



Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Renato José Senra Barbosa

**Avaliação do espectro harmônico da corrente de um conjunto de cargas não
lineares monofásicas por matrizes de admitâncias complexas**

**Belo Horizonte
2017**

RENATO JOSÉ SENRA BARBOSA

Avaliação do espectro harmônico da corrente de um conjunto de cargas não lineares monofásicas por matrizes de admitâncias complexas

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.
Área de concentração: Engenharia de Potência
Linha de pesquisa: Compatibilidade Eletromagnética e Qualidade de Energia (CEQE)

Orientador: Prof. Dr. Wallace do Couto

Boaventura

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Mazoni A. M.

Mendes

Belo Horizonte
2017

Agradecimento

Agradeço à Universidade Federal de Minas Gerais e à Escola de Engenharia, em particular ao Departamento de Engenharia Elétrica, pela aceitação da minha inscrição em seu quadro discente e por ter proporcionado a oportunidade de realização do curso de doutorado.

Agradeço, penhoradamente, ao meu orientador professor Dr. Wallace do Couto Boaventura pelo contínuo comprometimento e claro companheirismo na busca por soluções que facilitaram o desenvolvimento das pesquisas e publicações, além das inúmeras e esclarecedoras reuniões de trabalho.

Agradeço, de mesma forma, ao meu coorientador professor Dr. Eduardo Mazoni Andrade Marçal Mendes por suas contribuições na confecção e organização deste trabalho e das publicações.

“Keep one step ahead of yourself”

Talking Heads - 1982

Avaliação do espectro harmônico da corrente de um conjunto de cargas não lineares monofásicas por matrizes de admitâncias complexas

RESUMO

O problema de avaliação das correntes harmônicas geradas por cargas não lineares é uma constante no campo da qualidade da energia elétrica. Esse problema se torna ainda mais difícil quando a tensão de alimentação já está poluída com componentes harmônicos. O efeito dessa poluição é abordado neste trabalho, apresentando resultados de medição e evidenciando como as correntes geradas por uma carga não linear pode depender dos parâmetros de distorção da tensão. Uma vez colocado o problema da dependência de correntes harmônicas com a poluição da fonte de alimentação, este trabalho busca uma representação adequada para cargas não lineares neste contexto. Quando se trabalha com uma representação de uma carga não linear através de um conjunto de admitâncias cujas amplitudes e ângulos dependem do conteúdo harmônico da tensão, a metodologia que usa tensores é razoavelmente precisa no caso destas produzirem uma figura circular no plano das admitâncias, o que, em geral, acontece para simulações. Entretanto, esta abordagem não é adequada para o caso cargas em geral. Para se levar em consideração a variação da admitância devido à dependência com os ângulos (fundamental e harmônicos) da tensão de alimentação, este trabalho apresenta um procedimento especial que envolve um conjunto de matrizes de admitâncias que são adequadas para a modelagem de cargas em geral, uma vez que esta modelagem pode utilizar dados advindos de medições, os quais podem revelar completamente as características não lineares de cargas reais. A metodologia é baseada em um processo de cálculo iterativo no qual uma admitância de Norton é atualizada, sendo esta a responsável por levar em consideração a dependência do comportamento da carga não linear com o módulo e ângulo da tensão de alimentação. Uma vez que os parâmetros do sistema elétrico e da carga são estabelecidos, o método fornece uma maneira determinística de avaliação da corrente de linha produzida por uma carga não linear ou um grupo destas cargas não lineares. Além das medições mencionadas, simulações computacionais comparando resultados obtidos pela modelagem de cargas não lineares no domínio do tempo são apresentadas com o propósito de validação do processo. O procedimento desenvolvido é também utilizado para calcular a corrente total de dois conjuntos de cargas não lineares diferentes conectadas a um mesmo alimentador, mostrando sua aplicabilidade para casos mais gerais.

Palavras-chave: Carga não linear. Espectro harmônico. Soma de correntes harmônicas.

Assessing of the Harmonic Current Spectrum due to a set of Single-phase Nonlinear Loads through Complex Admittance Matrices

ABSTRACT

The problem of computing the harmonic currents produced by nonlinear loads has been constantly raised in the field of power quality. Such a problem becomes even more difficult when the voltage supply has already been polluted with harmonics. The effect of harmonic polluted voltage supply is addressed in this work by presenting measurement results showing how the harmonic currents generated by a nonlinear load can depend on the distortion parameters of the voltage supply. Upon posed the problem of harmonic currents dependency on the voltage supply pollution, this work seeks an adequate representation for nonlinear loads in this context. When dealing with the representation of a nonlinear load through admittances, whose magnitude and angle depend on the harmonic content of the supply voltage, the tensor based procedures are accurate enough when the load admittance loci yields to a circle, which is usually the case for simulations. However, this modeling approach does not fit all types of loads. To account for the admittance variation due to the dependency on the supply voltage angle (fundamental and harmonics), this work introduces a special procedure involving a collection of admittance matrices, which is suitable for any load modeling, as it can use data even from measurement, which may reveal all nonlinear behavior of real loads. The method is based on the iterative calculation using an updated Norton admittance, which takes into account the magnitude and angle voltage dependency behavior of the nonlinear load. Once the parameters from the electrical system and loads are gathered, the method provides a deterministic way of assessment the line current produced by as single load or a group of these specific loads. Besides the mentioned measurements, numerical calculations comparing results from time-domain simulation and the proposed methodology are presented for validation purposes. The developed procedure is also used to compute the total current for two sets of different loads connected to the same feeder, showing its applicability to more general cases.

Keywords: Nonlinear load. Harmonic spectrum. Harmonic currents summation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2.1 - DISPERSÃO DOS ÂNGULOS DE FASE DAS CORRENTES HARMÔNICAS PARA MICROCOMPUTADORES	37
FIGURA 3.1 - CIRCUITO ELÉTRICO SIMPLIFICADO PARA AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DA FONTE E DA CARGA	43
FIGURA 3.2 - MODELAGEM DE UMA CARGA NÃO LINEAR PELA ADMITÂNCIA DE NORTON	45
FIGURA 3.3 - INDICAÇÃO DAS ITERAÇÕES PELO MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON PARA A FUNÇÃO $y=f(x)$	48
FIGURA 3.4 - ESTIMATIVA DO VALOR DE UMA FUNÇÃO $y=f(x)$ UTILIZANDO A SÉRIE DE TAYLOR	49
FIGURA 3.5 - IMPEDÂNCIA DO SISTEMA VISTA DA CNL	53
FIGURA 3.6 - FLUXOGRAMA PARA OBTENÇÃO DE Y_{kj}	58
FIGURA 3.7 - ADMITÂNCIA Y_{33} MEDIDA E SUAVIZADA PARA $V_j = 1\%$ DE V_l	61
FIGURA 3.8 - AGRUPAMENTO DAS MATRIZES PARCIAIS DE ADMITÂNCIAS	64
FIGURA 3.9 - MONTAGEM DA MATRIZ DE ADMITÂNCIAS DE NORTON	65
FIGURA 3.10 - LINEARIZAÇÃO DE UMA FUNÇÃO NÃO LINEAR PELA SÉRIE DE TAYLOR	67
FIGURA 3.11 - REPRESENTAÇÃO DA ADMITÂNCIA COMPLEXA	70
FIGURA 3.12 - PONTOS NOTÁVEIS DA ADMITÂNCIA COMPLEXA LINEARIZADA	72
FIGURA 3.13 - LUGAR GEOMÉTRICO DAS ADMITÂNCIAS MEDIDAS PARA ORDEM HARMÔNICA $j = 3$ DE TENSÃO COM VALORES DE 1% E 2% E RELATIVAS ÀS CORRENTES DE ORDEM $1 \leq k \leq 15$	73
FIGURA 3.14 - LUGAR GEOMÉTRICO DAS ADMITÂNCIAS MODELADAS PARA ORDEM HARMÔNICA $j = 3$ DE TENSÃO COM VALORES DE 1% E RELATIVAS ÀS CORRENTES DE ORDEM $1 \leq k \leq 15$	75
FIGURA 3.15 - LUGAR GEOMÉTRICO DAS ADMITÂNCIAS MODELADAS PARA ORDEM HARMÔNICA $j = 5$ DE TENSÃO COM VALORES DE 1% E RELATIVAS ÀS CORRENTES DE ORDEM $1 \leq k \leq 15$	76
FIGURA 3.16 - LUGAR GEOMÉTRICO DAS ADMITÂNCIAS MODELADAS PARA ORDEM HARMÔNICA $j = 7$ DE TENSÃO COM VALORES DE 1% E RELATIVAS ÀS CORRENTES DE ORDEM $1 \leq k \leq 15$	77

FIGURA 4.1 -	DIAGRAMA PARA GERAÇÃO DE TENSÕES E MEDIÇÃO DAS GRANDEZAS	78
FIGURA 4.2 -	AGRUPAMENTO DE LINHAS ESPECTRAIS (<i>BINS</i>) PARA CÁLCULO DE HARMÔNICOS E INTER HARMÔNICOS	81
FIGURA 4.3 -	CURVA DE CORREÇÃO ANGULAR DO CONJUNTO AMPLIFICADOR + TRANSFORMADOR	83
FIGURA 4.4 -	SEGMENTO 1 DO PROGRAMA LABVIEW PARA GERAÇÃO DAS TENSÕES COMPOSTAS ATRAVÉS DO MÓDULO DAC MODELO NI USB 6218	84
FIGURA 4.5 -	FORMA DE ONDA DA TENSÃO MEDIDA (<i>TENSÕES</i>) E PROGRAMADA (<i>OUTPUT WAVEFORM</i>)	84
FIGURA 4.6 -	DIAGRAMA ELÉTRICO DE CONEXÃO DA PLACA ADC/DAC MODELO NI USB 6218	85
FIGURA 4.7 -	SEGMENTO 2 DO PROGRAMA LABVIEW PARA LEITURA DAS TENSÕES E CORRENTES NA CARGA	86
FIGURA 4.8 -	SEGMENTO 3 DO PROGRAMA LABVIEW PARA CRIAÇÃO DOS GRUPOS E SUBGRUPOS DE TENSÕES E DE CORRENTES HARMÔNICAS CONFORME IEC 61000-4.7 (2008)	87
FIGURA 4.9 -	FORMA DE ONDA DA CORRENTE MEDIDA DE FASE (<i>CORRENTES</i>) E DA CORRENTE DE NEUTRO	88
FIGURA 4.10 -	AMPLITUDES E ÂNGULOS MEDIDOS DOS HARMÔNICOS EM SUBGRUPOS. GRANDEZA F0 INDICA A FREQUÊNCIA INICIAL E DF INDICA A RESOLUÇÃO. VALORES DE AMPLITUDES EM A_{RMS} E ÂNGULOS EM RADIANS	88
FIGURA 4.11 -	MEDIÇÃO DAS AMPLITUDES DAS CORRENTES HARMÔNICAS CONVERTIDAS EM TENSÃO REFERENTE À ENTRADA DO ADC, ATÉ 600 HZ, (EM VERMELHO) E RUÍDO DE FUNDO (EM AZUL). AS AMPLITUDES E ÂNGULOS DOS HARMÔNICOS MEDIDOS COBREM A FAIXA ATÉ A ORDEM 15	89
FIGURA 4.12 -	SEGMENTO 4 DO PROGRAMA LABVIEW PARA TRANSFERÊNCIA DOS DADOS MEDIDOS DOS GRUPOS E SUBGRUPOS DE TENSÕES E DE CORRENTES HARMÔNICAS PARA O EXCEL	90
FIGURA 5.1 -	EVOLUÇÃO DE I_1 PARA GRUPOS DE 1 A 5 LUMINÁRIAS COM FONTE SENOIDAL	92

FIGURA 5.2 - EVOLUÇÃO DE I_3 PARA GRUPOS DE 1 A 5 LUMINÁRIAS COM FONTE SENOIDAL	92
FIGURA 5.3 - EVOLUÇÃO DE I_5 PARA GRUPOS DE 1 A 5 LUMINÁRIAS COM FONTE SENOIDAL	92
FIGURA 5.4 - EVOLUÇÃO DE I_7 PARA GRUPOS DE 1 A 5 LUMINÁRIAS COM FONTE SENOIDAL	92
FIGURA 5.5 - EVOLUÇÃO DE I_9 PARA GRUPOS DE 1 A 5 LUMINÁRIAS COM FONTE SENOIDAL	92
FIGURA 5.6 - EVOLUÇÃO DE I_{11} PARA GRUPOS DE 1 A 5 LUMINÁRIAS COM FONTE SENOIDAL	92
FIGURA 5.7 - EVOLUÇÃO DE I_{13} PARA GRUPOS DE 1 A 5 LUMINÁRIAS COM FONTE SENOIDAL	93
FIGURA 5.8 - EVOLUÇÃO DE I_{RMS} PARA GRUPOS DE 1 A 5 LUMINÁRIAS COM FONTE SENOIDAL	93
FIGURA 5.9 - EVOLUÇÃO DE I_1 PARA GRUPOS DE 1 A 5 LUMINÁRIAS COM FONTE DA BANCADA	94
FIGURA 5.10 - EVOLUÇÃO DE I_3 PARA GRUPOS DE 1 A 5 LUMINÁRIAS COM FONTE DA BANCADA	94
FIGURA 5.11 - EVOLUÇÃO DE I_5 PARA GRUPOS DE 1 A 5 LUMINÁRIAS COM FONTE DA BANCADA	94
FIGURA 5.12 - EVOLUÇÃO DE I_7 PARA GRUPOS DE 1 A 5 LUMINÁRIAS COM FONTE DA BANCADA	94
FIGURA 5.13 - EVOLUÇÃO DE I_9 PARA GRUPOS DE 1 A 5 LUMINÁRIAS COM FONTE DA BANCADA	95
FIGURA 5.14 - EVOLUÇÃO DE I_{11} PARA GRUPOS DE 1 A 5 LUMINÁRIAS COM FONTE DA BANCADA	95
FIGURA 5.15 - EVOLUÇÃO DE I_{13} PARA GRUPOS DE 1 A 5 LUMINÁRIAS COM FONTE DA BANCADA	95
FIGURA 5.16 - EVOLUÇÃO DE I_{RMS} PARA GRUPOS DE 1 A 5 LUMINÁRIAS COM FONTE DA BANCADA	95
FIGURA 5.17 - VARIAÇÃO DE I_{RMS} VERSUS ÂNGULO DE V_3	99
FIGURA 5.18 - VARIAÇÃO DE I_1 VERSUS ÂNGULO DE V_3	99
FIGURA 5.19 - VARIAÇÃO DE I_3 VERSUS ÂNGULO DE V_3	99
FIGURA 5.20 - VARIAÇÃO DE I_5 VERSUS ÂNGULO DE V_3	99

FIGURA 5.21 - VARIAÇÃO DE I_7 VERSUS ÂNGULO DE V_3	99
FIGURA 5.22 - VARIAÇÃO DE I_9 VERSUS ÂNGULO DE V_3	99
FIGURA 5.23 - VARIAÇÃO DE I_{11} VERSUS ÂNGULO DE V_3	100
FIGURA 5.24 - VARIAÇÃO DE I_{13} VERSUS ÂNGULO DE V_3	100
FIGURA 5.25 - VARIAÇÃO DE I_{15} VERSUS ÂNGULO DE V_3	100
FIGURA 5.26 - VARIAÇÃO DOS ÂNGULOS DAS ORDENS BAIXAS VERSUS ÂNGULO DE V_3 A 5%	100
FIGURA 5.27 - VARIAÇÃO DE I_{RMS} VERSUS ÂNGULO DE V_5	101
FIGURA 5.28 - VARIAÇÃO DE I_1 VERSUS ÂNGULO DE V_5	101
FIGURA 5.29 - VARIAÇÃO DE I_3 VERSUS ÂNGULO DE V_5	101
FIGURA 5.30 - VARIAÇÃO DE I_5 VERSUS ÂNGULO DE V_5	101
FIGURA 5.31 - VARIAÇÃO DE I_7 VERSUS ÂNGULO DE V_5	101
FIGURA 5.32 - VARIAÇÃO DE I_9 VERSUS ÂNGULO DE V_5	102
FIGURA 5.33 - VARIAÇÃO DE I_{11} VERSUS ÂNGULO DE V_5	102
FIGURA 5.34 - VARIAÇÃO DE I_{13} VERSUS ÂNGULO DE V_5	102
FIGURA 5.35 - VARIAÇÃO DE I_{15} VERSUS ÂNGULO DE V_5	102
FIGURA 5.36 - VARIAÇÃO DOS ÂNGULOS DAS ORDENS BAIXAS VERSUS ÂNGULO DE V_5 A 5%	102
FIGURA 5.37 - VARIAÇÃO DE I_{RMS} VERSUS ÂNGULO DE V_7	103
FIGURA 5.38 - VARIAÇÃO DE I_1 VERSUS ÂNGULO DE V_7	103
FIGURA 5.39 - VARIAÇÃO DE I_3 VERSUS ÂNGULO DE V_7	103
FIGURA 5.40 - VARIAÇÃO DE I_5 VERSUS ÂNGULO DE V_7	103
FIGURA 5.41 - VARIAÇÃO DE I_7 VERSUS ÂNGULO DE V_7	103
FIGURA 5.42 - VARIAÇÃO DE I_9 VERSUS ÂNGULO DE V_7	103
FIGURA 5.43 - VARIAÇÃO DE I_{11} VERSUS ÂNGULO DE V_7	104
FIGURA 5.44 - VARIAÇÃO DE I_{13} VERSUS ÂNGULO DE V_7	104
FIGURA 5.45 - VARIAÇÃO DE I_{15} VERSUS ÂNGULO DE V_7	104
FIGURA 5.46 - VARIAÇÃO DOS ÂNGULOS DAS ORDENS BAIXAS VERSUS ÂNGULO DE V_7 A 5%	104
FIGURA 5.47 - AMPLITUDE [A] DAS DIVERSAS ORDENS HARMÔNICAS DA CORRENTE REFERENTE À DIFERENÇA (TESTE 1 – TESTE 2) VERSUS ÂNGULO DE V_5	106

FIGURA 5.48 - AMPLITUDE [A] DAS DIVERSAS ORDENS HARMÔNICAS DA CORRENTE REFERENTE À DIFERENÇA (TESTE 3 – TESTE 4) VERSUS ÂNGULO DE V_5	106
FIGURA 5.49 - VARIAÇÃO ABSOLUTA DA AMPLITUDE [A] DAS DIVERSAS ORDENS DA CORRENTE HARMÔNICA DEVIDA À DIFERENÇA (TESTE 1 – TESTE 2) VERSUS ÂNGULO DE V_5	106
FIGURA 5.50 - VARIAÇÃO ABSOLUTA DA AMPLITUDE [A] DAS DIVERSAS ORDENS DA CORRENTE HARMÔNICA DEVIDA À DIFERENÇA (TESTE 3 – TESTE 4) VERSUS ÂNGULO DE V_5	106
FIGURA 5.51 - VARIAÇÃO RELATIVA DA AMPLITUDE [%] DAS DIVERSAS ORDENS DA CORRENTE HARMÔNICA DEVIDA À DIFERENÇA (TESTE 1 – TESTE 2) VERSUS ÂNGULO DE V_5	107
FIGURA 5.52 - VARIAÇÃO RELATIVA DA AMPLITUDE [%] DAS DIVERSAS ORDENS DA CORRENTE HARMÔNICA DEVIDA À DIFERENÇA (TESTE 3 – TESTE 4) VERSUS ÂNGULO DE V_5	107
FIGURA 5.53 - ÂNGULO [GRAU] DAS DIVERSAS ORDENS DA CORRENTE HARMÔNICA DEVIDA À DIFERENÇA (TESTE 1 – TESTE 2) VERSUS ÂNGULO DE V_5	108
FIGURA 5.54 - ÂNGULO [GRAU] DAS DIVERSAS ORDENS DA CORRENTE HARMÔNICA DEVIDA À DIFERENÇA (TESTE 3 – TESTE 4) VERSUS ÂNGULO DE V_5	108
FIGURA 6.1 - MODELO DA CARGA NÃO LINEAR NO SISTEMA ELÉTRICO	112
FIGURA 6.2 - CARGAS NÃO LINEARES DIFERENTES INSERIDAS NO SISTEMA ELÉTRICO	116
FIGURA 6.3 - REDISTRIBUIÇÃO DAS CARGAS IGUAIS EM AGLOMERADOS	117
FIGURA 6.4 - AMPLITUDE DE I_1 VERSUS ITERAÇÃO	120
FIGURA 6.5 - AMPLITUDE DE I_3 VERSUS ITERAÇÃO	120
FIGURA 6.6 - AMPLITUDE DE I_5 VERSUS ITERAÇÃO	120
FIGURA 6.7 - AMPLITUDE DE I_7 VERSUS ITERAÇÃO	120
FIGURA 6.8 - AMPLITUDE DE I_9 VERSUS ITERAÇÃO	120
FIGURA 6.9 - AMPLITUDE DE I_{11} VERSUS ITERAÇÃO	120
FIGURA 6.10 - AMPLITUDE DE I_{13} VERSUS ITERAÇÃO	121
FIGURA 6.11 - AMPLITUDE DE I_{15} VERSUS ITERAÇÃO	121
FIGURA 6.12 - ÂNGULO DE I_1 VERSUS ITERAÇÃO	121

FIGURA 6.13 - ÂNGULO DE I_3 VERSUS ITERAÇÃO	121
FIGURA 6.14 - ÂNGULO DE I_5 VERSUS ITERAÇÃO	122
FIGURA 6.15 - ÂNGULO DE I_7 VERSUS ITERAÇÃO	122
FIGURA 6.16 - ÂNGULO DE I_9 VERSUS ITERAÇÃO	122
FIGURA 6.17 - ÂNGULO DE I_{11} VERSUS ITERAÇÃO	122
FIGURA 6.18 - ÂNGULO DE I_{13} VERSUS ITERAÇÃO	122
FIGURA 6.19 - ÂNGULO DE I_{15} VERSUS ITERAÇÃO	122
FIGURA 6.20 - AMPLITUDE DA 3 ^A HARMÔNICA DA CORRENTE DE FASE VERSUS ALTERAÇÃO DA IMPEDÂNCIA DO CABO Z_B	124
FIGURA 6.21 - AMPLITUDE DA 5 ^A HARMÔNICA DA CORRENTE DE FASE VERSUS ALTERAÇÃO DA IMPEDÂNCIA DO CABO Z_B	124
FIGURA 6.22 - ÂNGULO DA 3 ^A HARMÔNICA DA CORRENTE DE FASE VERSUS ALTERAÇÃO DA IMPEDÂNCIA DO CABO Z_B	125
FIGURA 6.23 - ÂNGULO DA 5 ^A HARMÔNICA DA CORRENTE DE FASE VERSUS ALTERAÇÃO DA IMPEDÂNCIA DO CABO Z_B	125
FIGURA 6.24 - RESULTADO DAS SIMULAÇÕES NO MODELO: MUDANÇA PERCENTUAL [%] NAS AMPLITUDES DAS CORRENTES HARMÔNICAS EM RELAÇÃO AOS VALORES DA TABELA 6.2 VERSUS ÂNGULO DE V_3	126
FIGURA 6.25 - DIAGRAMA DE CONEXÕES PARA AS CARGAS A E B DO TESTE DE SOMA DE CORRENTES DE CARGAS DIFERENTES	130

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - VALORES CALCULADOS E SUAIVZADOS DE Y_{33} PARA $V_j = 1\%$ DE V_l .	60
TABELA 4.1 - REQUISITOS TÉCNICOS DA FFT PARA MEDIÇÃO DE HARMÔNICOS	79
TABELA 4.2 - REQUISITOS DE ERRO DOS INSTRUMENTOS	83
TABELA 5.1 - AMPLITUDES EFICAZES MEDIDAS [A] DAS ORDENS HARMÔNICAS ATÉ 15 PARA AS CORRENTES DA FASE DOS N REATORES PHILIPS COM FONTE SENOIDAL	93
TABELA 5.2 - AMPLITUDES EFICAZES MEDIDAS [A] DAS ORDENS HARMÔNICAS ATÉ 15 PARA AS CORRENTES DA FASE DOS N REATORES PHILIPS COM FONTE DA BANCADA	95
TABELA 5.3 - AMPLITUDES EFICAZES PARCIAIS MEDIDAS [A] DAS ORDENS HARMÔNICAS ATÉ 15 PARA AS CORRENTES DA FASE DE UM REATOR TECPAR COM FONTE SENOIDAL	97
TABELA 5.4 - AMPLITUDES EFICAZES PARCIAIS MEDIDAS [A] DAS ORDENS HARMÔNICAS ATÉ 15 PARA AS CORRENTES DA FASE DE UM REATOR PHILIPS COM FONTE SENOIDAL	97
TABELA 5.5 - AMPLITUDES EFICAZES TOTAIS MEDIDAS E CALCULADAS [A] DAS ORDENS HARMÔNICAS ATÉ 15 PARA A SOMA DAS CORRENTES DE FASE DOS REATORES TECPAR E PHILIPS COM FONTE SENOIDAL	97
TABELA 5.6 - AMPLITUDES EFICAZES MEDIDAS [A] DAS ORDENS HARMÔNICAS ATÉ 15 PARA AS CORRENTES DE FASE DOS REATORES PHILIPS EB-232A COMO REFERÊNCIA PARA AS FIGURAS 5.17 A 5.26	98
TABELA 6.1 - VALORES DAS CORRENTES RELATIVAS A UMA CNL E A UM CONJUNTO DE 100 CNL IGUAIS, OBTIDAS DO MATLAB SCRIPT	119
TABELA 6.2 - ESPECTRO HARMÔNICO CARACTERÍSTICO PARA O REATOR MODELADO	126
TABELA 6.3 - ESPECTRO HARMÔNICO SIMULADO DAS CORRENTES PARA A CARGA MODELADA	127

TABELA 6.4 - ESPECTROS HARMÔNICOS SIMULADOS DA CORRENTE PARA O TESTE 1	127
TABELA 6.5 - ESPECTROS HARMÔNICOS SIMULADOS DA CORRENTE PARA O TESTE 2	128
TABELA 6.6 - COMPARAÇÃO ENTRE A CORRENTE GERADA SOB TENSÃO PURAMENTE SENOIDAL E SOB TENSÃO DISTORCIDA (TESTE 1)	128
TABELA 6.7 - ESPECTRO HARMÔNICO DAS CARGAS A E B DA FIGURA 5.23	129
TABELA 6.8 - VALORES DAS CORRENTES APÓS A ESTABILIZAÇÃO DO SISTEMA PARA GRUPOS DE 100 CNL DO TIPO A E 50 CNL DO TIPO B	131
TABELA 6.9 - VALORES DAS CORRENTES APÓS A ESTABILIZAÇÃO DO SISTEMA PARA GRUPOS DE 100 CNL DO TIPO A E 100 CNL DO TIPO B	132

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A_0	amplitude máxima da componente contínua de uma onda periódica genérica
A_h	amplitude máxima de ordem harmônica h da série de cossenos de uma onda
B	susceptância elétrica [S]
B_h	amplitude máxima de ordem harmônica h da série de senos de uma onda periódica genérica
B_m	densidade de fluxo máxima [T]
C	capacitância elétrica [F]
$C_{sg,h}$	valor eficaz do sinal de ordem harmônica h e referente a um subgrupo de medição
C_{th}	capacitância térmica
CI	circuito integrado
CNL	carga(s) não linear(es)
ca-cc	corrente alternada-corrente contínua
c_m	valor eficaz do componente de frequência m de um sinal discretizado
c_0	valor eficaz do componente contínuo de um sinal discretizado
$\cos \phi$	ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente fundamentais
D	potência de distorção [VA_h], demanda elétrica [kW]
DAC	conversor digital-analógico (<i>Digital to Analog Converter</i>)
DFT	transformada discreta de Fourier (<i>Discret Fourier Transform</i>)
DHTv	distorção harmônica total de tensão [%]
DHTvh	distorção harmônica da tensão de ordem harmônica h [%]
DHTi	distorção harmônica total de corrente [%]
DHTih	distorção harmônica da corrente de ordem harmônica h [%]
d	diâmetro
d_C	diâmetro do condutor [m]
E	campo elétrico [V/m]
f	frequência da tensão ou da corrente [Hz]
FA	fator de atenuação (das correntes harmônicas)
FD	fator de diversidade (das correntes harmônicas)
FFT	transformada rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>)
FH	fator harmônico
fp	fator de potência
G	condutância elétrica [S]

H	intensidade de campo magnético [A/m]
h	ordem harmônica para uso geral da corrente ou da tensão, $h = 1, 2, 3, 4...∞$
HDF	fator de desclassificação harmônica (<i>Harmonic Derating Factor</i>)
h_1	menor ordem harmônica possível da corrente CA teórica para um conversor ideal
I	valor eficaz (<i>rms</i>) da corrente [A]
I_0	valor da componente contínua da corrente alternada [A]
I_1	valor eficaz da corrente harmônica de ordem fundamental [A]
I_{1-R}	valor eficaz da corrente primária sob frequência e carga nominais (I_1 rated) [A]
I_{2-R}	valor eficaz da corrente secundária sob frequência e carga nominais (I_2 rated) [A]
I_{dc}	valor médio da corrente contínua no lado cc de um retificador [A]
I_h	valor eficaz da corrente de ordem harmônica h [A]
I_{Nh}^0	corrente harmônica original de ordem h na barra N [A]
I_{Nh}^{CNL}	corrente harmônica de ordem h na barra N devida às cargas não lineares [A]
I_h^N	corrente de ordem harmônica h emitida pela carga N [A]
$I_h^{N=1}$	corrente de ordem harmônica h emitida por uma unidade da carga N [A]
I_{hL}	valor eficaz da corrente de ordem harmônica h gerada pela carga [A]
I_{hS}	valor eficaz da corrente de ordem harmônica h gerada pelo sistema externo [A]
$I_{MÁX}$	valor eficaz máximo permissível da corrente não senoidal [A]
I_n	valor eficaz da corrente nominal do sistema ou equipamento (<i>I nominal</i>) [A]
I_R	valor eficaz da corrente sob frequência e carga nominais (<i>I rated</i>) [A]
I_{RMS}	valor eficaz da corrente [A]
I_{SC}	valor eficaz da corrente de curto-circuito [A]
$i(t)$	valor instantâneo da corrente, função do tempo [A]
$i(\theta)$	valor instantâneo da corrente, função do ângulo elétrico [A]
j	ordem harmônica do componente de tensão sobreposto ao fundamental
J	densidade de corrente [A/m ²]
$jpdf$	função distribuição de probabilidades conjunta (<i>joint probability density function</i>)
K	fator de desclassificação do transformador para cargas não lineares
k	número natural, fator de ordem harmônica, ordem harmônica da corrente
$kVA_{NOM.}$	potência nominal do transformador ou de outro equipamento [kVA]
$kvar$	potência reativa de capacitor ou de banco de capacitores [kvar]
kVA_{SC}	potência de curto-circuito [kVA]
K_c	fator de crista de uma onda de tensão ou de corrente

K_t	fator de forma de uma onda de tensão ou de corrente
L	indutância elétrica [H]
L_{CA}	indutância de amortecimento no lado ca do conversor [H]
L_{CC}	indutância de amortecimento no lado cc do conversor [H]
M	magnetização
m	ordem da linha espectral relativamente à frequência fundamental
N	quantidade (número de unidades), períodos da onda fundamental dentro da janela de tempo da medição (tw)
N_1	número de espiras do enrolamento primário do transformador
N_2	número de espiras do enrolamento secundário do transformador
P_D	perdas dielétricas [W]
P_{EC}	perdas por corrente de Foucault [W]
P_h	potência ativa de ordem harmônica h [W]
P_{SC}	potência de curto-circuito [kVA]
$p(t)$	valor instantâneo da potência real em função do tempo [W]
pdf	função distribuição de probabilidade (<i>probability density function</i>)
pu	valor por unidade
Q	potência reativa [var]
Q_h	potência reativa de ordem h [var]
R	resistência elétrica [Ω]
R_1	resistência cc medida entre dois terminais primários do transformador [Ω]
R_{1h}	resistência do enrolamento primário à frequência de ordem h [Ω]
R_2	resistência cc medida entre dois terminais secundários do transformador [Ω]
R_{2h}	resistência do enrolamento secundário à frequência de ordem h [Ω]
R_{CC}	resistência elétrica em cc [Ω]
R_{dc}	resistência cc equivalente de carga do conversor ca-cc
R_f	valor da resistência cc a frio (à temperatura ambiente ou de referência)
rms	valor eficaz ou médio quadrático (<i>root mean square</i>)
R_q	valor da resistência cc a quente [Ω]
rss	soma raiz dos quadrados (<i>root sum square</i>)
R_{th}	resistência térmica
®	marca registrada
S	potência aparente [VA]
s	distância entre dois condutores [m]

S_h	potência aparente de ordem harmônica h [VA]
T	temperatura [°C] ou [K]
t	tempo [s]
$THDi$	<i>Total Harmonic Distortion of current</i> [%]
$THDv$	<i>Total Harmonic Distortion of voltage</i> [%]
tw	tempo da janela de medição [s]
V	valor eficaz (<i>rms</i>) da tensão [V]
$v(t)$	valor instantâneo da tensão, função do tempo [V]
$v(\theta)$	valor instantâneo da tensão, função do ângulo elétrico [V]
V_1	valor eficaz da tensão fundamental [V]
V_B^N	tensão no ponto B de ordem harmônica h obtida do teste N [V]
V_{dc}	valor médio da tensão contínua no lado cc de um retificador [V]
V_h	valor eficaz da tensão de ordem harmônica h [V]
V_{h0}	tensão harmônica de ordem h pré-existente no PAC [V]
V_{hC}	tensão harmônica de ordem h calculada no PAC [V]
V_{hL}	tensão harmônica de ordem h nos terminais da carga [V]
V_{hM}	tensão harmônica de ordem h medida no PAC [V]
V_{hP}	tensão harmônica de ordem h prevista no PAC [V]
V_n	valor eficaz da tensão nominal do sistema ou equipamento [V]
V_{Nh}	tensão harmônica de ordem h na barra N [V]
V_{Nh}^0	tensão harmônica original de ordem h na barra N [V]
V_{Nh}^{CNL}	tensão harmônica de ordem h na barra N devida às cargas não lineares [V]
V_o	valor da componente contínua da tensão alternada [V]
V_{RMS}	valor eficaz (<i>rms</i>) da tensão [V]
V_S	tensão no PAC [V]
XC	reatância capacitiva elétrica [Ω]
XL	reatância indutiva elétrica [Ω]
x_k	valor numérico da variável x na iteração k
Y	admitância elétrica $Y = G + jB$ [S]
Y^*	conjugado da admitância elétrica $Y^* = G - jB$ [S]
V^*	conjugado da tensão $V^* = V \angle -\theta$ [V]
Z	impedância elétrica [Ω]
Z_L	impedância da carga [Ω]
Z_S	impedância do sistema externo alimentador [Ω]

