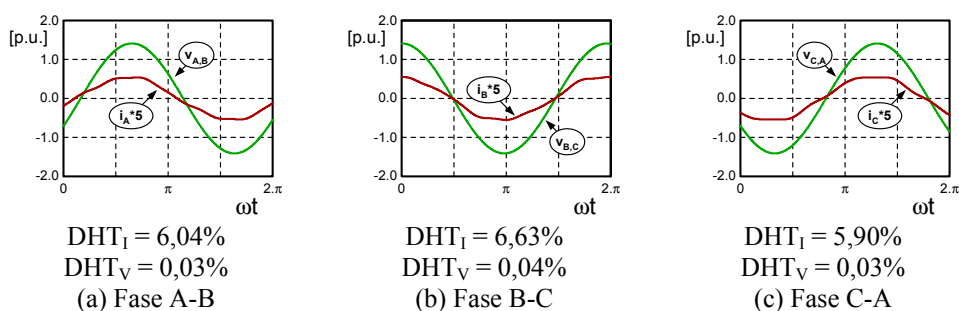


Fig. 5.13 (a), (b) e (c) – Formas de onda das Tensões (verde) e correntes (vermelho) no lado primário do transformador.

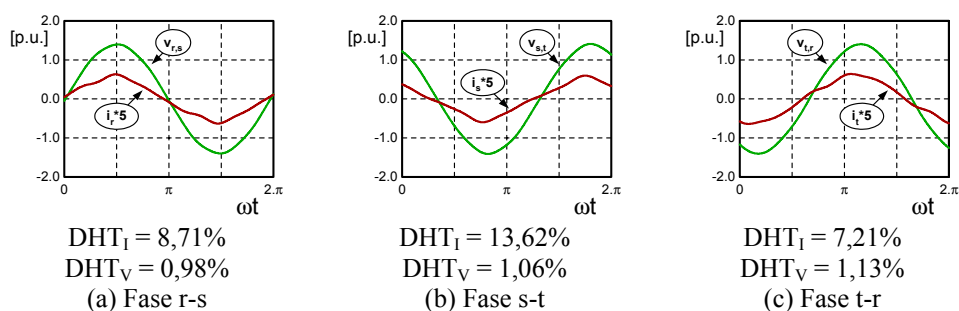


Fig. 5.14 (a), (b) e (c) – Formas de onda das Tensões (verde) e correntes (vermelho) no lado secundário do transformador.

O ponto de concentração “ S_0 ” é aquele que se encontra mais próximo do transformador, no lado secundário. Assim sendo, é apresentado na tabela 5.7 o espectro

harmônico das tensões neste ponto. 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. Porém, se a carga não linear for acrescida, tais distorções também aumentarão. Esta análise será apresentada no próximo capítulo.

Tabela 5.7
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%	1,390	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	0,010	0,74%	0,008	0,60%	0,004	0,30%

Plot Harmônico	Fase r-s		Fase s-t		Fase t-r	
	Amplitude [% da Fundamental]	Ordem Harmônica	Amplitude [% da Fundamental]	Ordem Harmônica	Amplitude [% da Fundamental]	Ordem Harmônica
	0,52	3	0,52	3	0,15	3
	0,38	5	0,7	5	1,08	5
	0,74	7	0,6	7	0,3	7

As tabelas 5.8 e 5.9 apresentam o espectro harmônico das correntes primárias e secundárias processadas pelo transformador.

Tabela 5.8
Espectro Harmônico das Correntes de Fase Processadas no Primário do Transformador

Ordem Harmônica	Fase A		Fase B		Fase C	
	Amplitude [p.u.]	% da fundamental	Amplitude [p.u.]	% da fundamental	Amplitude [p.u.]	% da fundamental
1	0,108124	100,00%	0,110550	100,00%	0,114035	100,00%
3	0,005244	4,85%	0,005428	4,91%	0,001300	1,14%
5	0,002305	2,13%	0,004253	3,84%	0,006490	5,67%
7	0,003144	2,91%	0,002514	2,27%	0,001324	1,16%

Plot Harmônico	Fase A		Fase B		Fase C	
	Amplitude [% da Fundamental]	Ordem Harmônica	Amplitude [% da Fundamental]	Ordem Harmônica	Amplitude [% da Fundamental]	Ordem Harmônica
	4,85	3	4,91	3	1,14	3
	2,13	5	3,84	5	5,67	5
	2,91	7	2,27	7	1,16	7

Tabela 5.9
Espectro Harmônico das Correntes de Fase Processadas no Secundário do Transformador

Ordem Harmônica	Fase r		Fase s		Fase t	
	Amplitude [p.u.]	% da fundamental	Amplitude [p.u.]	% da fundamental	Amplitude [p.u.]	% da fundamental
1	0,111402	100,00%	0,101234	100,00%	0,120600	100,00%
3	0,007152	6,42%	0,013130	12,97%	0,005029	4,17%
5	0,005739	5,16%	0,003537	3,49%	0,006600	5,48%
7	0,003166	2,84%	0,002292	2,26%	0,002586	2,14%

Plot Harmônico	Fase r		Fase s		Fase t	
	Amplitude [% da Fundamental]	Ordem Harmônica	Amplitude [% da Fundamental]	Ordem Harmônica	Amplitude [% da Fundamental]	Ordem Harmônica
Plot Harmônico	6,42	3	12,97	3	4,17	3
	5,16	5	3,49	5	5,48	5
	2,84	7	2,26	7	2,14	7

Através do espectro harmônico apresentado na tabela 5.8 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 Delta, já com uma carga desequilibrada entre as fases, como o simulado, as correntes de seqüência zero, *triplens*, são transferidas para o primário. Este fato foi plenamente confirmado na modelagem apresentada, dando assim condições para uma análise adequada sobre a propagação das componentes harmônicas nas linhas de distribuição.

A figura 5.15 apresenta a corrente que circula pelo condutor neutro, segmento secundário- S_0 , devido à presença de harmônicas de ordens triplas presentes na simulação.

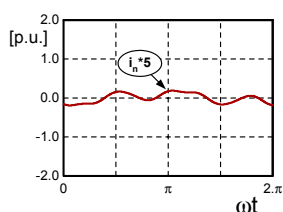


Fig. 5.15 – Corrente de neutro, segmento secundário- S_0 .

Os resultados de tensões e correntes obtidos no ponto de concentração “ S_1 ”, o qual se encontra a 26,3m do transformador, são apresentados na figura 5.16. Devido às correntes

distorcidas fluírem pelas impedâncias dos condutores pertencentes a este trecho, as distorções harmônicas da tensão são ampliadas. Na tabela 5.10 são apresentadas as amplitudes das componentes harmônicas das tensões. Observa-se também, que a amplitude da corrente de neutro neste ponto é menor que a corrente de neutro verificada no ponto “S₀”. Conforme a figura 5.2, o ponto de concentração “S₁” se encontra mais distante do que o ponto “S₀”, em relação ao transformador.

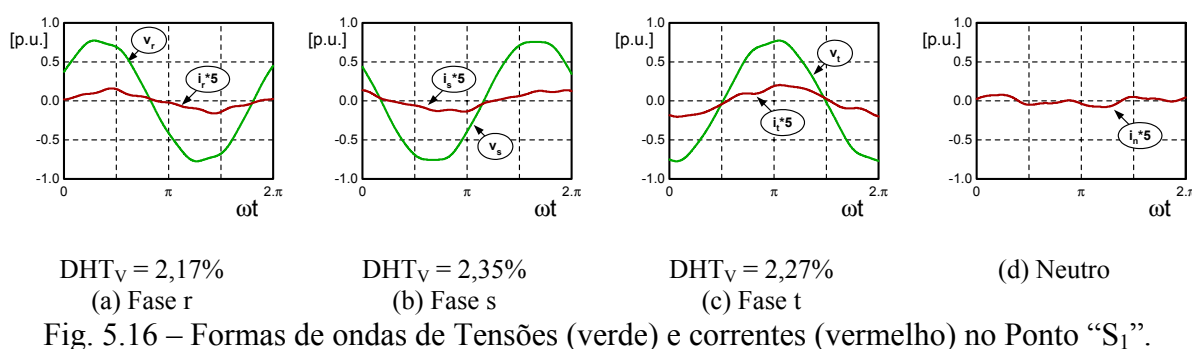


Tabela 5.10
Espectro Harmônico das Tensões de Fase no Ponto “S₁”

Ordem Harmônica	Fase r		Fase s		Fase t	
	Amplitude [p.u.]	% da fundamental	Amplitude [p.u.]	% da fundamental	Amplitude [p.u.]	% da fundamental
1	0,787	100,00%	0,789	100,00%	0,784	100,00%
3	0,008	0,97%	0,014	1,84%	0,006	0,72%
5	0,012	1,54%	0,008	1,00%	0,015	1,95%
7	0,009	1,17%	0,008	1,05%	0,007	0,91%

Plot Harmônico	Fase r			Fase s			Fase t		
	3	5	7	3	5	7	3	5	7
(%) da Fundamental	0,97	1,54	1,17	1,84	1,00	1,05	0,72	1,95	0,91
ordem harmônica	3	5	7	3	5	7	3	5	7

Conforme apresentado na figura 5.17, as distorções das tensões no ponto de concentração “S₂” possuem valores mais elevados, pois, o ponto “S₂” encontra-se a 86,3m do transformador, ou seja, devido a maior impedância inerente aos condutores neste trecho, as distorções das tensões são maiores neste ponto, em relação ao ponto “S₁”, considerando-se as

cargas não lineares presentes no circuito. Porém, observa-se novamente que a amplitude da corrente de neutro é ainda menor que a corrente tanto no ponto “S₁”, quanto em “S₀”, o que “logicamente” era de se esperar.

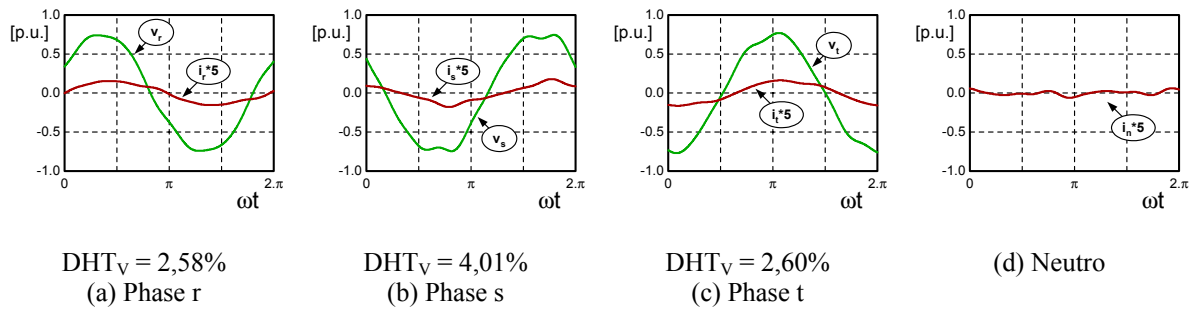


Fig. 5.17 – Formas de ondas de Tensões (verde) e correntes (vermelho) no Ponto “S₂”.

Assim, apresentam-se na tabela 5.11 os valores em p.u. do conteúdo harmônico das tensões de fase no Ponto de concentração “S₂”.

Tabela 5.11
Espectro Harmônico das Tensões de fase no Ponto “S₂”

Ordem Harmônica	Fase r		Fase s		Fase t	
	Amplitude [p.u.]	% da fundamental	Amplitude [p.u.]	% da fundamental	Amplitude [p.u.]	% da fundamental
1	0,768	100,00%	0,771	100,00%	0,764	100,00%
3	0,008	1,07%	0,023	2,99%	0,002	0,33%
5	0,017	2,22%	0,016	2,10%	0,019	2,48%
7	0,006	0,77%	0,013	1,64%	0,005	0,68%

Plot Harmônico	Fase r			Fase s			Fase t		
	3	5	7	3	5	7	3	5	7
(% da Fundamental)	1,07	2,22	0,77	2,99	2,1	1,64	0,33	2,48	0,68

5.3 – CONCLUSÕES

Neste capítulo foi apresentada uma nova modelagem para simulações de sistemas de distribuição. Esta modelagem se torna importante devido à mudança do perfil das cargas hoje presentes nos sistemas de distribuição, uma vez que no passado as cargas tinham características predominantemente lineares, o que não é verdadeiro atualmente.

As referências bibliográficas atuais, de maneira geral, tratam do assunto de uma forma a se fazer considerações simplificadoras nas modelagens, as quais não representam adequadamente as condições reais de operação dos sistemas. Tais modelagens assumem os sistemas de distribuição como equilibrados, admitindo-se para análise uma representação unifilar do sistema. Verificou-se, a partir das simulações realizadas com estas simplificações, que os resultados obtidos não são confiáveis e não permitem que sejam confrontados com os dados de medição de um sistema real de distribuição.

Buscando uma representação mais fiel ao sistema real, uma nova modelagem para simulação de sistemas de distribuição, em ambiente Pspice, foi apresentada. O sistema de distribuição é representado de forma trifilar nesta nova proposta de modelagem, fazendo-se as representações dos elementos do circuito (fontes de alimentações, cabos, transformadores, cargas lineares e não lineares, tanto para o primário quanto para o secundário) através de elementos disponíveis no próprio programa de simulação.

Algumas simplificações foram assumidas, com a concentração de cargas em alguns pontos, desde que o intuito principal era analisar a performance da modelagem, e, principalmente, do modelo proposto para os transformadores trifásicos.

Pôde-se observar que os resultados apresentados foram significativos para a representação de um sistema de distribuição a quatro fios (fases + condutor neutro), com

transformadores em conexão Δ/Y - aterrado e com a presença de cargas lineares e não lineares, com desequilíbrios (carregamento desbalanceado).

A partir deste cenário, no capítulo seguinte, apresentam-se as considerações para uma carga hipotética, devido crescimento do carregamento do circuito, em que as características sejam fortemente não lineares, levando à possibilidade de perda do condutor neutro. Neste sentido, apresentar-se-ão as análises das tensões resultantes, em pleno desequilíbrio, devido à perda do condutor neutro em determinado instante.

CAPÍTULO 6

ANÁLISE DO DESEQUILÍBRIO DAS TENSÕES EFICAZES EM FUNÇÃO DA PERDA DO CONDUTOR NEUTRO

6.1 – Análise do Crescimento das Cargas Não lineares.

A partir do cenário de simulação apresentado no capítulo anterior, utilizando-se a modelagem proposta, neste capítulo apresentam-se os resultados de simulação para uma determinada condição de operação do sistema.

Com a nova concepção de modelagem do sistema apresentado no capítulo anterior, enfatizam-se suas vantagens em relação às tradicionais representações unifilares. A nova modelagem trifilar permite uma análise mais próxima do comportamento real de um sistema de distribuição, representando-se ainda com maiores detalhes o lado secundário dos transformadores trifásicos de distribuição a quatro fios (fases e neutro).

A partir de então, tem-se a possibilidade de estudar em detalhes determinado ramal secundário, desde que o cenário de cargas seja bem conhecido. Além deste fato, tem-se a possibilidade de se avaliar o carregamento das unidades transformadoras e as capacidades de condução dos cabos de alimentação, frente a um determinado cenário de crescimento de cargas, permitindo ainda completa análise das distorções harmônicas das tensões e correntes no sistema de distribuição. Torna-se também possível a análise de dispositivos de compensação de reativos instalados no sistema, quer seja do lado de baixa (secundário) e/ou de média tensão (primário) do sistema de distribuição em análise, podendo-se observar e/ou prever possíveis ressonância e/ou problemas de inserção de tais bancos (chaveados ou não).

Neste sentido, a modelagem permite um cenário completo para o Planejamento do Sistema de Distribuição, prevendo-se a necessidade de substituição de unidades transformadoras e/ou cabos, além da possibilidade de estudos de proteção através da simulação de faltas.

Dentro deste contexto, neste capítulo é abordado um ponto de operação específico onde ocorre a ruptura do condutor neutro, do ramal escolhido para análise detalhada, em um determinado instante.

A perda do condutor neutro tem sido caracterizada por algumas causas, dentre as quais se destaca, em ramais de distribuição urbanos: as ocorrências de intempéries causando a queda de árvores sobre o condutor, o qual está disposto no nível mais elevado da rede, sendo o primeiro a ser afetado; furtos do condutor; outros problemas mecânicos, e, um recente problema elétrico devido à presença de grandes quantidades de cargas não lineares presentes no sistema.

Como observado nos capítulos anteriores, as cargas não lineares têm mudado o perfil das correntes que circulam no sistema, verificando-se elevados níveis de conteúdos harmônicos. Neste sentido, destacam-se principalmente as ordens triplas, as quais, em sistemas a quatro fios, se somam no neutro, originando surpreendentes valores eficazes de correntes através do mesmo, o qual, normalmente, possui sempre bitola (seção útil) inferior aos condutores fase.

Com a perda do condutor neutro ter-se-á um completo desequilíbrio das tensões trifásicas secundárias, podendo ocorrer a queima, danificação e/ou o mau funcionamento das cargas ligadas na rede secundária.

O gráfico da figura 6.1 apresenta o resultado de um levantamento realizado nos Estados Unidos (EUA), onde se verifica o crescimento da carga não linear em relação à

demanda instalada. Através da tabela 6.1 observa-se um crescimento quase que exponencial onde na última década foi alcançado um índice de 66,67% [32].

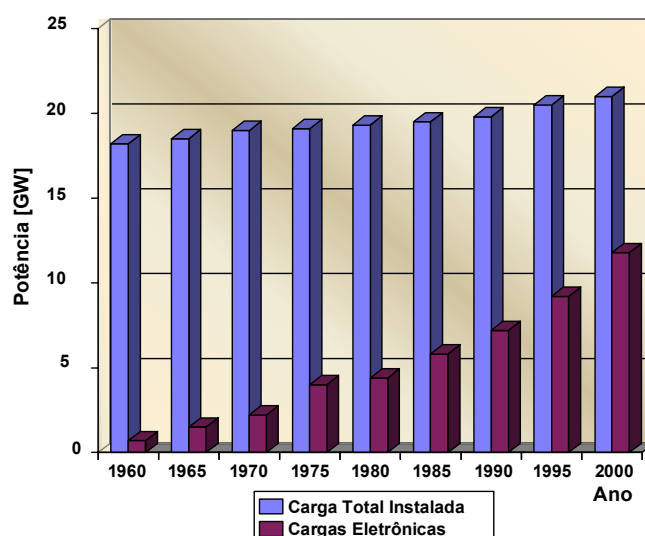


Fig. 6.1 – Crescimento das Cargas Eletrônicas (não lineares).

Ano	Potência Instalada (GW)	Crescimento em %		
		(GW)	5 anos	10 anos
1960	18,25	00,75		
1965	18,50	01,40	86,67	
1970	19,00	02,10	50,00	180,00
1975	19,15	04,00	90,47	
1980	19,40	04,40	10,00	109,52
1985	19,60	05,75	30,68	
1990	19,75	07,05	22,60	60,22
1995	20,50	09,20	30,49	
2000	21,00	11,75	27,71	66,67

Neste contexto, são apresentados nas tabelas 6.3 e 6.4 os valores das cargas lineares e não lineares utilizados para uma simulação hipotética de perda de condutor neutro.

O cenário para tal possibilidade de perda do condutor neutro é hipotético e admite um forte crescimento do carregamento não linear em relação ao linear. Assim, estabeleceu-se uma parcela de carregamento linear, baseado nas cargas lineares utilizadas na simulação do capítulo anterior, porém com uma redução de 50%. Já as cargas não lineares foram fortemente

incrementadas, de tal forma a possibilitar uma condição de ultrapassagem dos limites de condução do condutor neutro, em determinado segmento do ramal secundário em análise.

Na tabela 6.2 são apresentados os valores bases a partir dos quais são apresentados nas tabelas 6.3 e 6.4 os valores em p.u. das cargas hipotéticas para análise (lineares e não lineares), considerando-se os pontos de concentração no secundário “S₀”, “S₁” e “S₂”.

Tabela 6.2
Valores de Base Utilizados

Lado	Secundário (BT)
Potência Base – Sb (MVA)	1
Tensão Base – Vb (Kv)	0,22
Com os Valores Dados Acima Obtemos	
Impedância Base – Zb (Ω)	0,0484
Corrente Base – Ib (A)	2624,319

Tabela 6.3
Parâmetros das Cargas Lineares Conectadas à Linha Secundária

Ponto Parâmetro	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.]	59,20	80,40	107,22	157,74	153,44	74,00	85,24	148,00	157,74
L [p.u.]	73,22m	37,60m	50,14m	112,12m	148,16m	91,54m	82,30m	183,06m	112,12m

Tabela 6.4
Parâmetros das Cargas Não Lineares Conectadas à Linha Secundária

Ponto de concentração de carga	Ordem harmônica	Fase r			Fase s			Fase t		
		Amplitude [p.u.]	(%) da Fund.	fase [°]	Amplitude [p.u.]	(%) da Fund.	fase [°]	Amplitude [p.u.]	(%) da Fund.	fase [°]
S ₀ e S ₁	1	0,016248	100,00	0	0,015398	100,00	120	0,015249	100,00	240
	3	0,012627	77,71	162	0,011787	76,55	172	0,011881	77,91	158
	5	0,008275	50,93	-15	0,007342	47,68	236	0,008221	53,91	98
	7	0,003415	21,02	152	0,003682	23,91	-68	0,004721	30,96	20
	9	0,00256	15,76	-29	0,0023	14,94	-9	0,003304	21,67	-59
	11	0,001596	9,82	146	0,001621	10,53	49	0,0018	11,80	230
	13	0,000479	2,95	-66	0,000946	6,14	90	0,000408	2,68	127
	15	0,000448	2,76	85	0,000749	4,86	53	0,000447	2,93	61
S ₂	1	0,032497	100,00	0	0,030798	100,00	120	0,030499	100,00	240
	3	0,025255	77,71	162	0,023575	76,55	172	0,023764	77,92	158
	5	0,016553	50,94	-15	0,014686	47,68	236	0,016444	53,92	98
	7	0,006832	21,02	152	0,007366	23,92	-68	0,009441	30,96	20
	9	0,005122	15,76	-29	0,004602	14,94	-9	0,006611	21,68	-59
	11	0,003194	9,83	146	0,003243	10,53	49	0,003602	11,81	230
	13	0,000958	2,95	-66	0,001893	6,15	90	0,000816	2,68	127
	15	0,000897	2,76	85	0,001497	4,86	53	0,000894	2,93	61

6.2 – Análise dos Resultados obtidos

6.2.1 – Análise antes da abertura do condutor neutro

Apresentam-se neste item as formas de onda obtidas através do programa de simulação em ambiente Pspice, cuja descrição do programa, bem como um diagrama esquemático do novo modelo do transformador, do ramo secundário, das cargas lineares e não lineares, encontram-se no Anexo C.1 e C.2. Conforme já apresentado através das cargas, o sistema se encontra desequilibrado, porém, com cargas de mesma natureza acopladas nos pontos “S₀”, “S₁” e “S₂”.

As Figuras 6.2 e 6.3 apresentam as formas de ondas processadas pelo transformador.

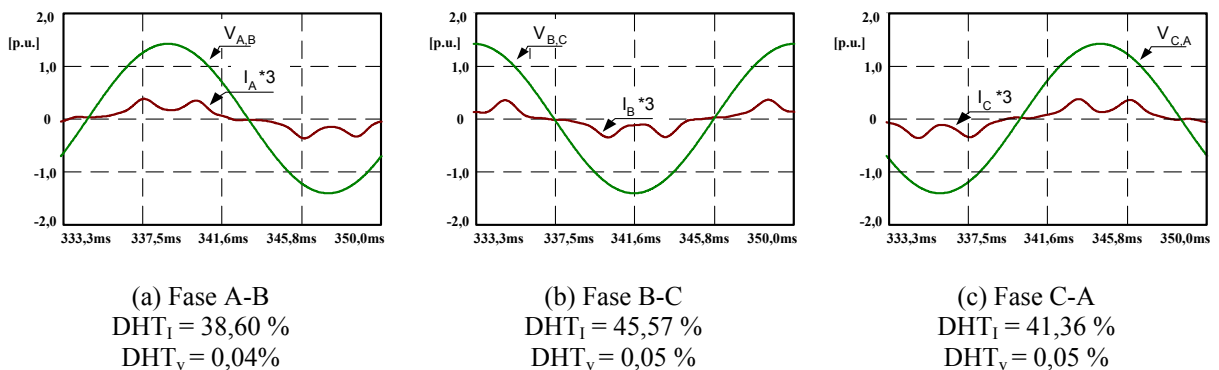


Fig. 6.2 - Formas de onda no primário do transformador

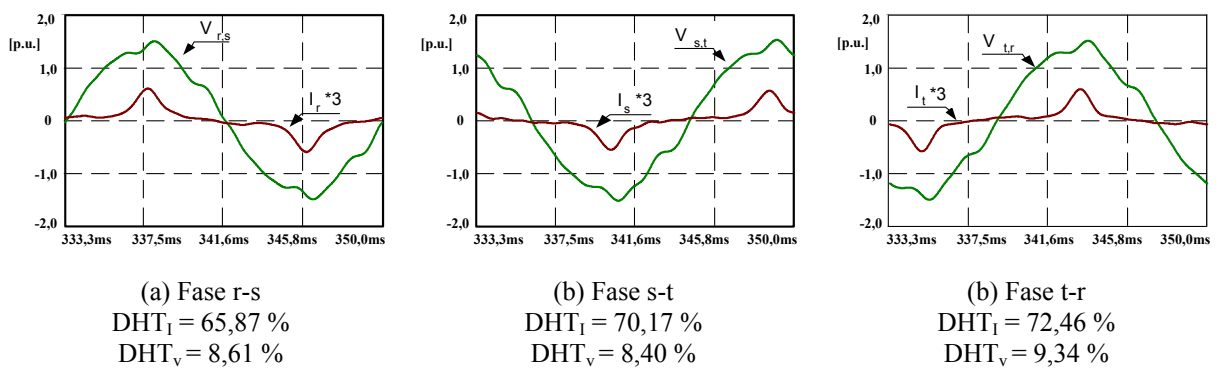


Fig. 6.3 - Formas de onda no secundário do transformador

Observa-se que as distorções harmônicas nas tensões do lado primário são bem pequenas, mesmo com uma grande distorção harmônica nas formas de onda das correntes. Isso se dá devido à impedância característica do transformador a qual atua como um filtro

parcial das harmônicas, fazendo com que seus níveis seja menor no lado primário. Além disso, as correntes no lado primário são de menores amplitudes, e, assim, devido às pequenas quedas de tensões nas impedâncias do lado primário, as formas de onda das tensões são preservadas próximas a uma senoide, uma vez que o transformador está conectado a um barramento “ideal”.

Já no lado secundário, as distorções nas formas de onda das tensões são claramente visualizadas, isto devido aos elevados valores de correntes distorcidas drenadas do transformador, as quais, ao fluírem pelas linhas causam acentuadas distorções nas formas de onda das tensões, ultrapassando-se o limite (5%), por exemplo, da norma IEEE 519 [7].

Na tabela 6.5 são apresentados os espectros harmônicos das tensões de fase no ponto “S₀” (ponto de concentração de carga mais próximo do transformador).

Tabela 6.5
Espectro Harmônico das Tensões de Fase no Secundário do Transformador “S₀”

Ordem harmônica	Fase r		Fase s		Fase t	
	Amplitude [p.u]	% da fundamental	Amplitude [p.u]	% da fundamental	Amplitude [p.u]	% da fundamental
1	0,80360	100,00	0,80500	100,00	0,80460	100,00
3	0,03806	4,74	0,03607	4,48	0,03603	4,48
5	0,04261	5,30	0,03857	4,79	0,04288	5,33
7	0,02506	3,12	0,02681	3,33	0,03395	4,22
9	0,02230	2,78	0,02076	2,58	0,02969	3,69
11	0,01767	2,20	0,01862	2,31	0,02033	2,53
13	0,00665	0,83	0,01268	1,58	0,00526	0,65
15	0,00641	0,80	0,01138	1,41	0,00645	0,80
	DHT _V = 8,61%		DHT _V = 8,40%		DHT _V = 9,34%	
Conteúdo Harmônico Percentual						

Nas tabelas 6.6 e 6.7 são apresentados os espectros harmônicos das correntes processadas pelo transformador observando-se que, como comentado no capítulo anterior quando da validação do modelo do transformador, em se tratando de um sistema trifásico

desequilibrado, mesmo com a configuração $\Delta - Y$, as correntes de ordens triplas também fluirão para o primário, destacando-se ainda as componentes de 5ª e 7ª ordens.

Tabela 6.6
Espectro Harmônico das Correntes Processadas no Primário do Transformador

Ordem harmônica	Fase A		Fase B		Fase C	
	Amplitude [p.u]	% da fundamental	Amplitude [p.u]	% da fundamental	Amplitude [p.u]	% da fundamental
1	0,08590	100,00	0,08131	100,00	0,08595	100,00
3	0,00532	6,20	0,00681	8,38	0,00222	2,58
5	0,02840	33,06	0,03260	40,09	0,03068	35,70
7	0,01490	17,35	0,01310	16,11	0,01657	19,28
9	0,00190	2,21	0,00562	6,91	0,00374	4,35
11	0,00533	6,21	0,00760	9,35	0,00503	5,85
13	0,00314	3,65	0,00152	1,87	0,00195	2,26
15	0,00100	1,17	0,00072	0,89	0,00041	0,48
	DHT _I = 38,60%		DHT _I = 45,57%		DHT _I = 41,36%	
Conteúdo Harmônico Percentual						

Tabela 6.7
Espectro Harmônico das Correntes Processadas no Secundário do Transformador “S₀”

Ordem harmônica	Fase r		Fase s		Fase t	
	Amplitude [p.u]	% da fundamental	Amplitude [p.u]	% da fundamental	Amplitude [p.u]	% da fundamental
1	0,09025	100,00	0,08048	100,00	0,08236	100,00
3	0,04716	52,25	0,04502	55,94	0,04494	54,57
5	0,03173	35,16	0,02869	35,65	0,03184	38,66
7	0,01328	14,71	0,01427	17,73	0,01802	21,88
9	0,00924	10,24	0,00863	10,73	0,01230	14,93
11	0,00599	6,63	0,00630	7,83	0,00686	8,33
13	0,00189	2,10	0,00364	4,52	0,00150	1,83
15	0,00159	1,76	0,00284	3,52	0,00161	1,95
	DHT _I = 65,87%		DHT _I = 70,17%		DHT _I = 72,46%	
Conteúdo Harmônico Percentual						

As figuras 6.4(a) e 6.4(b) mostram em detalhe as formas de onda das correntes no secundário do transformador e a corrente no neutro respectivamente.

Observa-se que o condutor neutro é utilizado como retorno para as fases, assim, a corrente que circula pelo neutro é estabelecida pela equação: $I_n = I_r + I_s + I_t$, sendo então a frequência da fundamental da corrente no neutro, três vezes a frequência fundamental das correntes nas fases.

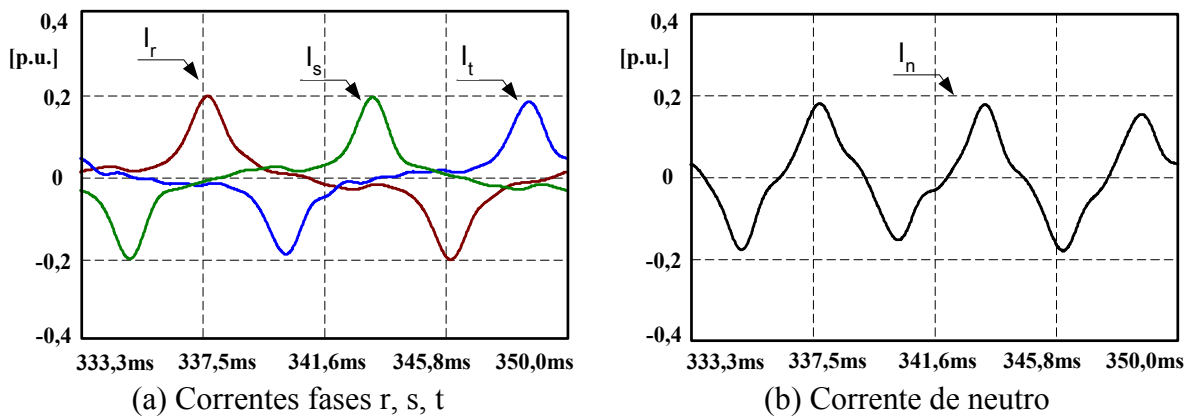


Fig. 6.4 - Detalhes das formas de onda das correntes no ponto “S₀”

6.2.1.1 – Análise no ponto de concentração “S₁”

Como o ponto “S₁” se encontra a aproximadamente 26,3m do transformador, as distorções harmônicas das tensões neste ponto são maiores devido às quedas de tensão nas impedâncias da linha compreendida no segmento “S₀ – S₁”, oriundas do fluxo da somatória das correntes drenadas no ponto “S₁” e “S₂”. A figura 6.5 apresenta as formas de onda das tensões e correntes neste ponto, estando visíveis as maiores distorções das tensões neste ponto, em relação àquelas no ponto “S₀”.

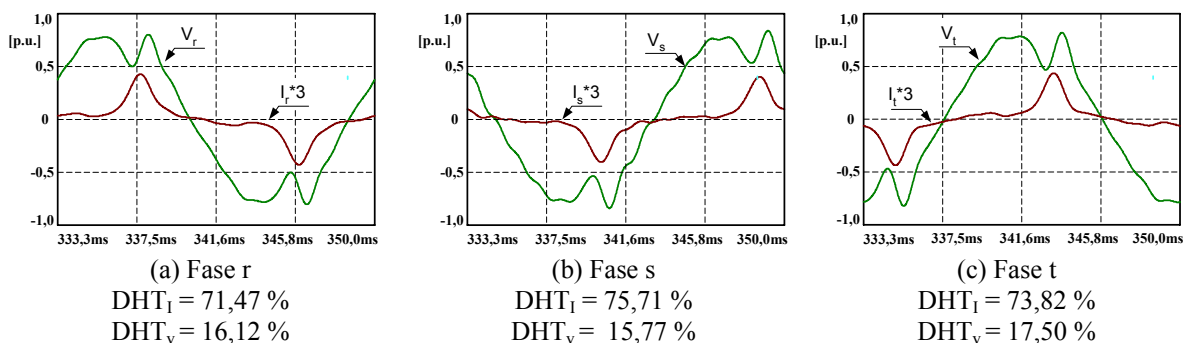


Fig. 6.5 - Formas de onda das tensões e correntes no ponto de concentração “S₁”

A tabela 6.8 apresenta o espectro harmônico das tensões neste ponto.

Tabela 6.8
Espectro Harmônico das Tensões no Ponto de Concentração “S₁”

Ordem harmônica	Fase r		Fase s		Fase t	
	Amplitude [p.u]	% da fundamental	Amplitude [p.u]	% da fundamental	Amplitude [p.u]	% da fundamental
1	0,78560	100,00	0,78850	100,00	0,78700	100,00
3	0,06958	8,86	0,06632	8,41	0,06608	8,40
5	0,07819	9,95	0,07094	9,00	0,07863	9,99
7	0,04599	5,85	0,04932	6,25	0,06217	7,90
9	0,04054	5,16	0,03809	4,83	0,05429	6,90
11	0,03233	4,12	0,03428	4,35	0,03727	4,74
13	0,01222	1,56	0,02332	2,96	0,00961	1,22
15	0,01162	1,48	0,02094	2,66	0,01175	1,49
	DHT _V = 16,12%		DHT _V = 15,77%		DHT _V = 17,50%	

Conteúdo Harmônico Percentual	Fase r							Fase s							Fase t						
	3	5	7	9	11	13	15	3	5	7	9	11	13	15	3	5	7	9	11	13	15
(%) da Fundamental	8,86	9,95	5,85	5,16	4,12	1,56	1,48	8,41	9,00	6,25	4,83	4,35	2,96	2,66	8,40	9,99	7,90	6,90	4,74	1,22	1,49

As correntes de fase processadas neste ponto são apresentadas com detalhes na figura 6.6, onde se visualiza as formas de onda das correntes e a conseqüente corrente de neutro.

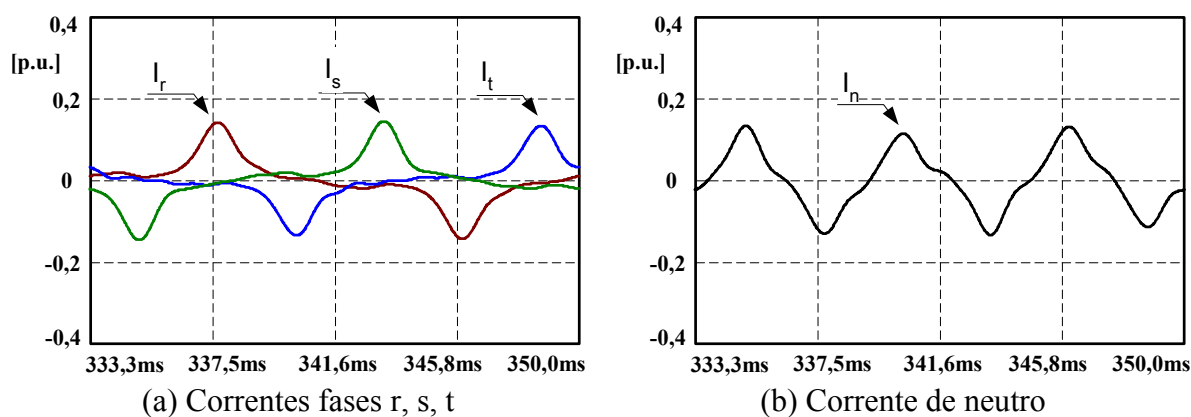


Fig. 6.6 - Detalhes das formas de onda das correntes no ponto “S₁”

Pode-se observar que as amplitudes das correntes que retornam pelo neutro são menores neste ponto “S₁” do que no ponto “S₀”, pois as correntes drenadas no ponto “S₀” não estão somadas neste ponto, sendo as correntes deste segmento o resultado das somatórias das correntes drenadas nos pontos “S₁” e “S₂”.

6.2.1.2 – Análise no ponto de concentração “S₂”

Na figura 6.7 são apresentadas as formas de ondas das tensões e correntes no ponto de concentração “S₂”, o qual se encontra no ponto terminal do ramal, a 86,3m de distância do transformador alimentador. Como apresentada na figura 6.7, devido à carga concentrada no ponto “S₂” ser maior que aquelas do ponto “S₀” e “S₁” (duas vezes maior), as formas de ondas das tensões apresentarão uma elevada taxa de distorção harmônica.

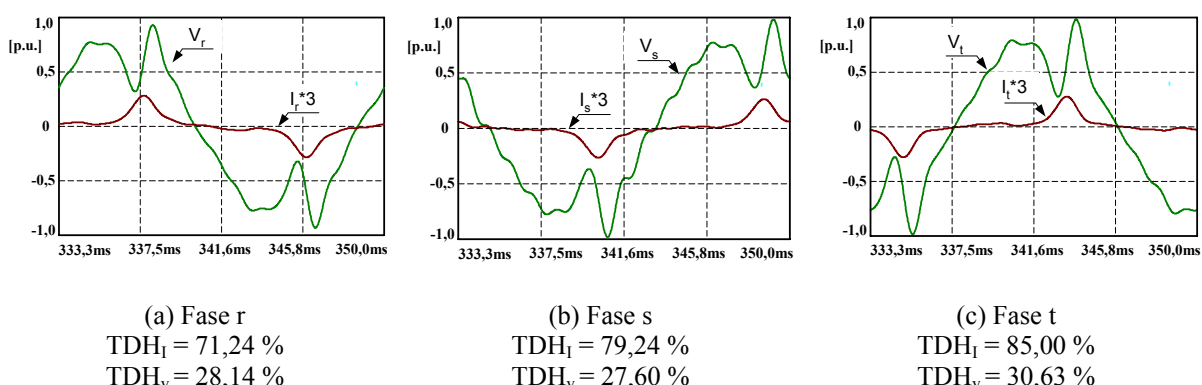


Fig. 6.7 - Formas de onda das tensões e correntes no ponto de concentração “S₂”

A tabela 6.9 apresenta o conteúdo harmônico das tensões neste ponto de concentração.

Tabela 6.9
Espectro Harmônico das Tensões no Ponto de Concentração “S₂”

Ordem harmônica	Fase r		Fase s		Fase t	
	Amplitude [p.u]	% da fundamental	Amplitude [p.u]	% da fundamental	Amplitude [p.u]	% da fundamental
1	0,75860	100,00	0,76460	100,00	0,76380	100,00
3	0,11700	15,42	0,11260	14,73	0,11270	14,76
5	0,13210	17,41	0,12040	15,75	0,13350	17,48
7	0,07785	10,26	0,08367	10,94	0,10540	13,80
9	0,06779	8,94	0,06453	8,44	0,09205	12,05
11	0,05445	7,18	0,05817	7,61	0,06318	8,27
13	0,02073	2,73	0,03956	5,17	0,01626	2,13
15	0,01940	2,56	0,03551	4,64	0,01988	2,60
	DHT _V = 28,14%		DHT _V = 27,60%		DHT _V = 30,63%	
Conteúdo Harmônico Percentual						
	<p>(% da Fundamental)</p>		<p>(% da Fundamental)</p>		<p>(% da Fundamental)</p>	
	<p>ordem harmônica</p>		<p>ordem harmônica</p>		<p>ordem harmônica</p>	

As correntes circulantes pelo neutro neste ponto de concentração são apresentadas na figura 6.8, destacando que as correntes tanto de fase quanto de neutro neste ponto de concentração são menores que as correntes nos pontos “S₀” e “S₁”, devido à disposição do ponto “S₂” no circuito (ponto terminal).