α	coeficiente de temperatura [$^{\circ}\text{C}^{-1}$], ângulo de disparo do tiristor [grau elétrico]
γ_P	fator de perdas por efeito proximidade [pu]
γ_{hP}	fator de perdas por efeito proximidade pela corrente de ordem harmônica h
γ_S	fator de perdas por efeito pelicular [pu]
γ_{hS}	fator de perdas por efeito pelicular pela corrente de ordem harmônica h [pu]
δ	profundidade de penetração no condutor [mm], ângulo de perdas dielétricas [grau]
δ_N	profundidade de penetração no condutor à frequência fundamental [mm]
ε	permissividade elétrica do material [F/m]
ε_0	permissividade elétrica do vácuo [F/m]
θ_{amb}	temperatura ambiente [$^{\circ}\text{C}$]
η	eficiência [%] ou [pu]
θ	intervalo angular elétrico ou ângulo elétrico instantâneo [grau elétrico]
μ	permeabilidade magnética do material [H/m], ângulo de comutação do tiristor
μ_0	permeabilidade magnética do vácuo [H/m]
ρ	resistividade elétrica [$\Omega\cdot\text{m}$]
σ	condutividade elétrica [S.m]
Φ	fluxo magnético [Wb]
ω	velocidade angular [rad/s]

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADC	conversor analógico-digital (<i>Analog to Digital Converter</i>)
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	American National Standard Institute
ASD	unidade de velocidade variável (para motores) (<i>Adjustable Speed Drive</i>)
AT	alta tensão, $V > 69 \text{ kV}$
BS	British Standards
BT	baixa tensão, $V \leq 1 \text{ kV}$
CE	Comunidade Europeia
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization
CBEMA	Computer and Business Equipment Manufacturers Association
CGIEE	Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética
CIGREE	Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques et Electroniques
CIGRE	International Council on Large Electric Systems
DAC	conversor digital-analógico (<i>Digital to Analog Converter</i>)
EMI	interferência eletromagnética (<i>ElectroMagnetic Interference</i>)
EMTP	ElectroMagnetic Transient Program
GCOI	Grupo Coordenador para Operação Interligada
GCPS	Grupo Coordenador de Planejamento dos Sistemas Elétricos
HVdc	High Voltage direct current
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEC	International Electrotechnical Commission
IGBT	transistor bipolar com porta isolada (<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>)
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia
LabVIEW	Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench
Matlab	Matrix Laboratory
MT	média tensão, $1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$
ONS	Operador Nacional do Sistema
PAC	ponto de acoplamento comum (<i>PCC - Point of Common Coupling</i>)
PLC	controlador lógico programável (<i>Programmable Logic Controller</i>)
PSCAD	Power Systems Computer Aided Design
PRODIST	Procedimentos de Distribuição

PWM	modulação por largura de pulso (<i>Pulse Width Modulation</i>)
QDC	Quadro de Distribuição de Circuitos
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão
UL	Underwriters Laboratories, Inc.
UPS	fonte de energia elétrica ininterrupta (<i>Uninterruptible Power Supply</i>)
UTE	Union Technique de L'Electricité
VA	variável aleatória
VSD	acionador de velocidade variável (para motores) (<i>Variable Speed Drive</i>)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	24
1.1	BREVE ABORDAGEM DO PROBLEMA DAS COMPONENTES HARMÔNICAS	24
2	REVISÃO DOS MÉTODOS DE SOMA DE CORRENTES HARMÔNICAS	27
2.1	INTRODUÇÃO	27
2.2	A ANÁLISE ESTOCÁSTICA	28
2.3	A SOMA PONDERADA	31
2.4	A ANÁLISE MATEMÁTICA	35
3	MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO	42
3.1	INTRODUÇÃO	42
3.2	COMPONENTES DO SISTEMA	43
3.2.1	Sistema externo e transformador	44
3.2.2	Linhas de cabos de baixa tensão	44
3.2.3	Outras cargas	44
3.3	MODELAGEM DA CARGA NÃO LINEAR	45
3.3.1	A admitância de Norton	45
3.4	CÁLCULO NUMÉRICO	47
3.4.1	O método de Newton-Raphson	47
3.4.1.1	<i>Função não linear de uma variável</i>	47
3.4.1.2	<i>O método de Newton-Raphson de uma variável utilizando a série de Taylor</i>	49
3.4.1.3	<i>Função não linear de um sistema de variáveis</i>	50
3.5	A ANÁLISE ITERATIVA	52
3.6	A MATRIZ DE ADMITÂNCIAS	55
3.6.1	Introdução	55
3.6.2	O cálculo das admitâncias	56
3.7	LINEARIZAÇÃO	59
3.7.1	Introdução	59
3.7.2	A matriz corrigida geometricamente	60
3.7.3	Linearização dos dados de medição	61
3.7.4	Matrizes parciais de admitâncias	64
3.7.5	Linearização por tensor	66

3.7.5.1	<i>Introdução</i>	66
3.7.5.2	<i>Representação do tensor</i>	67
3.7.5.3	<i>O tensor por dupla perturbação</i>	73
3.8	LOCIS DAS ADMITÂNCIAS SEM LINEARIZAÇÃO	74
4	MEDICÃO DOS PARÂMETROS DA CARGA	78
4.1	FLUXOGRAMA DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	78
4.2	O PROGRAMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS EM PLATAFORMA LABVIEW	78
4.3	MEDICÃO DE TENSÕES E CORRENTES	79
4.3.1	Metodologia normativa	79
4.3.2	Geração das tensões programadas	83
4.2.2	Aquisição dos dados do ADC USB-6218	85
4.2.3	Espectro harmônico segundo a IEC-61000-4.7	87
5	ENSAIOS	91
5.1	ENSAIOS PRELIMINARES	91
5.1.1	Ensaio 1 - Determinação da amplitude da soma de cargas iguais	91
5.1.1.1	<i>Ensaio 1.1 com fonte senoidal pura</i>	91
5.1.1.2	<i>Ensaio 1.2 com fonte da bancada</i>	93
5.1.2	Ensaio 2 - Determinação da amplitude da soma de cargas diferentes	96
5.1.2.1	<i>Ensaio 2.1 com fonte senoidal pura</i>	96
5.2	ENSAIO 3 - DETERMINAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS COMPONENTES HARMÔNICOS DA CORRENTE DE CARGA PARA DIVERSAS COMPOSIÇÕES DA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO	98
5.2.1	Ensaio 3.1 - Tensão composta por V_1 adicionada ao 3 ^o harmônico V_3	98
5.2.2	Ensaio 3.2 - Tensão composta por V_1 adicionada ao 5 ^o harmônico V_5	100
5.2.3	Ensaio 3.3 - Tensão composta por V_1 adicionada ao 7 ^o harmônico V_7	102
5.2.4	Ensaio 3.4 Teste de tensão a 3 componentes $V_1 + V_3 + V_5$ para avaliação da resposta ao componente V_5 apenas	104
5.3	RESULTADOS	108
6	A SOMA DE CORRENTES HARMÔNICAS	112
6.1	INTRODUÇÃO	112
6.2	ATUAÇÃO DA ADMITÂNCIA DE NORTON	112
6.3	O COMPORTAMENTO DO MODELO	114
6.3.1	Para um conjunto de CNL iguais	114

6.3.2	Para um conjunto de CNL diferentes	116
6.4	INTERAÇÕES COM O SISTEMA EXTERNO PARA GRUPO DE CARGAS	117
6.4.1	Com o sistema elétrico fixo	117
6.4.2	Dependência da impedância da fonte no espectro das CNL	123
6.5	COMPARAÇÕES COM A MODELAGEM SOB O DOMÍNIO DO TEMPO	126
6.6	A CORRENTE SOMA DE CARGAS DIFERENTES	129
7	CONCLUSÕES, CONTRIBUIÇÕES E DESENVOLVIMENTOS	
	FUTUROS	133
7.1	INTRODUÇÃO	133
7.2	CONCLUSÕES	135
7.3	CONTRIBUIÇÕES	135
7.4	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	137
7.5	TRABALHOS PUBLICADOS	141
	REFERÊNCIAS	142

1 INTRODUÇÃO

1.1 BREVE ABORDAGEM DO PROBLEMA DAS COMPONENTES HARMÔNICAS

A bibliografia dedicada ao estudo detalhado dos componentes harmônicos de tensão e de corrente existentes na rede elétrica pública é muito restrita, especialmente no Brasil, e ainda escassa em publicações de mídia de renovação mais lenta, como os livros didáticos. Assim, mesmo face às demandas técnicas e operacionais para a promoção da qualidade de energia elétrica, quase inexistente qualquer documentação que permita rastrear a evolução dos valores medidos em uma planta elétrica. No caso das tensões harmônicas, as normas determinam limites e sanções. Por outro lado, as correntes harmônicas são tidas como umas das causas do problema de tensões harmônicas na rede e são devidas a um tipo de carga que surgiu justamente para aumentar a eficiência na conversão da energia elétrica, entre outras facilidades técnicas, as ditas cargas não lineares que se valem da eletrônica para tal. Dessa forma, o aumento na eficiência promoveu redução na qualidade e, por razões mercadológicas, tidas como tecnológicas, não há volta.

O problema da ausência de documentação sobre harmônicos em plantas elétricas pode ser creditado à falta de exigência deste item por parte do contratante do projeto, da cultura da não necessidade de detalhamento nos projetos de engenharia, da falta de tempo hábil disponibilizado, da escassez de procedimentos técnicos que auxiliem na sua geração pelo projetista e da inexistência de métodos exatos que permitam prever seus valores antes que a planta elétrica esteja em operação. Em resumo, não há meios de estimativa da corrente de fase devida a um grupo de cargas não lineares, visto que as normas ou metodologias de soma de correntes são restritas à ordem fundamental.

A primeira parte deste trabalho, o capítulo 2, é uma retrospectiva da bibliografia disponível, relatando os diversos tipos de abordagens do problema de soma de vetores ou de componentes harmônicos, considerando o comportamento estimado da carga e dos métodos usuais para a solução. Nesse item estão relatados os métodos estocásticos que tratam das distribuições de probabilidades das amplitudes e ângulos dos vetores, os métodos analíticos que estudam o comportamento da corrente e o traduz em equações matemáticas à parte da obrigatoriedade de exemplificação numérica e os métodos práticos que tentam produzir fatores de ponderação diferentes para cada ordem harmônica, através da análise dos parâmetros elétricos da carga e do sistema.

Os capítulos seguintes são dedicados à abordagem específica desenvolvida para produzir um método que permita estabelecer o espectro harmônico da corrente gerada por uma carga não linear e sua dependência com o sistema elétrico que a alimenta.

O capítulo 3 detalha a base física e o desenvolvimento matemático do método aqui proposto e alguns meios de modelagem de uma carga não linear CNL utilizando a admitância de Norton, a linearização dos dados de medição e algumas formas de utilização desses dados sem a indispensabilidade da linearização.

O sistema montado em laboratório para a geração das tensões à carga e para a medição das correntes geradas pela carga é o tema do capítulo 4, de forma a atender aos requisitos das normas IEC e das ABNT derivadas. Para tais tarefas foi desenvolvido um programa gráfico em plataforma LabVIEW[®] que permite o aproveitamento de blocos pré-programados em *Vis* (*Virtual Instrument*) ou *subVis* já disponíveis na biblioteca da plataforma. Dessa forma, apesar da grande complexidade do programa, os blocos disponíveis na paleta de controles realizam algumas funções complicadas e foram desenvolvidas pelo fabricante para esse exato fim. No caso das medições de corrente, as agregações dos valores medidos em grupos e subgrupos de 200 ms já estavam disponíveis no *Electrical Power Suite* que é um programa executivo aditivo direcionado à medição, análise, monitoramento e arquivamento de grandezas relacionadas ao sistema elétrico de potência. Todo o programa está exibido seccionado em conjuntos de diagramas de blocos funcionais que executam o tratamento matemático dos sinais e em blocos para medição que constituem o *display* dos blocos funcionais de medição, chamados de painéis frontais, com as de formas de onda de tensão e de corrente e a apresentação dos valores obtidos, de forma digital.

No capítulo 5 são mostrados como a tensão terminal de uma CNL altera o espectro de correntes geradas e alguns ensaios preliminares realizados com o objetivo de justificar, através de medições, a necessidade de se promover outra forma de somar fasores que não seja o método determinístico que utiliza fatores pré-determinados para a ponderação dos valores parciais ou o método estocástico que tenta produzir uma função densidade de probabilidade *pdf* para solucionar a soma por meios matemáticos. O intuito é mostrar que esses métodos, em geral, não consideram a interação entre a carga e a fonte e que essa influência recíproca é a principal determinante do comportamento dos fasores parciais e que somente após o estabelecimento do seu comportamento final e definitivo é possível estabelecer os critérios para a soma.

O método desenvolvido de soma de correntes harmônicas está descrito no capítulo 6, com base nos resultados das medições preliminares descritos no capítulo 5 e apoiado no

programa de medições de harmônicos descrito no capítulo 4. O principal diferencial desse método, em relação aos anteriormente relacionados no capítulo 2, é a utilização da necessária interação entre a corrente gerada pelo grupo de cargas e o sistema elétrico, de forma a estimar convenientemente a tensão desenvolvida na carga. O processo proposto é capaz de atualizar o espectro harmônico a cada iteração até a convergência da tensão terminal, quando o sistema se estabiliza. O presente método não é restrito a sistemas elétricos estáticos nos quais apenas a CNL em questão é responsável pela alteração da tensão terminal, permitindo a interação tensão-corrente entre as demais cargas secundárias conectadas ao PAC e as próprias CNL.

Nessa linha, o presente trabalho de pesquisa tem como objetivo específico verificar a possibilidade de estabelecer um método não analítico que permita somar correntes harmônicas previamente conhecidas de CNL iguais ou não. Os objetivos gerais são a busca de um método não analítico para a previsão do espectro da corrente harmônica gerada por uma carga não linear inserida em um circuito elétrico cujos parâmetros elétricos devem ser conhecidos e relacionar estes parâmetros com a corrente gerada por uma CNL ou por um conjunto delas.

2 REVISÃO DOS MÉTODOS DE SOMA DE CORRENTES HARMÔNICAS

2.1 INTRODUÇÃO

Já há algum tempo, a quase totalidade das cargas do sistema elétrico de baixa tensão comercial e residencial é composta por cargas não lineares com conversores ca-cc na entrada. Mesmo na indústria esse perfil não é muito diferente, em razão do intenso uso de sistemas eletrônicos conjugados a controladores de processo. Assim, o clássico método para a estimação das correntes nos alimentadores, detalhado nas normas das concessionárias, se mostra restrito à fundamental e não possibilita a correta avaliação dos parâmetros elétricos mais simples, como potências e perdas elétricas harmônicas.

O desafio é, a partir de dados das cargas e do sistema elétrico a montante, determinar a quais esforços e solicitações estarão submetidos os diversos componentes intermediários. Para tal, é imprescindível a estimativa das tensões e correntes nos seus diversos pontos. O cálculo das tensões nas barras demanda determinar anteriormente a corrente total que circula por um alimentador que supre um conjunto de cargas, como em um quadro elétrico ou, eventualmente, uma única carga. De qualquer forma, um transformador quase sempre alimenta um quadro geral de baixa tensão QGBT que alimenta várias cargas ou vários grupos delas através dos quadros de distribuição de circuitos QDCs. Necessário, então, estimar os parâmetros amplitude e ângulo do fasor soma das correntes elétricas circulantes em um condutor comum devido a duas ou mais cargas não lineares iguais ou não. Essa estimativa deve ter um grau de incerteza tal que permita dimensionar corretamente o alimentador dentro de limites operacionais seguros. Não há equacionamento satisfatório para esse cálculo.

As pesquisas nessa área remontam à primeira metade do século XX, como relatado por Emanuel (2000), e durante a segunda metade as componentes harmônicas da corrente já começaram a se mostrar importantes pela utilização de conversores e inversores para motores industriais, como citado por Corbyn (1972). Já em 1975 havia a preocupação com a geração de correntes harmônicas e o texto de Dobinson (1975) sobre conversores ca-cc para motores mostra uma análise detalhada sobre a influência do *ripple* cc nas amplitudes harmônicas da corrente de fase.

A dificuldade nesse equacionamento está, principalmente, na correta avaliação das características dos fasores parciais. Correntes harmônicas reais possuem dispersão em módulo e ângulo devida às oscilações da tensão de barra ocasionadas por variações na corrente da carga em questão e pelas correntes de outras cargas conectadas à mesma barra ou a montante.

Mesmo que as cargas operem em estado estacionário, as correntes apresentam comportamento aleatório e alteram continuamente a tensão da barra.

A abordagem acadêmica pode ser dividida em duas vertentes: a análise estocástica das distribuições de probabilidade dos fasores parciais e do fasor soma e a análise matemática dos valores medidos ou simulados para cargas não lineares mais comumente utilizadas.

2.2 A ANÁLISE ESTOCÁSTICA

No início das pesquisas publicadas sobre harmônicos, a análise era puramente estocástica e as suposições das distribuições de probabilidades dos parâmetros dos fasores parciais eram simplistas e consideravam distribuição uniforme em um intervalo igual para todos eles (para todas as ordens).

Nessa área, um dos primeiros trabalhos foi publicado por [Margaret Slack \(1946\)](#). Este era dirigido, inicialmente, para a solução do problema de estabelecer a soma de tensões geradas pela coincidência em diferentes sinais de voz na entrada nos amplificadores de comunicação via *carrier*. O trabalho discute as probabilidades associadas aos valores instantâneos e à amplitude do vetor resultante da combinação de N vetores com amplitude igual e ângulos de fase aleatórios e apresenta os resultados em curvas que mostram as probabilidades da soma exceder de certo valor.

[W. G. Sherman \(1972\)](#) produziu um estudo no qual foram avaliados a função densidade de probabilidade *pdf* da soma de harmônicos com amplitudes iguais e com ângulos de fase variáveis e uniformemente distribuídos dentro de determinados limites e a probabilidade do fasor soma não exceder certos valores para quantidades variadas de fasores parciais. Nesse estudo, as projeções X e Y dos fasores devem ser estatisticamente independentes. Apesar de gerar comentários de [Kendall \(1972\)](#) que os cálculos foram baseados em valores instantâneos e não eficazes dos fasores e de [Kniel e Schneiper \(1974\)](#) sobre a utilização de valores similares em outro texto da mesma época, sua pesquisa é uma referência e citada em várias publicações posteriores.

Os cálculos de [W. Sherman \(1972\)](#) foram estendidos por [N. B. Rowe \(1974\)](#) para vetores com distribuição angular uniforme e que tenham amplitudes fixas ou uniformemente aleatórias entre 0 e um máximo conhecido. Sua conclusão é a de que a magnitude da soma de correntes harmônicas se aproxima da distribuição de Rayleigh para a contabilização de N muito elevado de vetores.

W. E. Kazibwe et al. (1989) desenvolveram um estudo estritamente matemático para a *pdf* da soma de um número N elevado de vetores com amplitudes e ângulos distribuídos aleatoriamente, a partir da função distribuição de probabilidades conjunta *jpdf* das somas das projeções X e Y de cada um. Para tal, lançou mão do teorema do limite central que estabelece que a soma dos N independentes vetores terá distribuição normal, qualquer que seja a distribuição de probabilidade dos seus componentes. Nesse mesmo trabalho foi apresentada uma comparação entre o estudo analítico desenvolvido e a simulação utilizando o método de Monte Carlo, indicando proximidade entre os valores obtidos.

Algumas pesquisas partem de distribuições de probabilidades mais comuns e de faixas fixas de valores de ângulos para qualquer ordem harmônica, mas não foi encontrada alguma que apresente um estudo sobre a real distribuição estatística dos componentes dos fasores parciais. A. E. Emanuel (1995) produziu um dos primeiros estudos nos quais se tentou correlacionar a amplitude da tensão de barra com a amplitude das correntes harmônicas e avaliou o aumento ou diminuição das componentes da tensão de barra provocado por essas correntes. Não é um trabalho sobre soma de correntes, mas sobre o impacto de uma carga não linear na tensão das barras a montante e adjacentes a ela. Uma observação vista nesse trabalho e incomum nos demais é a de que, para o caso de tensões de mesmo valor eficaz em uma barra terminal, mas cujos componentes harmônicos possuem amplitudes e ângulos diferentes, as correntes harmônicas das cargas alimentadas por essa barra podem ser drasticamente alteradas. Essa observação foi obtida a partir de simulações no EMTP[®].

Utilizando o método de Monte Carlo e a integral de convolução, Cavalini et al. (1995) realizaram um estudo sobre a *pdf* das correntes encontradas nas barras do sistema elétrico residencial e industrial em MT e concluíram que as técnicas apresentadas na literatura corrente se mostram razoavelmente exatas apenas para as altas ordens harmônicas ou quando os valores reais e imaginários das séries das correntes medidas têm correlação insignificante ou não-estacionariedade desprezível, o que não ocorre na prática. Para corrigir esse equívoco, os autores propõem dois procedimentos alternativos, sendo que o primeiro divide a série de correntes medidas em duas: uma parte estocástica e outra determinística, de forma que seja possível aplicar qualquer uma das duas técnicas referidas acima e o segundo que usa de um método de Monte Carlo aproximado para ser usado em séries altamente correlacionadas.

Apesar de ainda incipiente em muitos lugares, o sistema de veículos elétricos recebeu atenção de Staats et al. (1997) que fizeram um estudo estocástico na tentativa de determinar as amplitudes harmônicas da corrente resultante de muitos carregadores de bateria veicular, através do Teorema do Limite Central e de simulações utilizando o método de Monte Carlo,

considerando a distribuição aleatória do ponto de operação do carregador dentro do ciclo liga-carrega-flutua e a geração de harmônicos em cada ponto desse ciclo.

Li Wang e Yu Ming-Chen (1998) fizeram um estudo comparativo da soma de correntes harmônicas aleatórias e flutuantes utilizando a distribuição normal bivariada e a distribuição normal regular, comparando os resultados com os valores obtidos por simulação usando o método de Monte Carlo.

Dos estudos puramente teóricos sobre a distribuição do vetor soma, A. Cavallini et al. (1998) referenciaram os trabalhos anteriores para propor um método de simulação utilizando distribuição gaussiana e o método de Monte Carlo.

Abdi et al. (2000) publicaram um artigo com extenso trabalho de compilação dos tipos de distribuição de probabilidades e dos limites para as amplitudes e ângulos dos vetores utilizados nas pesquisas anteriormente publicadas na área da soma estatística de vetores e os métodos utilizados para sua solução, com uma longa lista de referências. Para uma quantidade determinística de vetores com ângulos independentes e uniformemente distribuídos entre 0 e 2π e amplitudes arbitrariamente dependentes com *pdf* definida, o resultado é analiticamente indicado por uma expansão infinita de polinômios da série de Laguerre, o que o torna desenvolvimento elegante, mas de grande esforço matemático para aplicações práticas.

Yahia Baghzouz et al. (2002) publicaram um breve estudo sobre a distribuição marginal dos componentes real e imaginário dos fasores corrente elétrica, considerando que são dependentes, e as características de probabilidade da soma desses mesmos fasores considerados estatisticamente independentes e de distribuição gaussiana. A partir dos dados, apresentam um método linearizado para o cálculo das tensões harmônicas nas barras. Uma restrição desse trabalho é a consideração de que as tensões remanescentes nas barras possuem componentes harmônicas com valores inferiores a 0,05 pu e que, por isso, as correntes são independentes deles. Três anos após, Yahia Baghzouz (2005), em trabalho solo, analisou brevemente, os problemas relacionados à medição e coleta de dados para estimação das tensões harmônicas. Quinze anos antes, Yahia Baghzouz e Owen Tan (1987) haviam publicado um estudo puramente estocástico no qual propuseram um algoritmo de simulação sobre a soma de correntes harmônicas de cargas não lineares operando de forma aleatória, desde que as *pdfs* correspondentes não variem durante os tempos de iteração. Segundo os autores, qualquer carga não linear se presta a esse estudo. O trabalho desenvolve a *pdf* da soma de uma quantidade aleatória de correntes constantes, a *pdf* da soma de uma quantidade constante de correntes aleatórias e a *pdf* da soma de uma quantidade aleatória de correntes aleatórias. As simulações computacionais foram feitas pelo método de integração, utilizando

convolução, e pelo método de Monte Carlo. Os resultados não são passíveis de constatação prática, apesar dos autores garantirem sua aplicação em capacitores instalados em ambientes poluídos e na estimativa das perdas em alimentadores.

2.3 A SOMA PONDERADA

J. M. Crucq e A. Robert (1989) publicaram um trabalho no qual referenciam o texto de W. G. Sherman (1972) para mostrar que a soma A de N vetores A_i com as fases uniformemente distribuídas pode ser expressa por

$$A = k \sqrt{\sum_{i=1}^N A_i^2} \quad (2.1)$$

Como todas as medições e simulações mostram que a corrente de ordem h resultante de N fontes é menor do que simples soma das N amplitudes, a abordagem procura uma forma de estabelecer um meio de ponderação na contabilização das amplitudes das componentes pela estimativa do fator de diversidade FD que pode ser representado pela letra k na equação (2.3) e definido para cada ordem harmônica h . Para uma carga elétrica composta por N unidades não lineares iguais, o FD indica a relação entre a corrente total obtida para uma ordem harmônica h específica e a somatória das N amplitudes individuais das correntes dessa mesma ordem. Por essa formulação, a redução das amplitudes das componentes harmônicas é devida à dispersão dos ângulos de fase das correntes harmônicas, caracterizando um comportamento aleatório.

$$FD_h = \frac{\left| \sum_{i=1}^N I_{h(i)} \right|}{\sum_{i=1}^N |I_{h(i)}|} = \frac{A}{\sum_{i=1}^N I_{h(i)}} \quad (2.2)$$

Segundo esses autores, o valor de k depende, principalmente, do número de vetores e muito pouco das suas amplitudes. Matematicamente, a soma A dos N vetores A_i que têm seus ângulos de fase aleatoriamente distribuídos pode ser, simplificada, estimada pela equação (2.3).

$$A = k \beta \sqrt{\sum_{i=1}^N A_i^\beta} \quad \text{com } 1 \leq \beta \leq 2 \quad (2.3)$$

O trabalho propõe vários valores de k e β para diferentes tipos de cargas e para distribuição uniforme de N vetores com amplitudes máximas iguais e de N vetores com amplitudes máximas diferentes com ângulos de fase aleatoriamente distribuídas em faixas de 0 a $\pi/2$, 0 a π , 0 a $3\pi/2$ e 0 a 2π e para diferentes tipos de cargas com distribuição normal. Propõe também valores de k e β para ordens harmônicas específicas, no caso da inserção de nova carga não linear na barra de média tensão.

Esse trabalho de [J. M. Crucq e A. Robert \(1989\)](#) é marcante e vários pesquisadores direcionaram suas pesquisas para tentar determinar os valores de k e β para diversos tipos e quantidades de cargas, através de análise estatística ou por medidas.

Nesse mesmo ponto de vista teórico, [Cavallini et al. \(1994\)](#) utilizam as mesmas equações do trabalho de [J. M. Crucq e A. Robert \(1989\)](#) para estimar que as equações e os índices apresentados por estes são satisfatoriamente exatos para uma barra que alimenta apenas conversores ca-cc de potências similares e que as simulações utilizando o método de Monte Carlo apresentam valores próximos se as variações na corrente cc dos conversores forem estocasticamente distribuídas. Nesse trabalho foram apresentados índices k e β ligeiramente diferentes do publicado na referência.

Ainda utilizando a equação (2.3), [Golovanov et al. \(2010\)](#) tentaram obter os índices k e β através do uso da FFT e de simulações no Matlab Simulink[®] para diversas situações operacionais dos conversores ca-cc de 4 MW em 20 kV e que são: ângulos de conduções diferentes e determinísticos ou ângulos de conduções diferentes e aleatórios. Os valores foram tabelados para as ordens harmônicas 5, 7, 11 e 13 e se mostraram razoavelmente superiores aos estabelecidos na norma [IEC 61000-3.6 \(1996\)](#), chegando próximo a 6,0 para a ordem 13, demonstrando forte atenuação de amplitude. A explicação dos autores para essas diferenças é de que os índices propostos na norma de referência foram obtidos para dispositivos eletrônicos a diodo que não permitem ajustes nos seus ângulos de disparo, diferentemente dos equipamentos que utilizam tiristores ou outros tipos de comutadores de estado sólido.

Em 2001, a primeira edição da norma [IEC 61400-21 \(2008\)](#), trazia a segunda lei da soma, que foi inicialmente apresentada, em 1996, na norma [IEC 61000-3.6 \(2008\)](#), similar à equação (2.3). As diferenças entre elas são que não há o fator de diversidade FD representado pela letra k na equação (2.3) (ou seu valor é unitário) e que as correntes harmônicas geradas

pelas diversas turbinas eólicas deveriam ser referenciadas a um valor normalizado, empregando uma divisão pela relação do TC utilizado em cada uma delas. Essa segunda lei da soma, equação (2.4), se aplica à agregação tanto de fontes de tensão quanto de fontes de corrente.

$$U_h = \alpha \sqrt{\sum_{i=1}^N U_{h(i)}^\alpha} \quad \text{com } 1 \leq \alpha \leq 2 \quad (2.4)$$

O Fator de Atenuação FA representa a redução na DHTi da corrente em cada carga devida ao aumento da DHTv provocada pelas correntes harmônicas dessa e das outras cargas que compartilham o mesmo barramento. A definição matemática de FA está mostrada na equação (2.5) e é a mesma utilizada por Nassif e Xu (2009) para o estudo da corrente de fase de sistemas de iluminação fluorescente. O valor de I_h para $m = 1$ representa a corrente harmônica de ordem h de uma única carga e I_h para $m = m$ a corrente harmônica de ordem h medida ou estimada para m cargas em paralelo.

$$FA_h = \frac{I_{h(m=m)}}{m I_{h(m=1)}} \quad (2.5)$$

Suárez et al. (2005) publicaram uma pesquisa na qual mostraram uma análise dos efeitos do FD e do FA, através do programa EMTP[®], nos índices de distorção harmônica resultantes em redes de BT de grupos de cargas domésticas iguais ou de combinações de cargas diferentes. Os resultados foram tabelados para cada faixa de potência de curto-circuito e para cada grupo ou combinação de cargas.

A norma IEC 61400-21 (2008) utilizou a equação (2.4) para que se proceda a avaliação da corrente harmônica no PAC devida a um grupo de turbinas eólicas e ela deveria ser aplicada apenas para turbinas com geradores síncronos ligados à barra através de conversor eletrônico intermediário. O valor do expoente α depende unicamente da ordem harmônica considerada, sendo 1,0 para $h < 5$, ou seja, para as correntes harmônicas de baixas ordens procede-se a soma simples das amplitudes. Para as correntes harmônicas de altas ordens, $h > 10$, a amplitude da soma será a média quadrática ou RSS (*root square sum*) dos valores parciais. Para as ordens intermediárias, inclusive os extremos, o expoente será 1,4. Não se

consideram os ângulos. Apesar da aplicação original proposta pela IEC 61400-21 (2008) a equação (2.4) é utilizada de forma geral para a avaliação da soma de correntes harmônicas.

F. Medeiros et al. (2010) propuseram uma forma alternativa de soma de correntes harmônicas utilizando a equação proposta pela IEC 61400-21 (2008) com alguns cálculos extras para o ajuste do expoente β do somatório. Diversos arranjos de sistemas elétricos em AT foram alimentados por uma turbina eólica modelada como fonte de correntes harmônicas com amplitudes próximas a $1/h$ e com ângulos de fase aleatoriamente distribuídos. Utilizando um método iterativo com o valor inicial proposto pela norma IEC 61400-21 (2008), os novos valores de β foram obtidos através de simulações no Matlab Simulink[®] para as ordens características de conversores de 6 pulsos até a 25^a ordem e comparados com os valores da norma, indicando desvios significativos.

No tocante aos ângulos, Xiao e Yang (2010) considerando, segundo eles, que os resultados conservativos da soma de tensões preconizados pela IEC-61000-3.6 produzem valores que podem conduzir ao sobre dimensionamento dos equipamentos, fizeram um estudo estatístico para determinar o vetor soma de duas tensões conhecidas cujos ângulos possuem as diferenças uniformemente distribuídas. A relação entre as amplitudes dos vetores parciais determina qual será o método proposto de soma. Esse método de soma não tem qualquer relação com o preconizado pela IEC-61000-3.6 que, segundo os autores, deveria ser atualizado.

Recentemente, Vladimir Čuk et al. (2013a) investigaram os efeitos de alguns parâmetros mecânicos relativos ao acionador de velocidade variável VSD, como a velocidade e o torque do motor, na DHTi da corrente no lado alimentador. Analisaram ainda a validade do fator de diversidade FD proposto por J. M Crucq e A. Robert (1989) e propuseram outros valores e outra faixa de ordem harmônica, ressaltando que os parâmetros mecânicos acima influenciam fortemente no FD e não são considerados na pesquisa de referência. Adicionalmente, investigaram os índices propostos na edição de 1996 da norma IEC 61000-3.6 (2008), e apresentaram outros valores, desde a ordem 3 até a ordem 31, e considerando o efeito da velocidade e do torque do motor nos índices. Os mesmos autores, em Vladimir Čuk et al. (2013b), calcularam o FD para cada caso de aglomerações diferentes de cargas não lineares, considerando que este é devido à diversidade entre os ângulos de fase das correntes nas diversas cargas.

2.4 A ANÁLISE MATEMÁTICA

Os trabalhos anteriores mostram que a estimativa da soma de correntes harmônicas pela equação proposta pela edição inicial de 2001 da IEC 61400-21 (2008) não estabeleceu um consenso entre os pesquisadores, por ser excessivamente genérica para ser aplicada em situações específicas e porque cada um obteve índices diferentes.

Por outro lado, a tentativa de equacionar o problema da soma de vetores através da análise matemática dos valores medidos ou simulados para cargas não lineares comuns é motivo de várias pesquisas, face ao problema de estabelecer convenientemente as equações das *jpdf* e dos demais índices estatísticos dos fasores, necessários ao estudo estocástico.

Daozhi Xia e G. T. Heydt (1982a, 1982b) produziram um trabalho pioneiro sobre o uso de um algoritmo iterativo para o cálculo das componentes harmônicas de baixa ordem da tensão de barras devida a correntes drenadas por uma carga não linear, utilizando fluxo de potências e partindo de uma tensão de barra em 1,0 pu com as componentes harmônicas (5, 7, 11, 13,...) estabelecidos em 0,01 pu e com ângulos nulos. O original do trabalho é o uso de cálculos parciais para as alterações das potências e o uso dos novos valores para o recálculo. A convergência foi obtida após um número próximo de 20 iterações.

No final dos anos 1980 e no decorrer dos anos 1990, as pesquisas se voltaram para a medição e modelagem das correntes harmônicas de cargas não lineares típicas, como conversores ca-cc, reatores para iluminação, computadores ou outros dispositivos eletrônicos. Essa etapa seria fundamental para os estudos posteriores nessa área, já que o conhecimento do comportamento de uma carga específica poderia fornecer valiosa informação para o estudo da corrente devida a um grupo delas. Os valores medidos e mostrados nos trabalhos se referem a um equipamento único, muitas vezes não detalhado ou não encontrado no Brasil.

No grupo de trabalhos sobre equipamentos específicos, os mais pesquisados são os conversores trifásicos ca-cc. Sakui et al. (1989) propuseram um método prático para o cálculo das correntes harmônicas geradas por uma ponte retificadora trifásica não controlada com filtro cc e considerando a reatância da fonte ca para computar o ângulo de superposição de condução entre os diodos de fases consecutivas (*overlap*). Os valores calculados foram comparados com os simulados e indicaram proximidade. Os resultados mostram um rápido aumento do conteúdo harmônico, em pu referente à amplitude da fundamental, a partir de $X_{C\ pu} = \sqrt{X_C / X_L}$ próximo de 5 ou 6, causado por ressonância harmônica entre a reatância indutiva X_L do link cc e a capacitância X_C do capacitor de filtro do conversor.

David E. Rice (1992) publicou um extenso estudo sobre a composição harmônica da corrente ca de um conversor trifásico. Para vários valores da indutância ca com o *link* cc fixo e para vários ângulos de *overlap* e de disparo dos tiristores, o autor calculou e tabelou o valor das amplitudes das componentes harmônicas da corrente ca, da 5ª até a 49ª ordem, por cinco métodos: FFT, 1/h, clássico, Dobinson e Graham-Schonholzer. Esses dois últimos métodos consideram o *ripple* cc como variável importante no cômputo das componentes harmônicas. Segundo o autor, o *ripple* cc é responsável pelo aumento da amplitude da corrente de quinto harmônico e pelo decréscimo da amplitude das demais ordens.

Y. J. Wang et al. (1994) publicaram um estudo analítico para obtenção do vetor soma da corrente composta devida a vários conversores trifásicos totalmente controlados de 6 pulsos. Nesse trabalho, as correntes harmônicas geradas são consideradas proporcionais apenas ao cosseno do ângulo de disparo dos tiristores e inversamente à ordem harmônica característica desse conversor ($h = 1, 5, 7, 11, 13, \dots$). Através de formulações matemáticas, estabelecem-se cinco parâmetros $E[X]$, $E[Y]$, $E[X^2]$, $E[Y^2]$, $E[XY]$ (distribuição bivariada normal) para cada ordem h , que irão determinar as médias e variâncias dos valores dos componentes ortogonais dos eixos X e Y da soma dos N vetores, assim como a covariância e o coeficiente de correlação. Utilizando as equações dos cinco parâmetros, obtêm-se as médias e variâncias dos vetores soma para uma quantidade qualquer de conversores operando, cada um, a uma determinada faixa angular de condução diferente e conhecida e para cada ordem h .

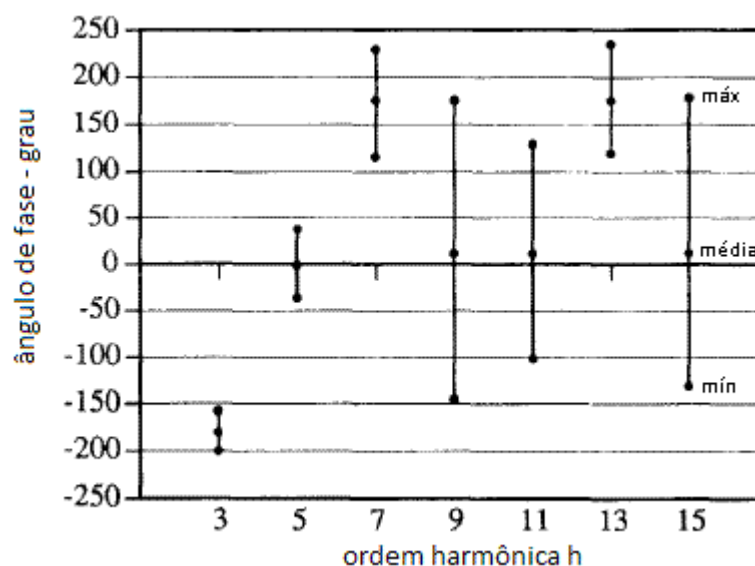
Reid Iwao Sasaki (1994) publicou um longo trabalho no qual avalia as características das lâmpadas fluorescentes compactas, propõe modelos de reatores eletrônicos e estuda a geração de componentes harmônicas e seus impactos na rede elétrica.

A fonte chaveada monofásica, utilizada em microcomputadores e em outros equipamentos digitais, é outro tipo de carga não linear muito pesquisado. Mansoor, Grady, Thallan, Doyle, Krein e Samotyj (1995) publicaram um estudo sobre a influência da composição harmônica da tensão de alimentação nas componentes da corrente ca e a tentativa de estabelecer uma correlação entre o fator de crista da tensão e a THDi.

Mansoor, Grady, Chowdhury e Samotyj (1995) e Mansoor, Grady, Staats, Thallan, Doyle e Samotyj (1995), utilizando os dados dos trabalhos anteriores, reuniram várias unidades de microcomputadores para determinar o efeito combinado do Fator de Atenuação FA e do Fator de Diversidade FD, já definidos anteriormente, e da influência da relação da corrente de curto-circuito para a corrente nominal do grupo sobre a corrente de fase do alimentador geral.

Mansoor et al. (1995), no intuito de fornecer informações para a consideração dos efeitos dos ângulos das correntes harmônicas, determinaram a dispersão angular das correntes para microcomputadores pessoais, que está indicada na Figura 2.1.

FIGURA 2.1 – DISPERSÃO DOS ÂNGULOS DE FASE DAS CORRENTES HARMÔNICAS PARA MICROCOMPUTADORES. MANSOOR ET AL. (1995).



Manfred Grötzbach e Michael Bauta (1996) produziram um estudo bem detalhado e muito parecido com o de David E. Rice (1992) para conversores trifásicos controlados. O trabalho utiliza os ângulos de disparo e de condução dos tiristores para determinar o ponto de operação ao invés da tensão cc, e foi especialmente focado na obtenção das correntes harmônicas pela contabilização do *ripple* dc através de vários métodos de cálculo, inclusive e além dos citados acima.

Antonio Dell'Aquila et al. (1998) estudaram as correntes harmônicas geradas por um acionador de velocidade variável com retificador a diodos e inversor *PWM* para motores de indução. O trabalho é estritamente analítico e mostra uma grande quantidade de equações para o cálculo das amplitudes harmônicas que são confrontadas com o resultado de simulação computacional.

Huaishu et al. (1998) propuseram um método original para cálculo das componentes harmônicas da corrente ca em redes trifásicas distorcidas. Eloi Ngandui et al. (2000) desenvolveram um estudo probabilístico para determinar a *pdf* das amplitudes e ângulos em conversores de 12 pulsos, ao contrário dos trabalhos anteriores que focaram o conversor de 6 pulsos.

Hegazy e Salama (1995) publicaram um artigo sobre a caracterização harmônica de conversores ca-cc de 6 pulsos com algumas considerações práticas: a alimentação é trifásica equilibrada, a comutação é instantânea e os tiristores são ideais com ângulos iguais de disparo. A análise parte da determinação dos componentes X e Y do vetor aleatório representativo da corrente harmônica I_h de ordem h .

$$X_h = I_h \cos \theta_h \quad \text{e} \quad Y_h = I_h \sin \theta_h \quad (2.6)$$

Os componentes X e Y de cada ordem harmônica h da corrente de fase foram avaliados utilizando o valor máximo fase-fase da tensão de alimentação $V_{m\acute{a}x}$, a resist\encia da carga R_0 e $k = 1, 2, 3, \dots$

$$X(h) = (-1)^k \frac{6\sqrt{3}V_{m\acute{a}x}}{\pi^2 R_0 h} \cos \alpha \cosh \alpha \quad (2.7)$$

$$Y(h) = (-1)^{k+1} \frac{6\sqrt{3}V_{m\acute{a}x}}{\pi^2 R_0 h} \cos \alpha \sin h \alpha \quad (2.8)$$

Uma vez que a soma de uma quantidade elevada desses componentes \xe9 regida pelo teorema do Limite Central, a *pdf* da soma tem distribui\c3o pr\oxima da normal. A m\edida μ e a vari\ancia σ^2 foram avaliados em rela\c3o aos \xc2ngulos de disparo m\edimo α_1 e m\aximo α_2 do conversor. Os resultados dos c\c2culos foram reunidos em tabelas com as m\edias e vari\ancias das correntes harm\onicas de ordem 5 e 7, apenas para $R_0 = 10 \Omega$, visto serem as mais representativas e as de mais baixa ordem presentes por causa das considera\c3es iniciais j\c2 informadas.

As equa\c3es te\oricas (2.6), (2.7) e (2.8) s\c2o citadas frequentemente em muitos textos e s\c2o derivadas de duas outras tamb\em te\oricas que tentam prever a amplitude I_h , na equa\c3o (2.9), e \xc2ngulo ϕ_h , na equa\c3o (2.10), da corrente de cada uma das ordens harm\onicas geradas por conversores ca-cc. Nas primeiras, α \xe9 o \xc2ngulo de disparo dos tiristores, que \xe9 considerado como uniformemente distribu\edo.

$$I_h = \frac{2\sqrt{3} I_{dc}}{\pi h} \quad (2.9)$$

$$\phi_h = -h \alpha + \left(\frac{\pi}{2} \right) [1 - (-1)^k] \quad (2.10)$$

Os trabalhos sobre conversores ca-cc publicados por [Hegazy e Salama \(2000\)](#) e por [BaSudan e Hegazy \(2001\)](#) se baseiam nas mesmas equações (2.7) e (2.8) para os componentes X e Y de cada ordem harmônica h da corrente de fase e mostram que, uma vez determinado ou estimado o FD na equação (2.11), para cada ordem harmônica, a corrente total para essa ordem será

$$\sum_{i=1}^N I_{h(i)} = FD_h N I_h \quad (2.11)$$

Os valores de FD_h estão tabelados para cada ordem $h < 13$ e para diversas quantidades de conversores iguais. Nestes mesmos trabalhos os autores utilizaram a avaliação determinística d do fator de demanda FD e a avaliação probabilística p , esta desenvolvida em [Hegazy e Salama \(1995\)](#), resultando em um fator FD combinado $FD_h = \sqrt{FDp_h \cdot FDd_h}$ para cada ordem h . Os resultados dos cálculos foram apresentados em tabelas com as médias e variâncias das correntes harmônicas de ordem 5 e 7.

Ainda sobre os conversores trifásicos de 6 pulsos, [Gary. W. Chang et al. \(2002\)](#) apresentaram um estudo no qual tentaram prever os harmônicos gerados por um agrupamento deles operando com cargas aleatoriamente distribuídas

As equações (2.6) a (2.10) também aparecem no trabalho de [Li Wang e Kuo-Hua Liu \(2005\)](#), no qual é apresentado um modelo de predição dos harmônicos injetados na rede por um grupo de conversores ca-cc, através do uso do método de Monte Carlo para diversos valores de α e diversas faixas de $\alpha_{máx}$ e α_{min} .

[Xiaodong Liang e William Jackson \(2008\)](#) fizeram um trabalho de investigação sobre a validade de se modelar cargas não lineares como fontes de corrente que possuem indutância ca de elevado valor ou como fontes de tensão que possuem, ao contrário, capacitância cc de elevado valor. Segundo os autores, no caso de conversores ca-cc de 6 pulsos para acionadores de velocidade variável, a modelagem por fontes de correntes fixas na proporção de $1/h$, segundo o espectro proposto pela [IEEE std 519-2014](#), não é real, já que a geração de correntes de quinto harmônico é fortemente influenciada pela carga do conversor. Apesar disso, a investigação comprova que as cargas se comportam como fontes de corrente e que as distorções de tensão dependem das impedâncias que são vistas por essas fontes harmônicas.

[Adam J. Colin et al. \(2010\)](#), usando simulações computacionais e medidas de campo, apresentaram os parâmetros harmônicos de alguns tipos de fonte chaveada e a influência do cancelamento de harmônicos utilizando o método de Monte Carlo. Foi produzido também um

conjunto de gráficos mostrando a influência da resistência interna total da fonte chaveada nas amplitudes e nos ângulos das componentes harmônicas da corrente ca.

As cargas não lineares residências mais comuns foram avaliadas [Sean Elphick et al. \(2010\)](#) para se determinar seu espectro harmônico característico sob tensão nominal senoidal e sob tensão diferente da nominal. As conclusões são de que as correntes harmônicas de baixa ordem apresentam variação percentual superior à fundamental e que são fortemente dependentes da distorção harmônica da tensão de alimentação.

Todos os trabalhos relacionados acima que utilizam a equação (2.11) não consideram a dispersão angular dos vetores componentes da corrente.

[Grady et al. \(2002\)](#) tentam obter os valores do FD e do FA para cargas não lineares domésticas simples ou combinadas, através de estudo analítico e simulações utilizando o método de Monte Carlo e concluem que o cancelamento das correntes devido à diversidade dos ângulos de fases é insignificante para as baixas ordens harmônicas.

Nessa área, o trabalho recente de [Rawa et al. \(2014\)](#) mostrou o estudo da influência da amplitude da tensão terminal, da impedância do sistema elétrico a montante, da frequência da tensão fundamental e do FD e FA, como definidos acima, na THDi da corrente total devida a grupos de um até vinte microcomputadores. Neste estudo a THDv terminal aumenta e a THDi diminui com o crescimento da quantidade de máquinas. Os dados de THD dessa pesquisa são quantitativos, mas não consideram as ordens harmônicas geradas, o que não permite a avaliação detalhada do comportamento da carga.

Diversos pesquisadores tentaram, como visto, criar um método razoavelmente simples para modelar as cargas não lineares mais comuns. Todos esses modelos geram as correntes harmônicas que foram obtidas de medições em laboratório sob tensão senoidal e nenhum desses trabalhos mostra claramente o modelo adotado. Alguns livros, como de [Jos Arrilaga \(1997\)](#), [Francisco de la Rosa \(2006\)](#) e [R. Senra \(2010\)](#), entre outros, que andam um passo atrás das pesquisas, por serem uma mídia menos ágil, apenas listam as cargas não lineares e mostram as harmônicas características. [Bora Acarkan e O. Kiliç \(2005\)](#), [Bora Acarkan e K. Erkan \(2007\)](#) e [Venkatesh et al. \(2008\)](#) publicaram os resultados de uma simulação no Matlab Simulink[®] para as diversas cargas monofásicas e trifásicas que utilizam fonte chaveada, através da modelagem harmônica e da utilização de resistores não lineares para o método de injeção de correntes. [K. C. Umeh et al. \(2003\)](#) propuseram um método para modelagem de cargas não lineares monofásicas, utilizando o programa *PSCAD*, através de variações no desenho em circuitos retificadores. [Wilsun Xu \(1992\)](#) mostra um guia para a instalação e

projeto da carga nominal máxima de *ASDs* a serem instalados em plantas com distorção harmônica pré existente, de forma a não violar os limites da IEEE 519.

Gary W. Chang (2003) produziu um trabalho sobre modelagem de reatores eletromagnéticos, utilizando o equivalente Norton para a lâmpada fluorescente, aplicável também, segundo o autor, para modelagem de transformadores e fornos a arco.

Souza et al. (2005) realizaram uma investigação sobre os harmônicos gerados por equipamentos eletrônicos, especialmente reatores para iluminação. Concluíram que a tensão de alimentação tem influência sobre os harmônicos produzidos, de forma que, um componente de ordem ímpar na tensão senoidal produz alteração na corrente fundamental e em todos os harmônicos ímpares da corrente de fase, e que um componente de ordem par na tensão senoidal produz alteração em todos os harmônicos pares.

O modelo estimador indicado pela equação (2.11) não se presta para uma análise mais detalhada, em função de ser bastante amplo. Nos últimos anos os trabalhos sobre a soma de correntes harmônicas por métodos não rigorosamente exatos parecem ter sido deixados de lado. Surgiram pesquisas mais elaboradas para a determinação matemática do vetor soma utilizando a estatística dos números aleatórios, como em Gifuni et al. (2015). Ainda persiste o problema de encontrar a verdadeira característica de comportamento das correntes harmônicas para as cargas não lineares variáveis. Isso inclui a faixa e a características de comportamento dos ângulos e das amplitudes das componentes harmônicas, A grande maioria dos trabalhos publicados analisa essas componentes através da lei dos grandes números e do teorema do limite central. Quase todos os estudos consideram que os ângulos de deslocamento dos componentes têm *pdf* uniforme de 0 a 2π e que as amplitudes têm *pdf* normal. Todos os estudos consideram que as cargas e, conseqüentemente, as correntes são similares. Isso pode ser considerado quando se somam as correntes de um alimentador específico, isto é, iluminação ou microcomputadores. Mas todas essas cargas convergem para um transformador alimentador e ainda não há literatura sobre a soma de correntes completamente diferentes, seja na composição harmônica seja quanto aos ângulos de defasagem.

Conclui-se que há várias vertentes de trabalhos publicados, algumas gerais e outras específicas que dão, cada uma, sua cota particular de contribuição para o estudo do comportamento das correntes harmônicas, seja relativa a uma única carga ou a várias delas reunidas. Ainda não foi encontrado um estudo não estatístico que trata da corrente devida a um conjunto de cargas ou a um grupo contendo conjuntos diferentes de cargas não lineares, seja pela diversidade de abordagens sobre o tema, seja pela complexidade no estabelecimento de uma metodologia determinística.

3 MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO

3.1 INTRODUÇÃO

O sistema elétrico contém um conjunto de fontes interligadas e o comportamento da tensão é flutuante pela interação geração-carga e dentro de valores normatizados para cada tensão nominal, conforme o ANEEL PRODIST, módulo 8 (2017), no caso brasileiro.

Os parâmetros elétricos do sistema externo são obtidos da concessionária de energia e, normalmente, apenas as correntes de curto-circuito e seus ângulos são disponibilizados. Dessa forma, o sistema externo é mais facilmente representado por uma fonte de tensão e uma impedância série, caracterizando um equivalente de Thévenin.

No lado da carga, em geral, é possível determinar sua característica pelos ensaios de curto-circuito e de circuito aberto. Porém, para as cargas não lineares, o teste de curto-circuito irá bloquear a geração da corrente fundamental e, conseqüentemente, de todas as correntes harmônicas associadas a ela, visto que essas cargas, em especial, não produzem correntes por fontes independentes e autônomas, mas como componentes inseparáveis derivados da fundamental e associados a ela, o que também caracteriza a não linearidade dessa carga.

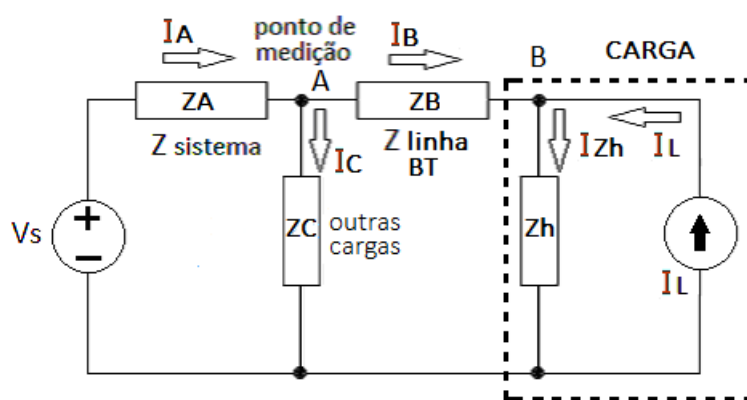
Em publicações cujo objetivo é mostrar que uma carga não linear se comporta como várias fontes de corrente em paralelo, como em Blanco e Parra (2010), Kus, Josefova e Bilik (2013), Pawelek et al. (2008), Bhattacharyya et al. (2009) e Jahanikia e Abbaspour (2010), estas são fixas e suas amplitudes são obtidas sob alimentação puramente senoidal. Assim, sob alimentação não senoidal, o modelo se mostra incompleto e as diversas fontes devem ser fontes de corrente controladas por tensão. Para tal, é necessário estabelecer a correspondência direta entre cada ordem harmônica de tensão aplicada à carga e a corrente gerada. Essa pode ser uma tarefa complexa, visto que, não é trivial isolar o efeito de um único componente de tensão sobre a corrente gerada de qualquer ordem. Cada ordem harmônica de tensão produz correntes de todas as ordens acima e abaixo da sua, dentro do espectro característico, variável segundo sua amplitude e seu ângulo de defasagem e dependentes das características elétricas da associação desses mesmos parâmetros com todas as demais ordens de tensão.

Outra forma de modelar uma carga não linear é estabelecer um conjunto de fontes fixas, de $h = 1, 3, 5, \dots, h$, associadas a uma impedância em paralelo que modifica a corrente injetada no sistema. Assim, uma carga não linear é mais bem representada por uma fonte de corrente composta pela ordem fundamental e por seus harmônicos característicos e uma impedância em paralelo, caracterizando um equivalente de Norton.

3.2 COMPONENTES DO SISTEMA

O diagrama da Figura 3.1 é uma representação simples de um sistema elétrico típico alimentado em MT através de um transformador de distribuição ou diretamente em BT e será utilizado nas modelagens posteriores. O ponto A é a saída do disjuntor alimentador da carga em questão e o ponto B é o seu terminal. Formas de modelagem harmônica mais detalhadas e mais exatas para os componentes do sistema podem ser vistas em [Ranade et Xu \(1996\)](#).

FIGURA 3.1 – CIRCUITO ELÉTRICO SIMPLIFICADO PARA AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DA FONTE E DA CARGA.



3.2.1 Sistema externo e transformador

O valor atribuído a Z_A é composto pela soma algébrica das parcelas que compõem o sistema a montante do quadro geral de baixa tensão - QGBT: a impedância do sistema externo no ponto de entrega ($R_S + jXL_S$) e informado pela concessionária de energia, a impedância dos cabos do ramal de ligação e do ramal de entrada de energia em MT ($R_{cabos\ MT} + jXL_{cabos\ MT}$) e de todo o sistema de condutores desde as buchas de saída em BT do transformador até o quadro elétrico de distribuição. A impedância do transformador de distribuição Z_T é representada por sua reatância de curto-circuito XL_{CC} . Todos os parâmetros citados devem ser corrigidos para cada ordem harmônica h , segundo as equações (3.1) a (3.4) e para a tensão de BT. Todas as fontes são resumidas em uma única fonte representada pelos parâmetros do sistema externo. Não são considerados, nessa modelagem, as influências ou acoplamentos harmônicos de outras fontes no ponto A.

$$Z_S = \sqrt{h} R_S + j h X L_S \quad (3.1)$$

$$Z_T = j h X L_{CC} \quad (3.2)$$

$$Z_{cabos BT} = \sqrt{h} R_{cabos BT} + j h X L_{cabos BT} \quad (3.3)$$

$$Z_{cabos MT} = \sqrt{h} R_{cabos MT} + j h X L_{cabos MT} \quad (3.4)$$

$$Z_A = Z_S + Z_T + Z_{cabos MT} + Z_{cabos BT} \quad (3.5)$$

3.2.2 Linhas de cabos de baixa tensão

O ponto B representa o terminal da carga. A impedância série Z_B é referente aos condutores desde a saída do disjuntor alimentador no QGBT até o ponto terminal da carga. A corrente a ser medida e acessível ao avaliador, no diagrama da Figura 3.1, é apenas I_B que pode ser medida no terminal da carga ou na saída do disjuntor alimentador. Para um conjunto de cargas não lineares estas cargas são consideradas iguais e instaladas no final do cabo representado por Z_B . Não são considerados, nesta modelagem, filtros ao longo do alimentador ou o efeito pelicular nos cabos.

$$Z_B = \sqrt{h} R_B + j h X L_B \quad (3.6)$$

3.2.3 Outras cargas

A impedância Z_C representa, no diagrama da Figura 3.1, todas as demais cargas que dividem o quadro geral QGBT com as cargas não lineares em questão. Como Z_C não é o alvo dos ensaios, será modelada como uma carga linear simples composta por uma resistência R_C em paralelo com uma indutância L_C definidos por sua potência elétrica ativa P_C e reativa Q_C , de forma que

$$Z_C = \sqrt{h} R_C // j h X L_C \quad (3.7)$$

$$\text{Com} \quad R_C = \frac{V^2}{P_C} \quad [\Omega] \quad \text{e} \quad X L_C = \frac{V^2}{Q_C} \quad [\Omega] \quad (3.7a)$$

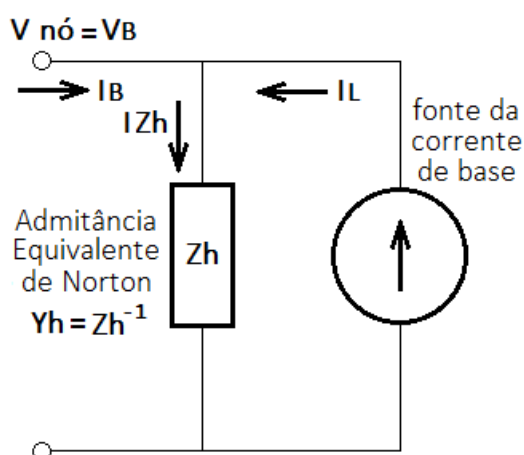
3.3 MODELAGEM DA CARGA NÃO LINEAR

O método mais simples para a determinação da característica da carga é a avaliação de sua operação em dois pontos distintos, de forma a verificar como seus parâmetros respondem a pontos diferentes de funcionamento. A inserção de um componente em série ou paralelo com a carga também é uma forma de alterar seus parâmetros de funcionamento, mas pode produzir resultados imprecisos, visto que esse componente adicional pode ter características não lineares não previstas, o que demandaria outro ensaio similar para sua determinação e, assim, *ad aeternum*. Dessa forma, é mais simples a alteração do ponto de operação da carga pela mudança controlada na tensão de alimentação, feito de modo que os demais parâmetros da tensão da fonte possam ser mantidos invariáveis durante o teste, como em Robert e Deflandre (1997), Thunberg e Suder (1999) e (2000), Abdelkader et al. (2001) e Rylander et al. (2010).

3.3.1 A admitância de Norton

A admitância de Norton compõe a modelagem da fonte de correntes de todas as ordens através da correspondência entre cada ordem da corrente gerada e cada ordem da tensão aplicada.

FIGURA 3.2 – MODELAGEM DE UMA CARGA NÃO LINEAR PELA ADMITÂNCIA DE NORTON.



No diagrama da Figura 3.2 aplica-se à carga em questão uma tensão de alimentação elétrica de conteúdo harmônico qualquer e de amplitude próxima do valor nominal da tensão

da carga. Essa tensão, composta por todos os seus harmônicos, caso haja, será tida como base e chamada V_{base} . A corrente gerada composta por todos os seus harmônicos e devida a essa alimentação elétrica será a corrente de base e chamada de I_{base} . Uma vez que a corrente medida $-I_B = I_L = I_{base}$, a parcela I_{Zh} da corrente I_B , na Figura 3.2, é inexistente se a tensão terminal V_B for V_{base} , conforme as equações (3.8) e (3.12). Se outra tensão for definida como V_{base} , a corrente I_{base} será outra, o que pode permitir o raciocínio que a fonte de I_{base} não é constante e que pode variar segundo cada teste ou avaliador, não podendo ser definida como base. Ocorre que uma V_{base} diferente provoca I_{base} diferente e também uma admitância paralelo diferente, de forma que o comportamento do conjunto fonte-admitância se mantém o mesmo sob uma tensão terminal diferente de V_{base} , como será visto adiante.

Após definido V_{base} , qualquer tensão diferente no valor eficaz, no ângulo ou na ordem harmônica de qualquer componente, irá continuar a produzir I_{base} exatamente como foi obtida de V_{base} e as diferenças fasoriais (em amplitudes e ângulos de cada ordem harmônica) dessa nova corrente I_B , em relação a I_{base} , será provida pela parcela I_{Zh} .

$$-\dot{I}_B = \dot{I}_L - \dot{I}_{Zh} \quad (3.8)$$

Para dois pontos de operação diferentes

$$\dot{I}_{B1} = \dot{I}_{Zh1} - \dot{I}_{L1} \quad (3.9)$$

e

$$\dot{I}_{B2} = \dot{I}_{Zh2} - \dot{I}_{L2} \quad (3.10)$$

Uma vez que a corrente gerada pela carga é uma grandeza previamente medida e fixa, $I_{L1} = I_{L2}$ em (3.9) e (3.10). Assim,

$$\dot{I}_{Zh1} - \dot{I}_{B1} = \dot{I}_{Zh2} - \dot{I}_{B2} \quad (3.11)$$

Já que

$$\dot{I}_{Zh} = \frac{\Delta V_B}{Z_h} = \frac{\dot{V}_B - \dot{V}_{base}}{Z_h} \quad (3.12)$$

E utilizando (3.10) e (3.11), fica

$$\frac{\dot{V}_{B1} - \dot{V}_{base}}{Z_{h1}} - \dot{I}_{B1} = \frac{\dot{V}_{B2} - \dot{V}_{base}}{Z_{h2}} - \dot{I}_{B2} \quad (3.13)$$

Os diversos valores da impedância Z_{hN} , para N experimentos, são todos iguais para a mesma ordem harmônica e, assim, $Z_{h1} = Z_{h2} = Z_h$.

Então,

$$\frac{\dot{V}_{B1} - \dot{V}_{B2}}{Z_h} = \dot{I}_{B1} - \dot{I}_{B2} \quad (3.14)$$

$$Z_h = \frac{\dot{V}_{B1} - \dot{V}_{B2}}{\dot{I}_{B1} - \dot{I}_{B2}} \quad (3.15)$$

$$Y_h = Z_h^{-1} = \frac{\dot{I}_{B1} - \dot{I}_{B2}}{\dot{V}_{B1} - \dot{V}_{B2}} \quad (3.16)$$

A equação (3.16) na sua forma vetorial é a expressão fundamental para a modelagem matemática da carga.

3.4 CÁLCULO NUMÉRICO

3.4.1 O método de Newton-Raphson

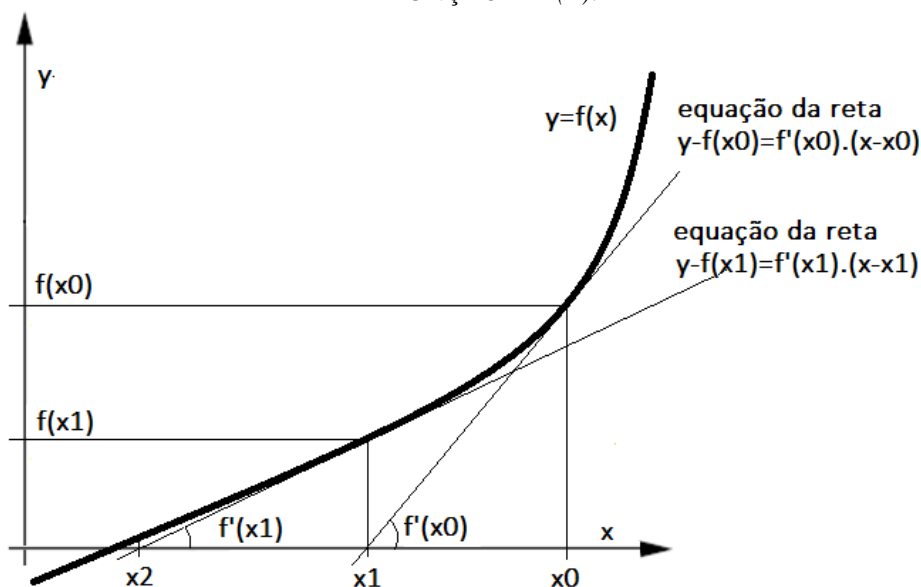
3.4.1.1 Função não linear de uma variável

Considera-se $y = f(x)$ uma função não linear da qual se deseja avaliar a raiz e que seja diferenciável no ponto x_k , com $f'(x_k)$ não nula. O método desenvolvido por Sir Isaac Newton (1642-1727) e Joseph Raphson (1648-1715) é capaz de convergir para a raiz da função, a partir de uma estimativa inicial x_0 . A seguir, calcula-se a equação da reta tangente da função $y=f(x)$ nesse ponto inicial x_0 e obtem-se o ponto x_1 que é a interseção da reta tangente que passa por x_0 com o eixo das abcissas. Todo o processo é repetido a partir do ponto x_1 e assim para os demais x_k , até encontrar uma melhor aproximação para a raiz. Essa estimativa pode ser definida, a priori, pelo máximo erro relativo admitido, usando a equação (3.17), na qual o numerador indica o erro absoluto limitador.

$$\varepsilon\% = \frac{x_{k+1} - x_k}{x_{k+1}} 100\% \quad (3.17)$$

O método iterativo de Newton-Raphson é representado da seguinte forma gráfica:

FIGURA 3.3 – INDICAÇÃO DAS ITERAÇÕES PELO MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON PARA A FUNÇÃO $Y=F(X)$.



A equação da reta inicial é $y - f(x_0) = f'(x_0) (x - x_0)$ (3.18)

Como essa reta passa por $(x_1, 0)$, fica

$$0 - f(x_0) = f'(x_0) (x_1 - x_0) \quad (3.19)$$

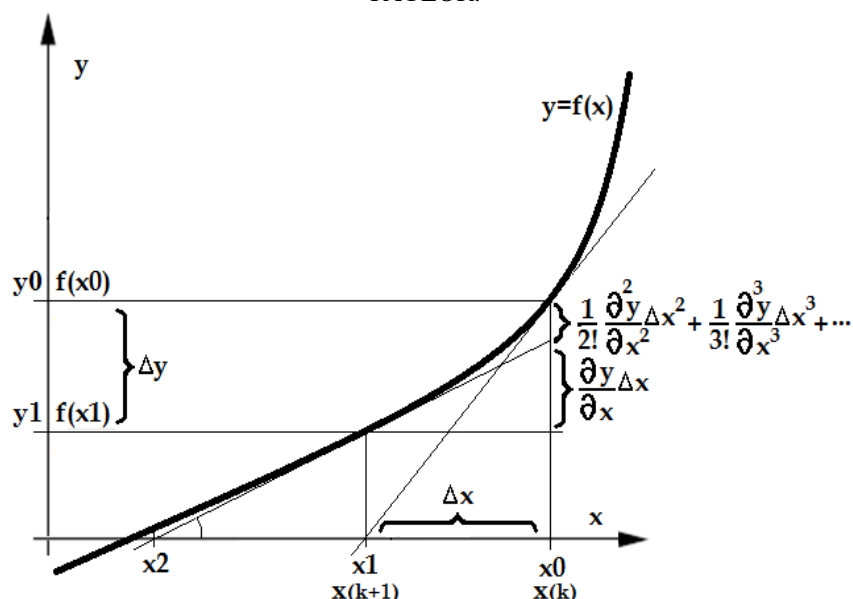
Então, $x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)}$ (3.20)

Que conduz à equação geral $x_{k+1} = x_k - f'(x_k)^{-1} f(x_k)$ (3.21)

3.4.1.2 O método de Newton-Raphson de uma variável utilizando a série de Taylor

Em uma função $y=f(x)$ da qual é conhecido seu valor y_1 para o ponto x_1 , é possível estimar outro valor y_0 para o ponto x_0 próximo e com deslocamento de Δx , utilizando a série de Taylor, conforme Heidt (1994), e mostrado na Figura 3.4.