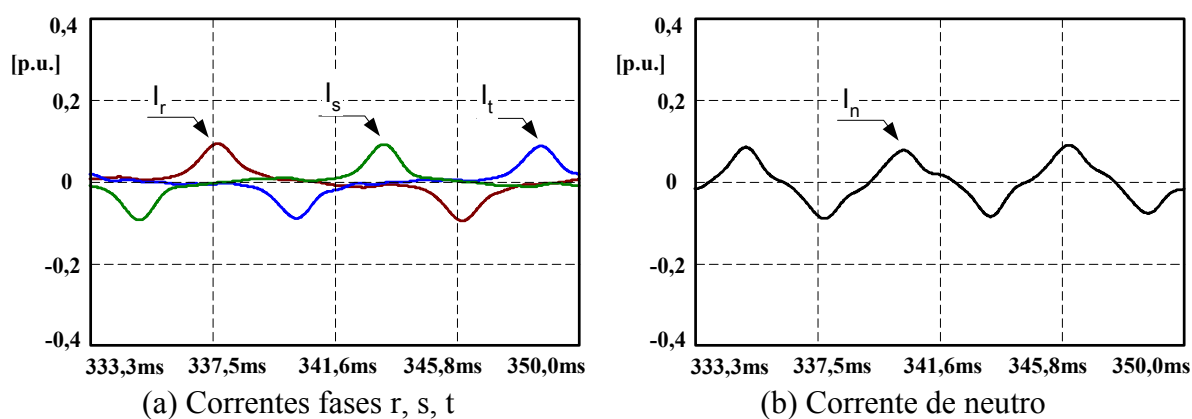


Fig. 6.8 Detalhes das formas de onda das correntes no ponto “S₂”

6.2.1.3 – Comparação das tensões e correntes nos diferentes pontos de concentração na fase r

As figuras 6.9, 6.10 e 6.11, apresentam comparações para as tensões e correntes processadas nos diferentes pontos de concentração em uma mesma fase, sendo então utilizada a fase r como exemplo. Assim, através da figura 6.9, torna-se de fácil visualização as deformações das formas de ondas das tensões, causadas pelas correntes drenadas por cargas não lineares, com elevados níveis de componentes harmônicos. Pode-se observar também que, praticamente, não há defasagem entre as tensões de um ponto para o outro.

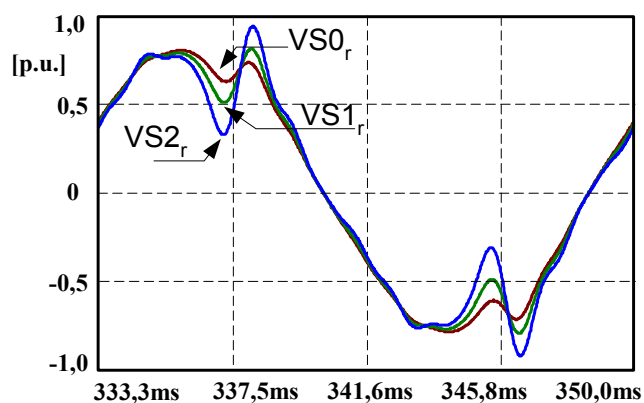


Fig. 6.9 - Comparação das tensões nos pontos “S₀”, “S₁” e “S₂” da fase r

A figura 6.10 traz um detalhe das formas de onda das correntes processadas nos diferentes pontos da fase r. Observa-se assim que a corrente no ponto “S₀” tem um elevado valor de pico e com uma envoltória nada senoidal (característica de carregamento fortemente não linear).

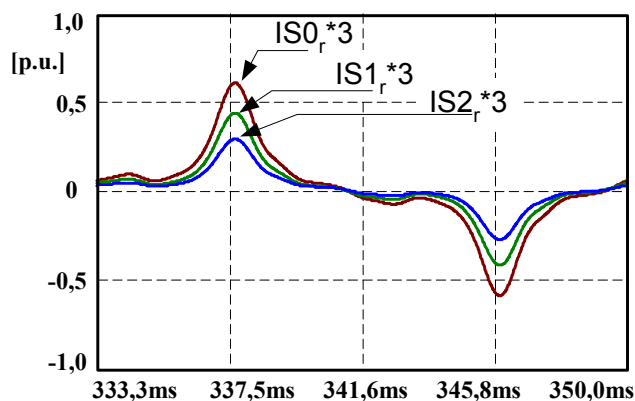


Fig. 6.10 - Comparação das correntes nos pontos “S₀”, “S₁” e “S₂” da fase r

Como consequência das formas de onda das fases, as formas de onda de corrente no neutro também se comportam da mesma maneira, ou seja, a cada nó mais próximo do transformador ela vai sendo incrementada a corrente das cargas acopladas neste determinado ponto. A figura 6.11 apresenta as formas de onda das correntes no condutor neutro, nos diferentes pontos de concentração de cargas.

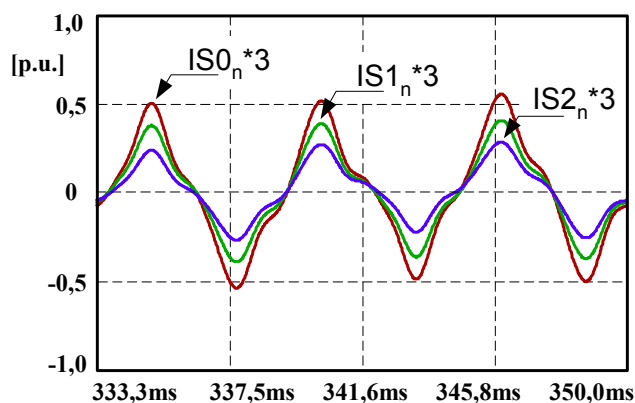


Fig. 6.11 - Comparação da corrente no neutro nos pontos “S₀”, “S₁” e “S₂” da fase r

6.2.2 – Análise comparativa após a abertura do condutor neutro

Como já citado anteriormente, num determinado instante (350ms), é considerado o rompimento do condutor neutro, no segmento entre o transformador e o ponto de concentração S_0 , uma vez que sua capacidade máxima de corrente foi excedida (bitola do condutor neutro 1/0 AWG – Anexo B – Tabela B.1). Observa-se que o valor de capacidade de condutor deste condutor (245,0 A) é especificado para corrente eficaz de frequência fundamental, porém vale ressaltar que devido ao alto conteúdo harmônico percorrendo o cabo, este condutor chegaria ao rompimento bem antes deste valor devido ao agravante fator da presença de correntes de ordens triplas elevadas circulantes por este condutor. Assim a penetração de corrente no cabo é reduzida fazendo com que a área utilizada para o fluxo seja também reduzida (efeito Skin).

Assim, em circuitos com a presença de um forte conteúdo harmônico torna-se necessário a aplicação de um fator de correção para especificação da bitola do condutor. A tabela 6.10, baseada na Norma NBR 5410 (tabela 45), mostra o fator de correção para a especificação da bitola do condutor na presença de harmônicas.

Tabela 6.10
Fatores de Correção Aplicáveis a Circuitos Trifásicos a Quatro Condutores com Presença de Correntes Harmônicas de 3ª Ordem.

Porcentagem de 3ª harmônica na corrente de fase (P_3 -%)	Fator de correção (f)	
	Escolha da seção com base na corrente de fase	Escolha da seção com base na corrente de neutro
0 – 15	1,0	-
15 – 33	0,86	-
33 – 45	-	0,86
> 45	-	1,0

Sendo que pode-se realizar dois tipos de cálculos:

- Pela corrente de fase: $I = \frac{I_B}{f}$

- Pela corrente de neutro: $I = \frac{I_B}{f} \cdot \frac{P_3 \%}{100} \cdot 3$

Onde:

I_B = corrente de projeto do circuito

$P_3\%$ = porcentagem da harmônica de 3ª ordem (tabela 6.10)

f = fator de correção (tabela 6.10)

Pode-se observar então que quanto maior o conteúdo harmônico circulante pelo condutor ($P_3\%$), maior terá que ser a seção transversal do condutor ou ainda, no caso de um condutor com bitola determinada, restringir-se-á a sua capacidade de condução em até três vezes, o que no estudo apresentado, levaria ao rompimento do condutor em valores bem menores do que o considerado.

A figura 6.12 apresenta o valor da corrente eficaz no neutro, antes de seu rompimento.

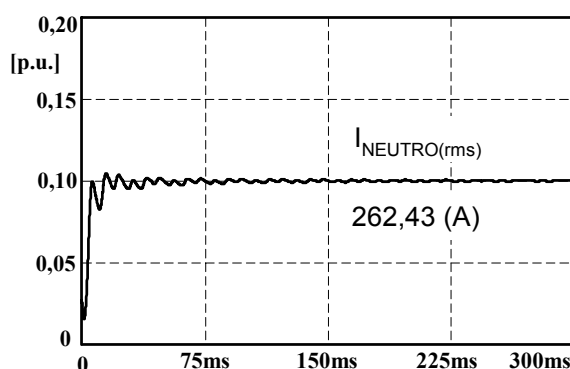


Fig. 6.12 – Valor eficaz da corrente de neutro

Assim, para simular um rompimento do condutor, devido o programa Pspice não aceitar qualquer nó flutuante, foi inserido um interruptor bidirecional em tensão e corrente na saída do transformador, o qual, quando em condução apresenta uma impedância muito baixa permitindo o fluxo de corrente; e quando bloqueado apresenta uma impedância bastante elevada (ordem de Mega-ohms), não permitindo o fluxo da corrente através do condutor neutro, simulando então sua ruptura.

A figura 6.13 apresenta o momento do rompimento do condutor.

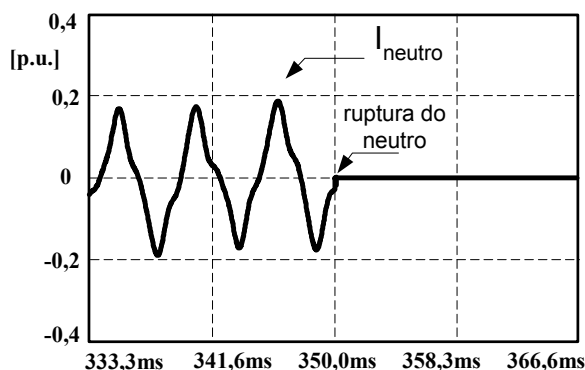


Fig. 6.13 – Instante da ruptura do condutor neutro

Assim, após o rompimento do condutor neutro, passa-se a apresentar as formas de onda das tensões e correntes nos diversos pontos do sistema. As formas de ondas são apresentadas em forma de comparação das tensões e correntes antes e depois da ruptura do neutro, isso para que se tenha uma melhor visualização das mudanças ocorridas no formato das mesmas.

Como as correntes de ordens triplas fluíam pelo neutro, ao abri-lo, tais correntes encontram caminhos alternativos através das cargas se somando as correntes de outras ordens harmônicas, fluindo assim pelas fases. Assim, as formas de onda das correntes nas fases, devido à composição harmônica ou possíveis cancelamentos, a partir do rompimento do neutro, apresentam uma envoltória com uma característica de menor distorção (mais senoidal), conforme se comprova através da comparação das DHT's. Como as correntes nas linhas passam a ter uma taxa de distorção menor, consequentemente, as distorções por elas causadas nas tensões serão menores, o que também pode ser conferido através das formas de onda e seus respectivos espectros harmônicos.

A figura 6.14 apresenta uma comparação entre as formas de onda das tensões e correntes no ponto de concentração "S₀", para as três fases r, s, t, antes e após a ruptura do neutro. Os respectivos espectros harmônicos são apresentados nas tabelas 6.11 a 6.13.

6.2.2.1 – Comparação das formas de ondas de tensão e correntes no ponto “S₀”

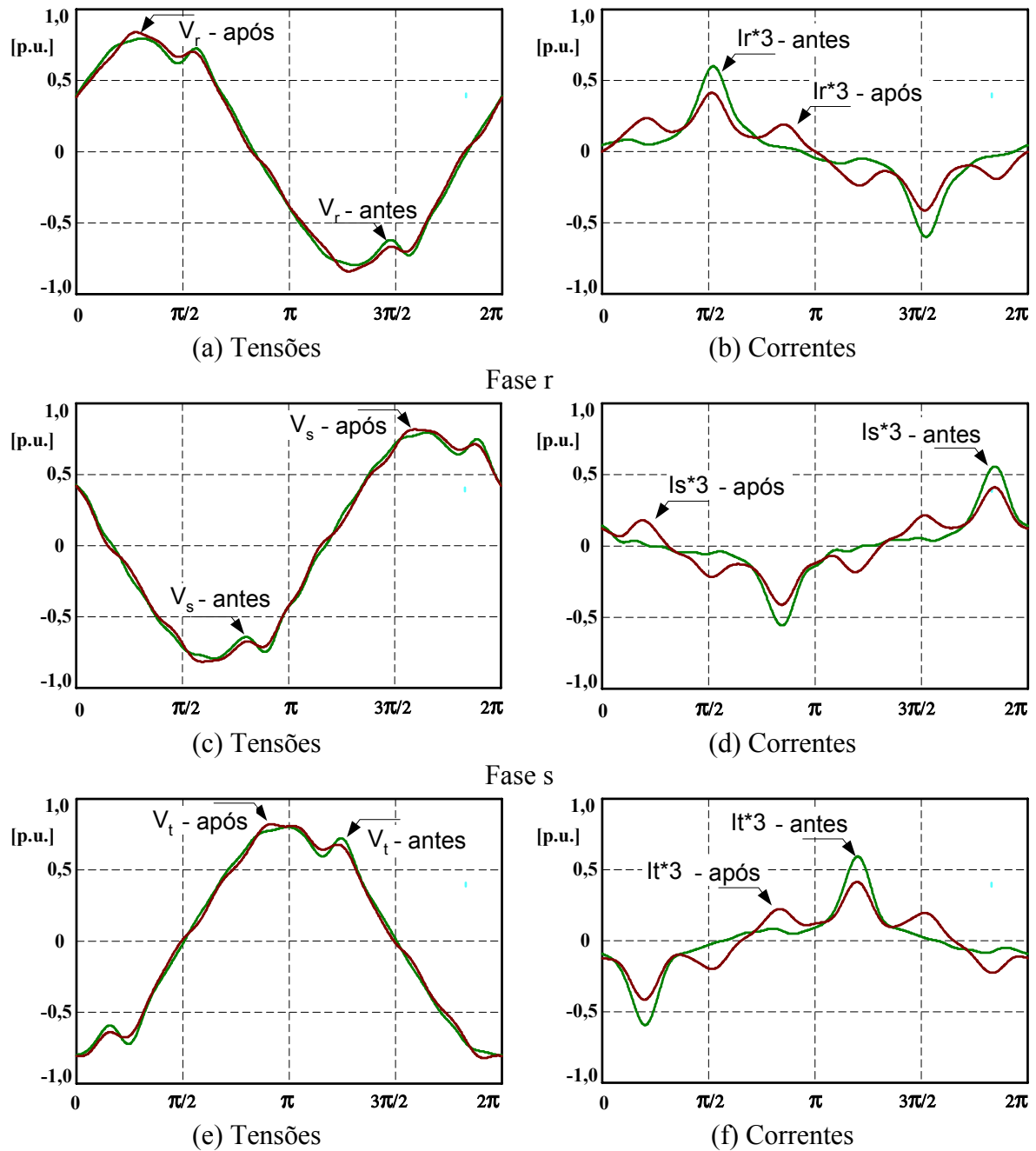


Fig. 6.14 – Comparação das tensões e correntes no ponto “S₀” antes e após a ruptura do neutro

Tabela 6.11
Espectro Harmônico no Secundário do Transformador “S₀”

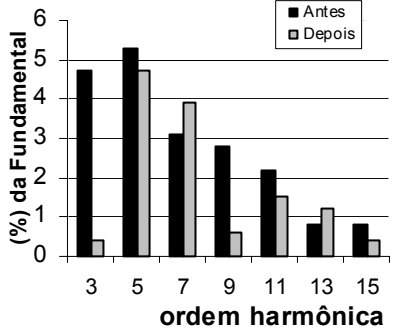
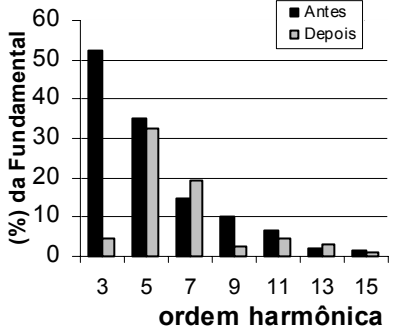
Ordem harmônica	Fase “ r ”							
	Tensões				Correntes			
	Antes		Depois		Antes		Depois	
	Amp.[p.u]	% fund.	Amp.[p.u]	% fund.	Amp.[p.u]	% fund.	Amp.[p.u]	% fund.
1	0,80360	100,00	0,80420	100,00	0,09025	100,00	0,08704	100,00
3	0,03806	4,74	0,00330	0,41	0,04716	52,25	0,00410	4,72
5	0,04261	5,30	0,03811	4,74	0,03173	35,16	0,02832	32,54
7	0,02506	3,12	0,03129	3,89	0,01328	14,71	0,01660	19,07
9	0,02230	2,78	0,00493	0,61	0,00924	10,24	0,00203	2,34
11	0,01767	2,20	0,01230	1,53	0,00599	6,63	0,00415	4,77
13	0,00665	0,83	0,00977	1,22	0,00189	2,10	0,00279	3,21
15	0,00641	0,80	0,00332	0,41	0,00159	1,76	0,00082	0,94
	DHT _V = 8,61%		DHT _V = 6,49%		DHT _I = 65,87%		TDH = 38,52 %	
Conteúdo Harmônico Percentual								

Tabela 6.12
Espectro Harmônico no Secundário do Transformador “S₀”

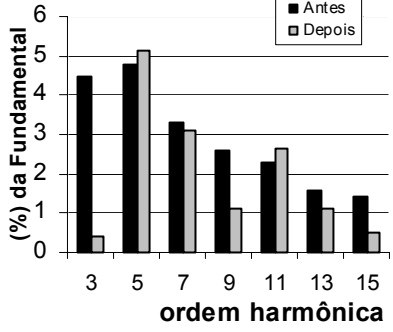
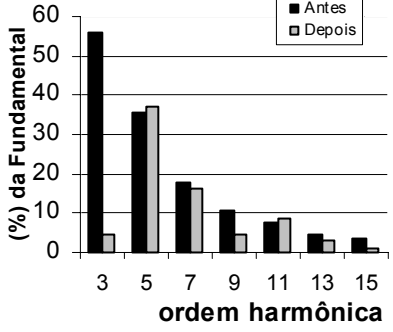
Ordem harmônica	Fase “ s ”							
	Tensões				Correntes			
	Antes		Depois		Antes		Depois	
	Amp.[p.u]	% fund.	Amp.[p.u]	% fund.	Amp.[p.u]	% fund.	Amp.[p.u]	% fund.
1	0,80500	100,00	0,80530	100,00	0,08048	100,00	0,08250	100,00
3	0,03607	4,48	0,00321	0,40	0,04502	55,94	0,00395	4,78
5	0,03857	4,79	0,04138	5,14	0,02869	35,65	0,03073	37,25
7	0,02681	3,33	0,02514	3,12	0,01427	17,73	0,01333	16,16
9	0,02076	2,58	0,00915	1,14	0,00863	10,73	0,00378	4,59
11	0,01862	2,31	0,02107	2,62	0,00630	7,83	0,00712	8,62
13	0,01268	1,58	0,00898	1,11	0,00364	4,52	0,00257	3,11
15	0,01138	1,41	0,00398	0,49	0,00284	3,52	0,00099	1,19
	DHT _V = 8,40%		DHT _V = 6,77%		DHT _I = 70,17%		DHT _I = 42,16%	
Conteúdo Harmônico Percentual								

Tabela 6.13
Espectro Harmônico no Secundário do Transformador “S₀”

Ordem harmônica	Fase “ t ”							
	Tensões				Correntes			
	Antes		Depois		Antes		Depois	
	Amp.[p.u]	% fund.	Amp.[p.u]	% fund.	Amp.[p.u]	% fund.	Amp.[p.u]	% fund.
1	0,80460	100,00	0,80400	100,00	0,08236	100,00	0,08293	100,00
3	0,03603	4,48	0,00531	0,66	0,04494	54,57	0,00658	7,93
5	0,04288	5,33	0,04381	5,45	0,03184	38,66	0,03256	39,26
7	0,03395	4,22	0,02792	3,47	0,01802	21,88	0,01482	17,87
9	0,02969	3,69	0,01348	1,68	0,01230	14,93	0,00556	6,71
11	0,02033	2,53	0,01992	2,48	0,00686	8,33	0,00673	8,11
13	0,00526	0,65	0,00302	0,38	0,00150	1,83	0,00086	1,04
15	0,00645	0,80	0,00177	0,22	0,00161	1,95	0,00044	0,53
	DHT _V = 9,34%		DHT _V = 7,16%		DHT _I = 72,46%		DHT _I = 45,12%	

Conteúdo Harmônico Percentual	Tensões						Correntes					
	3	5	7	9	11	15	3	5	7	9	11	15
Antes	4,48	5,33	4,22	3,69	2,53	0,65	54,57	38,66	21,88	14,93	8,33	1,83
Depois	0,66	5,45	3,47	1,68	2,48	0,38	7,93	39,26	17,87	6,71	8,11	1,04

A figura 6.15 apresenta o valor eficaz da corrente na fase r.

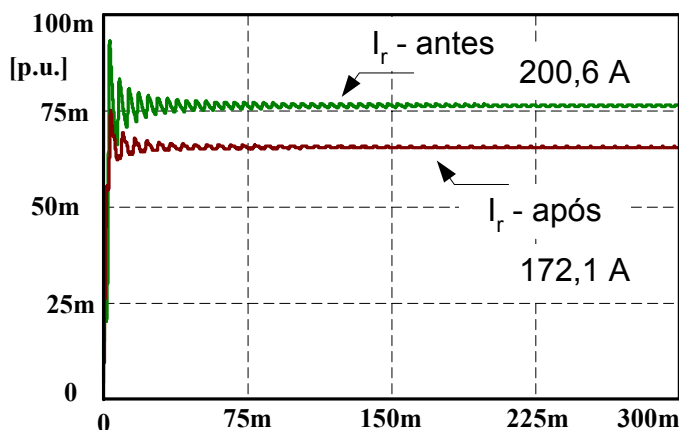


Fig. 6.15 - Detalhe do valor eficaz da corrente na fase r, antes e após a ruptura do neutro

Através desta figura, pode-se observar que as correntes nas fases decrescem quando o condutor neutro se rompe, pois a corrente de uma determinada fase encontrará sempre um caminho para circulação, através do circuito de outra fase, sendo que quando uma fase está injetando harmônicas de ordem tripla a outra fase esta drenando, diminuindo a corrente drenada da fonte (transformador).