FIGURA 3.4 – ESTIMATIVA DO VALOR DE UMA FUNÇÃO $Y=F(X)$ UTILIZANDO A SÉRIE DE TAYLOR.



$$y_1 + \Delta y = y_1 + \frac{\partial y}{\partial x} \Delta x + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} (\Delta x)^2 + \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} (\Delta x)^3 + \dots \quad (3.22)$$

$$\Delta y = \frac{\partial y}{\partial x} \Delta x + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} (\Delta x)^2 + \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} (\Delta x)^3 + \dots \quad (3.23)$$

Considerando que o deslocamento Δx seja suficientemente pequeno para produzir uma curvatura constante da função $y=f(x)$ em torno de x_1 , permite-se eliminar os termos de ordem igual ou superior a 2 da equação (3.23). Assim,

$$\Delta y = \frac{\partial y}{\partial x} \Delta x \quad (3.24)$$

Dessa forma, é possível estimar o valor da função $y=f(x)$ para um ponto qualquer a partir do conhecimento do seu valor para um ponto próximo.

$$f(x + \Delta x) \approx f(x) + \frac{\partial y}{\partial x} \Delta x \quad (3.25)$$

$$f(x_{k+1}) \approx f(x_k) + \frac{\partial y}{\partial x} (x_{k+1} - x_k) \quad (3.26)$$

Uma vez que a função foi linearizada, tem-se que $f(x_{k+1})=0$,

$$0 \approx f(x_k) + \frac{\partial y}{\partial x} (x_{k+1} - x_k) \quad (3.27)$$

$$x_{k+1} \approx x_k - \left(\frac{f(x_k)}{\frac{\partial y}{\partial x}} \right) = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)} \quad (3.28)$$

3.4.1.3 Função não linear de um sistema de variáveis

Para um sistema de equações não lineares

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= 0 \\ f_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= 0 \\ f_3(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= 0 \\ &\vdots \\ f_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= 0 \end{aligned} \quad (3.29)$$

Ou sob a forma matricial

$$F(x) = \begin{bmatrix} f_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\ f_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\ f_3(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\ \vdots \\ f_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Nesse caso a equação (3.25) aplicada ao sistema fica

$$F(x + \Delta x) \approx F(x) + \frac{\partial y}{\partial x} \Delta x \quad (3.31)$$

Definida $J_{F(x)}$ como a função Jacobiana de $F(x)$ como $J_{F_{ik}} = \frac{\partial F_i}{\partial x_k}$ (3.32)

Esta pode ser expressa de forma matricial

$$J_{F(x)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} & \dots & \frac{\partial f_3}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \frac{\partial f_n}{\partial x_3} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Assim, a equação (3.33) fica

$$F(x + \Delta x) \approx F(x) + J_{F(x)} \Delta x \quad (3.34)$$

A equação (3.21) geral para a solução iterativa pelo método de Newton-Raphson para um sistema de equações não lineares pode ser escrita como

$$x_{k+1} = x_k - \frac{F(x_k)}{F'(x_k)} \Rightarrow \Delta x_{k+1} = -\frac{F(x_k)}{F'(x_k)} \quad (3.35)$$

$$x_{k+1} = x_k - J_{F(x_k)}^{-1} F(x_k) \quad (3.36)$$

Ou na forma direta, sem a inversão da matriz Jacobiana,

$$J_{F(x_k)}(x_{k+1} - x_k) = -F(x_k) \quad (3.37)$$

$$J_{F(x_k)} \Delta x_{k+1} = -F(x_k) \quad (3.38)$$

3.5 A ANÁLISE ITERATIVA

Cargas lineares CL produzem corrente de mesma ordem harmônica da tensão de alimentação. Para estas, se a tensão da rede for puramente senoidal, apenas a corrente de ordem fundamental será drenada do sistema elétrico, causando alterações nas tensões das barras, normalmente para um valor um pouco menor, por causa das impedâncias do sistema, de forma que a carga continuará próxima ao seu ponto nominal de operação e com uma corrente de fase também um pouco menor. A corrente final poderá ser calculada, a priori, por algum dos vários métodos clássicos de solução de circuitos, como análise nodal ou de malhas.

Cargas não lineares CNL, diferentemente, produzem correntes de diversas ordens harmônicas k , mesmo sob a alimentação senoidal, e estas irão estabelecer componentes de tensão dessas mesmas ordens ao longo do alimentador. Agora, a tensão terminal da carga terá não somente do componente fundamental, mas várias outras ordens harmônicas justapostas, cada qual com seu ângulo de deslocamento em relação à referência. Sob essa nova forma de onda de tensão, as correntes geradas terão as mesmas ordens k , mas com amplitudes e ângulos de deslocamento diferentes dos anteriores. Correntes diferentes produzem tensões diferentes ao longo do sistema e estas produzem novos padrões de correntes nas cargas. Enquanto a corrente produzida pela carga não linear continuar a modificar sua tensão terminal, não será obtido o espectro final da corrente. Os métodos usuais de análise de circuitos, acima relatados, não são capazes de estabelecer as tensões e correntes de regime permanente. Por essa razão, é necessário um método iterativo que possa relacionar a corrente gerada à alteração da tensão terminal, até a estabilização. Todo o método descrito a seguir considera que a tensão no ponto A é modificada apenas pela interação com a CNL e não por flutuações no fornecimento ou por alteração nas outras cargas do PAC representadas por Z_C .

Utilizando o diagrama simplificado da Figura 3.1, aqui reproduzido na Figura 3.5, as funções que relacionam os parâmetros desse sistema elétrico são:

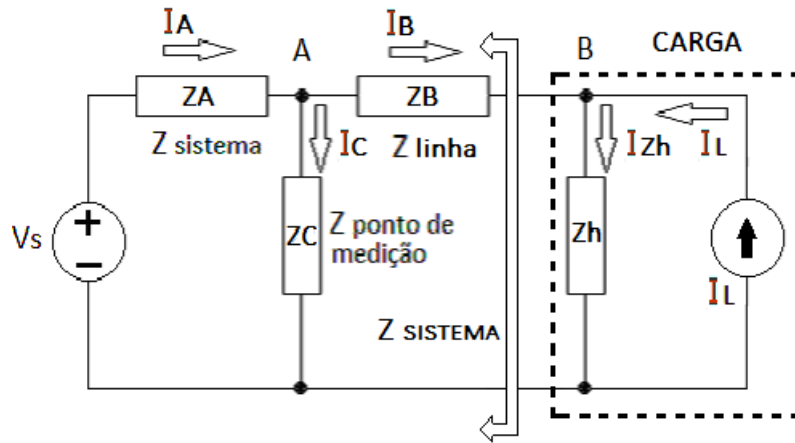
$$Y_h = Z_h^{-1} \quad (3.39)$$

$$I_{B_k} = f(V_{B_k}) \quad (3.40)$$

$$I_{B_k} = Y_{sistema} V_{B_k} \quad (3.41)$$

$$I_{B_k} = Y_h \Delta V_{B_k} - I_L \quad (3.42)$$

FIGURA 3.5 – IMPEDÂNCIA DO SISTEMA VISTA DA CNL.



Como a tensão $V_B = V_{base}$ foi utilizada para modelar $I_{base} = I_L$, sob esta tensão específica a corrente por Z_h é nula. A medição é feita em I_B que é diferente de I_L , já que esta última não é acessível. Essa diferença é devida à variação de V_B , chamada aqui de ΔV_B . O valor de ΔV_B deve ser atualizado a cada iteração e definida como ΔV_{Bk} .

$$I_{Z_h} = I_{B_k} + I_L = f(\Delta V_{B_k}) \quad (3.43)$$

$$\Delta V_{B_k} = V_{B_k} - V_{base} \quad (3.44)$$

$$I_{Z_h} = \frac{\Delta V_{B_k}}{Z_h} = Y_h \Delta V_{B_k} \quad (3.45)$$

Uma vez que são pequenos os deslocamentos encontrados no valor das abscissas durante as iterações k , isto é, a alteração em V_{Bk} é suave, pode-se utilizar o método de Newton-Raphson, através da série de Taylor, para a estimativa do erro entre o valor medido de $I_{B_{k+1}}$ e o valor anterior I_{B_k} . A convergência das iterações é obtida quando esses dois valores se igualam e o erro absoluto, da equação (3.16), é nulo.

$$f(x + \Delta x) \approx f(x) + \frac{\partial y}{\partial x} \Delta x \quad (3.46)$$

$$I_{B_{k+1}} \approx I_{B_k} + \frac{\partial I_B}{\partial V_B} \Delta V_{B_k} \quad (3.47)$$

$$I_{B_{k+1}} \approx I_{B_k} + Y_h \Delta V_{B_k} \quad (3.48)$$

$$\Delta I_{B_{k+1}} = I_{B_{k+1}} - I_{B_k} = Y_h \Delta V_{B_k} \quad (3.49)$$

O método de Newton-Raphson para sistemas de equações não lineares utiliza o Jacobiano da função, ao invés da derivada parcial, e demanda a avaliação deste primeiro a cada iteração k . Uma vez que a modelagem parte de uma coordenada fixa da função na região do ponto de operação da carga, a atualização do Jacobiano da função pode ser descartada e este é substituído pela matriz de admitâncias Y_h .

3.6 A MATRIZ DE ADMITÂNCIAS

3.6.1 Introdução

Para as cargas não senoidais monofásicas estudadas é sabido que, diferentemente da tensão senoidal pura que produz apenas correntes de ordens harmônicas k múltiplas inteiras de 1, a tensão composta, que possui um componente de ordem j adicionado à tensão senoidal, produz correntes de ordens harmônicas k , múltiplas e sub-múltiplas não inteiras de j , cobrindo todo o espectro anterior. Os vários componentes de j ordens harmônicas diferentes que formam uma tensão composta irão produzir, cada uma delas e cada qual de forma diferente, alteração nas componentes de k ordens harmônicas da corrente. Assim, para modelar precisamente esse comportamento é conveniente a utilização de uma matriz de admitâncias cujos membros são obtidos da relação vetorial $Y_{kj} = \frac{\Delta I_k}{\Delta V_j}$. Com isso consegue-se a interação de todas as k ordens de corrente com todas as j ordens de tensão. Para $j \neq k$ o valor de Y_{kj} não tem o significado físico convencional da admitância elétrica.

$$\mathbf{I}^- = \mathbf{Y}^- \mathbf{V}^- \quad (3.50)$$

$$\mathbf{I}^- = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_k \end{bmatrix} \quad \mathbf{Y}^- = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1j} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{k1} & Y_{k2} & \cdots & Y_{kj} \end{bmatrix} \quad \mathbf{V}^- = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_j \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

Para uma carga qualquer submetida a uma tensão senoidal pura, a matriz de admitâncias contém somente a coluna referente a $j=1$, conforme descrito por M. Fauri (1997).

$$\mathbf{Y}_{k1} = \begin{bmatrix} Y_{11} & 0 & \dots & 0 \\ Y_{21} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{k1} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

E para uma carga linear submetida a uma tensão composta, a matriz Y_{kj} não possui admitâncias cruzadas e que ficam fora da diagonal principal para a qual $j \neq k$.

$$\mathbf{Y}_{kj} = \begin{bmatrix} Y_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Y_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & Y_{kj} \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

A modelagem da carga não linear inserida em um alimentador terminal pode ser simplificada pelo diagrama da Figura 3.5. As expressões das correntes são:

$$I_A = V_S \frac{Z_C + Z_B + Z_h}{\Delta} - I_L \frac{Z_C Z_h}{\Delta} \quad (3.54)$$

$$I_C = V_S \frac{Z_B + Z_h}{\Delta} + I_L \frac{Z_A Z_h}{\Delta} \quad (3.55)$$

$$I_B = V_S \frac{Z_C}{\Delta} - I_L \frac{Z_h (Z_A + Z_C)}{\Delta} \quad (3.56)$$

$$I_{Zh} = V_S \frac{Z_C}{\Delta} + I_L \frac{Z_A Z_C + Z_A Z_B + Z_B Z_C}{\Delta} \quad (3.57)$$

Com $\Delta = Z_A Z_C + Z_A Z_B + Z_A Z_h + Z_C Z_B + Z_C Z_h$ (3.58)

Utilizando Kirchhoff para determinar as tensões nos nós,

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{Z_A Z_C + Z_A Z_B + Z_B Z_C}{Z_A Z_B Z_C} \right) & \begin{pmatrix} -1 \\ Z_B \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} -1 \\ Z_B \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} Z_B + Z_h \\ Z_B Z_h \end{pmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{V_S}{Z_A} \right) \\ -I_L \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\left(V_S Z_B Z_C + V_S Z_C Z_h - I_L Z_A Z_C Z_h \right)}{\Delta} \\ \frac{-Z_h (I_L Z_A Z_C + I_L Z_A Z_B + I_L Z_C Z_B - V_S Z_C)}{\Delta} \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

E as correntes das malhas são:

$$\begin{bmatrix} \left(Z_A + Z_C \right) & -Z_C \\ -Z_C & \left(Z_B + Z_C + Z_h \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_S \\ -I_L Z_h \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

Com $I_A = I_1$, $I_C = I_1 - I_2$, $I_B = I_2$ (3.62)

No diagrama da Figura 3.5, a impedância Z_h da fonte de corrente é fixa para cada ordem harmônica, como é fixa também a corrente I_L . Ocorre que, em razão dos valores apresentados no Capítulo 5 - ENSAIOS, a carga sob teste e todas as cargas não lineares geram correntes que dependem das ordens harmônicas, das amplitudes e das respectivas fases que compõem a tensão que se apresenta nos seus terminais. Assim, a fonte I_L é uma fonte de corrente controlada por tensão e por seus parâmetros (*Voltage-Controlled Current Source*).

Em se tratando de cargas elétricas não lineares, sua resposta aos componentes harmônicos da tensão depende do valor eficaz e do ângulo de cada V_j . A modelagem desse comportamento pode ser feita pelo lado da carga através da alteração na admitância da fonte de corrente constante. A atuação da admitância na alteração da amplitude e do ângulo da corrente injetada no sistema se dá pela diferença entre a corrente constante e o valor que circula por essa mesma admitância.

3.6.2 O cálculo das admitâncias

A equação (3.12) mostra que a admitância Y_h , relativa à ordem harmônica h é devida à variação da corrente provocada pela variação da tensão nos seus terminais, sendo ambos dessa mesma ordem harmônica h . Na modelagem de uma carga não linear, como descrito por Frater et al. (2008), Karimi et al. (2013) e Canesin et al. (2014), a corrente I de ordem harmônica específica k é relacionada à variação da tensão V de ordem harmônica específica j sobre a admitância Y_h e definida a partir da equação (3.15), aqui reproduzida.

$$Y_h = \frac{I_{B1} - I_{B2}}{V_{B1} - V_{B2}} \quad (3.63)$$

Nessa equação as grandezas de índice 2 são estabelecidas como bases, de forma que:

$I_{B2} = I_{base}$ = corrente obtida da alimentação promovida por V_{base} e composta pelas componentes harmônicas que compõem seu espectro harmônico e que será considerada como base para essa carga e para esse teste específico.

$V_{B2} = V_{base}$ = tensão no ponto de operação da carga ou próxima dele, constituída, preferencialmente, apenas pelo componente fundamental, ou por alguns componentes harmônicos suficientemente pequenos para configurar que a carga esteja próxima ao seu ponto de operação.

Utilizando a equação (3.15), e considerando as definições acima,

$$Y_{kj} = \frac{I_k - I_{base}}{V_j - V_{base}} \quad (3.64)$$

$$Y_{kj} (V_j - V_{base}) = I_k - I_{base} \quad (3.65)$$

$$Y_{kj} \Delta V_j = I_k - I_{base} \quad (3.66)$$

Que na forma matricial fica

$$\mathbf{I}_k = \mathbf{Y}_{kj} \mathbf{V}_j + \mathbf{I}_{base\ k} \quad (3.67)$$

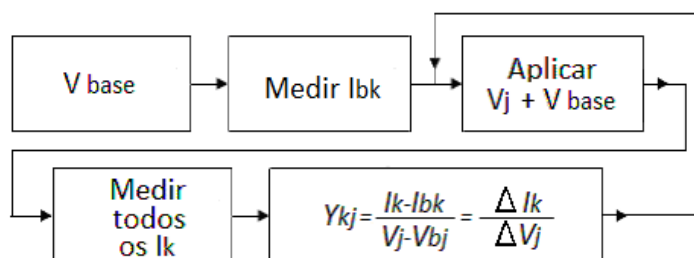
Um componente harmônico de tensão, isoladamente, não é capaz de excitar as diversas fontes de corrente harmônica da carga não linear testada. Isso somente acontece se esse componente estiver associado ao componente fundamental. Assim, uma forma de tentar isolar os efeitos do componente V_j da tensão composta é sobrepor esse componente harmônico ao fundamental e verificar a correspondente alteração da corrente I_k . Em geral, a amplitude do componente harmônico de tensão fica abaixo do limite de distorção harmônica individual para a tensão nominal do local, segundo a Tabela 4 do documento da ANEEL Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica ANEEL (2014) não existente na versão de 2017.

$$Y_{kj} = \frac{I_k - Y_{k1}V_1}{V_j} \quad (3.68)$$

Como a modelagem necessita avaliar todas as correntes harmônicas relacionadas a todas as ordens dos componentes de tensão, o processo parte de uma tensão de base de qualquer espectro harmônico e da corrente produzida por ela, segundo a equação (3.64).

O processo para a obtenção desses valores está mostrado na Figura 3.6 abaixo:

FIGURA 3.6 – FLUXOGRAMA PARA OBTENÇÃO DE Y_{kj}



Fonte: Frater et al. (2008).

As novas grandezas da Figura 3.6 são:

I_{bk} = corrente de ordem harmônica k produzida pela tensão de base V_{base}

I_k = corrente de ordem harmônica k produzida pela tensão composta $V_{base} + V_j$

O procedimento mostrado na Figura 3.6 deve ser repetido para cada ordem harmônica j de tensão adicionada à tensão de base e medido para cada ordem k da corrente produzida pelo conjunto $V_{base} + V_j$, acarretando em uma matriz de admitâncias de j linhas e k colunas.

Um componente harmônico de tensão V_j adicionado a V_{base} deve possuir um determinado ângulo de defasagem em relação a V_{base} . Assim, a fim de se obter uma matriz que reflita o comportamento de Y_{kj} , é necessário que cada V_j seja varrido em uma faixa entre 0 e 2π com um passo angular tal que permita uma quantidade representativa de admitâncias Y_{kj} . Com isso, cada Y_{kj} terá associada a ela uma quantidade de valores igual a $2\pi/(\text{passo angular})$. A fim de montar um sistema organizado, é desejável que se construam várias matrizes parciais com os valores calculados de Y_{kj} a partir das medições, cada uma delas relativa a um ângulo específico de V_j . Todos os ângulos medidos devem ser referenciados ao componente fundamental da tensão de base V_1 que pode ser ajustado para zero grau, por simplicidade. Como os resultados da FFT não irão mostrar o ângulo α de V_1 em zero grau, esse ângulo deve ser corrigido e assim para todos os componentes da tensão medida, segundo as equações (3.44) e (3.45). O mesmo deve ser feito para os ângulos β das I_k correntes medidas, segundo a equação (3.46).

$$\alpha_{j=1 \text{ corrigido}} = \alpha_{j=1 \text{ medido}} - \alpha_{j=1 \text{ medido}} = 0 \quad (3.69)$$

$$\alpha_{j \neq 1 \text{ corrigido}} = \alpha_{j \neq 1 \text{ medido}} - j(\alpha_{j=1 \text{ medido}}) \quad (3.70)$$

$$\beta_k \text{ corrigido} = \beta_k \text{ medido} - k(\alpha_{j=1 \text{ medido}}) \quad (3.71)$$

3.7 LINEARIZAÇÃO

3.7.1 Introdução

Cargas modeladas computacionalmente apresentam resposta segundo as equações matemáticas definidas pelo modelo, ao contrário de cargas reais que, algumas delas, ainda não as possuem de forma definitiva. Assim, para as cargas não lineares estudadas, como os reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes T5, as admitâncias obtidas de modelagem mostram figuras gráficas simétricas e perfeitas que permitem várias manipulações e simplificações, uma vez que as tensões e correntes apresentadas não são contaminadas por

acoplamentos eletromagnéticos não contabilizados, por outras não linearidades e por problemas de medição, como ruídos, erros sistemáticos, *offsets* e demais erros dos instrumentos. Assim, se a carga for convenientemente modelada, o gráfico da admitância será um círculo perfeito com centro nas coordenadas (A,B) e raio r . Cargas reais medidas não apresentam esse comportamento e a avaliação das admitâncias, a partir dos dados de medição, necessitam de tratamento estatístico adicional para a avaliação do centro e raio.

A seguir serão apresentados alguns métodos para linearização das admitâncias medidas.

3.7.2 A matriz corrigida geometricamente

Os valores medidos de V_j e I_k , por serem contaminados pelo ruído de medição, possuem dispersão em torno de um valor médio. Utilizando o processo de medição descrito no item 5.3 MEDIÇÃO DE TENSÕES E CORRENTES, é possível obter as médias de 12 medidas consecutivas de tensão e de corrente. Para sinais com flutuação de amplitude, a média das médias de 12 medidas nem sempre reflete a média verdadeira porque o intervalo de flutuação pode ser maior do que 200 ms ($12 \times 16,667$ ms) ou menor. Além disso, as medições de tensão e corrente posteriores podem encontrar outra temperatura de funcionamento para os dispositivos de potência e os reatores e características operacionais diferentes, como descrito por Camilo e Cidras (1998) e Moo et al. (2003). Assim, as amplitudes e ângulos de tensão V_j e de corrente I_k , podem ser diferentes dos valores reais a cada medição e produzir admitâncias Y_{kj} dispersas. Mesmo assim, as medidas das tensões V_j estão bem próximas dos valores preditos e o problema descrito acima é mais visível na medida dos I_k .

A listagem dos Y_{kj} calculados permite um tratamento geométrico da figura gerada e aproximar sua forma do ideal para os Y_{kj} , que é um círculo. Um programa estatístico específico, escrito no Microsoft Excel, permite encontrar o centro da figura geométrica descrita pelas admitâncias calculadas a partir dos V_j e dos I_k medidos, qualquer que seja sua forma, o que representa as coordenadas da admitância Y_1 e a distância média de cada ponto ao centro, o que representa o raio do círculo ou as coordenadas da admitância Y_2 .

A Tabela 3.1 mostra os valores finais após o tratamento das admitâncias Y_{33} calculadas.

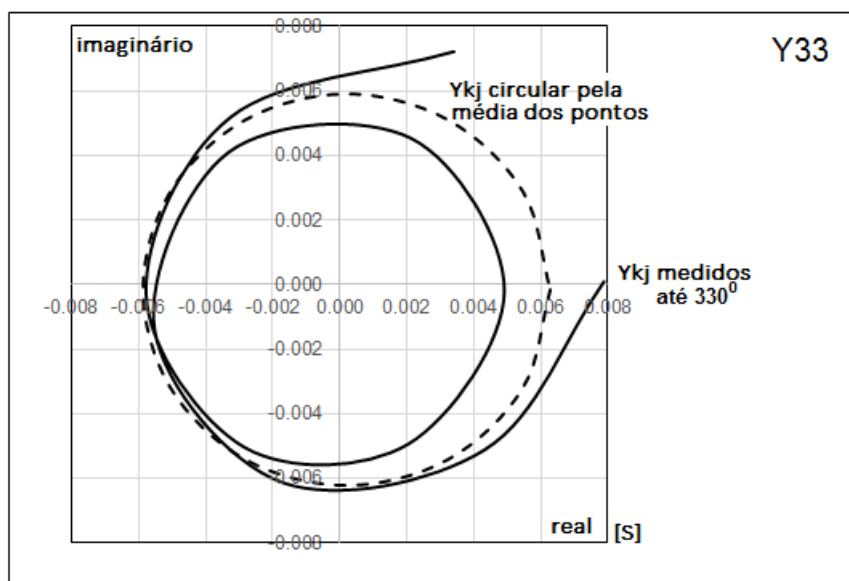
TABELA 3.1. VALORES CALCULADOS E SUAVIZADOS DE Y_{33} PARA $V_j = 1\%$ DE V_L .

Ângulo de V_j	Y_{33} calculado	Ângulo de Y_{33}	Y_{33} x	Y_{33} y	Raio de Y_2	(Y_1+Y_2) x	(Y_1+Y_2) y
0	0,0078893	0,666	0,007889	9,17e-05	0,006074	0,006266	-0,000172
30	0,0067064	-49,724	0,004335	-0,005117	0,006074	0,005452	-0,003209
60	0,0063662	-105,697	-0,00172	-0,006129	0,006074	0,003229	-0,005432
90	0,0057018	-165,486	-0,00552	-0,001429	0,006074	0,000192	-0,006246

120	0,0052694	-230,952	-0,00332	0,004092	0,006074	-0,002845	-0,005432
150	0,0050084	-295,193	0,002132	0,004532	0,006074	-0,005068	-0,003209
180	0,0049187	-2,339	0,004915	-0,000201	0,006074	-0,005882	-0,000172
210	0,0053505	-67,463	0,002051	-0,004942	0,006074	-0,005068	0,002865
240	0,0057906	-119,334	-0,00284	-0,005048	0,006074	-0,002845	0,005088
270	0,0057839	-176,867	-0,00578	-0,000316	0,006074	0,000192	0,005902
300	0,0061200	-237,848	-0,00326	0,005181	0,006074	0,003229	0,005088
330	0,0079817	-295,308	0,003412	0,007216	0,006074	0,005452	0,002865
média	0,0060739	centro	A	B	média	0,006266	-0,000172
		Y_1	0,00019	-0,00017			

A figura circular ideal é construída a partir do centro das medidas e não do centro geométrico da figura original. O raio da figura circular é a média das distâncias de cada ponto medido até o centro. Não há forma alternativa de se avaliar o centro da figura original plotada pelo programa, exceto através dos valores que a compõem. Como algumas medidas podem estar mais aglomeradas em um setor da figura original, é possível que o centro calculado não seja o seu centro geométrico.

FIGURA 3.7 – ADMITÂNCIA Y_{33} MEDIDA E SUAVIZADA PARA $V_j = 1\%$ DE V_l .



3.7.3 Linearização dos dados de medição

Quando se realizam os testes para avaliação de Y_{kj} , a partir de medições em laboratório de cargas não lineares reais, e conforme o item 5.3 “MEDIÇÃO DE TENSÕES E CORRENTES”, necessita-se de uma fonte de tensão programável. Adicionalmente, deve ser desenvolvido um programa específico para a geração da tensão fundamental e de cada ordem

harmônica a ser sobreposta a ela com o ângulo de deslocamento desejado, além de permitir a medição das amplitudes e ângulos da tensão e da corrente na carga. O problema na utilização desse processo de medição são os dispositivos de potência componentes do *booster* inserido após o conversor digital-analógico. São necessários um amplificador linear de baixa frequência, na faixa de áudio, para produzir potência suficiente ao funcionamento da carga e com as tensões conforme o programado e um transformador elevador para adequação da tensão de saída do amplificador ao nível exigido pela carga. Esses dois dispositivos são necessários, mas apresentam alguma não linearidade, de forma que componentes harmônicos de tensão não programados aparecem na carga. Assim, para um teste de um harmônico de ordem j , na carga estão presentes a fundamental adicionada a esse componente e todas as outras ordens ímpares de tensão. A corrente medida de cada ordem harmônica k desejada não é devida apenas ao componente de ordem j programado, mas devida a uma contribuição conjunta de todas as outras $h \neq j$ ordens harmônicas de tensão, cada qual com seu próprio ângulo de deslocamento.

Para o teste de medição de tensões e correntes na carga, cada um envolvendo a fundamental e um único componente harmônico j de tensão, a corrente ΔI_k medida não pode ser utilizada na equação (2.68), uma vez que esta é devida a vários componentes j de tensão.

Pela equação (3.67),

$$I_k = \sum_{j=1}^h Y_{kj} \Delta V_j + I_{base k} \quad (3.72)$$

Logo, I_k medida apenas de ordem harmônica fundamental $k=1$ será

$$I_1 = \sum_{j=1}^h Y_{1j} \Delta V_j + I_{base 1} \quad (3.73)$$

Assim, a corrente total I_k medida, para todas as k ordens, terá as parcelas

$$I_k = \left(\sum_{k=1}^h \sum_{j=1}^h Y_{kj} \Delta V_j \right) + I_{base k} \quad (3.74)$$

$$\Delta I_k = I_k - I_{base k} \quad (3.75)$$

Como cada Y_{kj} somente é obtido após a determinação de $\Delta I_k = I_k - I_{base k}$, a equação (3.74) não tem solução analítica. Dessa forma, a contabilização da corrente I_k deve ser feita calculando a contribuição de cada parcela e eliminando-as no cômputo final.

Para a carga não linear sob teste, uma luminária com iluminação fluorescente 2x32 W com reator eletrônico, as tensões harmônicas que aparecem nos seus terminais, felizmente, possuem ângulos diferentes, mas fixos, para cada ordem. Nos testes de injeção da tensão fundamental V_I acrescida de um componente de ordem harmônica j de baixa amplitude, por exemplo, 1% e 2% de V_I , nota-se que o componente de ordem j apresenta amplitude conforme programado. As demais ordens harmônicas de tensão não programadas que aparecem graças à não linearidade do conjunto amplificador-transformador, apresentam amplitude fixa nos 2 casos, isto é, independente da amplitude do componente programado de tensão.

Para o teste de injeção do 3^o harmônico de tensão com ângulo de zero grau, são necessárias 2 etapas separadas, com o 3^o harmônico a 1% de V_I e 2% de V_I .

$$\Delta I_3^{1\%0} = Y_{31}^0 \Delta V_1^0 + Y_{33}^0 \Delta V_3^0 + Y_{35}^{\alpha 5} \Delta V_5^{\alpha 5} + Y_{37}^{\alpha 7} \Delta V_7^{\beta 7} + \dots + Y_{315}^{\alpha 15} \Delta V_{15}^{\alpha 15} \quad (3.76)$$

$$\Delta I_3^{2\%0} = Y_{31}^0 \Delta V_1^0 + Y_{33}^0 \Delta V_3^0 + Y_{35}^{\alpha 5} \Delta V_5^{\alpha 5} + Y_{37}^{\alpha 7} \Delta V_7^{\alpha 7} + \dots + Y_{315}^{\alpha 15} \Delta V_{15}^{\alpha 15} \quad (3.77)$$

Que, na forma mais sintética, fica

$$\Delta I_k^{x\% \beta k} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^h Y_{kj}^{\alpha j} \Delta V_j^{\alpha j} + Y_{kj}^{\alpha j} \Delta V_j^{x\% \alpha j} \quad (3.78)$$

Com:

$\Delta I_k^{x\% \beta k}$ = variação da corrente de ordem harmônica k e com ângulo de deslocamento βk produzida pelo teste com componente de tensão de ordem j a $x\%$ de V_I

$\Delta V_j^{x\% \alpha j}$ = variação da tensão de componente harmônico de ordem j a $x\%$ de V_I e com ângulo de deslocamento αj

$Y_{kj}^{\alpha j}$ = admitância relativa à variação de tensão de ordem j com ângulo de deslocamento αj e à variação de corrente de ordem k .

O termo do somatório se refere às correntes espúrias devidas a todos os componentes de tensão de ordens diferentes daquela que se refere à admitância desejada, e que contribuem para o valor eficaz total da corrente medida sob a alimentação composta de $V_1 + V_3$ a 1% e para $V_1 + V_3$ a 2%.

$$\Delta I_k^{2\% \beta} - \Delta I_k^{1\% \beta} = Y_{kj}^0 \Delta V_j^{2\% \alpha} - Y_{kj}^0 \Delta V_j^{1\% \alpha} \quad (3.79)$$

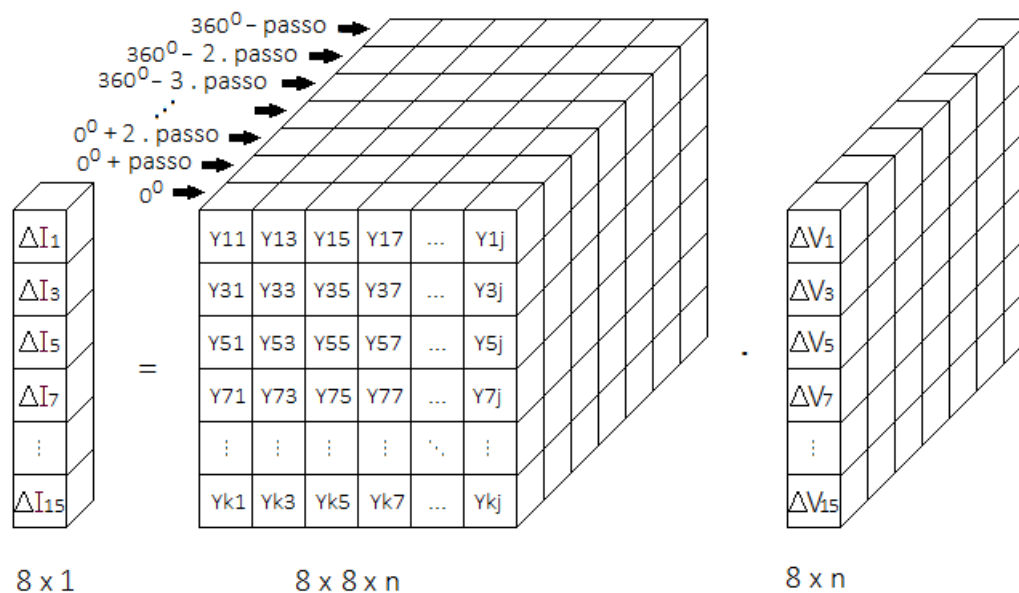
Ou na forma geral

$$Y_{kj}^{\alpha j} = \frac{\Delta I_k^{2\% \beta k} - \Delta I_k^{1\% \beta k}}{\Delta V_j^{2\% \alpha j} - \Delta V_j^{1\% \alpha j}} \quad (3.80)$$

3.7.4 Matrizes parciais de admitâncias

Para cada deslocamento angular do componente harmônico de tensão que foi adicionado ao componente fundamental, os valores de Y_{kj} , após medidos e linearizados, devem ser agrupados em uma única matriz. Assim são criadas n matrizes ($n = 360^\circ/\text{passo}$), cada uma delas associada a um determinado ângulo do componente harmônico de tensão V_j e as decorrentes correntes medidas I_k . Se o passo de medição for de 10 graus elétricos, haverá 36 matrizes apenas para agrupar os dados referentes a todas as admitâncias Y_{kj} medidas na faixa de zero a 360 graus de defasagem do componente harmônico V_j . A quantidade de linhas é definida pela maior ordem harmônica de corrente I_k e a quantidade de colunas pela maior ordem harmônica da tensão V_j . Como a amplitude das correntes medidas acima da 13ª ordem harmônica se confundem com o ruído de medição, todas as matrizes, neste trabalho, foram construídas até a 15ª ordem, o que acarreta oito linhas e oito colunas.