Nesta nova configuração as cargas ficam em série e recebem tensão de linha, sendo que a corrente drenada agora será imposta pela associação série das cargas.

Da mesma forma, são apresentadas as formas de onda das tensões e correntes nos pontos “S₁” e “S₂”, respectivamente, bem como as tabelas com os espectros harmônicos.

6.2.2.2 – Comparação das formas de ondas de tensão e correntes no ponto “S₁”

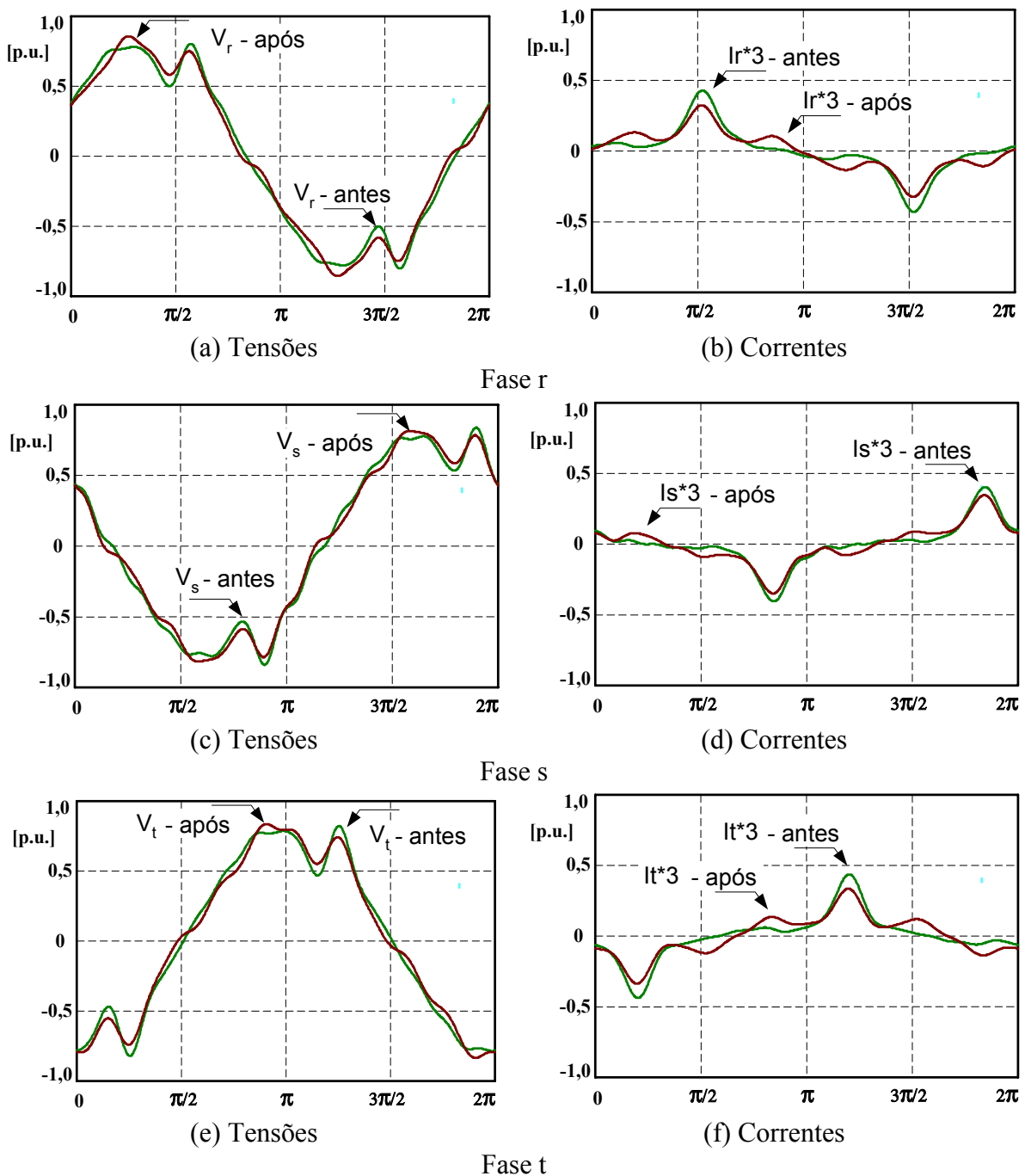


Fig. 6.16 – Comparação das tensões e correntes no ponto “S₁” antes e após a ruptura do neutro

Tabela 6.14
Espectro Harmônico das Tensões e Correntes no Ponto de Concentração “S₁” Antes e Após Ruptura do Neutro

Ordem harmônica	Fase “ r ”							
	Tensões				Correntes			
	Antes		Depois		Antes		Depois	
	Amp.[p.u]	% fund.	Amp.[p.u]	% fund.	Amp.[p.u]	% fund.	Amp.[p.u]	% fund.
1	0,78560	100,00	0,78680	100,00	0,06171	100,00	0,06001	100,00
3	0,06958	8,86	0,00518	0,66	0,03485	56,47	0,00757	12,62
5	0,07819	9,95	0,07080	9,00	0,02372	38,44	0,02180	36,33
7	0,04599	5,85	0,05618	7,14	0,00998	16,17	0,01187	19,78
9	0,04054	5,16	0,00911	1,16	0,00677	10,97	0,00191	3,18
11	0,03233	4,12	0,02344	2,98	0,00445	7,21	0,00339	5,64
13	0,01222	1,56	0,01739	2,21	0,00143	2,32	0,00196	3,26
15	0,01162	1,48	0,00545	0,69	0,00116	1,88	0,00051	0,85
	DHT _V = 16,12%		DHT _V = 12,16%		DHT _I = 71,47%		DHT _I = 43,85%	

Conteúdo Harmônico Percentual	Tensões				Correntes			
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois

Tabela 6.15
Espectro Harmônico das Tensões e Correntes no Ponto de Concentração “S₁” Antes e Após Ruptura do Neutro

Ordem harmônica	Fase “ s ”							
	Tensões				Correntes			
	Antes		Depois		Antes		Depois	
	Amp.[p.u]	% fund.	Amp.[p.u]	% fund.	Amp.[p.u]	% fund.	Amp.[p.u]	% fund.
1	0,78850	100,00	0,78870	100,00	0,05565	100,00	0,05673	100,00
3	0,06632	8,41	0,01854	2,35	0,03343	60,07	0,01722	30,35
5	0,07094	9,00	0,07454	9,45	0,02159	38,80	0,02206	38,89
7	0,04932	6,25	0,04629	5,87	0,01075	19,32	0,01008	17,77
9	0,03809	4,83	0,01720	2,18	0,00645	11,58	0,00431	7,59
11	0,03428	4,35	0,03707	4,70	0,00477	8,57	0,00487	8,58
13	0,02332	2,96	0,01829	2,32	0,00275	4,94	0,00239	4,22
15	0,02094	2,66	0,01048	1,33	0,00213	3,83	0,00150	2,64
	DHT _V = 15,77%		DHT _V = 12,77%		DHT _I = 75,71%		DHT _I = 53,89%	

Conteúdo Harmônico Percentual	Tensões				Correntes			
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois

Tabela 6.16

Espectro Harmônico das Tensões e Correntes no Ponto de Concentração “S₁” Antes e Após Ruptura do Neutro

Ordem harmônica	Fase “ t ”							
	Tensões				Correntes			
	Antes		Depois		Antes		Depois	
	Amp.[p.u]	% fund.	Amp.[p.u]	% fund.	Amp.[p.u]	% fund.	Amp.[p.u]	% fund.
1	0,78700	100,00	0,78590	100,00	0,06003	100,00	0,06030	100,00
3	0,06608	8,40	0,00825	1,05	0,03321	55,32	0,00578	9,58
5	0,07863	9,99	0,08050	10,24	0,02382	39,68	0,02450	40,63
7	0,06217	7,90	0,05284	6,72	0,01345	22,41	0,01189	19,72
9	0,05429	6,90	0,02549	3,24	0,00913	15,21	0,00469	7,78
11	0,03727	4,74	0,03680	4,68	0,00514	8,57	0,00515	8,54
13	0,00961	1,22	0,00601	0,76	0,00112	1,86	0,00079	1,31
15	0,01175	1,49	0,00104	0,13	0,00118	1,97	0,00017	0,29
	DHT _V = 17,50%		DHT _V = 13,57%		DHT _I = 73,82%		DHT _I = 47,60%	
Conteúdo Harmônico Percentual								

6.2.2.3 – Comparação das formas de ondas de tensão e correntes no ponto “S₂”

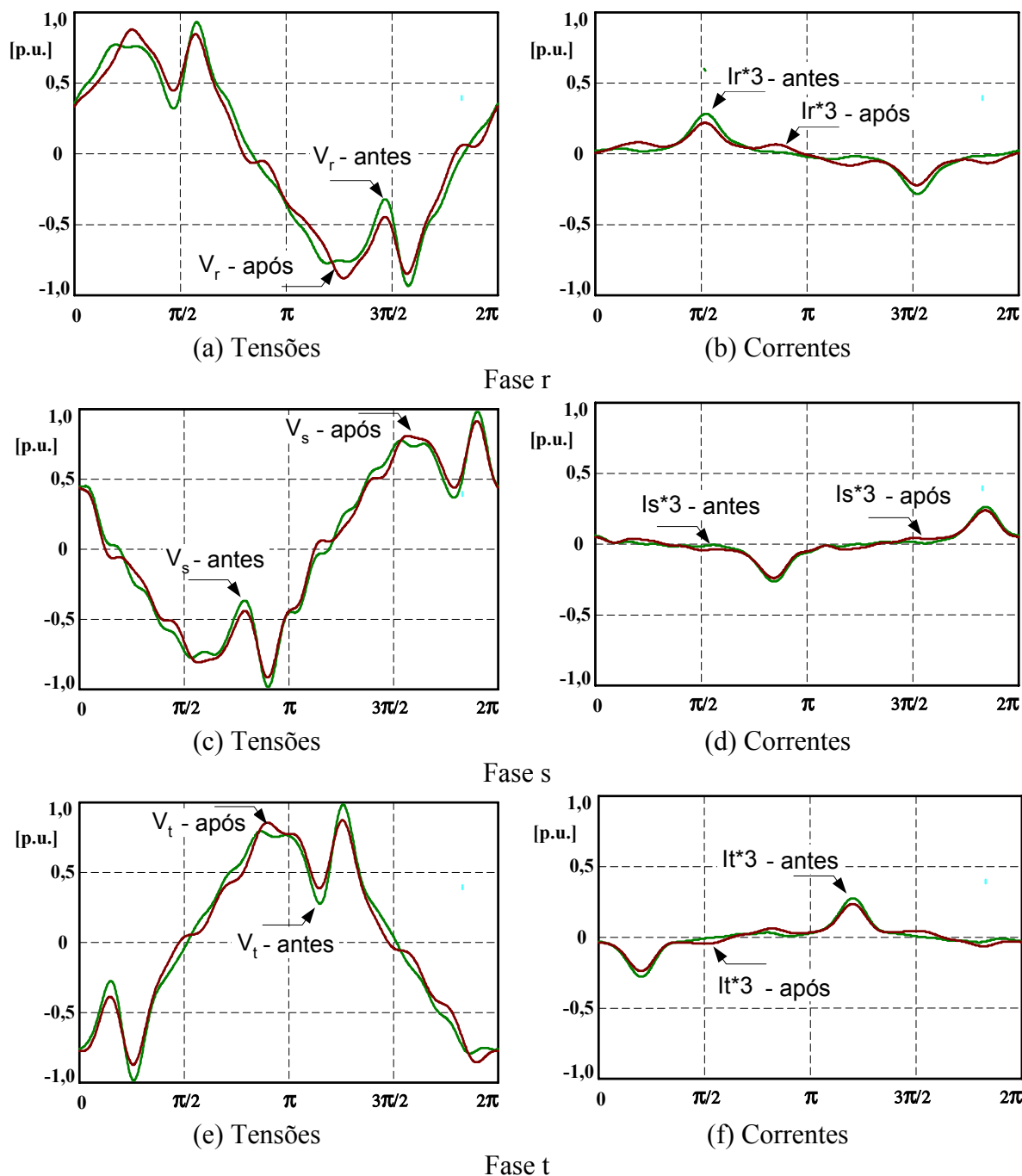


Fig. 6.17 – Comparação das tensões e correntes no ponto “S₂” antes e após a ruptura do neutro

Tabela 6.17
Espectro Harmônico das Tensões e Correntes no Ponto de Concentração “S₂” Antes e Após Ruptura do Neutro

Ordem harmônica	Fase “ r ”							
	Tensões				Correntes			
	Antes		Depois		Antes		Depois	
	Amp.[p.u]	% fund.	Amp.[p.u]	% fund.	Amp.[p.u]	% fund.	Amp.[p.u]	% fund.
1	0,75860	100,00	0,76070	100,00	0,04075	100,00	0,03968	100,00
3	0,11700	15,42	0,01830	2,41	0,02284	56,05	0,00637	16,06
5	0,13210	17,41	0,12080	15,88	0,01573	38,60	0,01459	36,77
7	0,07785	10,26	0,09331	12,27	0,00665	16,33	0,00776	19,55
9	0,06779	8,94	0,01880	2,47	0,00443	10,87	0,00169	4,25
11	0,05445	7,18	0,04102	5,39	0,00295	7,23	0,00234	5,90
13	0,02073	2,73	0,02851	3,75	0,00096	2,35	0,00125	3,16
15	0,01940	2,56	0,00886	1,17	0,00076	1,86	0,00037	0,92
	DHT _V = 28,14%		DHT _V = 21,42%		DHT _I = 71,24%		DHT _I = 45,35%	
Conteúdo Harmônico Percentual								

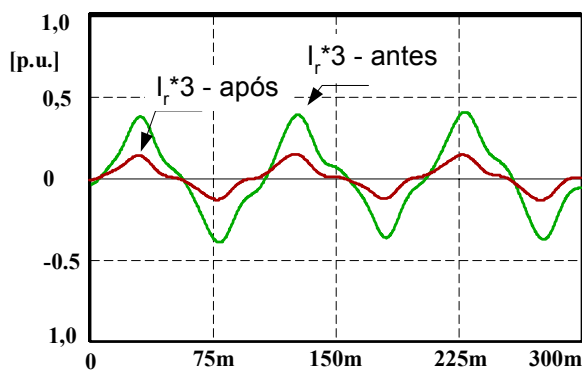
Tabela 6.18
Espectro Harmônico das Tensões e Correntes no Ponto de Concentração “S₂” Antes e Após Ruptura do Neutro

Ordem harmônica	Fase “ s ”							
	Tensões				Correntes			
	Antes		Depois		Antes		Depois	
	Amp.[p.u]	% fund.	Amp.[p.u]	% fund.	Amp.[p.u]	% fund.	Amp.[p.u]	% fund.
1	0,76460	100,00	0,76470	100,00	0,03547	100,00	0,03602	100,00
3	0,11260	14,73	0,04939	6,46	0,02227	62,79	0,01491	41,39
5	0,12040	15,75	0,12470	16,31	0,01443	40,68	0,01460	40,53
7	0,08367	10,94	0,07907	10,34	0,00719	20,26	0,00686	19,03
9	0,06453	8,44	0,03545	4,64	0,00431	12,15	0,00333	9,25
11	0,05817	7,61	0,06115	8,00	0,00319	8,99	0,00321	8,92
13	0,03956	5,17	0,03319	4,34	0,00184	5,18	0,00168	4,66
15	0,03551	4,64	0,02212	2,89	0,00143	4,02	0,00115	3,18
	DHT _V = 27,60%		DHT _V = 22,95%		DHT _I = 79,24%		DHT _I = 62,56%	
Conteúdo Harmônico Percentual								

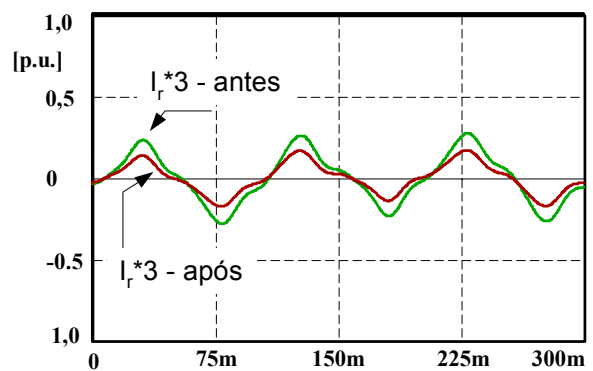
Tabela 6.19
Espectro Harmônico das Tensões e Correntes no Ponto de Concentração “S₂” Antes e Após Ruptura do Neutro

Ordem harmônica	Fase “ t ”							
	Tensões				Correntes			
	Antes		Depois		Antes		Depois	
	Amp.[p.u]	% fund.	Amp.[p.u]	% fund.	Amp.[p.u]	% fund.	Amp.[p.u]	% fund.
1	0,76380	100,00	0,76230	100,00	0,03514	100,00	0,03529	100,00
3	0,11270	14,76	0,03292	4,32	0,02245	63,89	0,01227	34,77
5	0,13350	17,48	0,13580	17,81	0,01599	45,50	0,01616	45,79
7	0,10540	13,80	0,09262	12,15	0,00903	25,71	0,00833	23,60
9	0,09205	12,05	0,05098	6,69	0,00614	17,47	0,00429	12,16
11	0,06318	8,27	0,06220	8,16	0,00345	9,82	0,00341	9,65
13	0,01626	2,13	0,01098	1,44	0,00075	2,13	0,00058	1,66
15	0,01988	2,60	0,00291	0,38	0,00079	2,26	0,00036	1,02
	DHT _V = 30,63%		DHT _V = 24,43%		DHT _I = 85,00%		DHT _I = 64,10%	
Conteúdo Harmônico Percentual								

Nas figuras 6.18 são apresentadas as formas de onda das correntes no neutro entre os segmentos S₀ – S₁ – S₂, o qual ainda permanece no circuito. Verifica-se que, também como nas fases, as correntes no neutro se reduzem.



Segmento S₀ - S₁



Segmento S₁ - S₂

Fig 6.18 - Formas de onda das correntes no neutro

6.2.3 – Análise dos desequilíbrios dos valores eficazes das tensões após a perda do neutro.

Após a perda do condutor neutro, como as tensões de fase perdem sua referência (neutro), as tensões nos diferentes pontos de concentração sofrem variações de seus valores eficazes, acarretando o desequilíbrio das tensões de alimentação das cargas.

A figura 6.19 apresenta os valores eficazes, em p.u. e em Volts, das tensões nos pontos “S₀”, “S₁” e “S₂”, antes e após o instante 350ms, momento este em que ocorre o rompimento do condutor neutro no segmento do trecho transformador – ponto S₀.

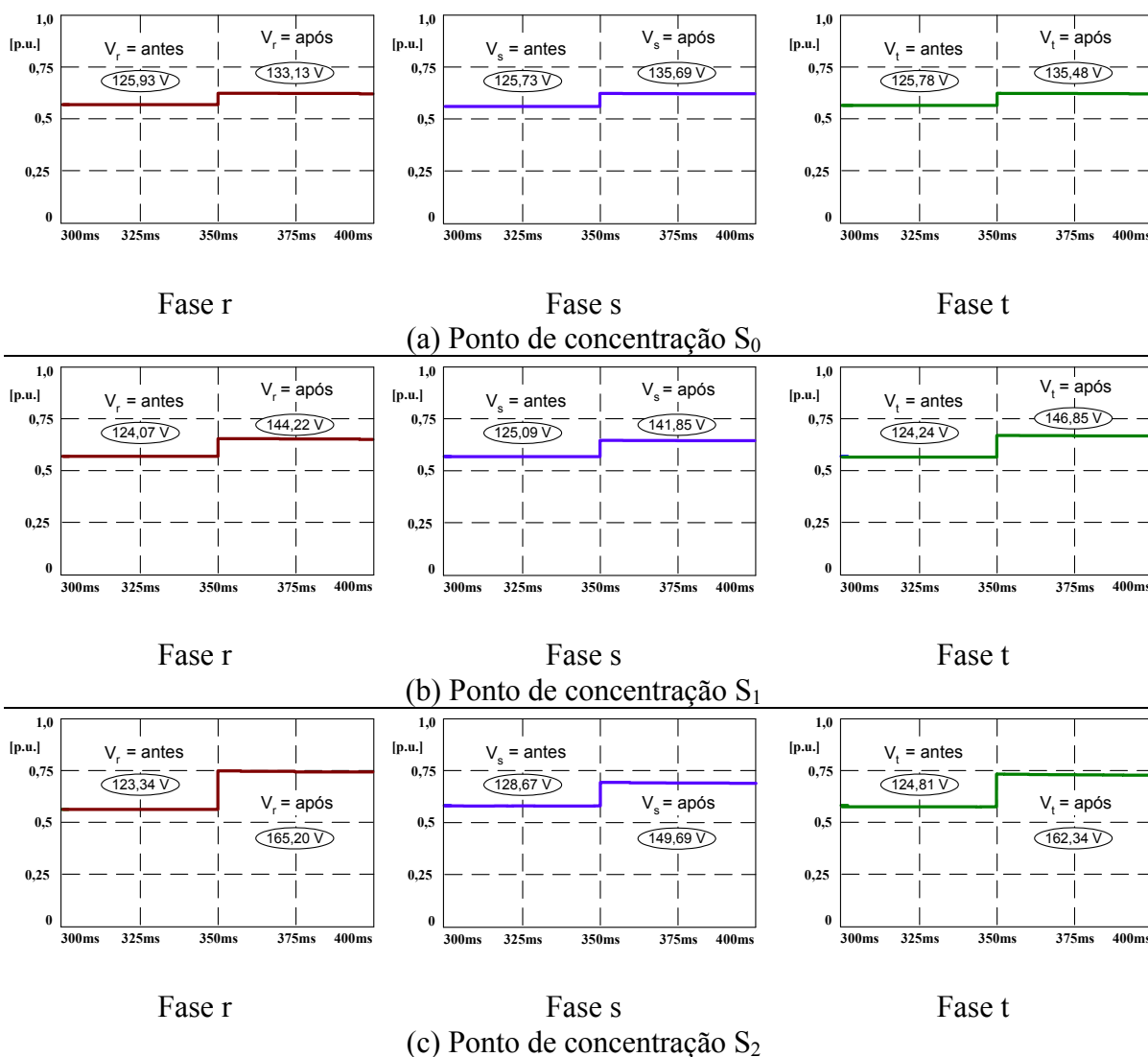


Fig. 6.19 – Comparação entre os valores eficazes das tensões, nos diferentes pontos de concentração, antes e depois da ruptura do condutor neutro

Observa-se que, após a perda do condutor neutro, as tensões assumem valores aleatórios devido à perda da referência (neutro), tendo assim valores eficazes sem correlação entre os valores de fases típicos. Pode-se observar através dos valores eficazes apresentados na figura 6.19 que as tensões nos pontos de concentração e, conseqüentemente, nas cargas, sofreram alterações significativas.

Assim, esta nova modelagem dentre outras aplicações, permite analisar e prever os desequilíbrios de tensões, o que se torna uma ferramenta importante uma vez que existem valores preestabelecidos por norma para as variações dos valores eficazes das tensões.

6.2.4 – Conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente – Resolução 505.

No ano de 1997 foram implantados dois órgãos a nível nacional sendo eles a ANEEL Agencia Nacional de Energia Elétrica e o ONS – Operador Nacional do Sistema elétrico. Tais órgãos atuam em áreas diferentes sendo a ANEEL responsável pelo estabelecimento das diretrizes, normas e resoluções e o ONS por sua vez tem a incumbência de operar o sistema elétrico.

Uma das resoluções estabelecidas pela ANEEL, resolução 505, estabelece de forma atualizada e consolidada, as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente.

Como observado na análise apresentada neste capítulo, o forte carregamento não linear representa com propriedade a situação do sistema elétrico atual. Devido às características das tecnologias de processamento de energia presente nos equipamentos atuais, o sistema se encontra hoje com um grande fluxo harmônicos no sistema elétrico o que tem levado à grandes distorções nas formas de ondas das tensões de alimentação das cargas, além de

causarem o mau funcionamento dos equipamentos, uma vez projetados para operarem com uma alimentação senoidal. No caso da perda de condutor neutro, o qual na configuração Δ -Y opera como um filtro de harmônicas de ordem tripla, os desequilíbrios de tensões são elevados ultrapassando os limites estabelecidos pela Resolução 505 apresentados na tab. 6.20.

Tabela 6.20
Tensões Eficazes Nominais Padronizadas

Tensão Nominal (TN)		Faixa de Valores Adequados das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN (Volts)	Faixa de Valores Precários das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN (Volts)	Faixa de Valores Críticos das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN (Volts)
Ligação	Volts			
Trifásica	(220) / (127)	$(201 \leq TL \leq 231) / (116 \leq TL \leq 133)$	$(189 \leq TL < 201$ ou $231 < TL \leq 233) / (109 \leq TL < 116$ ou $133 < TL \leq 140)$	$(TL < 189$ ou $TL > 233) / (TL < 109$ ou $TL > 140)$
	(380) / (220)	$(348 \leq TL \leq 396) / (201 \leq TL \leq 231)$	$(327 \leq TL < 348$ ou $396 < TL \leq 403) / (189 \leq TL < 201$ ou $231 < TL \leq 233)$	$(TL < 327$ ou $TL > 403) / (TL < 189$ ou $TL > 233)$
Monofásica	(254) / (127)	$(232 \leq TL \leq 264) / (116 \leq TL \leq 132)$	$(220 \leq TL < 232$ ou $264 < TL \leq 269) / (109 \leq TL < 116$ ou $132 < TL \leq 140)$	$(TL < 220$ ou $TL > 269) / (TL < 109$ ou $TL > 140)$
	(440) / (220)	$(402 \leq TL \leq 458) / (201 \leq TL \leq 229)$	$(380 \leq TL < 402$ ou $458 < TL \leq 466) / (189 \leq TL < 201$ ou $229 < TL \leq 233)$	$(TL < 380$ ou $TL > 466) / (TL < 189$ ou $TL > 233)$

Assim, a tab. 6.21 traz um resumo dos valores de tensão (F-N) obtidos em simulação após o rompimento do condutor neutro.

Tabela 6.21
Valores das Tensões Eficazes Antes e Após o Rompimento do Condutor Neutro

Fase	Ponto “S ₀ ”		Ponto “S ₁ ”		Ponto “S ₂ ”	
	Antes	Após	Antes	após	Antes	Após
“r”	125,93 (V)	133,13 (V)	124,07 (V)	144,22 (V)	123,34 (V)	165,20 (V)
“s”	125,73 (V)	135,69 (V)	125,09 (V)	141,85 (V)	128,67 (V)	149,69 (V)
“t”	125,78 (V)	135,48 (V)	124,24 (V)	146,85 (V)	124,81 (V)	162,34 (V)

Comparando as informações da tab. 6.21 com os valores estabelecidos pela tab. 6.20 pode-se observar que as tensões nos pontos de concentração “S₁” e “S₂” ultrapassaram a faixa de valores críticos estabelecidos (140 V). Observando-se ainda os valores das tensões no ponto “S₀”, verifica-se que estes valores, após a perda da conexão do condutor neutro próximo ao transformador, encontram-se na faixa de valores precários para tensões de

distribuição. Uma das possíveis conseqüências para estes desequilíbrios de tensões e ultrapassagem das faixas admissíveis para seus valores eficazes, é a ocorrência de falhas na operação e queima de equipamentos eletro-eletrônicos, acarretando ainda interrupções de processos produtivos, perdas de produtos perecíveis, perdas de faturamento, etc. Tais fatos têm levado muitos consumidores a buscarem por ressarcimento devido a danos causados em seus aparelhos, produtos e processos, onerando as empresas de distribuição de energia elétrica com processos judiciais e indenizações.

6.3 CONCLUSÃO

Os desequilíbrios dos valores eficazes das tensões, assim como variações repentinas das tensões nas cargas, como no momento do rompimento do neutro, podem levar à queima, danificação e/ou ao mau funcionamento dos equipamentos instalados. Como os problemas de energias oriundos do sistema de distribuição, tais como surtos de tensões e até mesmo desequilíbrios de tensões sustentados, como verificado no caso da perda do neutro, poderão levar os consumidores à busca de ressarcimento dos prejuízos obtidos. Torna-se então de extrema importância a simulação de tais ocorrências nos sistemas de distribuição.

Tais casos têm crescido a cada dia e têm trazido maiores ônus às companhias de distribuição de energia elétrica, as quais têm despendido de grandes valores com processos e indenizações.

Com a proposta de modelagem apresentada neste trabalho, podem-se fazer estudos e previsões de tensões e correntes processadas no sistema, possibilitando análises que resultem em soluções para os problemas decorrentes do aumento de carga, principalmente aquelas não lineares, servindo de instrumento importante para o planejamento dos sistemas de distribuição.

Destaca-se que, como consequência dos desequilíbrios de tensões, possivelmente haveria a queima de cargas em alguns pontos do sistema, porém, tal situação não foi simulada, uma vez que o objetivo deste capítulo foi tão somente a análise dos desequilíbrios dos valores eficazes das tensões.

Ressalta-se também que, em alguns pontos, devido ao elevado índice de distorção harmônica das correntes processadas no sistema, algumas tensões se encontraram com valores de distorção superiores a 10%; e, como apresentado no capítulo 3, índices de distorções das tensões superiores a 10%, comprometem a análise quantitativa, uma vez que estas distorções

elevadas das tensões resultarão em diferentes distorções harmônicas de correntes drenadas pelas cargas, comprometendo seus modelos adotados (fontes de correntes harmônicas constantes).

Desta forma, uma contribuição importantíssima para a evolução deste modelo proposto seria a realimentação das fontes de correntes, deixando-as dependentes das tensões sobre elas impostas. Assim, ao se distorcer as formas de ondas das tensões, as correntes automaticamente se atualizariam.

CAPÍTULO 7

CONFRONTAÇÃO E VALIDAÇÃO DA MODELAGEM

PROPOSTA

7.1 Confrontação dos resultados de simulação em Pspice e EMTP -

ATP

O programa EMTP – ATP (Electromagnetic Transients Program) – (Alternative Transients Program) é considerado como um dos programas de simulação de sistemas mais amplamente conhecido e utilizado pelo meio científico e também pelas empresas que trabalham com geração, transmissão e/ou distribuição de energia elétrica. Inicialmente alguns modelos presentes no ATP foram desenvolvidos pela BPA (Bonneville Power Administration), DCG (o grupo de coordenação e desenvolvimento do EMTP) e EPRI (Electric Power Research Institute).

Existem duas versões sendo uma para computadores pessoais e outra para máquinas de grande porte. O ATP tem aplicações em duas grandes categorias: projetos de sistemas elétricos e soluções de problemas de operação de sistemas elétricos.

Este programa, baseado na linguagem de programação FORTRAN, permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas, com configurações arbitrárias, por um método que utiliza matriz admitância de barras. Basicamente a regra de integração trapezoidal é usada para a resolução de equações diferenciais, que descrevem os fenômenos transitórios resultantes nos componentes do sistema, no domínio do tempo. Estes transitórios eletromagnéticos envolvem uma ampla gama de fenômenos, provocados por

variações súbitas de tensão ou corrente nos sistemas elétricos, inicialmente em estado de regime permanente na grande maioria dos casos. Tais variações súbitas de tensão e corrente são provocadas por descargas atmosféricas, faltas no sistema, ou qualquer outra anomalia que possa causar oscilações no sistema.

O ATP tem muitos modelos os quais incluem máquinas rotativas, transformadores, para-raios, linhas e cabos de transmissão. A capacidade de interface com o programa de modelagem TAC (Transient Analysis of Control Systems) e MODELS (uma linguagem de simulação) permite a modelagem de sistemas de controle e componentes com características tais como arcos e efeito corona. Perturbações simétricas e assimétricas também podem ser simuladas, tais como faltas, descargas atmosféricas e vários tipos de operações de chaveamento incluindo comutações de tiristores, chaveamento de capacitores, dentre outras. O programa também permite a análise harmônica no domínio da frequência usando o método de injeção de corrente harmônica (Harmonic Frequency Scan).

O programa pode simular redes monofásicas ou trifásicas sendo que alguns dos estudos realizados através do programa EMTP – ATP são:

- Obtenção de grandezas fasoriais em sistemas lineares com fontes CA para um único valor de frequência. Pode ser usado como condição inicial para simulação de transitórios;
- Análise de sistemas lineares com variação da frequência em um intervalo Δf ;
- Transitórios eletromagnéticos;
- Solução em regime permanente de alguns tipos de sistemas não lineares;
- Estudos de descargas elétricas;
- Partida de motores;
- Chaveamento de transformadores e bancos de capacitores “shunt”;
- Ferroressonância;

- Aplicações da eletrônica de potência;
- Análises harmônicas.

A biblioteca de modelos do ATP atual consiste dos seguintes componentes:

- Elementos R, C, L com ou sem acoplamento;
- Linhas e cabos de transmissão com parâmetros dependentes da frequência;
- Resistências e indutâncias não lineares, indutor com histerese, resistência variante no tempo;
- Componentes com não linearidades: transformadores incluindo saturação e histerese;
- Interruptores comuns, interruptores dependentes de tensão ou do tempo, diodos, tiristores, triacs;
- Máquinas rotativas: máquinas síncronas trifásicas, e modelo de máquina universal;

A tabela 7.1 apresenta os limites máximos de distribuição de dispositivos em programas padrões de simulação.

Barras	6000	Fontes	900
Ramos	10000	Elementos Não Lineares	2250
Chaves	1200	Máquinas síncronas	90

Como um programa digital não permite obter uma solução contínua no tempo, são calculados valores a intervalos de tempo discretos os quais podem ser estabelecidos pelo usuário ou o valor estabelecido pelo “default” do programa.

Como uma das expectativas desta confrontação é a análise da performance do novo modelo do transformador modelado em Pspice como apresentado no capítulo anterior, tem-se

então a necessidade de também apresentar algumas características do modelo do transformador disponibilizado neste programa.

Os transformadores monofásicos com dois ou mais enrolamentos podem ser representados conforme o circuito equivalente mostrado na Figura 7.1.

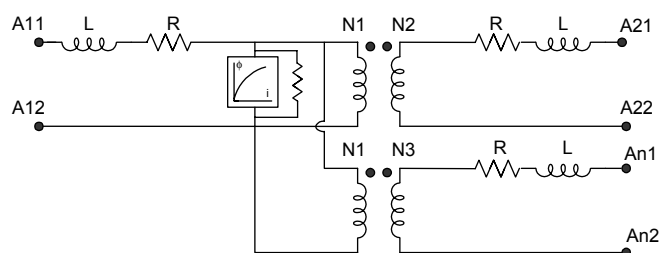


Fig. 7.1 – Circuito equivalente do transformador - ATP

São representadas as impedâncias de dispersão de cada enrolamento, o ramo magnetizante com saturação e perdas no núcleo e a relação de transformação entre os enrolamentos.

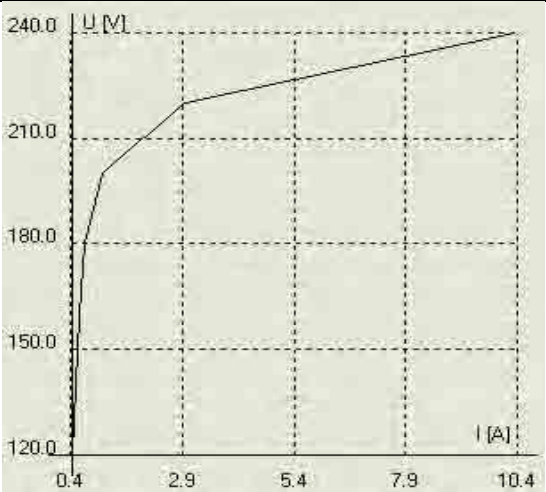
Uma vez que o novo modelo de transformador para simulação em Pspice apresentado no capítulo anterior representa as características elétricas de um transformador, torna-se de interesse, confrontar este modelo com um modelo que contemple as características elétricas e inclusive as magnéticas. Desta forma o modelo utilizado nas simulações no programa EMTP – ATP foi de um transformador trifásico saturável.

7.1.1 Transformador trifásico saturável EMTP -ATP

O EMTP – ATP dispõe de uma rotina que permite a representação de transformadores monofásicos e trifásicos contemplando as características elétricas e magnéticas de um transformador real. O programa ATP versão ATP-DRAW fornece uma interface amigável para a modelagem do transformador chamada BCTRAN. Para a representação da saturação é utilizada uma sub-rotina, “SATURA”, a qual possibilita converter os valores eficazes de tensão – corrente, da característica de magnetização, à valores de ϕ (fluxo) – corrente. As

conexões podem ser estrela, delta, ou acoplamentos os quais permitem todos os tipos de defasagens. O ramo de magnetização não linear pode ser opcionalmente adicionado externamente.

Deste modo, para que a simulação fosse realizada utilizando o modelo do transformador saturável disponível no programa ATP, tornou-se necessário a obtenção dos valores relativos aos parâmetros elétrico-magnéticos de um transformador real. Como tais dados sofrem variação dependendo da classe de tensão e potência do transformador, os dados inseridos foram correspondentes ao transformador presente no ramal modelado no capítulo 6, conforme mostra a tabela 7.2.

Tabela 7.2			
Dados de Entrada no Modelo do Transformador Saturável			
Características elétricas		Ramo Magnetizante	
Potência	112,5 MVA	Corrente de magnetização	0,0471 A
Tensão Primária	13,8 KVA	Fluxo	0,238 mWb
Tensão Secundária	220/127 V	Resistência de magnetização	529 k Ω
Dados das bobinas			
Enrolamento primário		Enrolamento secundário	
Resistência	11,87 Ω	Resistência	3,02 m Ω
Indutância	71,88 mH	Indutância	18,27 μ H
Curva de Saturação (B.T.)			
V eficaz (V)	I eficaz (A)		
120	0,42		
140	0,49		
160	0,58		
180	0,72		
200	1,11		
220	2,95		
240	10,36		

A partir dos dados obtidos para o transformador, foi realizada a modelagem no programa ATP-Draw, onde os dispositivos são representados graficamente. A modelagem no programa ATP-Draw se encontra no Anexo D.

7.1.2 Análise das tensões processadas através do transformador em ambas as modelagens (Pspice – ATP).

Para analisarmos a performance da nova modelagem do transformador em Pspice, são apresentadas então a seguir as tensões e correntes processadas pelas duas modelagens (Pspice – ATP). Observa-se que o interesse principal deste capítulo é a validação do modelo do transformador através da análise das tensões e correntes.

A figura 7.2 apresenta detalhe das formas de ondas da tensão da fase “r” no ponto S₀.

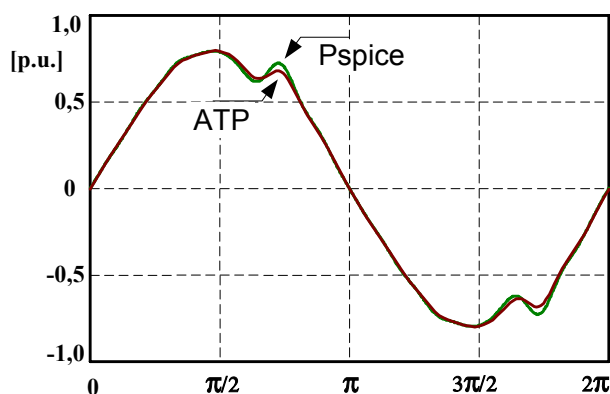


Fig. 7.2 Formas de onda da tensão fase “r”

Como pode-se observar a forma de onda da tensão da fase “r” obtida pela simulação no programa Pspice é bastante similar à forma de onda resultante através da simulação realizada no programa ATP. A tabela 7.3 apresenta o espectro harmônico das tensões apresentadas na figura 7.2.

Tabela 7.3
Espectro Harmônico das Tensões no Secundário do Transformador “S₀”

Ordem Harmônica	Fase “ r ”			
	Pspice		ATP	
	Amp.[p.u.]	% fund.	Amp.[p.u.]	% fund.
1	0,80360	100,00	0,80000	100,00
3	0,03806	4,74	0,02837	3,55
5	0,04261	5,30	0,03072	3,84
7	0,02506	3,12	0,01770	2,21
9	0,02230	2,78	0,01688	2,11
11	0,01767	2,20	0,01290	1,61
13	0,00665	0,83	0,00460	0,57
15	0,00641	0,80	0,00490	0,61

Conteúdo Harmônico Percentual

Com os valores apresentados na tabela 7.3 pode-se observar que o espectro harmônico da tensão no secundário do transformador é bastante similar, o que também pôde ser visualizado através da figura 7.2 apresentada anteriormente.

De igual modo são apresentadas na figura 7.3 as formas de onda das tensões nas fases “s” e “t”, e, em seguida, os respectivos espectros harmônicos são apresentados na tabela 7.4.

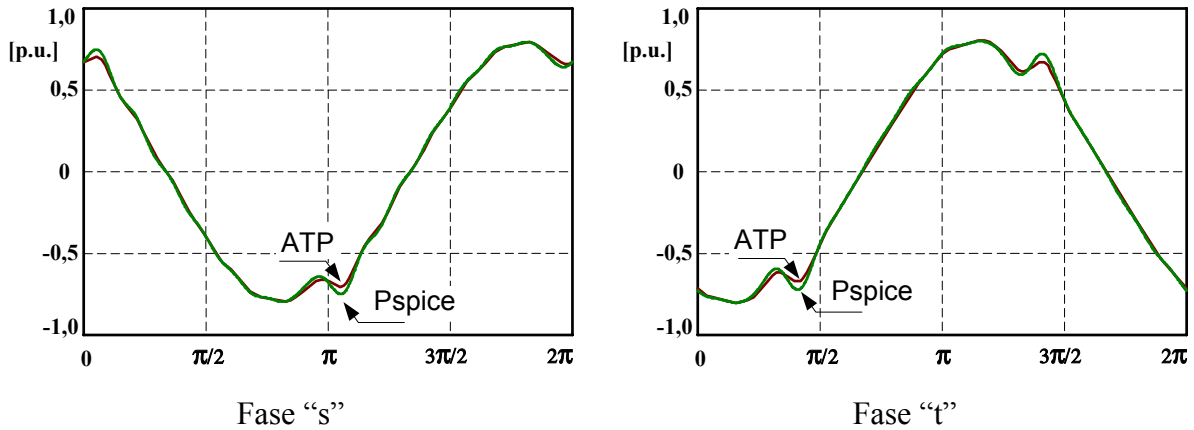


Fig. 7.3 Formas de ondas das tensões no secundário do transformador

Tabela 7.4 Espectro Harmônico das Tensões no Secundário do Transformador “S₀”

Ordem Harmônica	Fase “s”				Fase “t”			
	Pspice		ATP		Pspice		ATP	
	Amp.[p.u]	% fund.	Amp.[p.u]	% fund.	Amp.[p.u]	% fund.	Amp.[p.u]	% fund.
1	0,80500	100,00	0,80210	100,00	0,80460	100,00	0,80200	100,00
3	0,03607	4,48	0,02752	3,43	0,03603	4,48	0,02709	3,38
5	0,03857	4,79	0,02800	3,49	0,04288	5,33	0,03031	3,78
7	0,02681	3,33	0,01944	2,42	0,03395	4,22	0,02454	3,06
9	0,02076	2,58	0,01536	1,91	0,02969	3,69	0,02197	2,74
11	0,01862	2,31	0,01316	1,64	0,02033	2,53	0,01453	1,81
13	0,01268	1,58	0,00887	1,11	0,00526	0,65	0,00410	0,51
15	0,01138	1,41	0,00839	1,05	0,00645	0,80	0,00482	0,60

Conteúdo Harmônico Percentual	Fase “s”						Fase “t”							
	3	5	7	9	11	13	15	3	5	7	9	11	13	15
(%) da Fundamental	4,48	4,79	3,33	3,49	2,42	1,91	1,64	5,33	4,22	3,06	2,74	1,81	0,51	0,60

Através das figuras e tabelas apresentadas neste capítulo, as quais apresentam as comparações entre as formas de onda das tensões obtidas das simulações em Pspice e ATP, pode-se observar que os resultados obtidos de ambas as modelagens foram de igual propriedade, ou seja, resultaram em valores quantitativos e qualitativos praticamente idênticos.