FIGURA 3.8 – AGRUPAMENTO DAS MATRIZES PARCIAIS DE ADMITÂNCIAS.

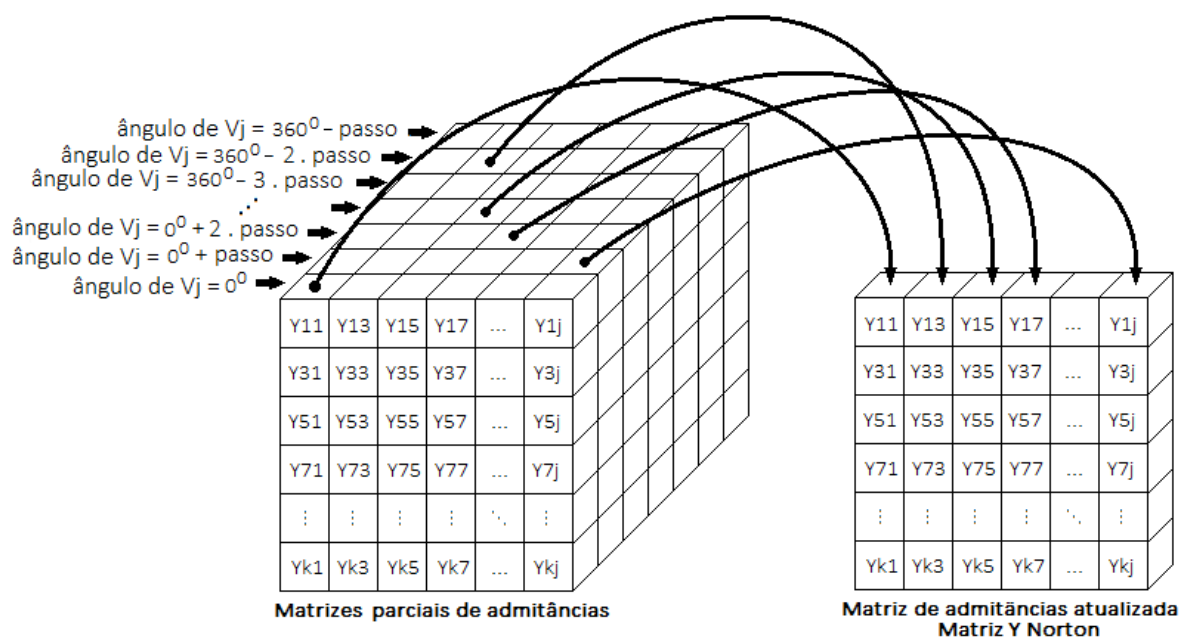


A equação (3.16), utilizada para a modelagem matemática da carga, permite a estimativa dos diversos Y_{kj} relacionados a um componente V_j de ordem harmônica fixa e reescrito em (3.81) como V_B .

$$Y_{kj} = \frac{\Delta I_k}{V_{B1} - V_{B2}} \quad (3.81)$$

A cada vez que a tensão terminal da carga V_B for avaliada, cada ordem harmônica de tensão terá amplitude ligeiramente alterada e um novo ângulo de deslocamento, devidos à iteração entre a corrente gerada pela carga e o sistema externo. A matriz de Norton a ser utilizada na iteração carga-sistema será composta por elementos Y_{kj} em que cada um deles corresponde à admitância medida para o ângulo de defasagem de cada ordem harmônica de tensão avaliada no terminal da carga. Assim, a matriz de Norton terá elementos Y_{kj} oriundos das matrizes com valores de Y_{kj} relacionados a V_j e I_k realmente medidos. Algumas dessas matrizes poderão não ser utilizadas, mas todas devem ser construídas, já que não há forma de determinar, a priori, quais serão os ângulos dos componentes de V_j que aparecerão na carga. As matrizes parciais são um banco de dados para utilização iterativa na matriz de Norton. Nesse caso, não há a necessidade de linearização dos dados calculados, a menos que existam valores espúrios muito excedentes.

FIGURA 3.9 – MONTAGEM DA MATRIZ DE ADMITÂNCIAS DE NORTON.



3.7.5 Linearização por tensor

3.7.5.1 Introdução

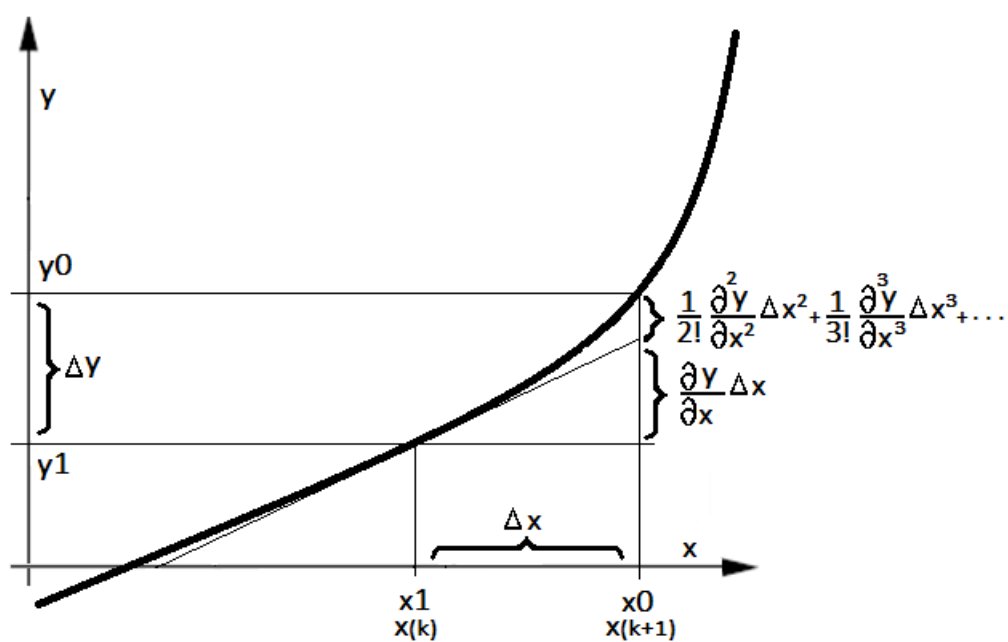
O método tradicional que utiliza a matriz cruzada de admitâncias da eq. (3.51) reproduz a dependência de I com a amplitude de V , mas não consegue reproduzir a dependência de I com o ângulo de V . Smith et al. (1998) publicaram um trabalho de apresentação de uma alternativa à matriz tradicional na qual cada admitância Y_{kj} é representada por um tensor composto por uma matriz 2×2 que corresponde às frequências positiva e negativa (conjugado), como em Sun et al. (2007) e, assim, produzir uma correta correspondência entre a tensão e a corrente para cada ordem harmônica, considerando as variações angulares da tensão. Esse método foi descrito por Gabriel Kron (1959). A representação pelo tensor é necessária porque os eixos real e imaginário do fasor tensão complexa giram em relação à referência.

3.7.5.2 Representação do tensor

Uma vez que admitância Y_{kj} depende do componente V_j de tensão harmônica, que tem valor pequeno comparado ao componente fundamental V_1 , e do seu ângulo α_j relativo a V_1 , pode-se supor que Y_{kj} é dependente apenas de α_j em torno do ponto de operação e, então,

utilizar uma matriz de admitâncias linearizada. Se $I = F(V)$, a resposta linearizada da função F para um harmônico específico pode ser obtida da derivada primeira no ponto de operação, visto que a perturbação ocorre em valores próximos a 1%, o que significa que a carga ainda está no seu ponto de operação nominal.

FIGURA 3.10 – LINEARIZAÇÃO DE UMA FUNÇÃO NÃO LINEAR PELA SÉRIE DE TAYLOR



$$\Delta I = \frac{\partial F}{\partial V} \Delta V \quad (3.82)$$

Expandindo (3.82) em componentes cartesianos real e imaginário, fica

$$\begin{bmatrix} \Delta I_r \\ \Delta I_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_r}{\partial V_r} & \frac{\partial F_r}{\partial V_i} \\ \frac{\partial F_i}{\partial V_r} & \frac{\partial F_i}{\partial V_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_r \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \quad (3.83)$$

Para representar o efeito da amplitude e da fase da tensão é necessário utilizar mais de uma admitância complexa. O estudo do comportamento linearizado de uma corrente injetada no sistema elétrico, que se ajusta a este caso, mostra que ele pode ser representado na forma da equação (3.84) abaixo. A linearização pode ser feita representando cada Y_{kj} através de ΔI e de ΔV que utilizam sequência positiva e negativa da tensão a fim de transferir o efeito da fase da tensão harmônica, de forma que

$$\begin{bmatrix} \Delta I^+ \\ \Delta I^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 & Y_2 \\ Y_1^* & Y_2^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V^+ \\ \Delta V^- \end{bmatrix} \quad (3.84)$$

Usando apenas a sequência positiva (giro anti-horário) em (3.84),

$$\Delta I^+ = Y_1 \Delta V^+ + Y_2 \Delta V^- \quad (3.85)$$

$$\Delta I_r + j\Delta I_i = \left[Y_{1r} + jY_{1i} \right] \Delta V_r + j\Delta V_i + \left[Y_{2r} + jY_{2i} \right] \Delta V_r - j\Delta V_i \quad (3.86)$$

$$\Delta I_r = \left[Y_{1r} \Delta V_r - Y_{1i} \Delta V_i \right] + \left[Y_{2r} \Delta V_r + Y_{2i} \Delta V_i \right] \quad (3.87)$$

$$j\Delta I_i = \left[Y_{1r} j\Delta V_i + jY_{1i} \Delta V_r \right] + \left[Y_{2i} \Delta V_r - Y_{2r} j\Delta V_i \right] \quad (3.88)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta I_r \\ \Delta I_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{1r} + Y_{2r} & Y_{2i} - Y_{1i} \\ Y_{1i} + Y_{2i} & Y_{1r} - Y_{2r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_r \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \quad (3.89)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta I_r \\ \Delta I_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_r \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \quad (3.90)$$

$$\text{Com } Y_{11} = Y_{1r} + Y_{2r}, \quad Y_{12} = Y_{2i} - Y_{1i}, \quad Y_{21} = Y_{1i} + Y_{2i}, \quad Y_{22} = Y_{1r} - Y_{2r} \quad (3.91)$$

O comportamento dependente da frequência pode ser expresso convenientemente pela admitância Y_{kj} , se ela for representada por um tensor 2x2, como mostrado na equação (3.90). As equações (3.84) e (3.90) são iguais e a matriz Y desta última é um tensor que representa a dependência de I_k com a amplitude e a fase da tensão V_j .

O modelo derivado das equações (3.84) e (3.85) para representar uma carga não linear é chamado de harmonicamente acoplado porque a atuação conjunta das duas matrizes de admitâncias Y_1 e Y_2 promovem a correta correspondência entre a amplitude e o ângulo da corrente medida com a amplitude e o ângulo da tensão aplicada, conforme demonstrado por [Yong et al. \(2010\)](#). Nesse mesmo trabalho estão apresentadas as expressões matemáticas analíticas das admitâncias Y_1 e Y_2 para cada ordem harmônica k e j e a informação que os elementos da diagonal e da sub-diagonal da matriz de Y_1 são dominantes e os elementos da matriz Y_2 são de amplitude muito menor do que os elementos de Y_1 para uma carga composta apenas por reator eletrônico e lâmpada fluorescente. Adicionalmente, considerando que as amplitudes das tensões harmônicas são inferiores a 7,5% da amplitude da tensão fundamental para a BT, segundo o documento PRODIST módulo 8 na revisão 8 de 2017, a equação (3.85) é simplificada e reescrita como

$$\Delta I^+ = (Y_1 + Y_2)\Delta V_1^+ + Y_1\Delta V_h^+ \quad (3.92)$$

Muitos autores, como [Fuentes et al. \(2000\)](#), [Balci et al. \(2008\)](#), [Almeida e Kagan \(2011\)](#), [Holey et al. \(2014\)](#), [Canesin et al. \(2014\)](#) e [Fröbel e Vick \(2015\)](#), não contabilizam a matriz Y_2 e a equação (3.92) tem aspecto ainda mais simples.

$$\begin{bmatrix} \Delta I_1 \\ \Delta I_3 \\ \Delta I_5 \\ \vdots \\ \Delta I_k \\ \vdots \\ \Delta I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{1,1} & Y_{1,3} & Y_{1,5} & \cdots & Y_{1,k} & \cdots & Y_{1,j} \\ Y_{3,1} & Y_{3,3} & Y_{3,5} & \cdots & Y_{3,k} & \cdots & Y_{3,j} \\ Y_{5,1} & Y_{5,3} & Y_{5,5} & \cdots & Y_{5,k} & \cdots & Y_{5,j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{k,1} & Y_{k,3} & Y_{k,5} & \cdots & Y_{k,k} & \cdots & Y_{k,j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{j,1} & Y_{j,3} & Y_{j,5} & \cdots & Y_{j,k} & \cdots & Y_{j,j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_5 \\ \vdots \\ \Delta V_k \\ \vdots \\ \Delta V_j \end{bmatrix} \quad (3.93)$$

Que representa a matriz de admitâncias linearizada

$$\begin{bmatrix} \Delta I_1 \\ \Delta I_3 \\ \Delta I_5 \\ \vdots \\ \Delta I_k \\ \vdots \\ \Delta I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial I_1}{\partial V_1} & \frac{\partial I_1}{\partial V_3} & \frac{\partial I_1}{\partial V_5} & \dots & \frac{\partial I_1}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial I_1}{\partial V_j} \\ \frac{\partial I_3}{\partial V_1} & \frac{\partial I_3}{\partial V_3} & \frac{\partial I_3}{\partial V_5} & \dots & \frac{\partial I_3}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial I_3}{\partial V_j} \\ \frac{\partial I_5}{\partial V_1} & \frac{\partial I_5}{\partial V_3} & \frac{\partial I_5}{\partial V_5} & \dots & \frac{\partial I_5}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial I_5}{\partial V_j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial I_k}{\partial V_1} & \frac{\partial I_k}{\partial V_3} & \frac{\partial I_k}{\partial V_5} & \dots & \frac{\partial I_k}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial I_k}{\partial V_j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial I_j}{\partial V_1} & \frac{\partial I_j}{\partial V_3} & \frac{\partial I_j}{\partial V_5} & \dots & \frac{\partial I_j}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial I_j}{\partial V_j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_5 \\ \vdots \\ \Delta V_k \\ \vdots \\ \Delta V_j \end{bmatrix} \quad (3.94)$$

Com cada Y_{kj} sendo um tensor composto por 4 elementos reais e cada ΔV e ΔI é expresso por um vetor 2x1 para representar o fasor harmônico em suas partes real e imaginária. Os valores característicos da Figura 3.11 são utilizados para a determinação dos componentes de cada tensor e obtidos das relações abaixo:

$$A = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \text{real} \left\langle \mathbf{e}_n \right\rangle \quad \text{e} \quad B = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \text{imag} \left\langle \mathbf{e}_n \right\rangle \quad (3.95)$$

$$r = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left| \left\langle \mathbf{e}_n - \left\langle \mathbf{A} + jB \right\rangle \right\rangle \right| \quad (3.96)$$

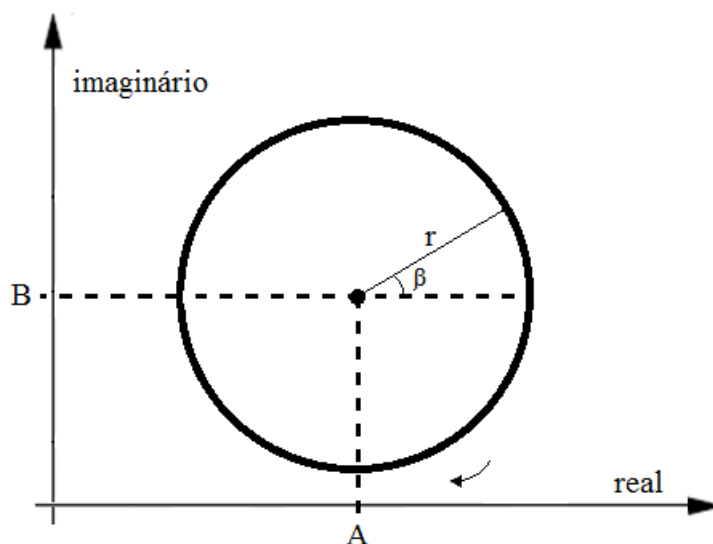
Esses valores podem também ser referenciados aos componentes da matriz de Y na equação (3.69).

$$A = \frac{1}{2} \left\langle \mathbf{Y}_{11} + Y_{22} \right\rangle \quad \text{e} \quad B = \frac{1}{2} \left\langle \mathbf{Y}_{12} + Y_{21} \right\rangle \quad (3.97)$$

$$r = \frac{1}{2} \sqrt{\left\langle \mathbf{Y}_{11} - Y_{22} \right\rangle^2 + \left\langle \mathbf{Y}_{12} + Y_{21} \right\rangle^2} \quad (3.98)$$

$$\beta = \text{arc tg} \frac{\angle_{12} + Y_{21}}{\angle_{22} - Y_{11}} \quad (3.99)$$

FIGURA 3.11 – REPRESENTAÇÃO DA ADMITÂNCIA COMPLEXA.



Geometricamente, a varredura de V_j entre 0 e 2π irá criar um círculo com o raio equivalente à sua amplitude. Para cada ordem k de corrente harmônica as admitâncias advindas terão a mesma forma geométrica, como mostrado na Figura 3.11, mas com centro nas coordenadas (A,B), raio r e ângulo inicial β , este devido à medição relativa ao componente distorcido da tensão com zero grau elétrico em relação a V_l . O conjunto de todas as medidas de Y_{kj} irá mostrar a interdependência entre a amplitude e o ângulo da tensão V_j e a amplitude e o ângulo da corrente I_k .

Uma vez que o centro do círculo possui as coordenadas (A,B), as equações (3.97) a (3.99) podem representar a localização espacial desse círculo.

$$A = \frac{1}{2} \angle_{11} + Y_{22} \rightrightarrows \frac{1}{2} \angle_{1r} + Y_{2r} \rightrightarrows (Y_{1r} - Y_{2r}) = Y_{1r} \quad (3.100)$$

$$B = \frac{1}{2} \angle_{12} + Y_{21} \rightrightarrows \frac{1}{2} \angle_{2i} + Y_{1i} \rightrightarrows (Y_{1i} + Y_{2i}) = Y_{1i} \quad (3.101)$$

Uma análise da equação de linearização mostra que

$$\Delta I = Y_1 \Delta V + Y_2 \Delta V^* \quad (3.102)$$

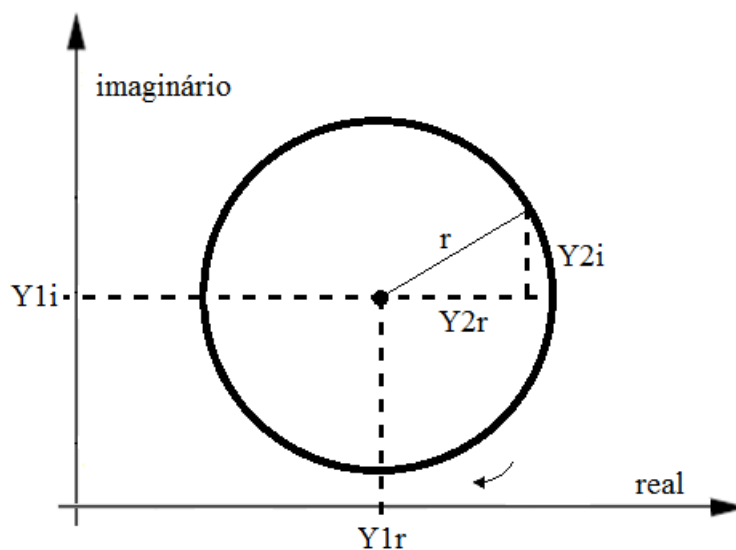
$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = Y = Y_1 \angle 0 + Y_2 \angle (Y_2 - 2 \angle \Delta V) \quad (3.103)$$

O que significa, conforme a equação (3.103), que a representação da admitância composta do gráfico da Figura 3.12 tem centro em Y_1 e raio equivalente ao módulo de Y_2 que gira no sentido horário com passos iguais ao dobro do passo de mudança do ângulo de V_j .

Das equações (3.70) e (3.73) obtém-se

$$r = \frac{1}{2} \sqrt{(Y_{1r} + Y_{2r})^2 - (Y_{1r} - Y_{2r})^2 + (Y_{2i} - Y_{1i})^2 + (Y_{1i} + Y_{2i})^2} = \sqrt{Y_{2r}^2 + Y_{2i}^2} \quad (3.104)$$

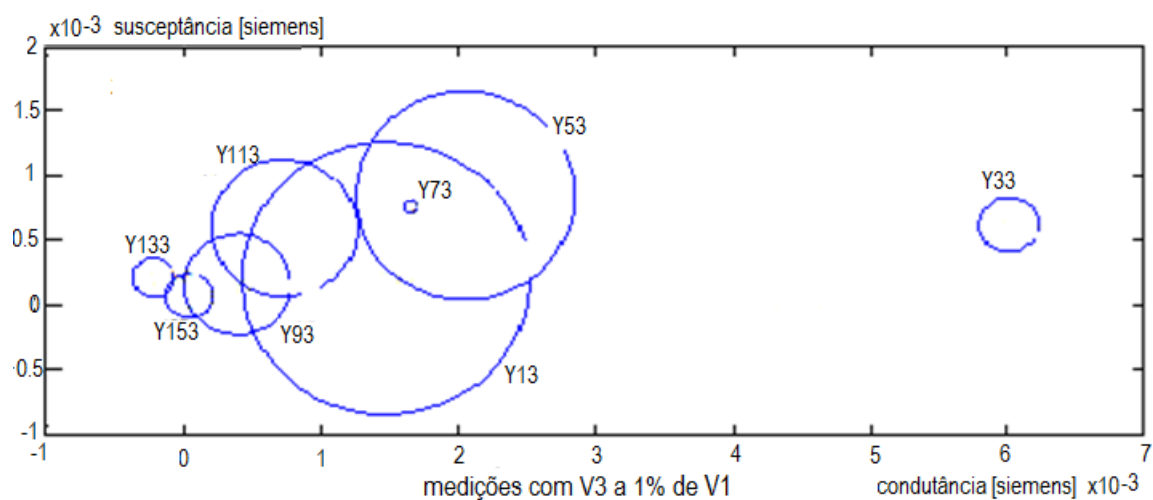
FIGURA 3.12 – PONTOS NOTÁVEIS DA ADMITÂNCIA COMPLEXA LINEARIZADA.

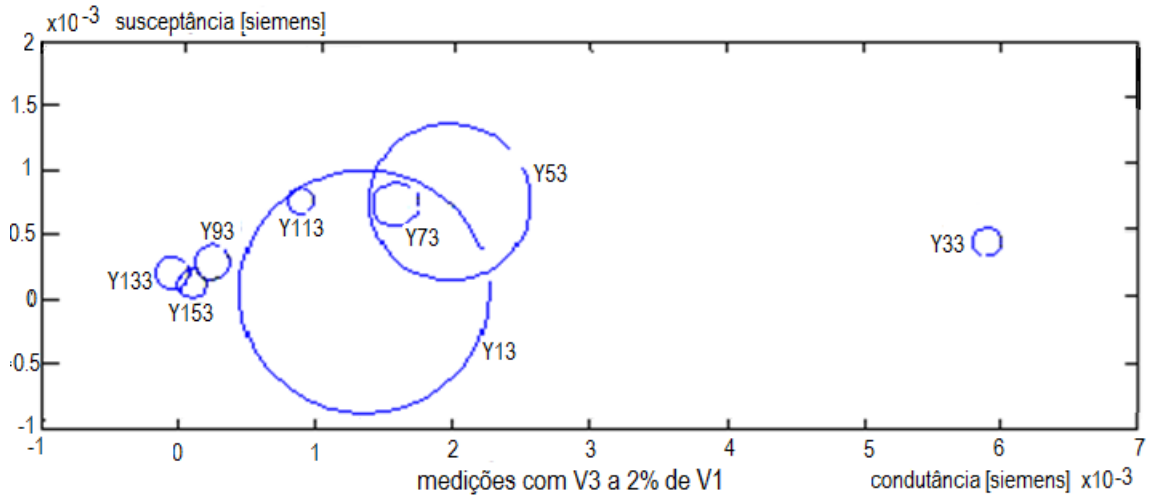


A seguir são apresentadas as admitâncias calculadas a partir de dados de medição e geradas no Matlab[®] script, para perturbação de terceiro harmônico da tensão a 1% e a 2% do valor eficaz do componente fundamental de V_1 , respectivamente. Os gráficos da Figura 3.13 mostram que os centros são razoavelmente coincidentes, indicando boa concordância em relação a Y_1 . Note-se que para valores de perturbação com o componente harmônico V_3 de 1% e de 2% em relação ao valor eficaz do componente fundamental, as circunferências são

razoavelmente coincidentes (Y_1), mas com Y_2 um pouco diferentes. Os valores de Y_2 se refletem no raio dos círculos e mostram algumas discrepâncias, especialmente nas ordens harmônicas 9 e 11.

FIGURA 3.13 – LUGAR GEOMÉTRICO DAS ADMITÂNCIAS MEDIDAS PARA ORDEM HARMÔNICA $j = 3$ DE TENSÃO COM VALORES DE 1% E 2% E RELATIVAS ÀS CORRENTES DE ORDEM $1 \leq k \leq 15$.





Fonte: O autor

3.7.5.3 O tensor por dupla perturbação

Uma vez que o círculo da admitância complexa estiver completo e linearizado, é possível encontrar os valores de Y_{11} , Y_{12} , Y_{21} e Y_{22} de maneira não geométrica e com apenas dois testes. Para tal, é necessário escolher dois valores de ΔV , cada um deslocado de 90 graus elétricos do outro, o que representa 180 graus elétricos no diagrama $Y_{real} \times Y_{imaginário}$, conforme descrição de Hume et al. (1998).

A equação (3.89) está copiada como (3.105) e pode ser reescrita de outra forma, como em (3.106), contemplando dois valores de ΔV de ordem harmônica j , deslocados de 90 graus elétricos, de forma a obter dois valores de ΔI de ordem harmônica k .

$$\begin{bmatrix} \Delta I_r \\ \Delta I_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[\begin{matrix} \leftarrow_{1r} + Y_{2r} \end{matrix} \right] & \left[\begin{matrix} \leftarrow_{2i} - Y_{1i} \end{matrix} \right] \\ \left[\begin{matrix} \leftarrow_{1i} + Y_{2i} \end{matrix} \right] & \left[\begin{matrix} \leftarrow_{1r} - Y_{2r} \end{matrix} \right] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_r \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \quad (3.105)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{r0} \\ \Delta I_{i0} \\ \Delta I_{r90} \\ \Delta I_{i90} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta V_{r0} & \Delta V_{i0} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta V_{r0} & \Delta V_{i0} \\ \Delta V_{r90} & \Delta V_{i90} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta V_{r90} & \Delta V_{i90} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \left[\begin{matrix} \leftarrow_{1r} + Y_{2r} \end{matrix} \right] \\ \left[\begin{matrix} \leftarrow_{2i} - Y_{1i} \end{matrix} \right] \\ \left[\begin{matrix} \leftarrow_{1i} + Y_{2i} \end{matrix} \right] \\ \left[\begin{matrix} \leftarrow_{1r} - Y_{2r} \end{matrix} \right] \end{bmatrix} \quad (3.106)$$

Com isso, os quatro valores parciais das admitâncias, vistos em (3.90), podem ser encontrados em (3.107).

$$\begin{bmatrix} Y_{11} \\ Y_{12} \\ Y_{21} \\ Y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Ⓢ}_{1r} + Y_{2r} \\ \text{Ⓢ}_{2i} - Y_{1i} \\ \text{Ⓢ}_{1i} + Y_{2i} \\ \text{Ⓢ}_{1r} - Y_{2r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta I_{r0} \Delta V_{r0}^* + \Delta I_{i90} \Delta V_{r90}^* \\ \Delta I_{r0} \Delta V_{i0}^* + \Delta I_{i90} \Delta V_{i90}^* \\ \Delta I_{i0} \Delta V_{r0}^* + \Delta I_{i90} \Delta V_{r90}^* \\ \Delta I_{i0} \Delta V_{i0}^* + \Delta I_{i90} \Delta V_{i90}^* \end{bmatrix} \quad (3.107)$$

3.8 LOCI DAS ADMITÂNCIAS SEM LINEARIZAÇÃO

As admitâncias obtidas pelos procedimentos acima descritos podem apresentar figuras geométricas não regulares, cujos aspectos mudam com o valor relativo da tensão harmônica sobreposta à fundamental e com seu ângulo, não sendo trivial a obtenção do seu centro e da sua circunferência, justificando o emprego do processo descrito no item 3.7.4 Matrizes parciais de admitâncias.

As Figuras 3.14 a 3.16 mostram o aspecto das admitâncias obtidas de um conversor ca-cc monofásico modelado no Matlab Simulink e sem qualquer tratamento numérico prévio. Os desenhos dentro das Figuras 3.14 a 3.16 não são fechados para que seu programa gerador, o Office Excel, não altere sua forma original e para que se possa preservar seu ângulo inicial, conforme descrito no item 3.7.5.2 *Representação do tensor*. Tratamentos numéricos dos dados obtidos que forem realizados antes da confecção do gráfico podem produzir figuras diferentes, conforme o método utilizado e do par de coordenadas sob intervenção, produzindo resultados diferentes em cada figura.

FIGURA 3.14 – LUGAR GEOMÉTRICO DAS ADMITÂNCIAS MODELADAS PARA ORDEM HARMÔNICA $j = 3$ DE TENSÃO COM VALORES DE 1% E RELATIVAS ÀS CORRENTES DE ORDEM $1 \leq k \leq 15$.

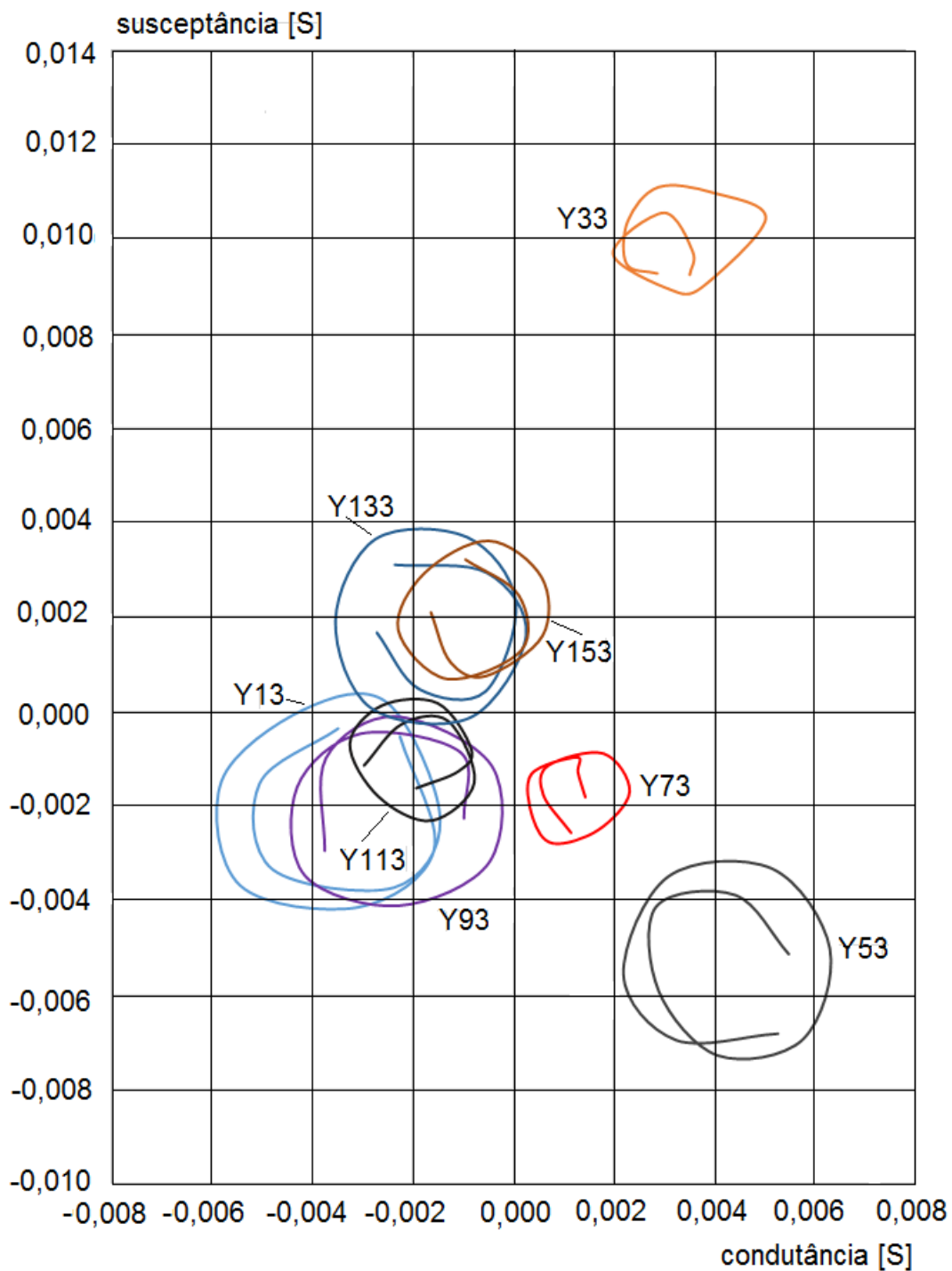


FIGURA 3.15 – LUGAR GEOMÉTRICO DAS ADMITÂNCIAS MODELADAS PARA ORDEM HARMÔNICA $j = 5$ DE TENSÃO COM VALORES DE 1% E RELATIVAS ÀS CORRENTES DE ORDEM $1 \leq k \leq 15$.