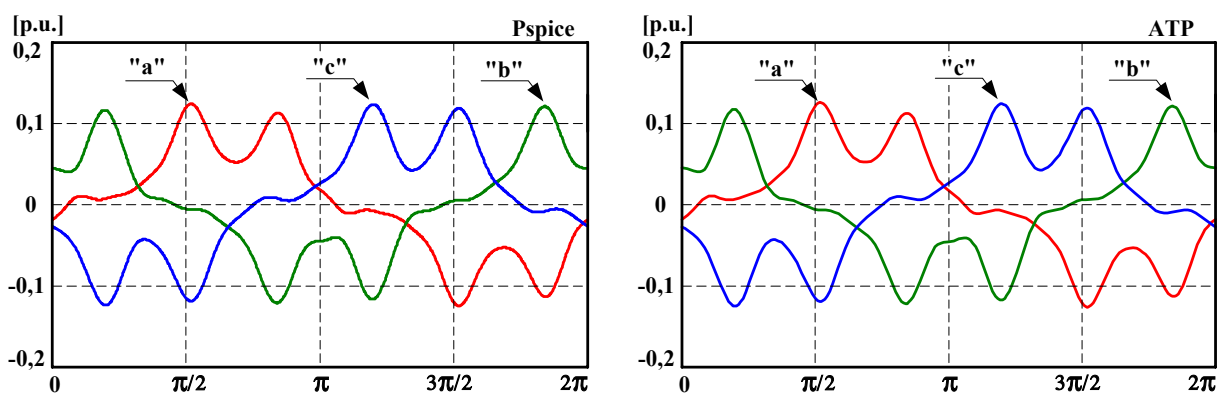
Assim, pode-se concluir que a nova modelagem, utilizando fontes de tensão e corrente na modelagem do transformador em Pspice, apresenta resultados realmente satisfatórios, mesmo com a consideração da modelagem proposta, onde somente foram representadas as características elétricas do transformador, em comparação à modelagem que contempla todas as características elétricas e magnéticas do transformador do programa ATP.

O que se pode observar são valores das componentes harmônicas ligeiramente menores nos resultados obtidos através da simulação em ATP, entretanto, em valores quantitativos mínimos de diferenças, fato que se deve à característica magnética contemplada no modelo do transformador, uma vez que esta característica dificulta um pouco o fluxo harmônico através do transformador. Porém, em função destas mínimas diferenças quantitativas, pode-se concluir que as mesmas não comprometem os resultados obtidos pela nova modelagem.

7.1.3 Análise das correntes processadas através do transformador em ambas as modelagens (Pspice – ATP).

As correntes processadas através do transformador, tanto na modelagem do Pspice quanto do ATP, uma vez que as cargas, por serem modeladas através de fontes de correntes harmônicas são impostas no circuito, não sofrem diferenças consideráveis entre uma modelagem e outra.

Desta forma são apresentadas na figura 7.4 as formas de onda das correntes processadas pelo transformador no lado primário. A tabela 7.5 apresenta os respectivos espectros harmônicos e a tabela 7.6 apresenta o conteúdo harmônico percentual respectivo a cada corrente.



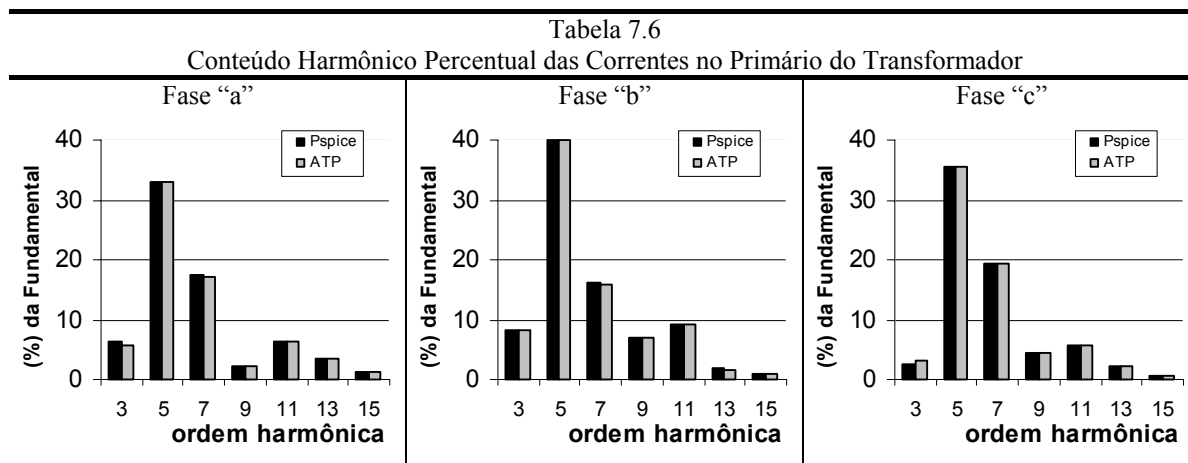
(a) Simulação em Pspice

(b) Simulação em ATP

Figura 7.4 – Correntes no primário do transformador

Tabela 7.5
Espectro Harmônico das Correntes no Primário do Transformador

Ordem Harmônica	Fase "a"				Fase "b"				Fase "c"			
	Pspice		ATP		Pspice		ATP		Pspice		ATP	
	Amp. [p.u.]	% Fund.	Amp. [p.u.]	% Fund.	Amp. [p.u.]	% Fund.	Amp. [p.u.]	% Fund.	Amp. [p.u.]	% Fund.	Amp. [p.u.]	% Fund.
1	0,0859	100	0,0867	100	0,0813	100	0,0822	100	0,0860	100	0,0865	100
3	0,0053	6,20	0,0050	5,81	0,0068	8,38	0,0068	8,22	0,0022	2,58	0,0026	3,02
5	0,0284	33,1	0,0287	33,1	0,0326	40,1	0,0328	40,0	0,0307	35,7	0,0308	35,6
7	0,0149	17,4	0,0149	17,2	0,0131	16,1	0,0132	16,0	0,0166	19,3	0,0167	19,3
9	0,0019	2,21	0,0019	2,21	0,0056	6,91	0,0057	6,95	0,0037	4,35	0,0039	4,46
11	0,0053	6,21	0,0054	6,2	0,0076	9,35	0,0076	9,25	0,0050	5,85	0,005	5,83
13	0,0031	3,65	0,0030	3,49	0,0015	1,87	0,0014	1,73	0,0020	2,26	0,002	2,31
15	0,0010	1,17	0,0011	1,21	0,0007	0,89	0,0008	0,91	0,0004	0,48	0,0005	0,53



Desta forma, pode-se concluir que a nova modelagem, desenvolvida e implementada através do programa Pspice, é válida e com um excelente grau de precisão, quando se confrontam os seus resultados com aqueles obtidos através da simulação em um software já consolidado como o ATP.

Adicionalmente, apresenta-se a seguir uma confrontação da modelagem proposta com um exemplo de experimentação laboratorial, com a finalidade de se verificar e comprovar os resultados de simulação com aqueles obtidos na experimentação prática.

7.2 – Confrontação a partir de resultados obtidos com a modelagem e através de resultados experimentais

A partir da modelagem do transformador validada em comparação à um software já consolidado (ATP), é apresentada a comparação da performance do transformador modelado com medições obtidas em laboratório utilizando um transformador real.

Desta forma foi montado um “esquemático” de simulação constituído de uma fonte trifásica, Califórnia Instruments, alimentando um transformador Δ - Y (220V-110V). Na saída do transformador foi conectado um retificador trifásico com ponto médio à diodo alimentando uma carga R-C, e após esta carga foram inseridas diferentes impedâncias a cada fase, representando uma linha ou ramal. No ponto terminal de cada fase foram conectados retificadores monofásicos de meia onda a diodo alimentando cargas R-C. O “esquemático” montado em laboratório é apresentado na figura 7.5.

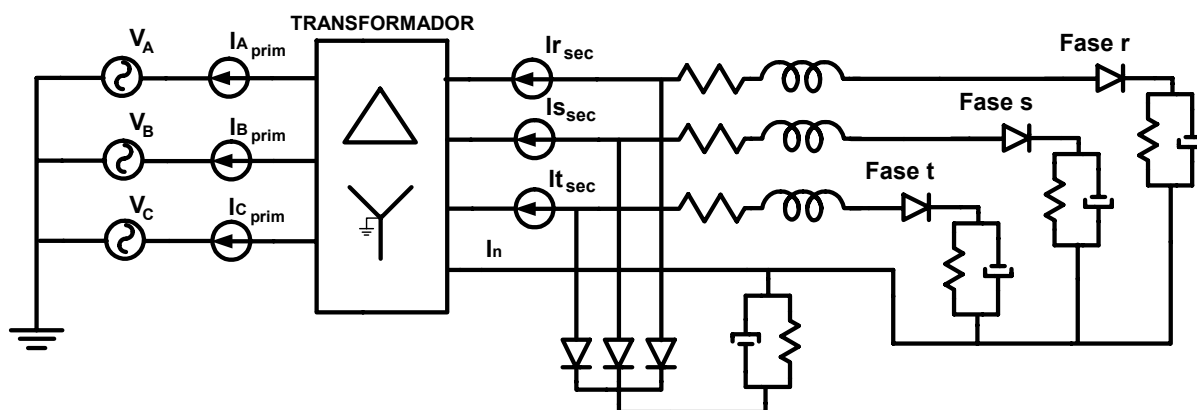


Fig. 7.5 – Esquema de montagem para ensaios laboratoriais

As tabelas 7.7 e 7.8 apresentam os valores das impedâncias de linha e os valores das cargas respectivamente.

Tabela 7.7		
Valores das Impedâncias de Linha		
Fase	Parâmetro	
	R	L
Fase r	15 Ω	120,7mH
Fase s	24 Ω	116,7mH
Fase s	27,5 Ω	118,0mH

Tabela 7.8			
Valores das Cargas RC			
Carga		Parâmetro	
		R	C
Retificadores monofásicos	Fase r	150 Ω	220μF
	Fase s	100 Ω	100μF
	Fase t	50 Ω	150μF
Retificador trifásico		100 Ω	330μF

A partir do “esquemático” montado, foram obtidas as formas de ondas das tensões e correntes no primário e no secundário do transformador utilizando o osciloscópio digital Tektronix TDS 420A.

De posse das formas de ondas das correntes no secundário, o “esquemático” foi modelado no programa Pspice utilizando o método de Norton, ou seja, as cargas foram modeladas utilizando fontes de correntes associadas, especificadas a partir dos espectros harmônicos obtidos mediante a decomposição harmônica das correntes medidas.

Apresenta-se na figura 7.6 as formas de onda das correntes medidas e das correntes reconstituídas a partir dos espectros harmônicos obtidos na medição a partir de associação em paralelo de fontes de correntes especificadas para cada ordem harmônica com os respectivos valores de amplitude e fase.

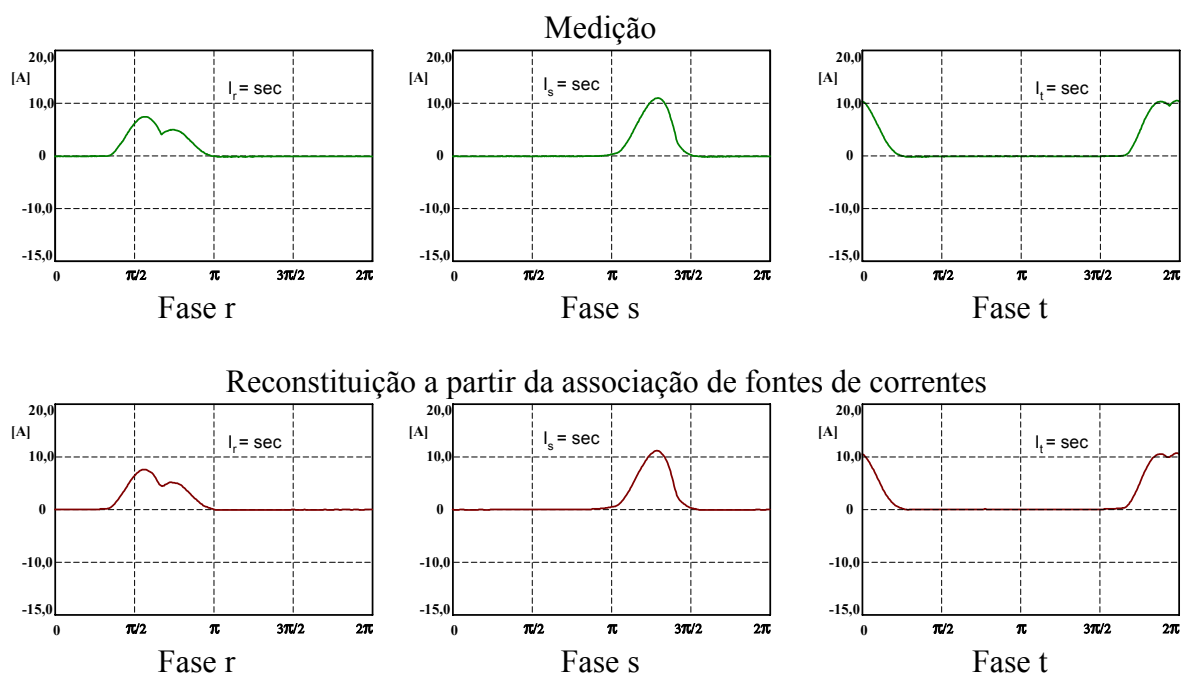


Fig. 7.6 – Formas de onda das correntes no secundário.

Para que as formas de onda das correntes fossem reconstituídas com tal proximidade às formas de ondas medidas, cada carga foi modelada com um conjunto de fontes de correntes harmônicas de ordem 1 até 30 conforme apresentado na tabela 7.9.

Tabela 7.9
Espectro Harmônico das Correntes Medidas no Secundário

Ordem Harmônica	Fase r			Fase s			Fase t		
	Amp. (A)	(%) da Fund.	fase (°)	Amp. (A)	(%) da Fund.	fase (°)	Amp. (A)	(%) da Fund.	fase (°)
1	2,408	100,00	-23,35	2,649	100,00	-136,53	3,458	100,00	101,98
2	1,778	73,82	-136,06	2,307	87,08	-4,68	2,790	80,69	113,90
3	1,001	41,58	116,26	1,833	69,17	126,45	1,882	54,40	125,87
4	0,397	16,50	32,86	1,331	50,24	-104,41	0,990	28,63	138,91
5	0,332	13,77	-10,83	0,888	33,51	22,94	0,304	8,78	157,41
6	0,400	16,63	-102,70	0,539	20,33	146,94	0,116	3,36	-40,34
7	0,333	13,81	148,68	0,296	11,17	-96,75	0,270	7,81	-10,10
8	0,212	8,82	35,72	0,173	6,54	3,81	0,269	7,79	10,05
9	0,114	4,74	-84,98	0,143	5,41	100,77	0,200	5,77	33,48
10	0,074	3,06	137,36	0,136	5,13	-148,85	0,126	3,65	57,08
11	0,073	3,04	6,20	0,118	4,44	-31,89	0,069	1,99	74,05
12	0,072	2,99	-110,50	0,091	3,44	84,89	0,036	1,05	67,38
13	0,062	2,57	139,75	0,063	2,36	-165,87	0,035	1,02	49,03
14	0,046	1,93	30,65	0,046	1,75	-68,88	0,039	1,12	58,62
15	0,033	1,36	-91,57	0,045	1,69	28,73	0,040	1,16	83,46
16	0,030	1,23	133,15	0,043	1,64	140,32	0,039	1,12	104,50
17	0,031	1,30	5,58	0,037	1,40	-104,02	0,032	0,92	122,72
18	0,031	1,27	-108,29	0,028	1,07	4,46	0,023	0,66	128,90
19	0,026	1,08	141,32	0,023	0,86	107,02	0,017	0,49	129,66
20	0,022	0,90	35,83	0,023	0,85	-153,00	0,015	0,44	128,48
21	0,017	0,71	-85,74	0,022	0,85	-41,22	0,019	0,54	134,80
22	0,016	0,67	144,28	0,021	0,80	72,03	0,019	0,56	154,51
23	0,019	0,77	8,27	0,018	0,68	-176,92	0,018	0,52	172,72
24	0,018	0,76	-116,70	0,014	0,54	-70,65	0,012	0,36	-167,16
25	0,018	0,75	130,67	0,014	0,53	23,44	0,007	0,20	-160,16
26	0,014	0,58	17,59	0,016	0,59	125,95	0,004	0,12	-155,20
27	0,010	0,40	-92,00	0,014	0,54	-124,50	0,007	0,22	-142,22
28	0,009	0,38	132,16	0,014	0,54	-4,61	0,010	0,28	-137,27
29	0,009	0,37	2,91	0,010	0,39	104,41	0,012	0,36	-123,11
30	0,009	0,37	-113,53	0,008	0,32	-162,69	0,012	0,34	-111,19

Como pode-se observar na figura 7.6, as correntes no secundário possuem uma característica fortemente não linear composta por todas as ordens harmônicas, pares e ímpares, uma vez que a forma de onda da corrente drenada de cada carga não é simétrica em

ambos os ciclos, positivo e negativo, o que permite então verificar o desempenho da modelagem ao processar correntes com altos conteúdos harmônicos.

Na figura 7.7 é apresentada a comparação entre a corrente de neutro medida e a corrente de neutro obtida na simulação.

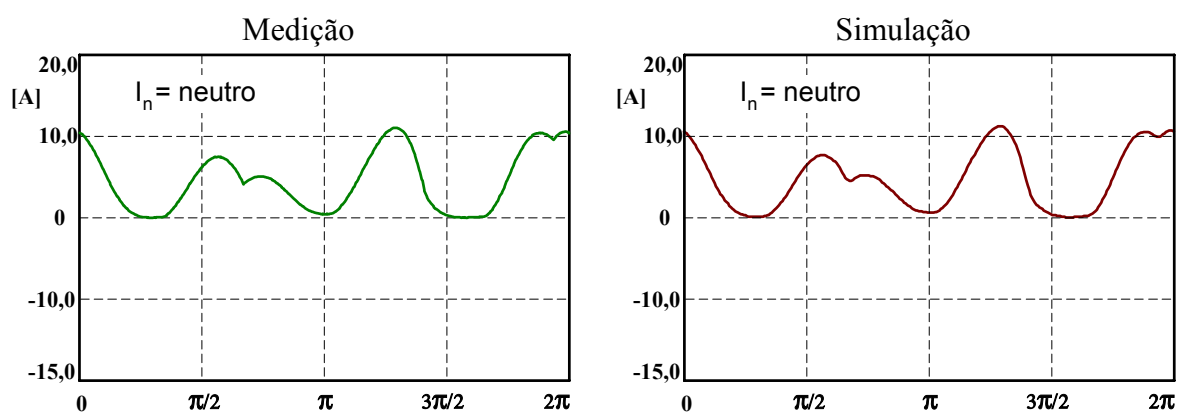


Fig. 7.7 – Corrente de neutro, Medição – Simulação

Assim, a partir das correntes no secundário já reproduzidas através da modelagem utilizando associação de fontes de correntes harmônicas pode-se então analisar o desempenho do modelo do transformador em Pspice com os resultados obtidos em laboratórios.

Neste contexto, a figura 7.8 apresenta as formas de onda das correntes no primário processadas pela modelagem em Pspice e a figura 7.9 apresenta as formas de onda das correntes obtidas no primário do transformador em laboratório. Nas tabelas 7.10, 7.11 e 7.12 são apresentados o espectro harmônico das correntes no lado primário a partir dos resultados obtidos em simulação e dos resultados obtidos em medição.

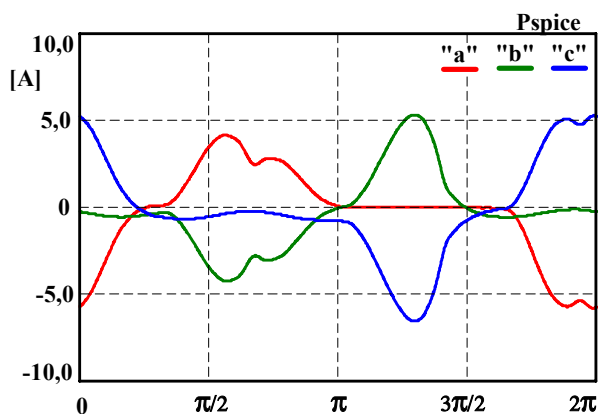


Fig. 7.8 – Correntes no primário
Simulação em Pspice

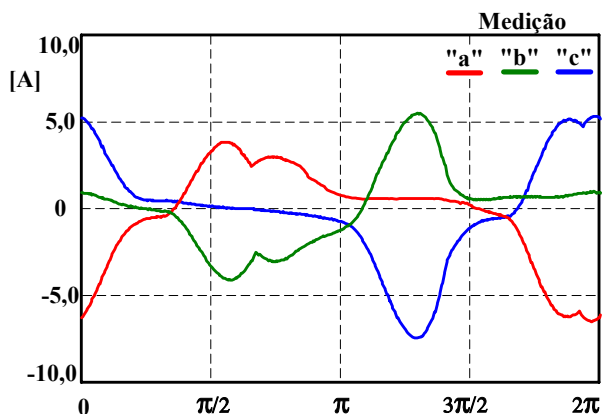


Fig. 7.9 – Correntes no primário
Resultados de laboratório

Tabela 7.10

Espectro Harmônico da Corrente no Primário do Transformador – Fase “a”

Ordem Harmônica	Pspice		Medição	
	Amp. [p.u.]	% Fund.	Amp.[p.u.]	% Fund.
1	3,617	100	3,622	100
2	1,894	52,4	1,898	52,4
3	0,455	12,6	0,442	12,2
4	0,582	16,1	0,489	13,5
5	0,316	8,73	0,480	13,2
6	0,181	5,00	0,125	3,46
7	0,296	8,19	0,296	8,17
8	0,060	1,67	0,084	2,33
9	0,136	3,77	0,138	3,81
10	0,067	1,86	0,060	1,65
11	0,032	0,88	0,029	0,79
12	0,054	1,49	0,057	1,58
13	0,042	1,16	0,045	1,24
14	0,009	0,25	0,008	0,22
15	0,036	1,01	0,032	0,88

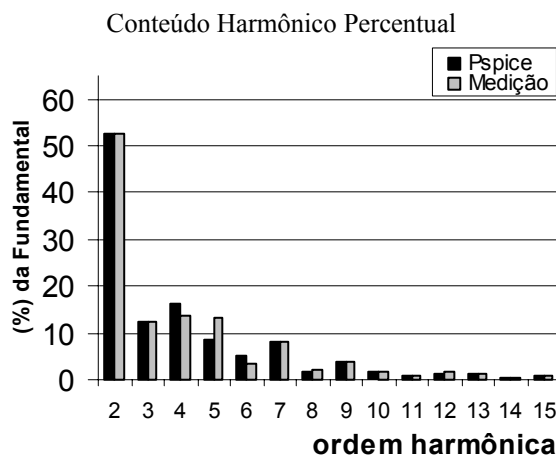


Tabela 7.11

Espectro Harmônico da Corrente no Primário do Transformador – Fase “b”

Ordem Harmônica	Pspice		Medição	
	Amp. [p.u.]	% Fund.	Amp.[p.u.]	% Fund.
1	2,112	100	2,467	100
2	1,866	88,4	1,728	70,0
3	0,433	20,5	0,616	25,0
4	0,850	40,2	0,862	35,0
5	0,320	15,1	0,415	16,8
6	0,388	18,3	0,369	15,0
7	0,265	12,5	0,200	8,12
8	0,056	2,66	0,080	3,25
9	0,129	6,09	0,144	5,82
10	0,068	3,20	0,060	2,43
11	0,038	1,78	0,047	1,91
12	0,081	3,82	0,085	3,45
13	0,028	1,35	0,030	1,21
14	0,035	1,68	0,039	1,57
15	0,034	1,60	0,031	1,24

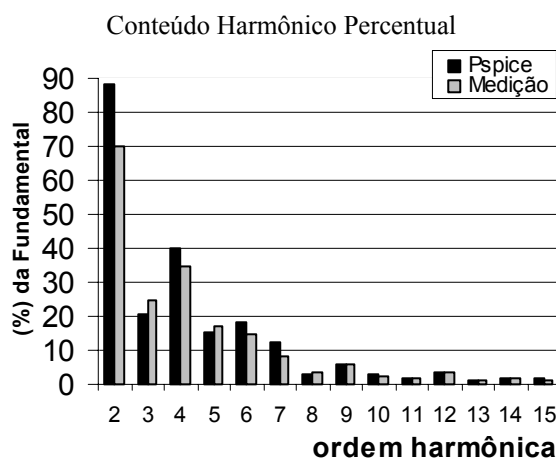
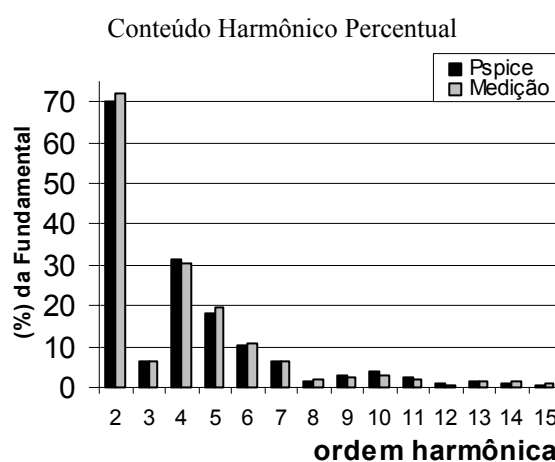


Tabela 7.12
Espectro Harmônico da Corrente no Primário do Transformador – Fase “c”

Ordem Harmônica	Pspice		Medição	
	Amp. [p.u]	% Fund.	Amp. [p.u]	% Fund.
1	3,125	100	3,359	100
2	2,191	70,1	2,417	72,0
3	0,203	6,50	0,217	6,45
4	0,988	31,6	1,026	30,5
5	0,561	17,9	0,666	19,8
6	0,327	10,5	0,358	10,6
7	0,194	6,22	0,221	6,59
8	0,050	1,59	0,065	1,93
9	0,098	3,13	0,081	2,42
10	0,128	4,08	0,106	3,17
11	0,076	2,43	0,073	2,16
12	0,029	0,92	0,017	0,52
13	0,047	1,50	0,044	1,31
14	0,038	1,22	0,048	1,41
15	0,020	0,63	0,030	0,91



Observa-se que as correntes processadas pelo transformador, obtidas no primário, são bem semelhantes. Comprovando a fidelidade do modelo ao representar fluxo harmônico através do mesmo.

Assim, pode-se afirmar que, como visto no capítulo 6 e capítulo 7, o modelo apresentado corresponde satisfatoriamente à performance de modelagem já utilizada em software consolidado, como em comparação com ensaio real realizado em laboratório.

Desta forma, esta modelagem se torna uma importante ferramenta para estudos em sistemas elétricos, podendo ser utilizada para simulações de ramais monofásicos e trifásicos, equilibrados ou desequilibrados e com qualquer tipo de carga, lineares ou não, ressaltando apenas a restrição da utilização do método de fonte de correntes, em ponto de acoplamento onde a distorção harmônica da tensão de alimentação seja superior a 10%.

Ainda, se faz possível prever o comportamento de ramais na presença de um forte conteúdo harmônico, possibilitando a análise do fluxo harmônico nos sistemas e da qualidade da energia processada permitindo também a simulação de prováveis soluções em busca de uma melhora na qualidade da energia.

7.3 CONCLUSÃO

Neste capítulo apresentou-se a comparação da nova modelagem de transformador trifásico Delta - Estrela com resultados obtidos em simulação através do programa EMTP – ATP. Os resultados apresentados comprovaram a modelagem destacando que a nova modelagem apresentada tem por característica simplicidade e garantia de resultados satisfatórios, pois ao se comparar com o programa EMTP – ATP o qual na sua modelagem de transformadores contempla todas as características de um transformador real, a modelagem para o programa PSpice, mesmo não possuindo ainda as características magnéticas, mostrou resultados semelhantes.

A comparação feita com ensaios em laboratório mostrou também o que já tinha sido comprovado em simulação. Os resultados obtidos em laboratório comparados aos resultados obtidos através da simulação foram também satisfatórios, fazendo assim a nova modelagem totalmente comprovada e validada.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÃO GERAL E PROPOSTA DE CONTINUIDADE

Como apresentado neste trabalho, o cenário elétrico brasileiro tem passado por grandes mudanças, uma vez que o país tem retomado seu crescimento, atingindo um índice de aproximadamente 4,5% ao ano. Porém, no passado, pouco foi investido na parte de infraestrutura de ampliação de fontes geradoras de energia, faltando principalmente uma visão crítica ao se considerar que a principal fonte de matéria prima para geração de energia elétrica no Brasil é o recurso hídrico. Esta falta de visão acarretou sérios problemas relacionados à capacidade de suprimento de energia elétrica, devido elevação da demanda, levando o país a uma crise energética, como se verificou em 2001.

Mesmo com a crise, temporariamente contornada, problemas relacionados ao processamento da energia elétrica têm permanecido, uma vez que o perfil das cargas no sistema elétrico tem mudado significativamente. Com a difusão de diversos tipos de equipamentos, como por exemplo, os eletrodomésticos, os sistemas de iluminação, os sistemas de controle para máquinas elétricas, os equipamentos de informática, dentre outros, elevadas taxas de distorções harmônicas têm sido observadas nas correntes drenadas dos sistemas de distribuição e instalações em geral. Tais equipamentos possuem características de não linearidade, devido à tecnologia neles empregados, resultando em reduzidos fatores de potência e elevados índices de conteúdos harmônicos das correntes.

A inexistência de uma regulamentação rigorosa, imposta aos fabricantes de equipamentos e até mesmo aos importadores, tem muitas vezes resultado em índices de conteúdos harmônicos em circulação os quais impedem o bom funcionamento, e/ou provocam danos (e/ou perdas) em equipamentos e processos produtivos.

Para que tais problemas relacionados à qualidade da energia sejam solucionados, tem-se investido em estudos, modelagens e análises do comportamento dos sistemas elétricos, diante de tais mudanças das cargas neles instaladas.

Neste contexto, este trabalho apresentou um resumo de algumas técnicas até hoje desenvolvidas para a representação/modelagem dos sistemas elétricos de distribuição, permitindo-se através de simulações, o melhor entendimento dos fenômenos oriundos de tais cargas. Várias técnicas de modelagem foram abordadas, onde simulações são propostas tanto no domínio do tempo, quanto no domínio da frequência. Uma grande vantagem dos estudos realizados no domínio do tempo é a possibilidade de análises não apenas em regime, mas também durante transitórios, os quais são de suma importância para as companhias distribuidoras de energia elétrica.

Portanto, este trabalho apresentou uma nova proposta de modelagem de sistemas elétricos para simulação no domínio do tempo através do programa Pspice, com o objetivo principal de melhor estudar e representar os sistemas de distribuição de energia elétrica a partir de uma representação multifilar, permitindo-se a análise de carregamentos desequilibrados do sistema.

Como analisado, a representação unifilar e equilibrada até então presente em determinadas metodologias na literatura, torna-se inadequada para representar os sistemas reais, uma vez que os sistemas normalmente se encontram com acentuados desequilíbrios de carregamento.

A nova modelagem proposta foi desenvolvida para simulações em ambiente Pspice, utilizando-se de componentes representativos disponibilizados neste mesmo ambiente, onde a modelagem e validação de um novo modelo de transformador trifásico de distribuição em configuração Δ/Y -aterrado proposta, apresenta uma significativa contribuição. Este modelo, trifásico, representa todas as características elétricas destas unidades de transformação, e, com

uma representação multifilar para o sistema de distribuição, ou seja, a três fios (três fases) no primário e a quatro fios (três fases e neutro) no secundário, torna-se possível a realização de várias análises em regime e transitórios dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

Neste contexto, apresentaram-se exemplos de simulações com carregamento linear e não linear desequilibrado, analisando-se o fluxo de harmônicos e as distorções harmônicas das tensões nos pontos de acoplamento de cargas.

Adicionalmente, utilizando-se a modelagem apresentada, analisaram-se os desequilíbrios dos valores eficazes das tensões, devido à simulação de perda do condutor neutro em determinado trecho do ramal secundário admitido para análise. Como anteriormente comentado, esta análise é de grande importância, uma vez que as cargas presentes nos sistemas elétricos inserem grandes distorções harmônicas nas correntes, podendo acarretar, dentre outros problemas, a perda do condutor neutro, devido elevado valor eficaz de corrente através do mesmo, superior à sua capacidade de condução.

Para a simulação da perda do condutor neutro, admitiu-se um cenário hipotético com elevado carregamento não linear, de tal forma que elevadas distorções harmônicas das correntes drenadas pelas cargas resultassem em elevados valores eficazes das correntes através do condutor neutro. Assim, em um determinado instante, simulou-se o rompimento deste condutor para a análise dos desequilíbrios dos valores eficazes das tensões.

Como analisado no capítulo 6, a perda do condutor neutro faz com que as tensões sobre as cargas assumam valores eficazes aleatórios e superiores comparados aos estabelecidos por norma, podendo levar ao mau funcionamento das cargas, e/ou danos, e/ou até mesmo a queima destas “cargas”, obrigando as concessionárias ao ressarcimento de tais equipamentos, e/ou ao atendimento de solicitações de ressarcimento por perdas de faturamento (dos consumidores).

Através das comparações realizadas entre a nova modelagem e um software já consolidado, como o EMTP – ATP, pôde-se observar uma satisfatória precisão nos valores obtidos através da simulação utilizando o novo modelo de transformador. De igual modo, também pôde-se observar a concordância do modelo confrontado com ensaios em laboratório onde o mesmo correspondeu adequadamente aos resultados obtidos nas medições.

Para uma completa modelagem do transformador, apresenta-se como proposta de continuidade a incorporação das características eletromagnéticas no modelo do transformador, uma vez que as características relativas às perdas por dispersão já foram acrescentadas ao mesmo. Ainda, como proposta de continuidade, apresenta-se a necessidade de uma melhor representação das cargas não lineares, compostas por fontes harmônicas de correntes constantes (amplitudes e ângulos constantes), tornando-as dependentes da tensão, através de uma realimentação das amplitudes e fases em função da variação na forma de onda da tensão de alimentação.

REFERÊNCIAS

- [1] Ministério de Minas e Energia, “Análise Energética Brasileira – Período de 1970 a 2002”, downloaded em: <http://www.mme.gov.br/BEN/AnaliseEnergetica.pdf>;
- [2] R. C. Dugan, McGranaghan, M. F. e Beaty, H. W., “Electrical Power Systems Quality” McGraw-Hill, 265 pg., 1996;
- [3] M. M. Morcos, e J.C. Gomez, “Electric power quality – The strong connection with power electronics”, IEEE Power & Energy Magazine, pp. 18-25, 2003;
- [4] G. A. Melo, “A Eficiência Energética Sob a Ótica da Qualidade de Energia Elétrica”, Dissertação de Mestrado, UNESP, Ilha Solteira/SP, pp. 98, 2001;
- [5] A. H. M. Santos, A. A. Simões, et alli, “Conservação de Energia – Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos”, Editora EFEI, pp. 467, 2001;
- [6] downloaded em: <http://www.qualityes.com.br/pquality.htm>;
- [7] IEEE Std 519 – IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE - 1992;
- [8] C. A Canesin, “Qualidade da Energia nos Sistemas Elétricos” Material Complementar, 55 pg, 1997;
- [9] R. W Erickson, “Fundamentals of Power Electronics”, Kluwer Academic Publisher, 773 pg., 1997;
- [10] IEC 61000-3-2 – International Electrotechnical Commission, second edition, “Limits for harmonic current emissions (equipment input current $\leq 16A$), final draft EN 61000-3-2, 2000;
- [11] E. Thunberg, e L. Söder, “A Norton Approach to Distribution Network Modeling for Harmonics Studies”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 1, 1999;

-
- [12] IEEE Task Force, “Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, 1996;
- [13] W. G. Sherman, “Summation of Harmonic with Random Phase Angles”, Proceeding IEE, 119 (11), pp 1643 – 1648, 1992;
- [14] N. B. Rowe, “The Summation of Randomly Varying Phasors or Vectors with Particular Reference of Harmonic Levels”, IEE Conference Publication 110, pp 177 – 181, 1974;
- [15] A. Papoulis, “Probability, Random Variables, and Stochastic Processes”, 2nd Ed. New York, McGraw-Hill, pp. 104 – 148, 1984;
- [16] R. Caldon, M. Fauri, L. Fellin, “Harmonic Modelling of Household and Commercial Aggregate Loads”, ICHQP Proc., 7th International Conference on Harmonics and Quality of Power, pp. 681 – 686, 1996;
- [17] R. E. Morrison, “Probabilistic Analysis of Harmonic Currents in Power Systems”, Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE, Vol. 2, pp. 1082-1083, 2002;
- [18] R. E. Morrison, e E. Duggan, “Probabilistic methods applied to harmonic distortion”, Probabilistic Methods Applied to Electric Power Systems, Third International Conference, pp. 43 – 46, 1991;
- [19] R. E. Morrison, e A. D. Clark, “A Probabilistic Representation of Harmonic Currents in AC Traction Systems”, IEE Proceedings (B), Vol 131, No. 5, 1984;
- [20] Y. G. Hegazy, e M. M. A. Salama, “Probabilistic Modeling of Distribution Systems Loads for Harmonic Studies” Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, Vol.3, pp. 1778 – 1781, 2001;
- [21] Y. G. Hegazy, e M. M. A. Salama, “Probabilistic representation of harmonic currents produced by AC/DC Static Power Converters. Thirtieth IAS Annual Meeting, IEEE, Vol.2, pp. 1689 – 1695, 1995;
- [22] W. Mack Grady, A. Jakwani, *et alli*, “The Effect of Distorted Voltage on the Current Harmonics of Typical Single-Phase Commercial Office Building Loads”, ICHQP Proceedings, 7th International Conference on Harmonics and Quality of Power, pp. 734 – 739, 1996;

- [23] J. W. Nilsson, e S. A. Riedel, “Electric Circuits” Fifth Edition, Addison-Wesley Publishing Company, pp. 983, 1996;
- [24] E. Thunberg, e L. Söder, “A Norton Approach To Distribution Network Modeling For Harmonic Studies”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 1, pp. 272-277, 1999;
- [25] E. Thunberg, e L. Söder, “A Harmonic Norton Model of a Real Distribution Network”, Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, Vol. 3, pp. 932 – 937, 2000;
- [26] E. Thunberg, e L. Söder, “Influence of the Network Impedance on Distribution System Harmonic Norton Models” International Conference on Power System Technology, Vol.3, pp. 1143 – 1148, 2000;
- [27] E. Thunberg, e L. Söder, “On the Performance of a Distribution Network Harmonic Norton Model”, Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, Vol. 3, pp. 932 – 937, 2000;
- [28] A. M. Gole, Albert Keri, C. Nwankpa, E. W. Gunther, “Guidelines for Modeling Power Electronics in Electric Power Engineering Applications”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, pp. 505 – 514, 1997;
- [29] Y. J. Wang, R. M. O’Connell, e G. Brownfield, “Modeling and Prediction of Distribution System Voltage Distortion Caused by Nonlinear Residential Loads”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 16, No. 4, pp. 744 – 751, 2001;
- [30] A. Mansoor, W. M. Grady, R. S. Thallam, M. T. Doyle, S. D. Krein, M. J. Samotyj, “Effect of Supply Voltage Harmonics on the Input Current of Single-Phase diode Bridge Rectifier Loads”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 10, No. 3, pp. 1416 – 1422, 1995;
- [31] A. A. C. Figueiredo, *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), 2004;
- [32] J. C. Oliveira, “Qualidade da energia elétrica: definição e análise dos itens de Qualidade”. Cap. II, Universidade Federal de Uberlândia, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Grupo de Qualidade e Racionalização da Energia Elétrica, 2000;