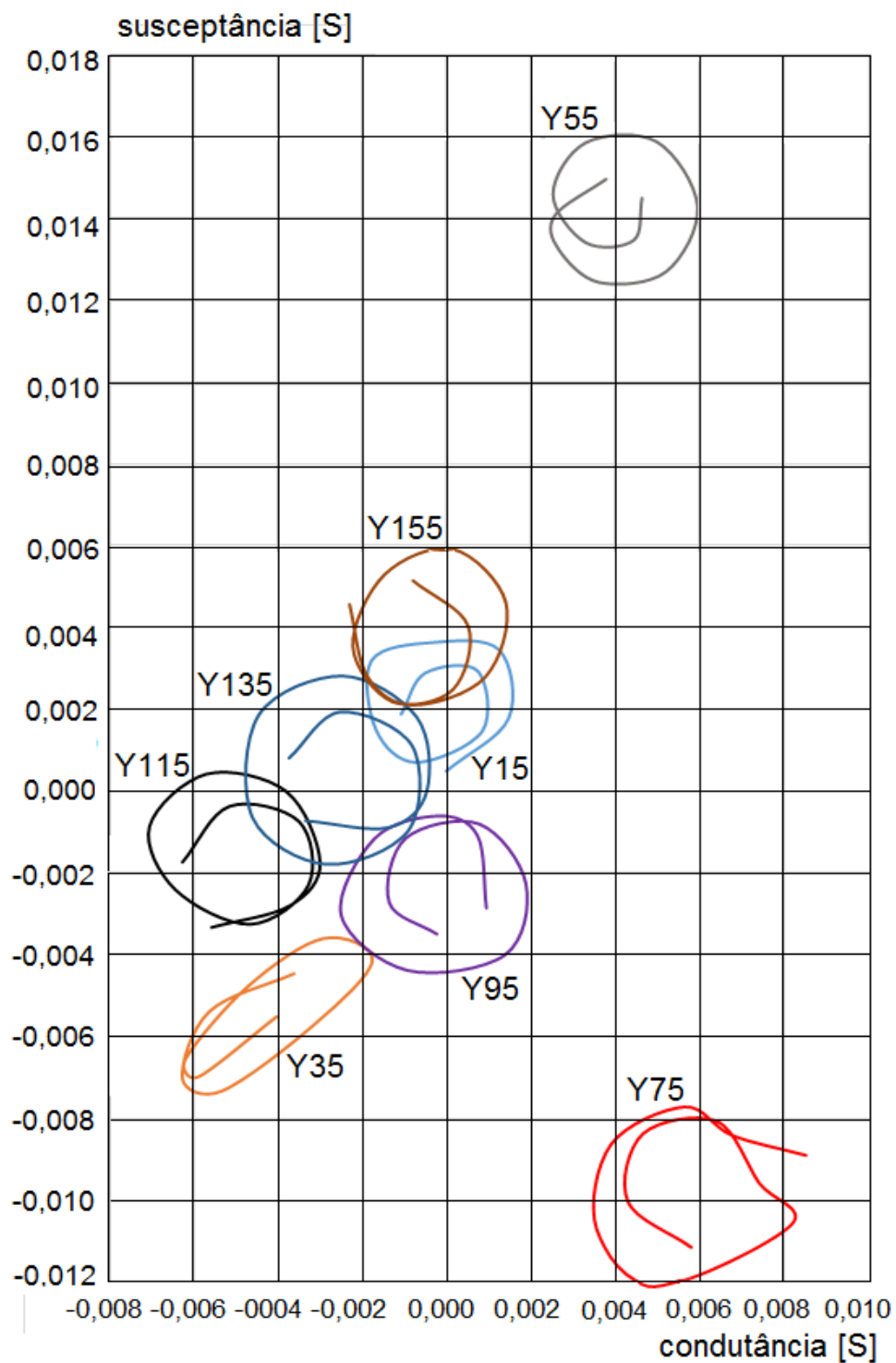
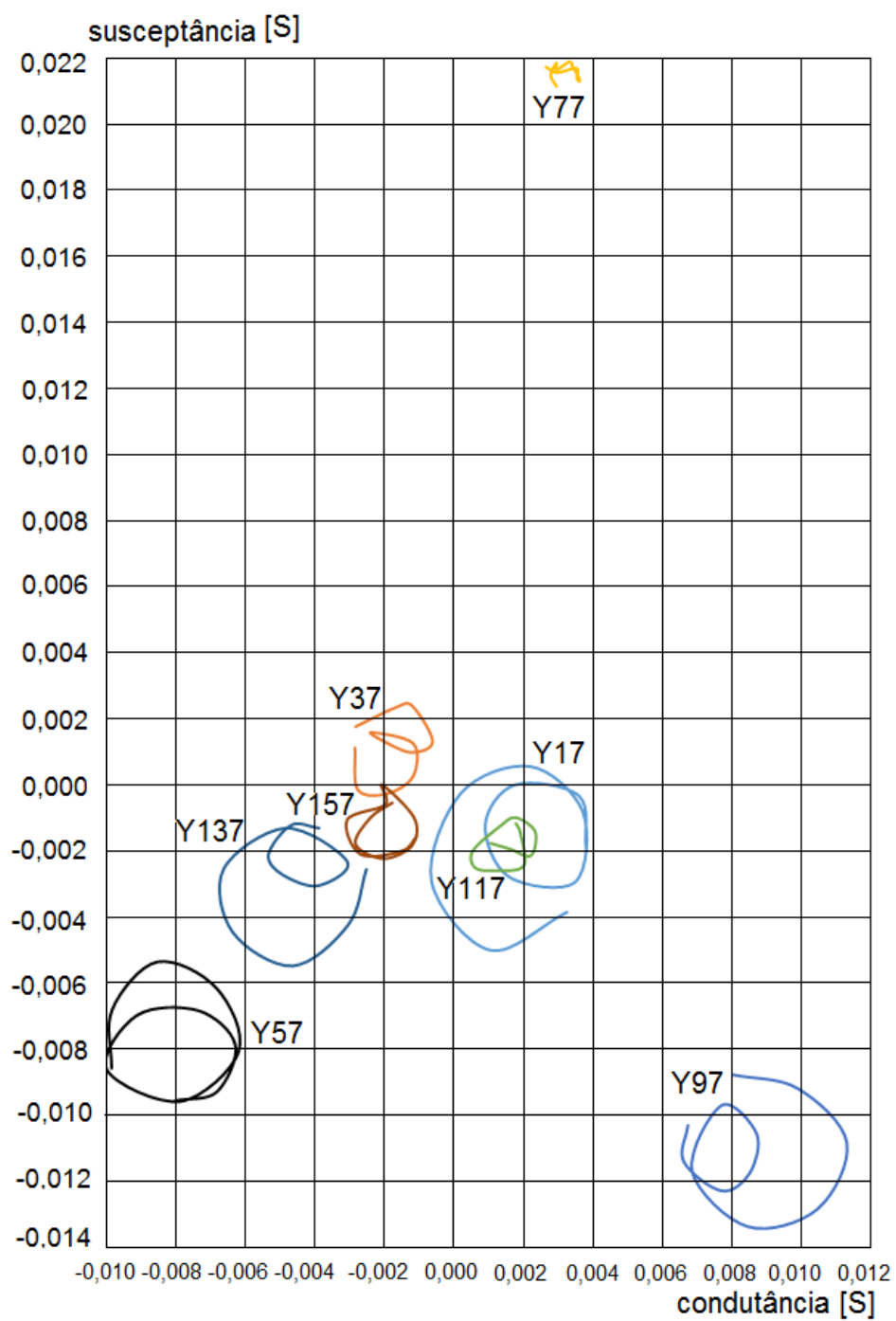


FIGURA 3.16 – LUGAR GEOMÉTRICO DAS ADMITÂNCIAS MODELADAS PARA ORDEM HARMÔNICA $j = 7$ DE TENSÃO COM VALORES DE 1% E RELATIVAS ÀS CORRENTES DE ORDEM $1 \leq k \leq 15$.

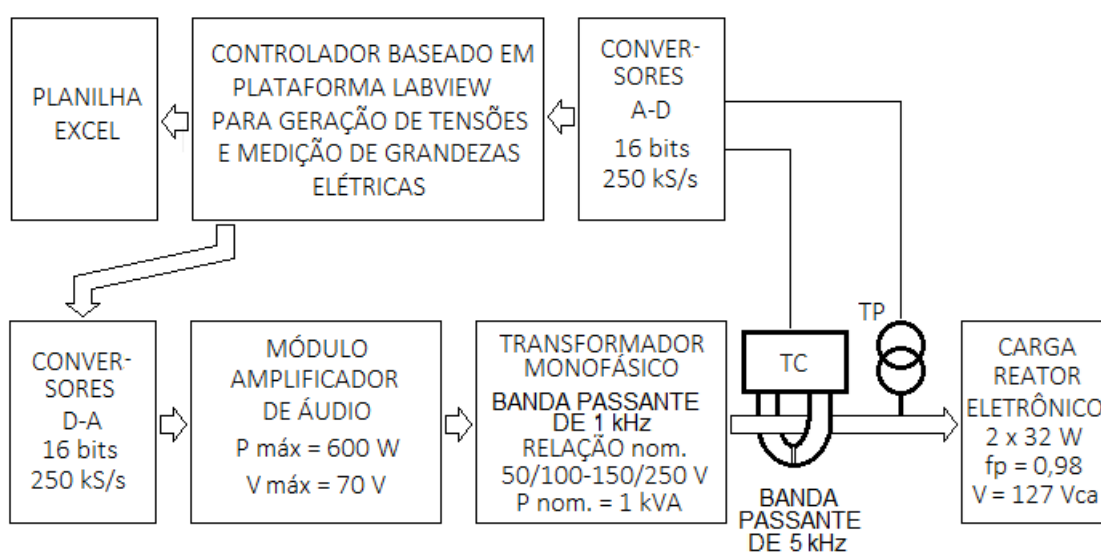


4 MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS DA CARGA

4.1 O FLUXOGRAMA DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

A Figura 4.1 apresenta o diagrama de conexões utilizado para geração das tensões e medições das correntes da CNL nos capítulos 5 e 6, através de programa específico em plataforma LabVIEW®, exposto em seções separadas nas Figuras 4.4, 4.7, 4.8 e 4.12. Os conversores A-D e D-A para interface externa são reunidos em placa única modelo NI USB 6218 com as conexões mostradas na Figura 4.6. Os demais blocos são mostrados adiante.

FIGURA 4.1 – DIAGRAMA PARA GERAÇÃO DE TENSÕES E MEDIÇÃO DAS GRANDEZAS.



4.2 O PROGRAMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS EM PLATAFORMA LABVIEW

Alguns requisitos básicos de projeto do conjunto de instrumentos para a medição de componentes espectrais de sinais até 9 kHz, de forma a atender a IEC 61000-4.7 (2008), são:

Janela de 12 ciclos de 60 Hz ou de 10 ciclos em 50 Hz, perfazendo 200 ms.

Circuito de entrada de dados com filtros *anti-aliasing* e passa-baixas com $f_c = 3,0$ kHz.

Janelamento retangular ou, opcionalmente, *Hanning*, conforme Tang et al. (2008).

Conversor analógico-digital ADC com função *Sample & Hold*.

Sincronização para o circuito principal (PLL) e para o janelamento.

Processador matemático para realizar a FFT e calcular os coeficientes e ângulos.

A medição dos harmônicos requer diferentes janelamentos, em função da categoria do seu comportamento dinâmico, segundo a Tabela 4.1:

TABELA 4.1 – REQUISITOS TÉCNICOS DA FFT PARA MEDIÇÃO DE HARMÔNICOS.

<i>Comportamento</i>	<i>T_w e janelamento</i>	<i>Requisitos adicionais</i>
Quase estacionário	0,1 s – 0,5 s - Retangular	Permitidos gaps entre janelas
Flutuante	0,32 s – Retangular	Sem gaps entre janelas
	0,4 s – 0,5 s - Hanning	Superposição meio a meio
Varição rápida	0,08 s – 0,16 s - Retangular	Sem gaps entre janelas

Fonte: IEC-61000-4.7 (2008)

O programa baseado na plataforma LabVIEW[®] obtém, dentro de cada janela de tempo de 200 ms, a amplitude C_m de cada uma das componentes harmônicas da corrente de fase, arquivada em uma coluna independente, aqui estendidos até a 15ª ordem. A designação C_m se refere a um sinal genérico medido. O mesmo procedimento é repetido para as tensões terminais da carga que são diferentes dos valores programados, em razão da não linearidade do sistema de potência instalado. Para todas as correntes e tensões são medidos também os ângulos de defasagem presentes na carga. Após o tempo de medição, todos os valores medidos são reunidos em grupos de 15 leituras de 200 ms, perfazendo 3 segundos.

4.3 MEDIÇÃO DE TENSÕES E CORRENTES

4.3.1 Metodologia normativa

Para avaliar o comportamento dos componentes harmônicos da corrente de fase de uma carga qualquer, as medições das amplitudes de cada componente harmônica da corrente e da tensão devem ser feitas conforme a IEC 61000-4.7 (2008), a partir da decomposição espectral, usando a DFT.

$$f(t) = c_0 + \sum_{m=1}^{\infty} c_m \operatorname{sen}\left(\frac{m}{N} \omega_1 t + \varphi_m\right) \quad (4.1)$$

$$c_m = \sqrt{b_m^2 + a_m^2} \quad (4.2)$$

$$c_0 = \frac{1}{T_w} \int_0^{T_w} f(t) dt \quad (4.3)$$

$$b_m = \frac{2}{T_w} \int_0^{T_w} f(t) \operatorname{sen} \left(\frac{m}{N} \omega_1 t + \varphi_m \right) dt \quad (4.4)$$

$$a_m = \frac{2}{T_w} \int_0^{T_w} f(t) \operatorname{cos} \left(\frac{m}{N} \omega_1 t + \varphi_m \right) dt \quad (4.5)$$

$$\varphi_m = \operatorname{arc\,tg} \frac{b_m}{a_m} \quad \text{para } b_m \geq 0 \quad (4.6)$$

$$\varphi_m = \pi + \operatorname{arc\,tg} \frac{b_m}{a_m} \quad \text{para } b_m < 0 \quad (4.7)$$

Com

$$\omega_1 = 60 \text{ Hz}$$

$$T_w = 200 \text{ ms} = 12 \text{ ciclos de } 60 \text{ Hz}$$

$$N = \text{ciclos da fundamental dentro da janela de tempo } T_w \rightarrow N = 12 \text{ ciclos}$$

$$m = \text{ordem da linha espectral relativa à frequência fundamental}$$

$$\text{bin} = \text{resolução espectral} \rightarrow \text{bin} = 1/T_w \text{ [s}^{-1}\text{]} = 5 \text{ Hz}$$

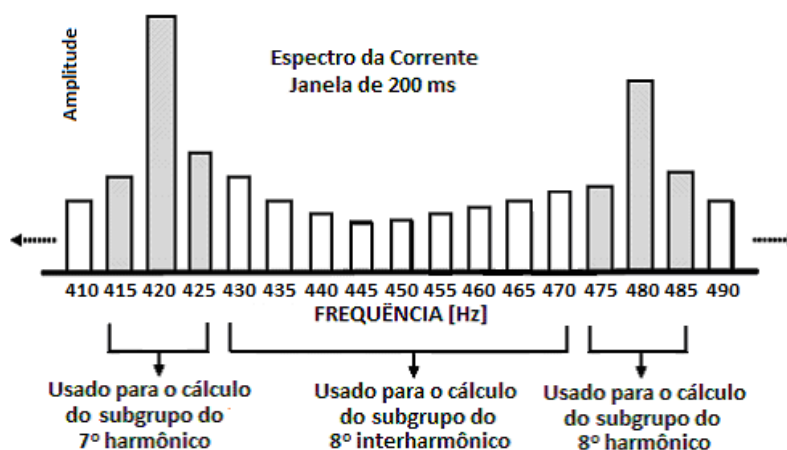
Após o ADC, o sinal é discretizado e armazenado pelos blocos de memória intermediária do programa de medição. Os M valores medidos compõem a janela de tempo T_w . A frequência de amostragem F_s foi ajustada em 15.360 Hz e corresponde a $M = 3072$ amostras dentro da janela de 200 ms. Antes do processador da DFT as amostras são submetidas ao janelamento retangular e ponderadas segundo sua função de transferência. O processador da DFT produz os coeficientes a_m e b_m das equações (4.4) e (4.5).

A amplitude relativa a 200 ms é medida tomando os valores eficazes obtidos de cada janela de medição. Os M valores amostrados pelo ADC durante esse intervalo de tempo devem ser sequenciais e não justapostos, o que requer um sistema interno de sincronismo que deve ser provido pelo programa desenvolvido. O valor consolidado de 200 ms, após M medidas dentro desse intervalo de tempo, é calculado pela equação (4.8).

$$U_{rms200ms} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M U^2} \quad (4.8)$$

Ao invés de avaliar a amplitude e ângulo de uma linha espectral simples, a IEC 61000-4.7 (2008) define que as amplitudes das ordens harmônicas inteiras sejam calculadas através das linhas espectrais (*bins*) imediatamente adjacentes, conforme a Figura 4.2.

FIGURA 4.2 – AGRUPAMENTO DE LINHAS ESPECTRAIS (*BINS*) PARA CÁLCULO DE HARMÔNICOS E INTER-HARMÔNICOS.



Fonte: IEC-61000-4.7 (2008)

A amplitude C_h de cada um dos componentes harmônicos inteiros é obtida através da média quadrática (*root square sum*) das amplitudes das linhas espectrais central e adjacentes configurando a medição por grupo ou subgrupo, segundo Gunther (2006) e Bracale et al (2008).

A IEC 61000-4.7 (2008) define que os valores medidos das amplitudes das linhas espectrais da Figura 4.2 acima devem ser reunidos por grupo, segundo a equação (4.9), para cada ordem harmônica h . Como são medidas as correntes e as tensões das ordens ímpares até 15, são 8 subgrupos de cada parâmetro.

$$C_{g,h}^2 = \frac{C_{m-6}^2}{2} + \sum_{i=-5}^{+5} C_{m+i}^2 + \frac{C_{m+6}^2}{2} \quad (4.9)$$

A IEC 61000-4.7 (2008) também permite a reunião por subgrupo para sinais flutuantes, definida pela equação (4.10), de forma a facilitar a medição. Nesse trabalho e no programa LabVIEW implementado, todas as medidas serão reunidas por subgrupo.

$$C_{sg,h} = \sqrt{\sum_{i=-1}^{+1} C_{m+i}^2} \quad (4.10)$$

A IEC 61000-4.30 (2015) define que os valores obtidos de 200 ms, segundo a IEC 61000-4.7 (2008), podem ser agregados em intervalos de tempo pré-definidos, de forma a estabelecer uma metodologia para armazenamentos sucessivos de 3 s, 10 min e 2 h (*very short time interval*, *short time interval* e *long time interval*, respectivamente). Para este trabalho os valores consolidados de 200 ms foram agregados em 3 s. Todos os valores constantes dos gráficos e utilizados nas tabelas e cálculos das admitâncias são as médias quadráticas dos valores medidos de tensão e corrente $C_{sg,h}$ em 200 ms, da equação (4.10), e agregados em 3 s, segundo a equação (4.11). Em medições com tempo superior ao múltiplo de 3 s, os valores finais são as médias quadráticas dos $C_{h,3 s}$ parciais, segundo equação similar à (4.8) e conforme o protocolo mínimo para a medição de harmônicos em Oliveira et al. (2003) e Billik (2009). Valores fora do tempo não múltiplo de 3 s são desconsiderados.

$$C_{h,3s} = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{j=1}^{15} C_{sg,h}^2} \quad (4.11)$$

Os ângulos relativos a cada componente harmônico medido são obtidos da DFT, utilizando as equações (4.6) e (4.7). A IEC 61000-4.30 (2015) não define agregação dos ângulos por subgrupo. Neste trabalho os ângulos também foram agregados em 3 s por média simples, após tratamento matemático para correção dos valores de φ_m próximos a π .

A IEC 61000-4.7 (2008) também define os limites de erros dos instrumentos envolvidos na medição, considerando que instrumentos de classe I são aqueles dos quais é demandada alta exatidão ou usados como referência para outros e os instrumentos de classe II são para uso normal. Na tabela 4.2, U_{nom} e I_{nom} se referem à escala do instrumento e U e I são os valores medidos. Os instrumentos utilizados nesta pesquisa são de classe II.

TABELA 4.2 – REQUISITOS DE ERRO DOS INSTRUMENTOS

Classe	Grandeza	Condição	Máximo erro
	Tensão	$U \geq 1\% U_{nom.}$	$\pm 5\% \text{ de } U$
		$U < 1\% U_{nom.}$	$\pm 0,05\% \text{ de } U_{nom.}$

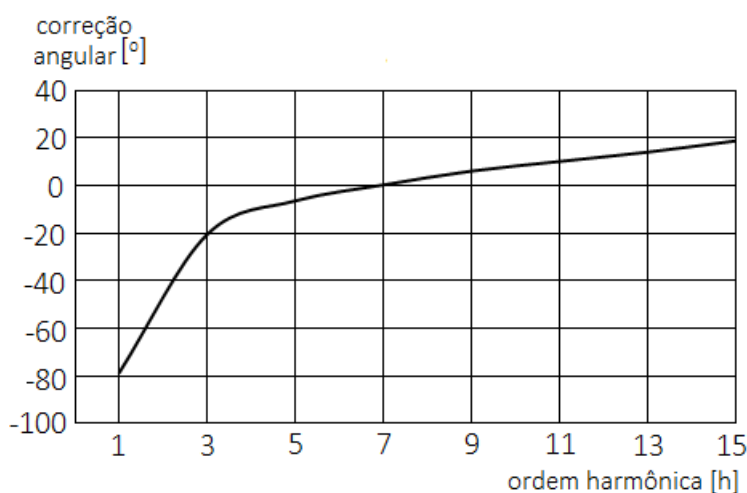
I	Corrente	$U \geq 3\% I_{nom.}$	$\pm 5\% \text{ de } I$
		$U < 3\% I_{nom.}$	$\pm 0,15\% \text{ de } I_{nom.}$
	Potência	$U \geq 150 \text{ W}$	$\pm 1\% \text{ de } P_{nom.}$
		$U < 150 \text{ W}$	$\pm 1,5 \text{ W}$
II	Tensão	$U \geq 3\% U_{nom.}$	$\pm 5\% \text{ de } U$
		$U < 3\% U_{nom.}$	$\pm 0,15\% \text{ de } U_{nom.}$
	Corrente	$U \geq 10\% I_{nom.}$	$\pm 5\% \text{ de } I$
		$U < 10\% I_{nom.}$	$\pm 0,5\% \text{ de } I_{nom.}$

Fonte: IEC-61000-4.7 (2008)

4.3.2 GERAÇÃO DAS TENSÕES PROGRAMADAS

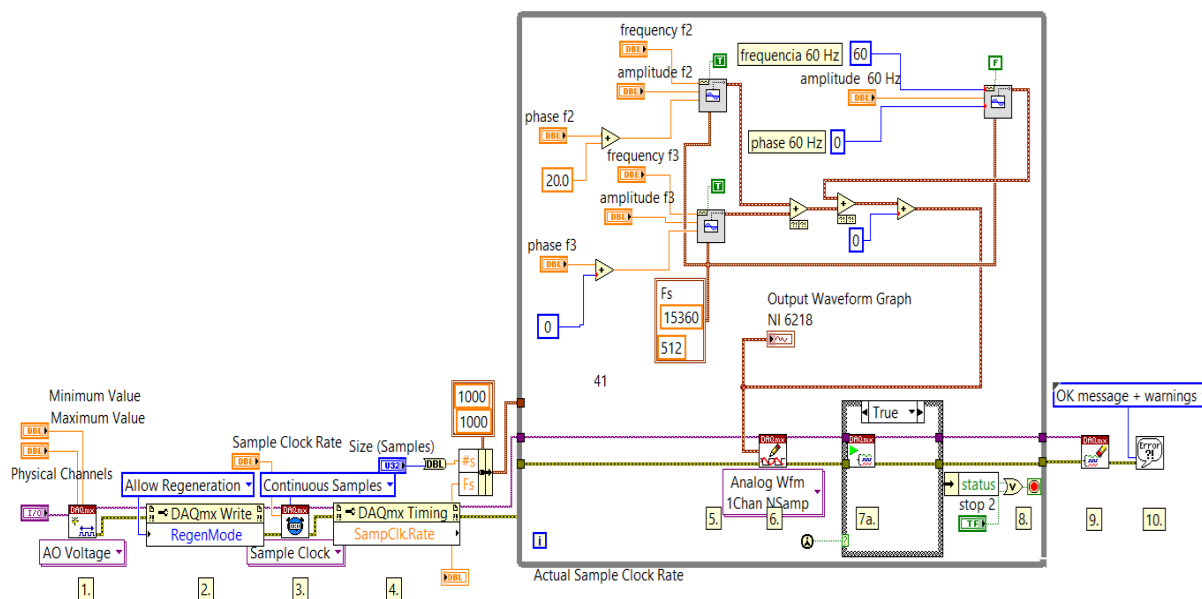
As tensões são geradas segundo a programação de amplitudes e de ângulos desejados. No programa LabVIEW foram incluídos dispositivos para compensar os deslocamentos angulares provocados pela não linearidade do amplificador DJ-2200 e do transformador elevador de tensão, mostrados na Figura 4.6. As curvas de compensação foram previamente avaliadas, de forma que as compensações são diferentes para cada frequência da tensão a ser sobreposta à fundamental. Os valores de amplitude de V_1 fundamental são ajustados para produzir 127 Vca eficazes na carga. O gráfico da Figura 4.3 mostra a curva de deslocamento angular do conjunto amplificador + transformador em função da frequência do sinal.

FIGURA 4.3 – CURVA DE CORREÇÃO ANGULAR DO CONJUNTO AMPLIFICADOR + TRANSFORMADOR



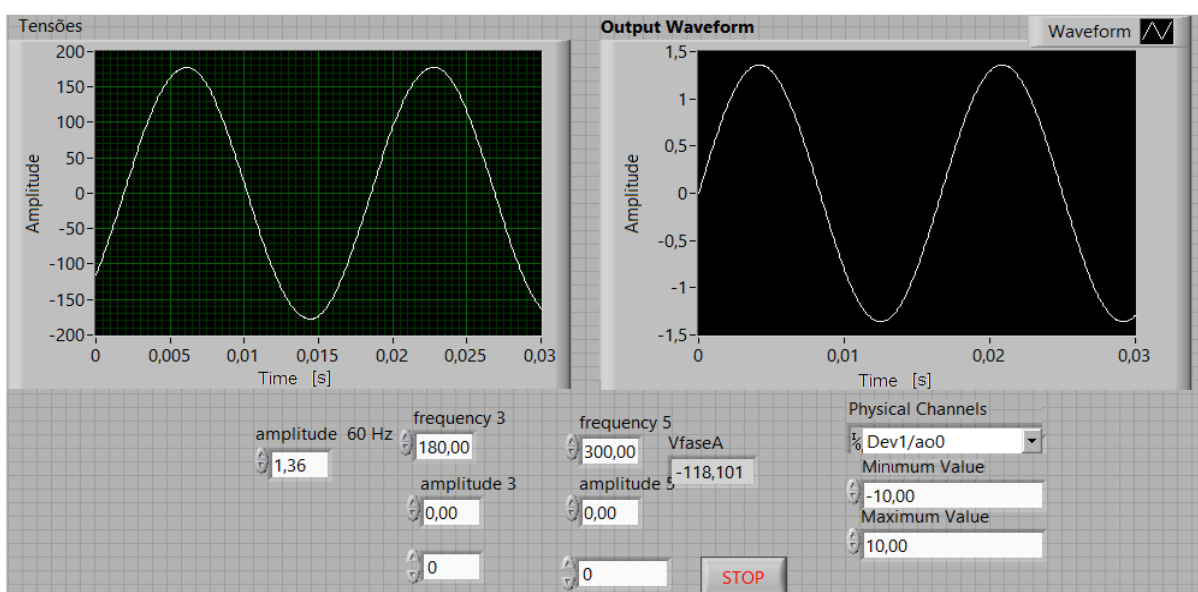
Fonte: O autor

FIGURA 4.4 – SEGMENTO 1 DO PROGRAMA LABVIEW PARA GERAÇÃO DAS TENSÕES COMPOSTAS ATRAVÉS DO MÓDULO DAC MODELO NI USB 6218



Nesse segmento são inseridos os valores para correção angular das tensões harmônicas solicitadas, conforme o gráfico da Figura 4.3. É possível agrupar à fundamental dois componentes harmônicos simultaneamente, mas não há limite de quantidade, bastando agrupar outros blocos semelhantes. A forma de onda da tensão gerada é mostrada no *FRONT PANEL* como *Output Waveform* da Figura 4.5. O quadro Tensões do mesmo *FRONT PANEL* mostra a forma de onda da tensão medida.

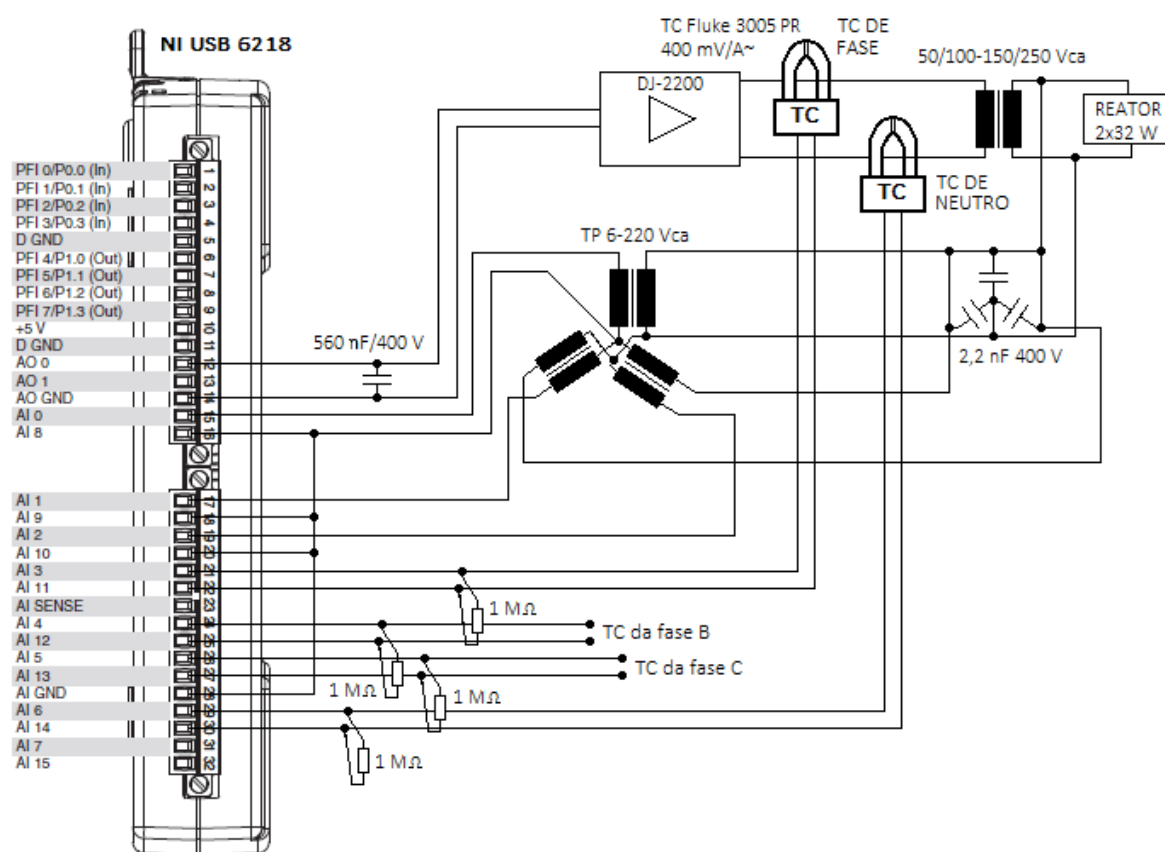
FIGURA 4.5 – FORMA DE ONDA DA TENSÃO MEDIDA (*TENSÕES*) E PROGRAMADA (*OUTPUT WAVEFORM*).



4.2.2 AQUISIÇÃO DOS DADOS DO ADC NI USB-6218

Nesta etapa são medidas as tensões e correntes na carga. Os sinais são medidos dentro da faixa de ± 10 Vcc pelo ADC e são condicionados previamente para adequação a essa faixa. Os TCs utilizados são do tipo pinça amperimétrica de marca Fluke, modelo 3005 PR, faixa de entrada 0,01 A a 5 A, classe de exatidão $\pm 0,5\%$ do fundo da escala, resposta plana em frequência até 5 kHz, saída por tensão com relação 400 mV/A. Os TPs são transformadores indutivos de relação nominal 220-6 V. A frequência de amostragem é 15.360 Hz. A saída da FFT produz os ângulos em radianos que demanda fator de conversão $a=180/\pi = 57,3$.

FIGURA 4.6 – DIAGRAMA ELÉTRICO DE CONEXÃO DA PLACA ADC/DAC MODELO NI USB 6218



Fonte: National Instruments Corp. NI-USB 621x User Manual (2006) e o autor.

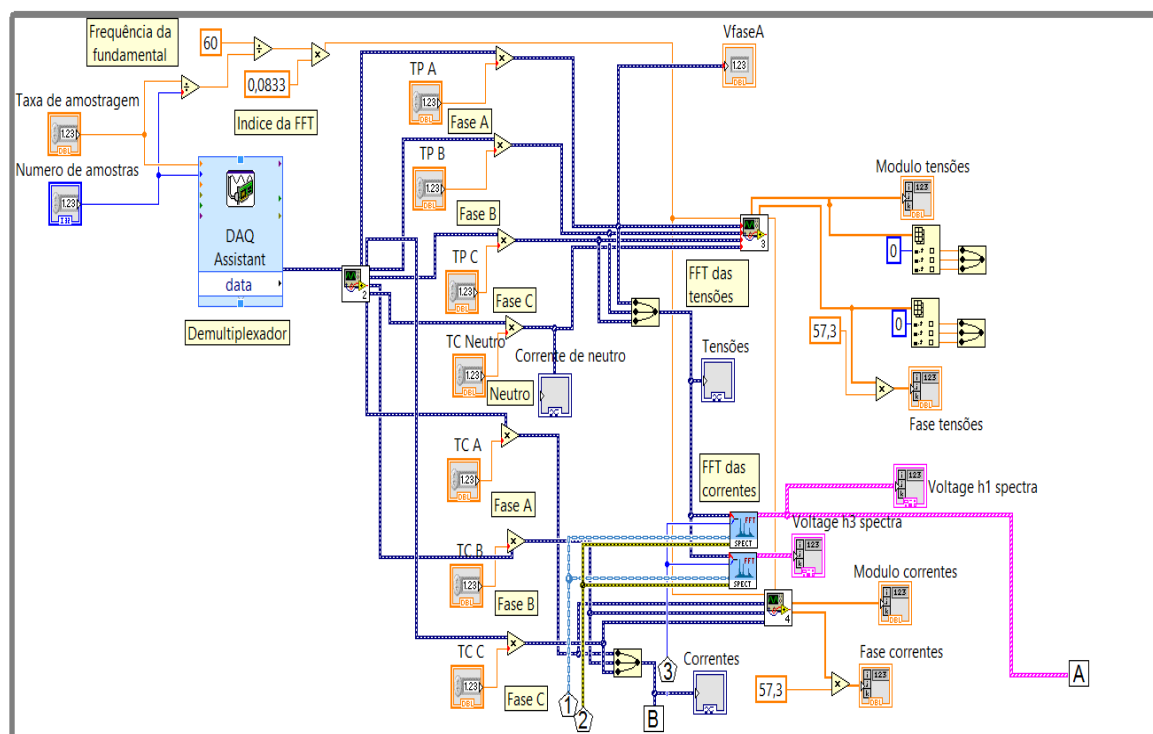
As características elétricas do módulo ADC/DAC modelo NI USB 6218, segundo o documento NI-USB-621x User Manual (2006) são:

32 entradas analógicas (16-bit, 250 kS/s) 60 V, CAT I, isolamento 1000 V_{rms}

2 saídas analógicas (16-bit, 250 kS/s)

8 entradas digitais, 8 saídas digitais, 2 contadores 32-bit

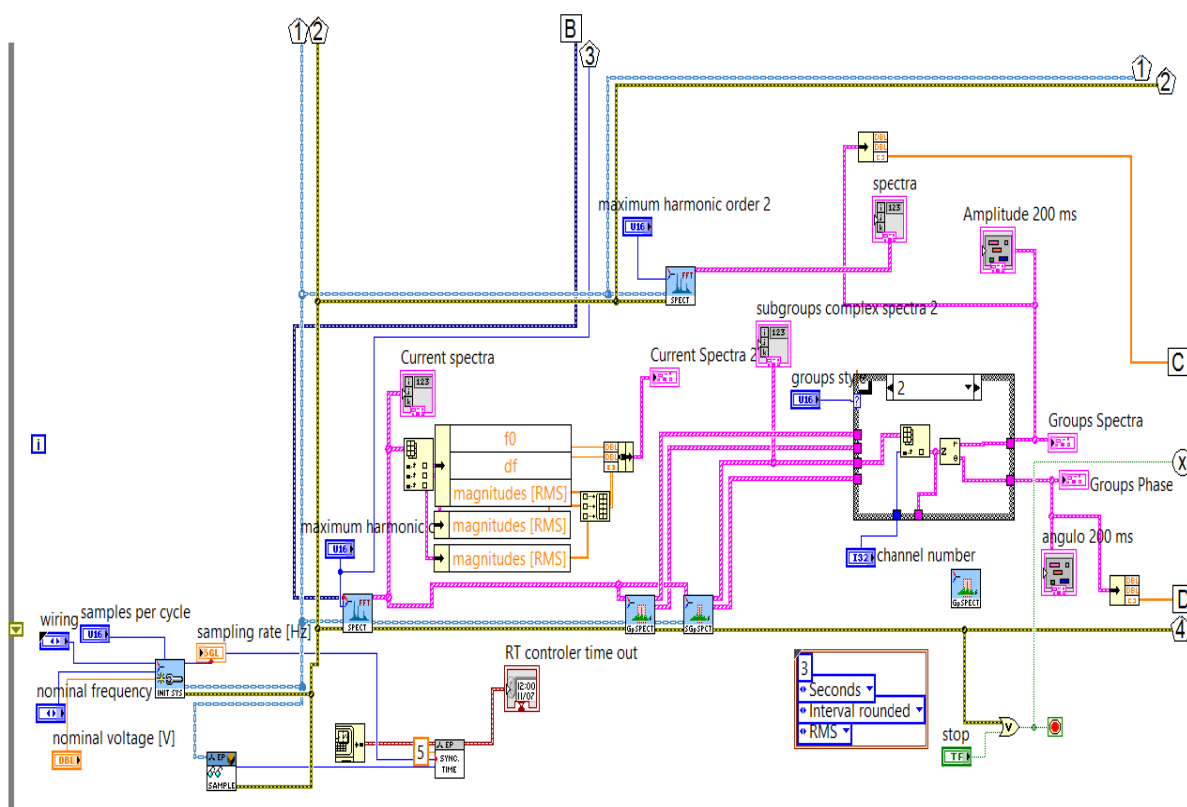
FIGURA 4.7 – SEGMENTO 2 DO PROGRAMA LABVIEW PARA LEITURA DAS TENSÕES E CORRENTES NA CARGA



Conforme a Figura 4.7 no módulo *DAQ Assistant* são configurados a frequência e a forma de aquisição dos dados, se continuamente ou segundo uma programação temporal específica. Possível também determinar a faixa da tensão da entrada que está conforme os requisitos do USB 6218 que é de -10 V a +10 V, já que todos os sinais dos transformadores para instrumentos são de saída por tensão. O *DEMUX* na saída do *DAQ Assistant* separa as tensões e correntes que são multiplicados por seus respectivos fatores de transformação. Nesse caso, os TPs possuem relação 35,1:1 e os TCs 2,2:1. Os blocos *Voltage Spectra* são utilizados para listar no *FRONT PANEL* os vetores obtidos da FFT para as tensões da fundamental e do terceiro harmônico. As saídas do bloco que realiza a FFT das tensões mostram as amplitudes e os ângulos medidos. Outro bloco similar realiza a FFT das correntes. A saída A envia o sinal de tensão para o bloco que o traduz na forma polar com módulo e o ângulo convertido em graus elétricos para comunicação ao programa Excel.

4.2.3 ESPECTRO HARMÔNICO SEGUNDO A IEC-61000-4.7

FIGURA 4.8 – SEGMENTO 3 DO PROGRAMA LABVIEW PARA CRIAÇÃO DOS GRUPOS E SUBGRUPOS DE TENSÕES E DE CORRENTES HARMÔNICAS CONFORME IEC 61000-4.7 (2008).



Fonte: O autor

Este segmento do programa realiza a FFT com $F_s = 15.360$ Hz e a medição dos harmônicos e inter harmônicos em grupos e subgrupos de 12 ciclos da fundamental, segundo a IEC 61000-4.7 (2008) e mostrados nas Figuras 4.9 e 4.10. Para este projeto de pesquisa os inter harmônicos não são considerados. Apenas a saída de subgrupos é utilizada e os valores de amplitude e ângulo gerados são convertidos para a forma polar. O módulo *Initialize System* recebe as informações de frequência nominal 60 Hz, ligação a 4 fios, tensão nominal 230 Vca e 256 amostras por ciclo. Os blocos *Group Spectra* e *Subgroup Spectra* contabilizam as medições segundo as equações (4.9) e (4.10), respectivamente. As saídas 1 e 2 são informações do sistema, como tensão nominal e frequência de amostragem para todos os blocos. A saída C envia as amostras de amplitude da corrente de 200 ms e a saída D envia as amostras de ângulo da corrente de 200 ms para comunicação ao programa Excel.

FIGURA 4.9 – FORMA DE ONDA DA CORRENTE MEDIDA DE FASE (CORRENTES) E DA CORRENTE DE NEUTRO

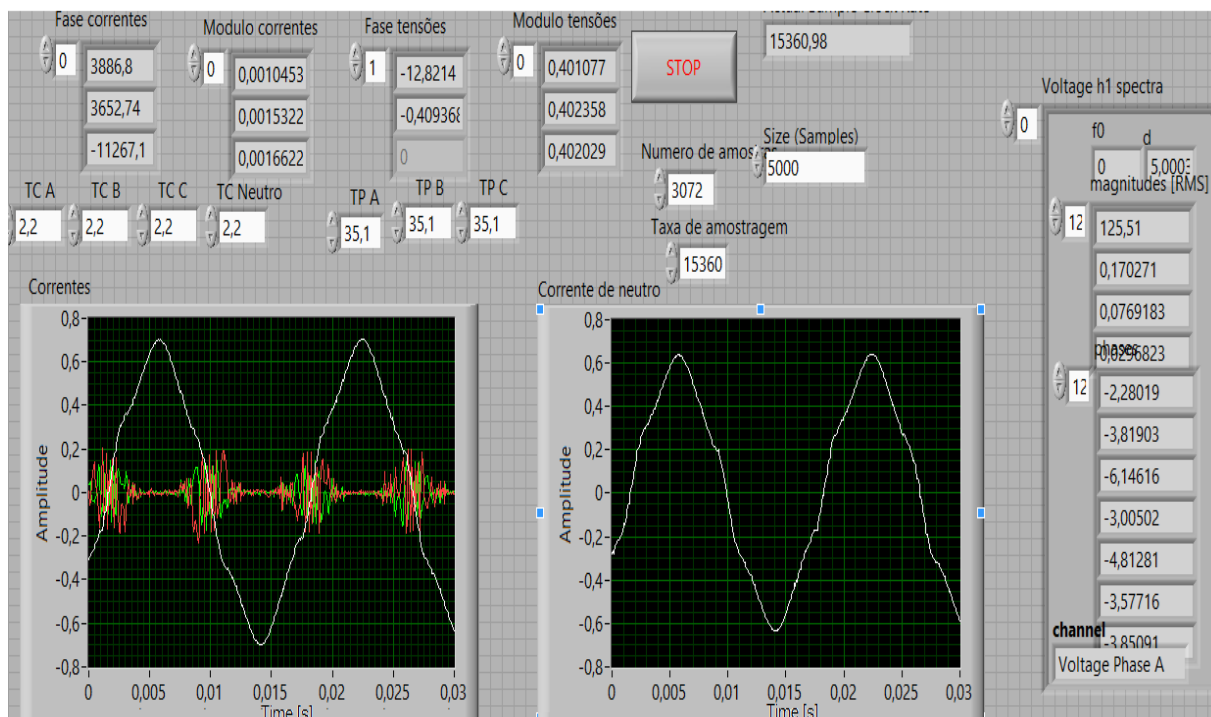
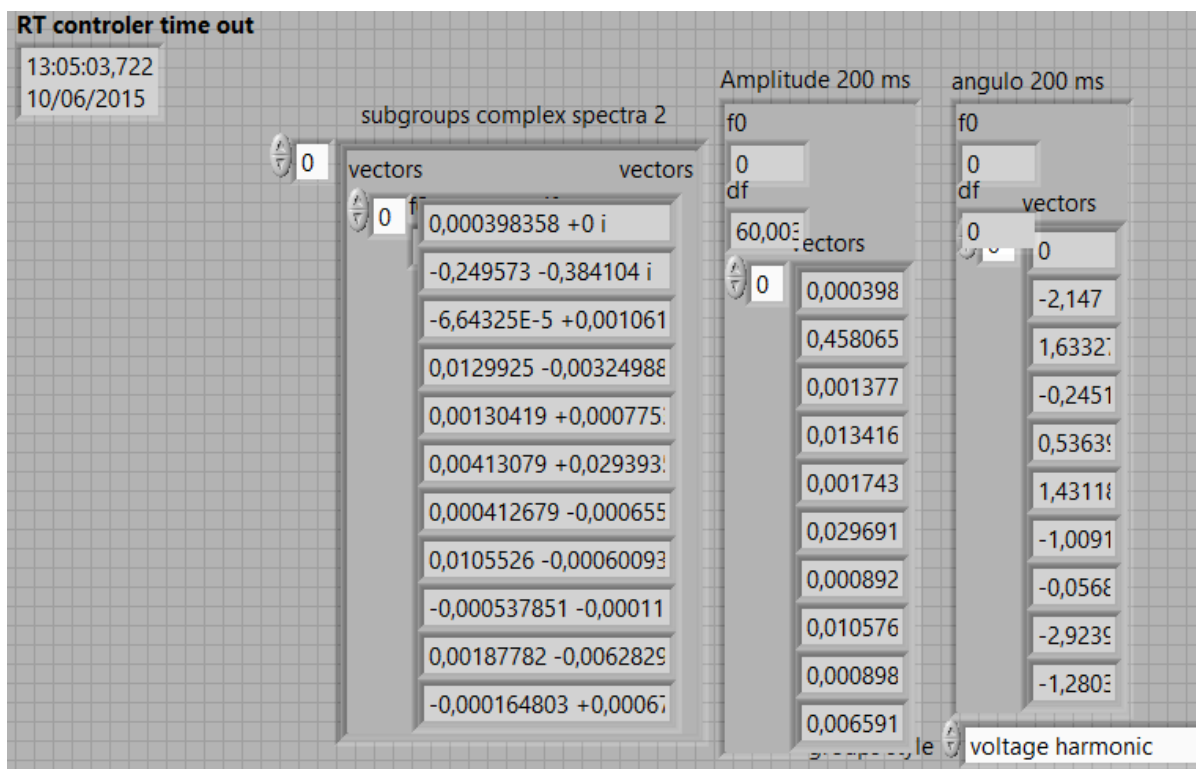


FIGURA 4.10 – AMPLITUDES E ÂNGULOS MEDIDOS DOS HARMÔNICOS EM SUBGRUPOS. GRANDEZA f_0 INDICA A FREQUÊNCIA INICIAL E df INDICA A RESOLUÇÃO. VALORES DE AMPLITUDES EM A_{RMS} E ÂNGULOS EM RADIANOS.



O gráfico da Figura 4.11 abaixo mostra as amplitudes absolutas, em pu das tensões de entrada no ADC que são relativas às correntes de fase dos harmônicos de ordem 1 a 10, indicadas na janela *Current Spectra*, à esquerda. As linhas em cor azul se referem à corrente da fase B que não foi medida e podem ser consideradas como entrada de tensão de ruído. Note-se que as correntes de ordem harmônica 9 já se encontram com amplitude inferior a 2 vezes à do ruído e as correntes de ordem harmônica 13 se confundem com ele. Não é disponível a curva de calibração dos TCs Fluke, de forma que amplitudes de corrente abaixo de 10 mA são medidas com erro indefinido. Os ângulos das correntes estão indicados na janela *Group Phase*, à direita e abaixo.

FIGURA 4.11 – MEDIÇÃO DAS AMPLITUDES DAS CORRENTES HARMÔNICAS CONVERTIDAS EM TENSÃO REFERENTE À ENTRADA DO ADC, ATÉ 600 HZ, (EM VERMELHO) E RUÍDO DE FUNDO (EM AZUL). AS AMPLITUDES E ÂNGULOS DOS HARMÔNICOS MEDIDOS COBREM A FAIXA ATÉ A ORDEM 15.

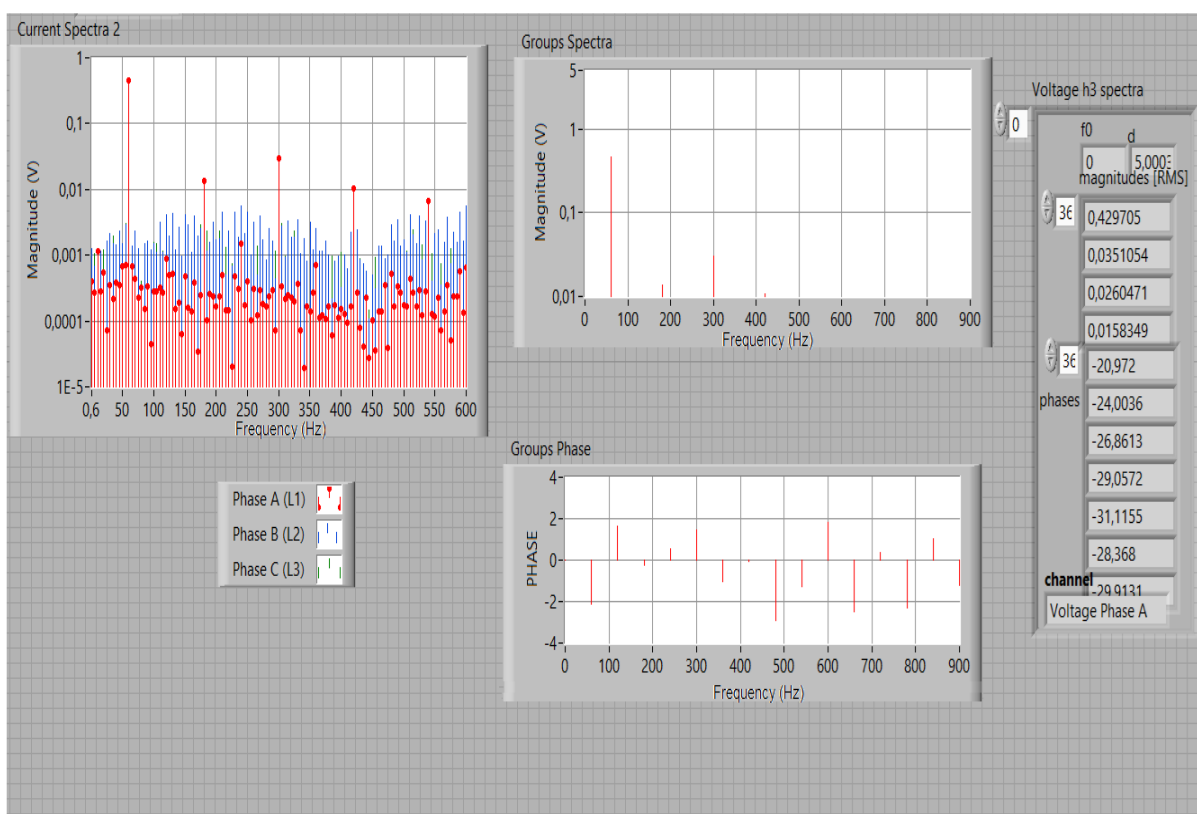
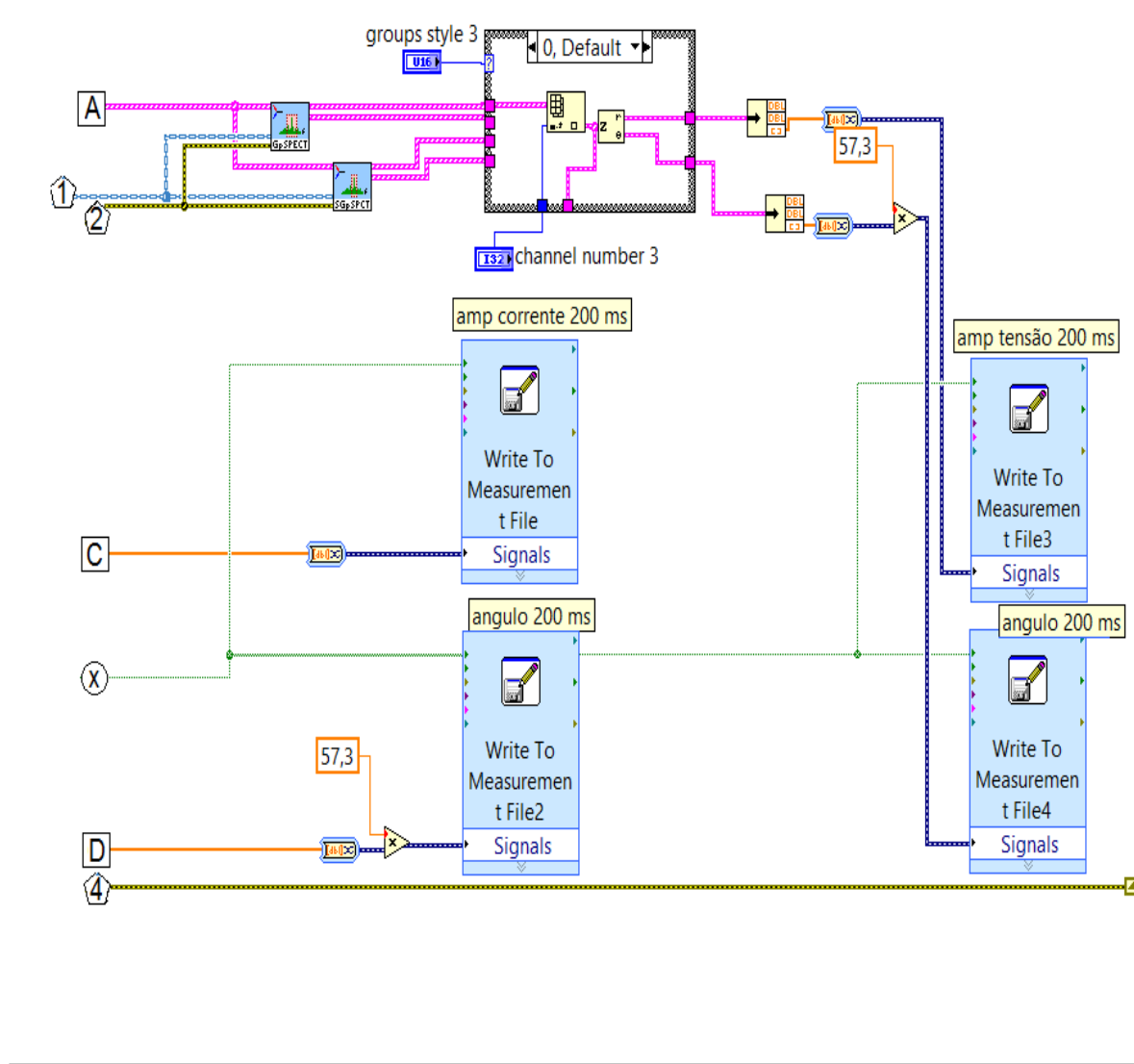


FIGURA 4.12 – SEGMENTO 4 DO PROGRAMA LABVIEW PARA TRANSFERÊNCIA DOS DADOS MEDIDOS DOS GRUPOS E SUBGRUPOS DE TENSÕES E DE CORRENTES HARMÔNICAS PARA O EXCEL.



O segmento do programa LabVIEW[®] da Figura 4.12 acima mostra os quatro blocos de transferência de dados para o ambiente Excel. A corrente ou a tensão contabilizada de 200 ms da fase A é decomposta em amplitude e ângulo pelos blocos anteriores. Cada vez que há um ajuste no programa gerador de tensão para que um componente harmônico diferente seja adicionado ao componente fundamental, configura-se uma medição diferente. Cada medição gera quatro arquivos Excel, sendo um para cada um dos quatro parâmetros: amplitude e ângulo da corrente de fase e amplitude e ângulo da tensão de fase. Todos os pós tratamentos dos dados, como agregação da amplitude por média quadrática ou agregação dos ângulos por média simples, em grupos de 3 segundos, são feitos pelo Excel.

5 ENSAIOS

5.1 ENSAIOS PRELIMINARES

Um dos objetivos desses ensaios é demonstrar que o fator de diversidade FD, referido no item 2.3 - A SOMA PONDERADA e utilizado para ponderar as amplitudes harmônicas da corrente soma, não tem razão física, sendo um recurso matemático para compensar a falta de avaliação dos efeitos dessas mesmas amplitudes harmônicas parciais de corrente na composição da tensão terminal da carga e desta tensão na composição harmônica de cada ordem da corrente resultante, o que, em geral, não é medido nos trabalhos em que se usam o FD. Ademais, a fundamentação básica desta tese reside na consideração de que as correntes harmônicas de mesma ordem, quaisquer que sejam suas amplitudes e ângulos, se somam algebricamente, desde que as componentes a somar sejam corretamente avaliadas.

5.1.1 Ensaio 1 – Determinação da amplitude da corrente soma de cargas iguais

5.1.1.1 *Ensaio 1.1 com fonte senoidal pura*

Ensaio: Determinação da amplitude da soma de cargas iguais com fonte senoidal pura

Objetivo: Medição da evolução da amplitude das componentes harmônicas da corrente de fase para grupos de $N = 1$ a 5 luminárias 2x32 W com reator marca Philips modelo EB-232A, de baixa DHTi e alto fp, alimentado com fonte senoidal pura.

Alimentação: Senoidal pura fixa gerada através do programa LabVIEW, segundo o diagrama mostrado na Figura 4.1, com $V_{1\text{ eficaz}}$ mantida em 127 Vca.

O termo luminária, utilizado neste texto, se refere a um conjunto contendo duas lâmpadas fluorescentes de 32 W cada, o sistema óptico (opcional) para o direcionamento desejado do fluxo luminoso produzido por elas, segundo o padrão desejado pelo projeto do fabricante, um reator eletrônico necessário para fornecer a tensão de alimentação das lâmpadas e promover sua partida (instantânea ou rápida, segundo o projeto do fabricante) e a estrutura mecânica para suporte e acomodação dos equipamentos relacionados acima.

Os gráficos 5.1 a 5.8 se referem à evolução das amplitudes das componentes harmônicas da corrente de fase [A] para agrupamentos crescentes de N luminárias de 1 até 5.

FIGURA 5.1 – EVOLUÇÃO DE I_1 PARA GRUPOS DE 1 a 5 LUMINÁRIAS COM FONTE SENOIDAL

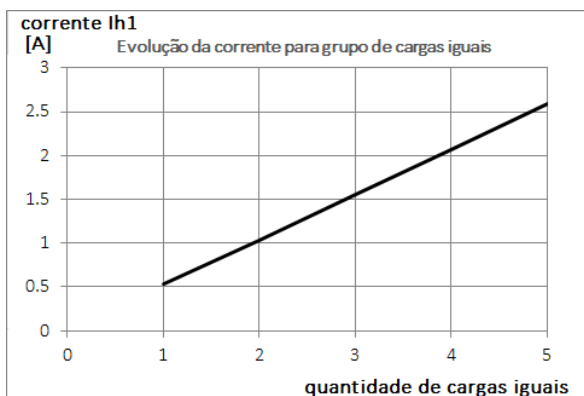


FIGURA 5.2 – EVOLUÇÃO DE I_3 PARA GRUPOS DE 1 a 5 LUMINÁRIAS COM FONTE SENOIDAL

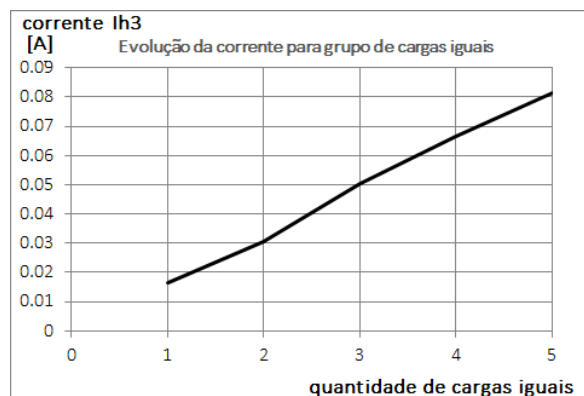


FIGURA 5.3 – EVOLUÇÃO DE I_5 PARA GRUPOS DE 1 a 5 LUMINÁRIAS COM FONTE SENOIDAL

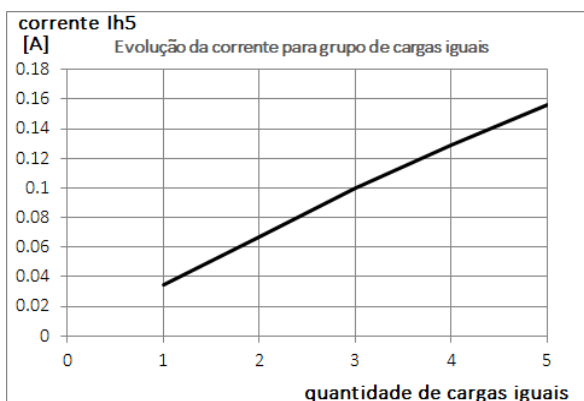


FIGURA 5.4 – EVOLUÇÃO DE I_7 PARA GRUPOS DE 1 a 5 LUMINÁRIAS COM FONTE SENOIDAL

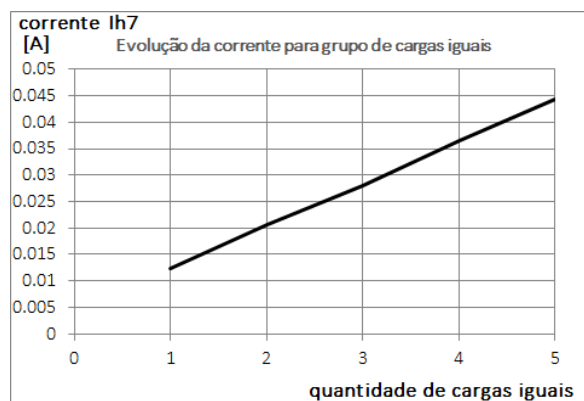


FIGURA 5.5 – EVOLUÇÃO DE I_9 PARA GRUPOS DE 1 a 5 LUMINÁRIAS COM FONTE SENOIDAL

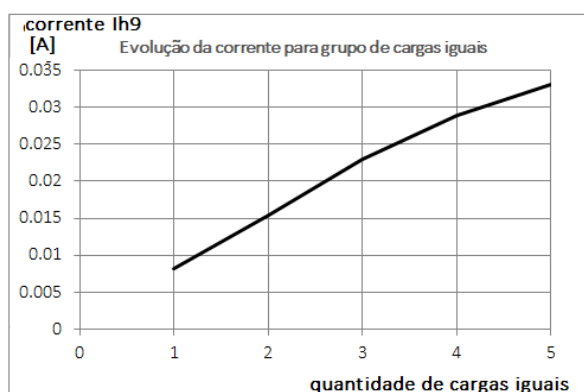


FIGURA 5.6 – EVOLUÇÃO DE I_{11} PARA GRUPOS DE 1 a 5 LUMINÁRIAS COM FONTE SENOIDAL

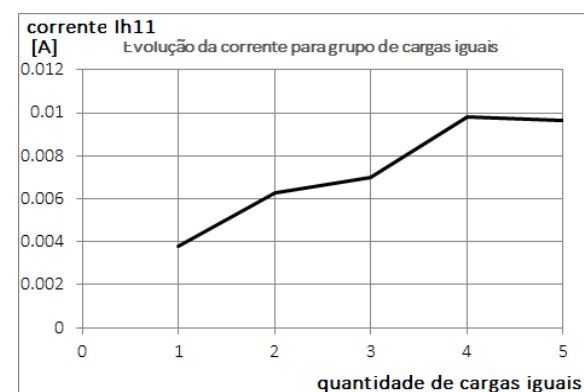


FIGURA 5.7 – EVOLUÇÃO DE I_{13} PARA GRUPOS DE 1 a 5 LUMINÁRIAS COM FONTE SENOIDAL

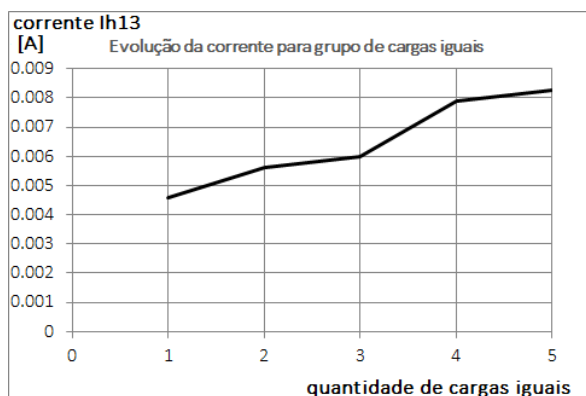


FIGURA 5.8 – EVOLUÇÃO DE I_{rms} PARA GRUPOS DE 1 a 5 LUMINÁRIAS COM FONTE SENOIDAL

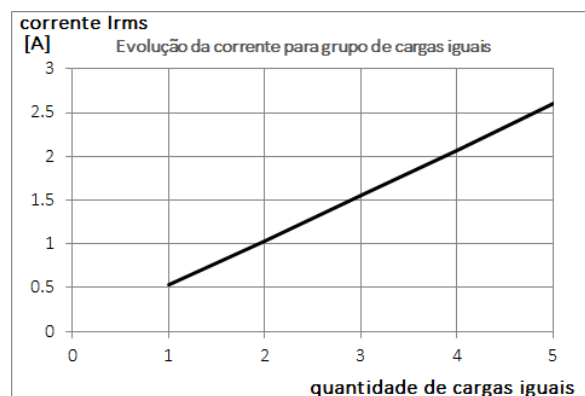


TABELA 5.1 - AMPLITUDES EFICAZES MEDIDAS [A] DAS ORDENS HARMÔNICAS ATÉ 15 PARA AS CORRENTES DA FASE DOS N REATORES PHILIPS COM FONTE SENOIDAL.

ordem	N = 1	N = 2	N = 3	N = 4	N = 5	fator 2x	fator 3x	fator 4x	fator 5x
h_1	0,531	1,031	1,551	2,061	2,593	1,94	2,92	3,88	4,88
h_3	0,017	0,030	0,051	0,067	0,081	1,83	3,04	4,01	4,90
h_5	0,035	0,067	0,100	0,129	0,156	1,92	2,89	3,73	4,50
h_7	0,012	0,021	0,028	0,037	0,044	1,66	2,27	2,94	3,57
h_9	0,008	0,015	0,023	0,029	0,033	1,88	2,80	3,54	4,04
h_{11}	0,004	0,006	0,007	0,010	0,010	1,66	1,84	2,58	2,53
h_{13}	0,005	0,006	0,006	0,008	0,008	1,22	1,30	1,72	1,80
h_{15}	0,006	0,007	0,005	0,007	0,009	1,20	0,84	1,07	1,41

Conclusão do Ensaio 1.1: Para as ordens baixas (h_1 até h_9) a evolução da amplitude dos componentes harmônicos é linear com o número de luminárias, desde que mantida a fonte estável e sem qualquer alteração na forma de onda, indicando que as correntes se somam algebricamente. Para as ordens mais altas ($h \geq 11$), os valores são dispersos e se confundem com o ruído de medição.

5.1.1.2 Ensaio 1.2 com fonte da bancada

Ensaio: Determinação da amplitude da soma de cargas iguais com fonte senoidal poluída disponível na bancada do laboratório.

Objetivo: Medição da evolução da amplitude das componentes harmônicas da corrente de fase para grupos de $N = 1$ a 5 luminárias 2x32 W com reator marca Philips modelo EB-232A, de baixa DHTi e alto fp, alimentados com fonte da bancada.

Alimentação: Senoidal poluída da tomada da bancada com V_{eficaz} sujeita às variações estocásticas da rede (127 Vca) com THDv inicial de 1,63%.

Os gráficos 5.9 a 5.15 se referem à evolução das amplitudes das componentes harmônicas da corrente de fase [A] para agrupamentos crescentes de N luminárias desde 1 até 5 unidades.