ANEXO A - Concentração de cargas e redução do circuito – Rede Primária

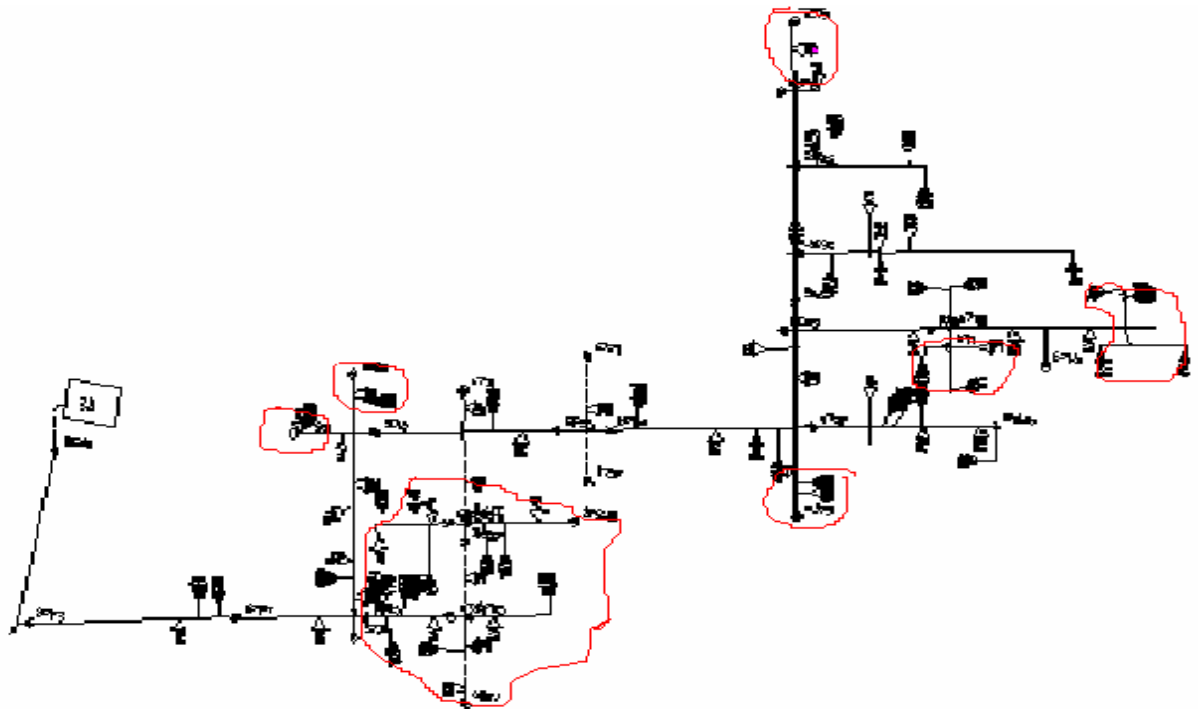


Fig. A.1 - Circuito original: (áreas de concentração)

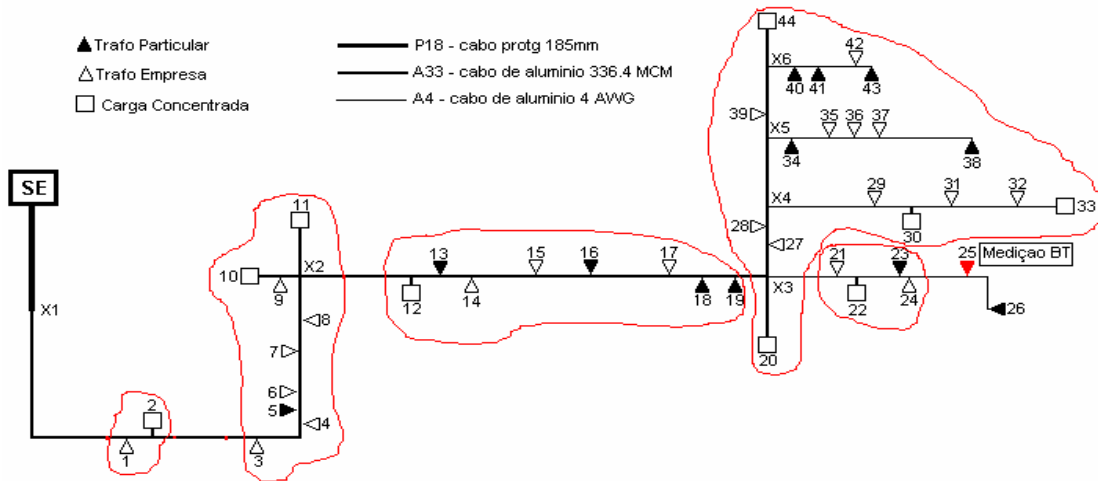


Fig. A.2 – Circuito simplificado 01: (áreas de concentração)

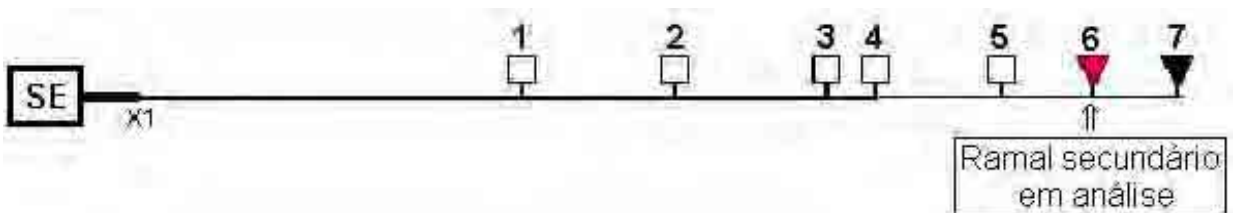


Fig. A.3 - Circuito simplificado 02: (Pontos de concentração do ramal primário).

ANEXO B - Ramal Secundário utilizado como base para as simulações em Pspice

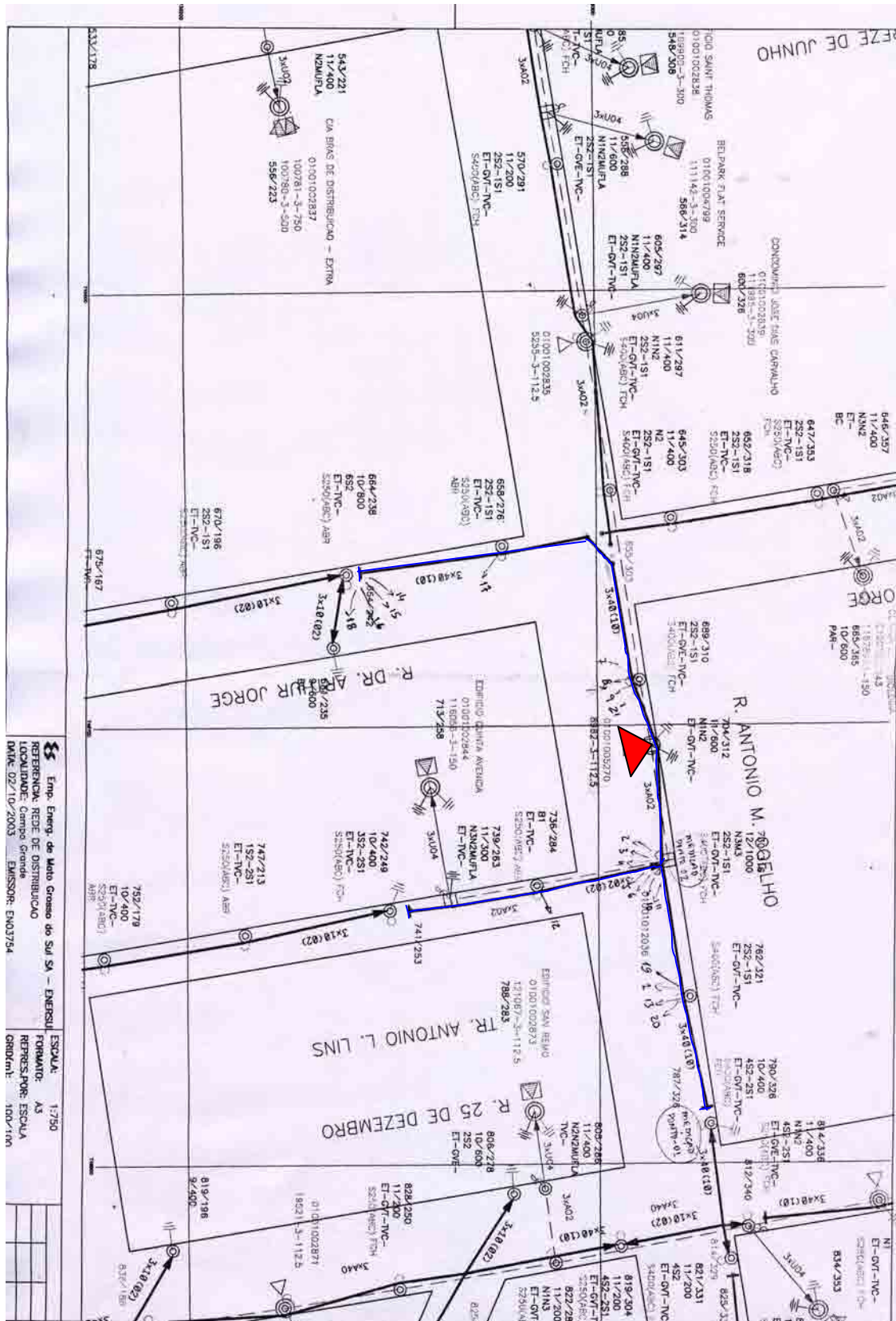


Fig. B.1 – Ramal Secundário em análise

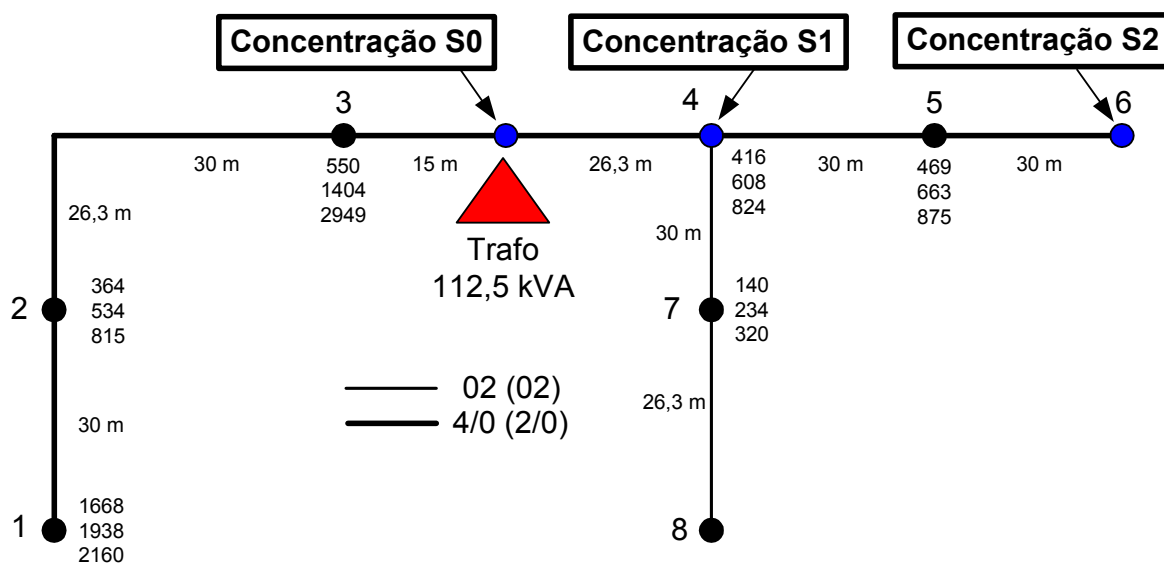


Fig. B.2 - Circuito simplificado do ramal secundário em análise.

Tabela B.1
Características dos Condutores

Tensão	C	CO	Descrição MTR_MB	Resistência (Ohm/Km)	Corrente máx. (A)	RMG (m)
MT/BT	A	02	Alumínio (CA) 2 AWG	1,0439	185,0	0,00269
MT/BT	A	04	Alumínio (CA) 4 AWG	1,6616	135,0	0,00213
MT/BT	A	10	Alumínio (CA) 1/0 AWG	0,6568	245,0	0,00339
MT/BT	A	40	Alumínio (CA) 4/0 AWG	0,3281	380,0	0,00481

ANEXO C – Diagramas do transformador (Δ - Y) modelado e ramal secundário

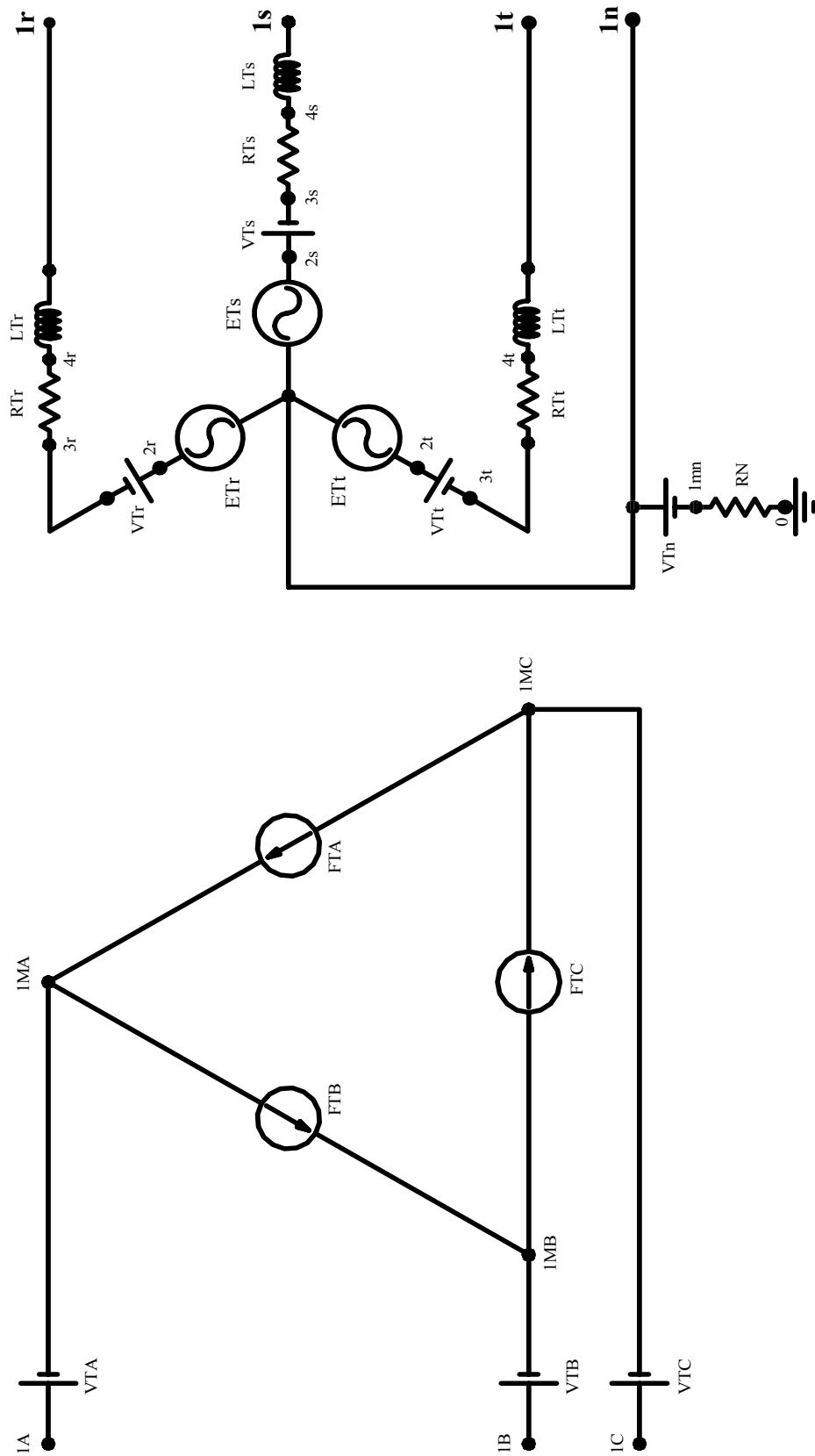


Figura C.1 – Diagrama esquemático do modelo do transformador

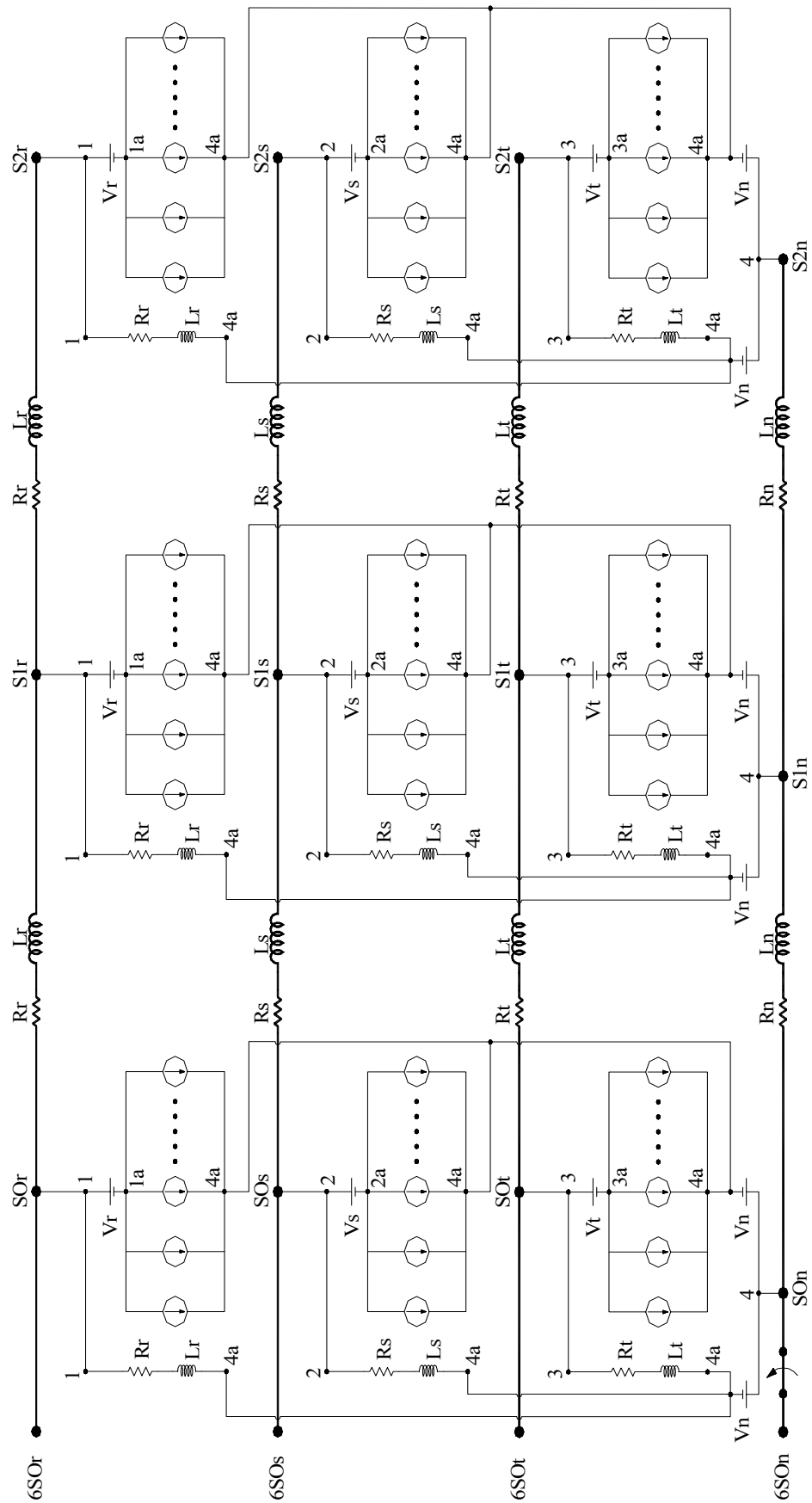
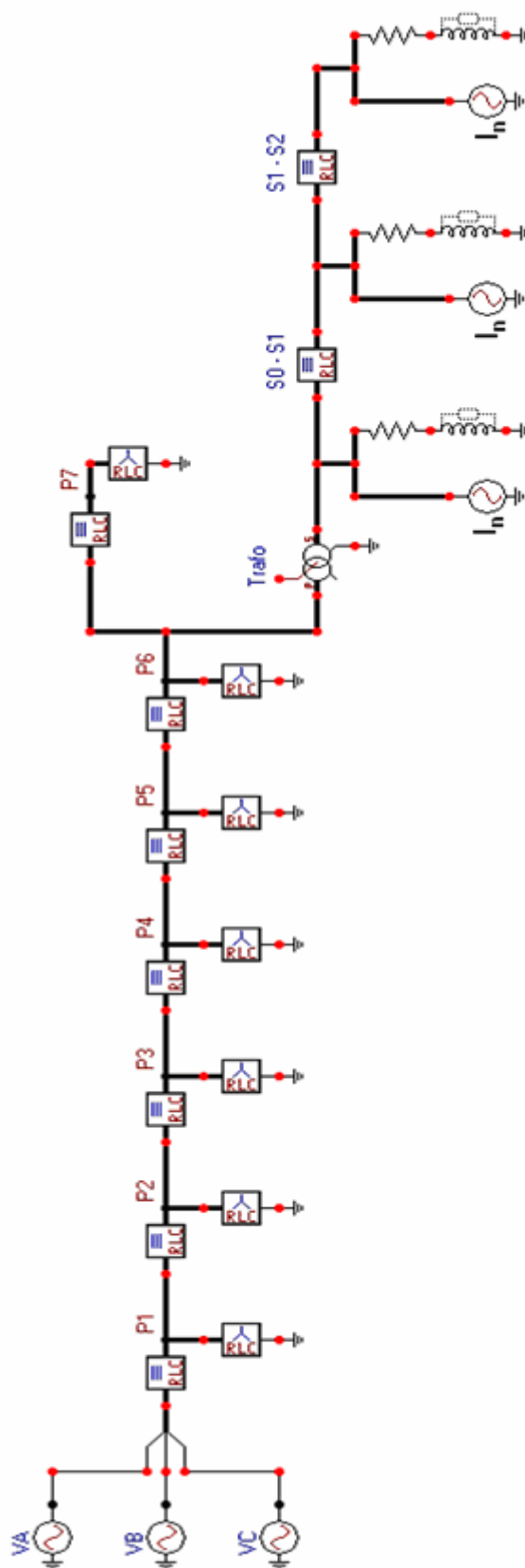


Figura C.2 – Diagrama esquemático do ramal secundário, cargas lineares e não lineares

ANEXO D – Diagrama do ramal modelado no programa EMTP – ATP (Draw)**Figura D.1 – Ramal modelado no programa EMTP – ATP (Draw)**