FIGURA 5.9 – EVOLUÇÃO DE I_1 PARA GRUPOS DE 1 a 5 LUMINÁRIAS COM FONTE DA BANCADA

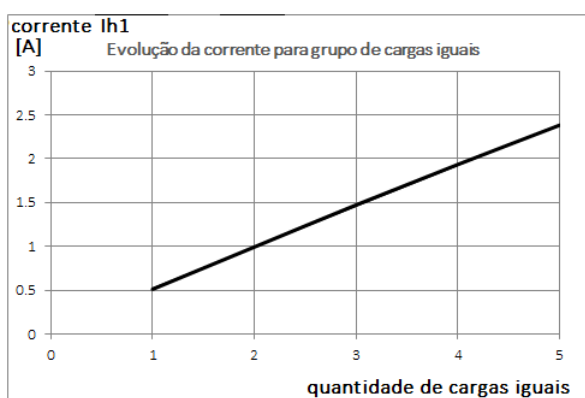


FIGURA 5.10 – EVOLUÇÃO DE I_3 PARA GRUPOS DE 1 a 5 LUMINÁRIAS COM FONTE DA BANCADA

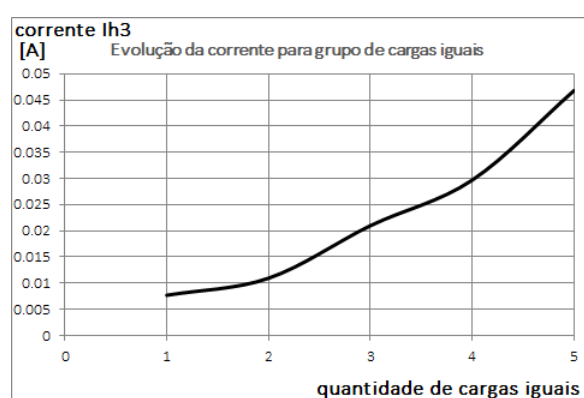


FIGURA 5.11 – EVOLUÇÃO DE I_5 PARA GRUPOS DE 1 a 5 LUMINÁRIAS COM FONTE DA BANCADA

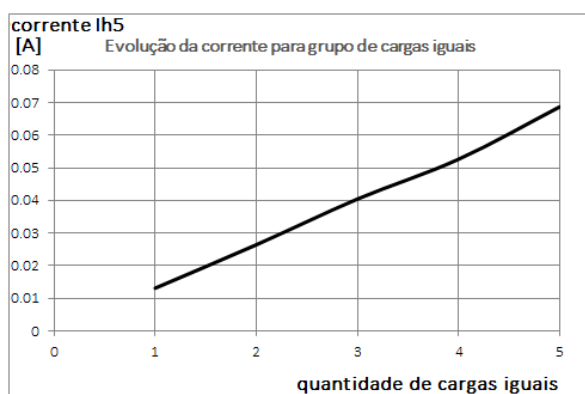


FIGURA 5.12 – EVOLUÇÃO DE I_7 PARA GRUPOS DE 1 a 5 LUMINÁRIAS COM FONTE DA BANCADA

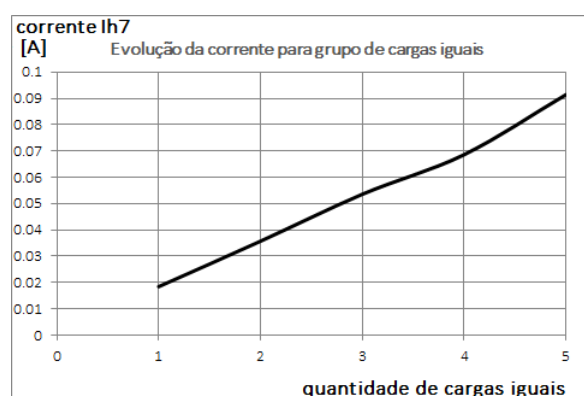


FIGURA 5.13 – EVOLUÇÃO DE I_9 PARA GRUPOS DE 1 a 5 LUMINÁRIAS COM FONTE DA BANCADA

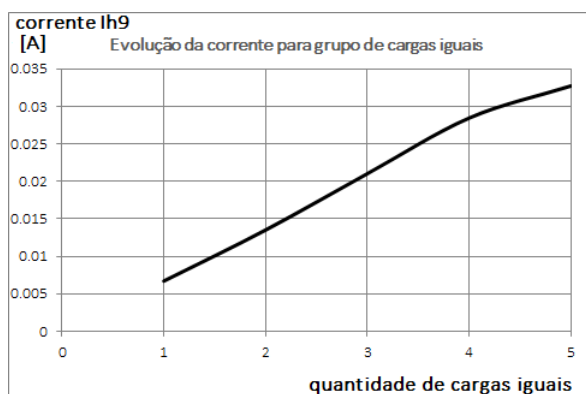


FIGURA 5.14 – EVOLUÇÃO DE I_{11} PARA GRUPOS DE 1 a 5 LUMINÁRIAS COM FONTE DA BANCADA

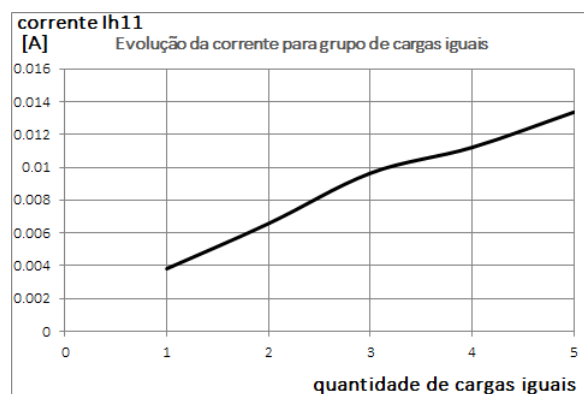


FIGURA 5.15 – EVOLUÇÃO DE I_{13} PARA GRUPOS DE 1 a 5 LUMINÁRIAS COM FONTE DA BANCADA

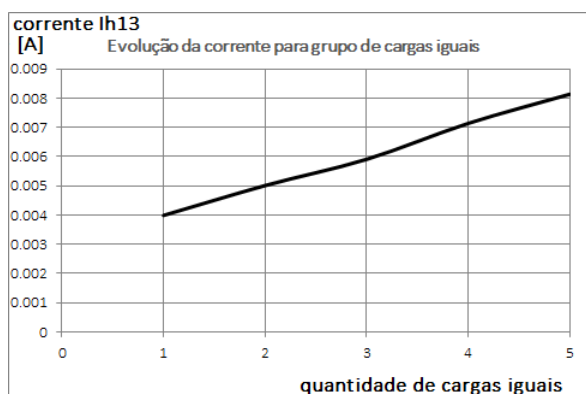


FIGURA 5.16 – EVOLUÇÃO DE I_{RMS} PARA GRUPOS DE 1 a 5 LUMINÁRIAS COM FONTE DA BANCADA

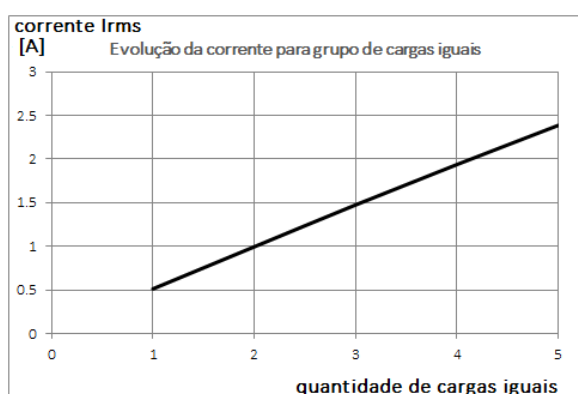


TABELA 5.2 - AMPLITUDES EFICAZES MEDIDAS [A] DAS ORDENS HARMÔNICAS ATÉ 15 PARA AS CORRENTES DA FASE DOS N REATORES PHILIPS COM FONTE DA BANCADA.

ordem	N = 1	N = 2	N = 3	N = 4	N = 5	fator 2x	fator 3x	fator 4x	fator 5x
h_1	0,511	0,994	1,473	1,936	2,384	1,94	2,88	2,79	4,67
h_3	0,008	0,011	0,016	0,030	0,047	1,42	2,08	3,86	6,09
h_5	0,013	0,026	0,040	0,053	0,069	2,02	3,09	4,02	5,25
h_7	0,018	0,036	0,054	0,069	0,091	1,94	2,91	3,72	4,96
h_9	0,007	0,014	0,021	0,028	0,033	2,01	3,13	4,24	4,88
h_{11}	0,004	0,007	0,010	0,011	0,013	1,72	2,53	2,94	3,50
h_{13}	0,004	0,005	0,007	0,007	0,008	1,26	1,73	1,79	2,04
h_{15}	0,003	0,004	0,006	0,007	0,009	1,34	1,93	2,15	2,70

Conclusão do Ensaio 1.2: Em ambos os casos, Ensaio 1.1 e Ensaio 1.2, a corrente de fase tem comportamento linear com o número de luminárias.

Assim, deduz-se que as amplitudes das componentes harmônicas se somam algebricamente, desde que as amplitudes e ângulos de cada ordem de tensão, em relação à componente fundamental, sejam mantidos constantes para cada uma das cargas, isto é, a fonte não deve mostrar alteração de amplitude ou de ângulo para qualquer componente harmônico.

A soma de correntes devidas a uma fonte de tensão não fixa, isto é, susceptível às variações da corrente de fase ou do carregamento imposto ao alimentador por outras cargas, também é realizada algebricamente. Ocorre que as correntes que se somam não são aquelas existentes anteriormente ou pré modeladas para a alimentação senoidal, mas as novas correntes modificadas pela susceptibilidade da fonte.

Quando se tem alimentação senoidal firme, significando que a fonte tem potência suficiente para alimentar a carga sem sofrer qualquer alteração em seus parâmetros, e uma única carga, o espectro da corrente pode ser medido e deve ser semelhante ao espectro comumente encontrado na literatura. Quando se tem alimentação senoidal distorcida ou poluída, o espectro da corrente será diferente desse espectro encontrado na literatura, já que este é normalmente devido à alimentação puramente senoidal.

Quando se tem alimentação passível de apresentar distorção harmônica de tensão e se conecta uma ou mais cargas eletricamente iguais em paralelo, suficiente(s) para distorcer a tensão de alimentação, o espectro harmônico da corrente da primeira carga será diferente do inicial e o espectro das demais também, a menos que o alimentador seja uma barra infinita. Com isso, as amplitudes harmônicas das correntes no condutor alimentador não serão resultantes da soma algébrica dos valores tabelados, mas a soma algébrica dos valores alterados pela tensão distorcida.

5.1.2 Ensaio 2 - Determinação da amplitude da soma de cargas diferentes

5.1.2.1 *Ensaio 2.1 com fonte senoidal pura*

Objetivo: Medição da amplitude das componentes harmônicas da corrente de fase devida a uma luminária 2x32 W equipada com reatores diferentes, sendo um de marca Philips EB-232A e outro de marca Tecpar B226A, ambos de baixa DHTi e alto fp, alimentados com fonte senoidal pura.

Alimentação: Senoidal pura fixa gerada através do programa LabVIEW, segundo o diagrama mostrado na Figura 4.1, com $V_{1 \text{ eficaz}}$ mantida em 127 Vca.

As amplitudes e ângulos das correntes de cada ordem harmônica foram medidas através de programa criado em ambiente LabVIEW, assim como as amplitudes e ângulos da tensão de alimentação. Os ângulos de V_1 , para cada caso, foram recalculados para se estabelecerem em zero grau, já que a saída do conversor D/A do LabVIEW produz as defasagens estabelecidas, mas referenciadas a um valor aleatório. Todos os ângulos medidos foram recalculados a fim de se estabelecer correspondência com V_1 em zero grau para facilitar a comparação.

TABELA 5.3 - AMPLITUDES EFICAZES PARCIAIS MEDIDAS [A] DAS ORDENS HARMÔNICAS ATÉ 15 PARA AS CORRENTES DA FASE DE UM REATOR TECPAR B226A COM FONTE SENOIDAL.

	h_1	h_3	h_5	h_7	h_9	h_{11}	h_{13}	h_{15}
Amplitude medida [A]	0,4543	0,1285	0,0836	0,0408	0,0353	0,0136	0,0177	0,0126
Ângulo de I_h [grau]	-111,1	19,8	146,6	-84,6	38,1	-178,4	-56,1	-115,8
Ângulo de V_1 [grau]	-121,9							
Âng. de I_h corrigido[grau]	10,8	25,6	36,2	48,8	55,3	82,7	88,8	-87,1
Componente I_{hx} [A]	0,4463	0,1160	0,0675	0,0269	0,0201	0,0017	0,0004	0,0006
Componente I_{hy} [A]	0,0849	0,0555	0,0494	0,0307	0,0291	0,0135	0,0177	0,0126

TABELA 5.4 - AMPLITUDES EFICAZES PARCIAIS MEDIDAS [A] DAS ORDENS HARMÔNICAS ATÉ 15 PARA AS CORRENTES DA FASE DE UM REATOR PHILIPS EB 232A COM FONTE SENOIDAL.

	h_1	h_3	h_5	h_7	h_9	h_{11}	h_{13}	h_{15}
Amplitude medida [A]	0,5061	0,0164	0,0314	0,0184	0,0142	0,0126	0,0126	0,0078
Ângulo de I_h [grau]	-78,9	129,8	-75,4	-19,2	-107,1	9,0	-142,8	127,2
Ângulo de V_1 [grau]	-90,7							
Âng. de I_h corrigido[grau]	11,7	41,8	17,9	-104,5	-11,2	-73,7	-44,1	47,1
Componente I_{hx} [A]	0,4955	0,0123	0,0298	-0,0046	0,0140	0,0035	0,0090	0,0053
Componente I_{hy} [A]	0,1030	0,0110	0,0097	-0,0178	-0,0028	-0,0121	-0,0088	0,0057

TABELA 5.5 - AMPLITUDES EFICAZES TOTAIS MEDIDAS E CALCULADAS [A] DAS ORDENS HARMÔNICAS ATÉ 15 PARA A SOMA DAS CORRENTES DE FASE DOS REATORES TECPAR B226A E PHILIPS EB 232A COM FONTE SENOIDAL.

	h_1	h_3	h_5	h_7	h_9	h_{11}	h_{13}	h_{15}
Amplitude calculada [A]	0,9603	0,1444	0,1138	0,0258	0,0431	0,0055	0,0130	0,0091
Ângulo calculado [grau]	11,3	27,4	31,2	30,1	37,7	15,1	43,5	-49,0
Amplitude medida [A]	0,9523	0,1440	0,1138	0,0314	0,0376	0,0109	0,0129	0,0086
Ângulo medido [grau]	-121,1	-11,3	89,9	-171,0	-69,2	31,4	137,8	84,1
Ângulo medido de V_1 [grau]	-132,6							
Ângulo de I_h corrigido [grau]	11,5	26,4	32,7	36,9	43,9	49,6	61,1	-87,5

Conclusão do Ensaio 2.1: Pelo ensaio 2.1 pode-se estabelecer que correntes harmônicas se somam algebricamente, desde que essas correntes não causem alteração na tensão de alimentação. A não linearidade da soma das correntes harmônicas decorre da distorção na tensão de alimentação, o que provoca o aumento ou a diminuição das amplitudes das ordens harmônicas características.

5.2 ENSAIO 3 - DETERMINAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS COMPONENTES HARMÔNICOS DA CORRENTE DE CARGA PARA DIVERSAS COMPOSIÇÕES DA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO

5.2.1 Ensaio 3.1 Tensão conjunta V_1 adicionada ao 3^o harmônico V_3

Objetivo: Avaliação do comportamento dos componentes harmônicos da corrente de fase para uma luminária 2x32 W com reator marca Philips modelo EB-232A devido a uma alimentação composta pelo fundamental V_1 adicionado ao componente 3^o harmônico V_3 .

Alimentação: Senoidal pura fixa gerada através do programa LabVIEW, segundo o diagrama mostrado na Figura 4.1, com V_1 mantido em 127 Vca adicionado ao componente de 180 Hz com 3 diferentes amplitudes relativas (5%, 10% e 15%) e ângulos de defasagem variáveis de 0 grau a 330 graus elétricos em passos de 30 graus.

Medidos os valores eficazes e ângulos de cada componente da corrente de fase. Todos os ângulos das tensões geradas são referenciados a $V_1 = 0$ grau.

Os gráficos a seguir, de 5.17 a 5.25, mostram a diferença percentual entre a amplitude do valor medido e a amplitude de referência que corresponde à respectiva ordem da corrente sob alimentação senoidal pura da Tabela 5.6. Essa medida é necessária para se avaliar se a amplitude medida é maior ou menor do que a referência. Os gráficos dos ângulos são relativos ao vetor da diferença entre o vetor medido e o vetor de referência. A medição de corrente de ordem k devida ao componente de tensão de ordem j , para $k \neq j$, é necessária para a obtenção dos componentes da matriz de admitâncias fora da diagonal principal.

TABELA 5.6 - AMPLITUDES EFICAZES MEDIDAS [A] DAS ORDENS HARMÔNICAS ATÉ 15 PARA AS CORRENTES DA FASE DE UM REATOR PHILIPS EB 232A COMO REFERÊNCIA PARA AS FIGURAS 5.17 A 5.26.

	h_1	h_3	h_5	h_7	h_9	h_{11}	h_{13}	h_{15}	Irms
Amplitude medida [A]	0,487	0,026	0,038	0,009	0,013	0,006	0,007	0,005	0,490

FIGURA 5.17 – VARIÇÃO [%] DE I_{RMS} VERSUS ÂNGULO DE V_3 . I_{RMS} ref. = 0,490 A

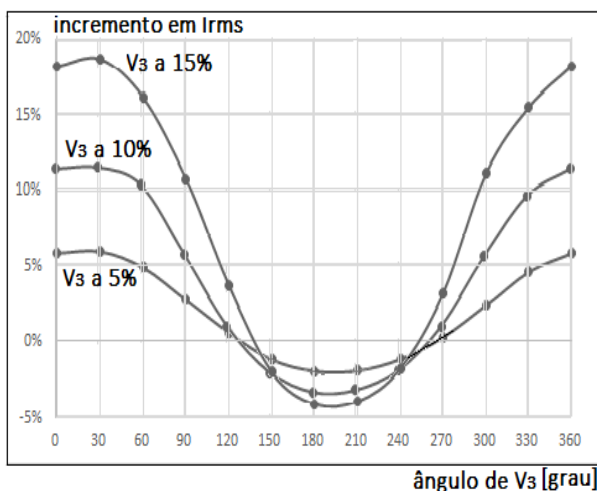


FIGURA 5.18 – VARIÇÃO [%] DE I_1 VERSUS ÂNGULO DE V_3 . I_1 ref. = 0,487 A

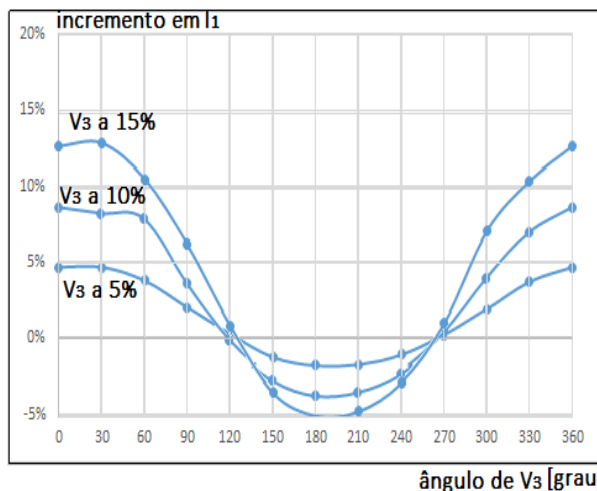


FIGURA 5.19 – VARIÇÃO [%] DE I_3 VERSUS ÂNGULO DE V_3 . I_3 ref. = 0,026 A

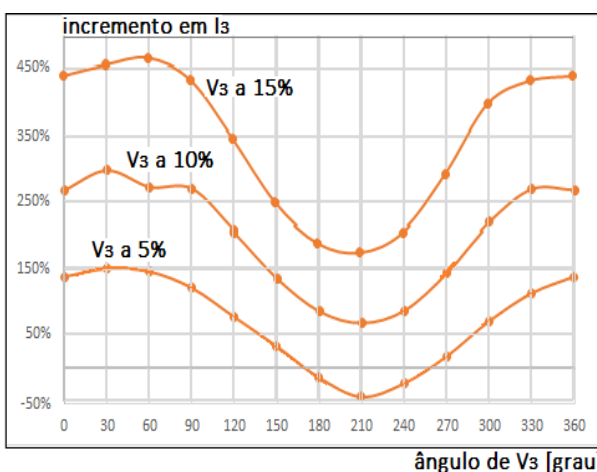


FIGURA 5.20 – VARIÇÃO [%] DE I_5 VERSUS ÂNGULO DE V_3 . I_5 ref. = 0,038 A

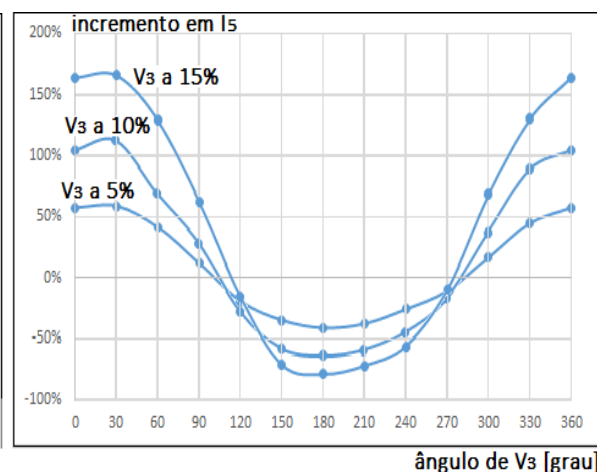


FIGURA 5.21 – VARIÇÃO [%] DE I_7 VERSUS ÂNGULO DE V_3 . I_7 ref. = 0,009 A

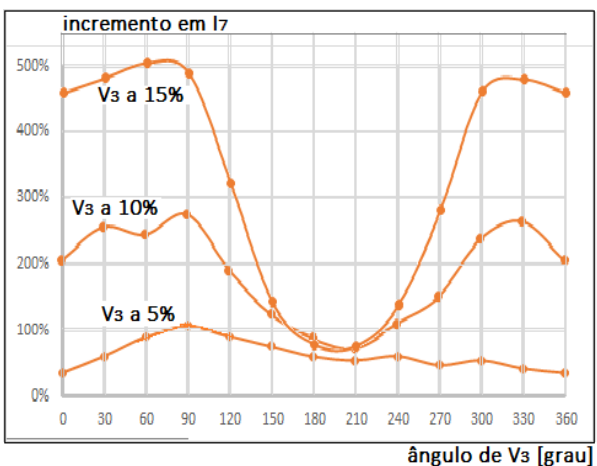


FIGURA 5.22 – VARIÇÃO [%] DE I_9 VERSUS ÂNGULO DE V_3 . I_9 ref. = 0,013 A

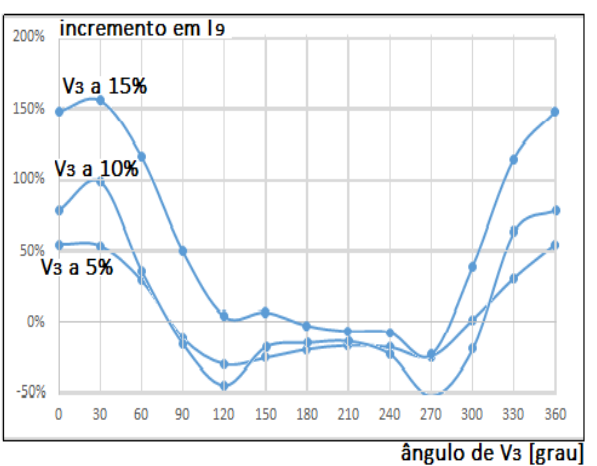


FIGURA 5.23 – VARIACÃO [%] DE I_{11} VERSUS ÂNGULO DE V_3 . I_{11} ref. = 0,006 A

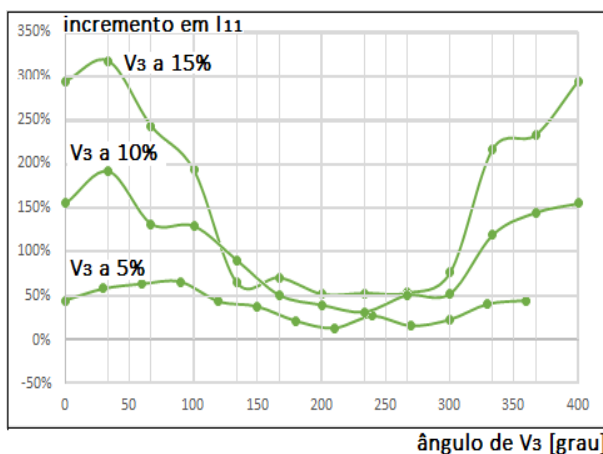


FIGURA 5.24 – VARIACÃO [%] DE I_{13} VERSUS ÂNGULO DE V_{13} . I_{13} ref. = 0,007 A

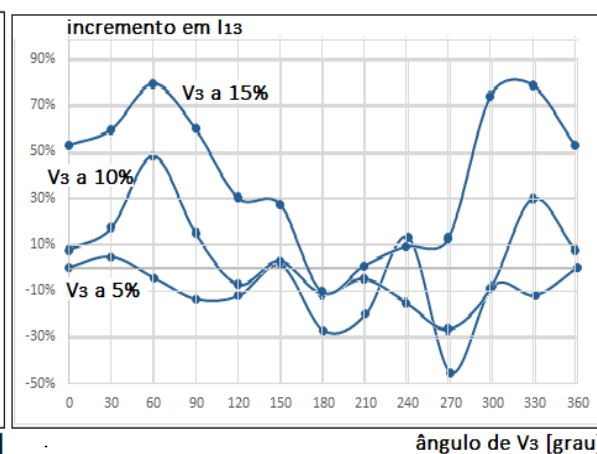


FIGURA 5.25 – VARIACÃO [%] DE I_{15} VERSUS ÂNGULO DE V_3 . I_{15} ref. = 0,005 A

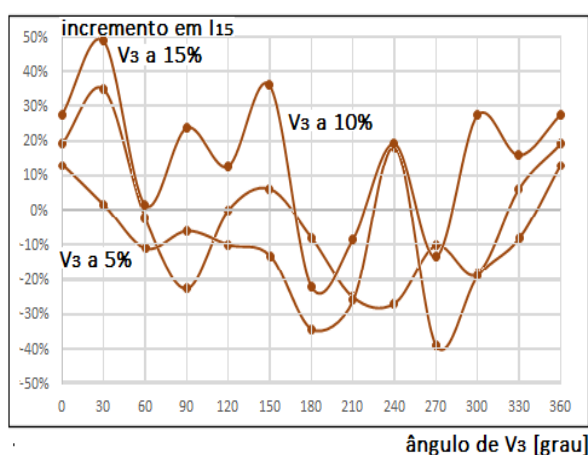
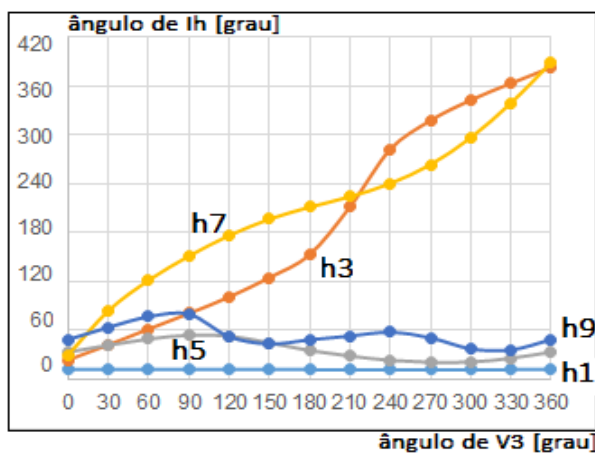


FIGURA 5.26 – VARIACÃO DOS ÂNGULOS DAS ORDENS BAIXAS VERSUS ÂNGULO DE V_3 .



5.2.2 Ensaio 3.2 Tensão conjunta V_1 adicionada ao 5^0 harmônico V_5

Objetivo: Avaliação do comportamento dos componentes harmônicos da corrente de fase para uma luminária 2x32 W com reator marca Philips modelo EB-232A devido a uma alimentação composta pelo fundamental adicionado ao componente 5^0 harmônico V_5 .

Alimentação: Senoidal pura fixa gerada através do programa LabVIEW, segundo o diagrama mostrado na Figura 4.1, com V_1 mantido em 127 Vca adicionada ao componente de 300 Hz com 3 diferentes amplitudes relativas (5%, 10% e 15%) e ângulos de defasagem variáveis de 0 grau a 330 graus elétricos em passos de 30 graus. Medidos os valores eficazes e ângulos de cada componente da corrente de fase. Todos os ângulos das tensões geradas são referenciados a $V_1 = 0$ grau.

FIGURA 5.27 – VARIACÃO [%] DE I_{RMS} VERSUS ÂNGULO DE V_5 . I_{RMS} REF. = 0,490 A

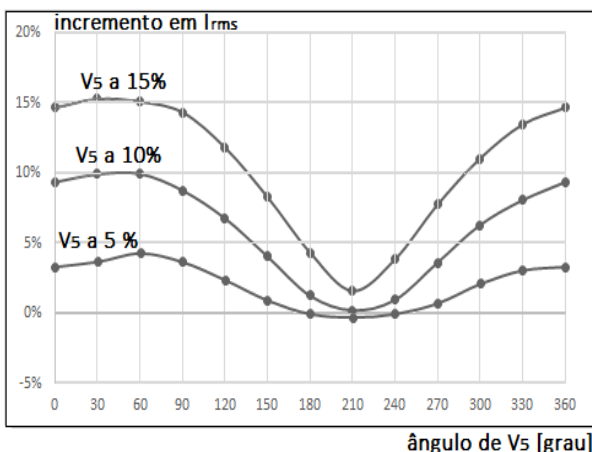


FIGURA 5.28 – VARIACÃO [%] DE I_1 VERSUS ÂNGULO DE V_5 . I_1 REF. = 0,487 A

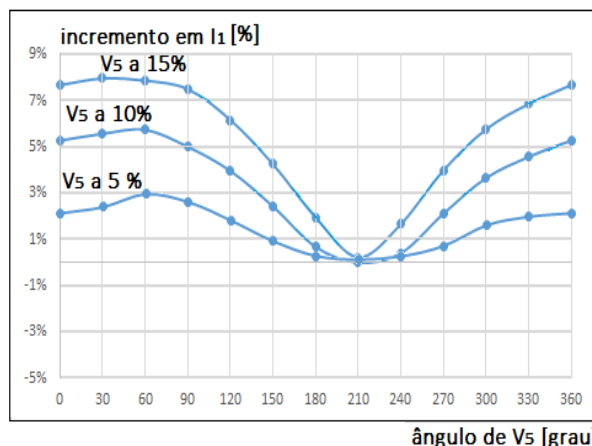


FIGURA 5.29 – VARIACÃO [%] DE I_3 VERSUS ÂNGULO DE V_5 . I_3 REF. = 0,026 A

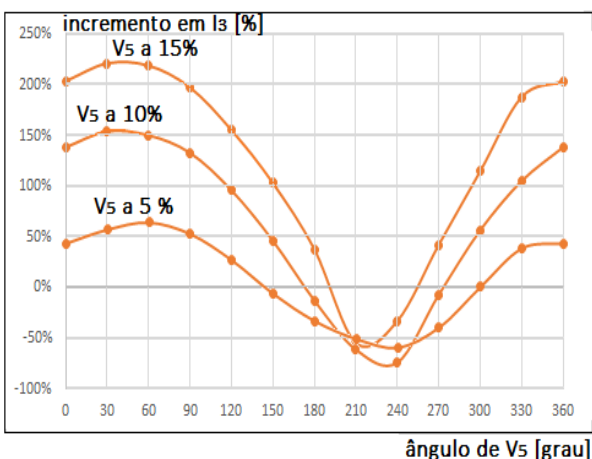


FIGURA 5.30 – VARIACÃO [%] DE I_5 VERSUS ÂNGULO DE V_5 . I_5 REF. = 0,038 A

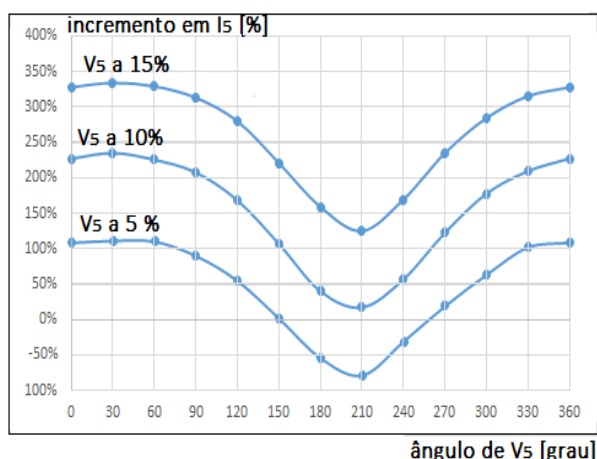


FIGURA 5.31 – VARIACÃO [%] DE I_7 VERSUS ÂNGULO DE V_5 . I_7 REF. = 0,009 A

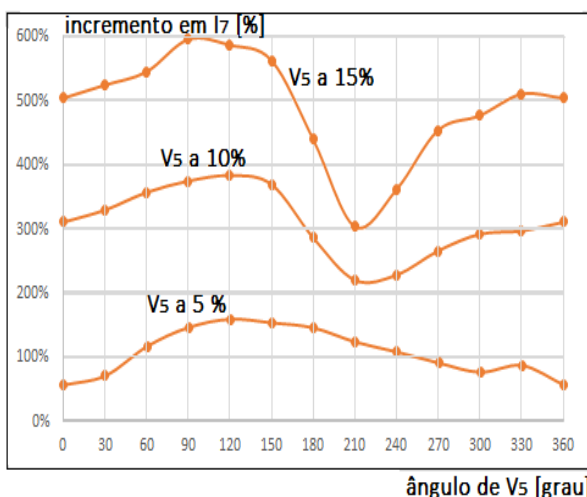


FIGURA 5.32 – VARIACÃO [%] DE I_9 VERSUS ÂNGULO DE V_5 . I_9 REF. = 0,013 A

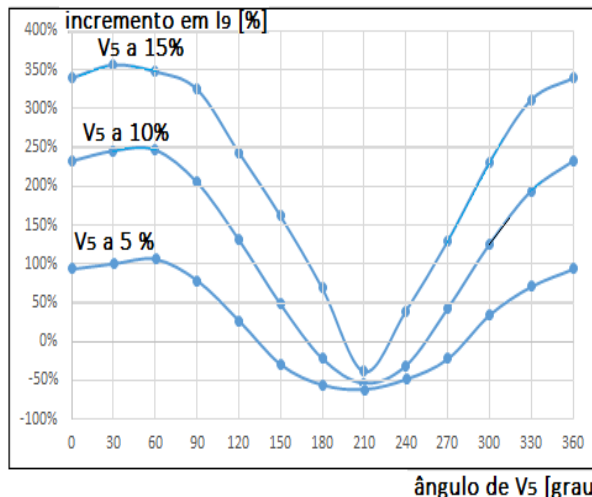


FIGURA 5.33 – VARIACÃO [%] DE I_{11} VERSUS ÂNGULO DE V_5 . I_{11} REF. = 0,006 A

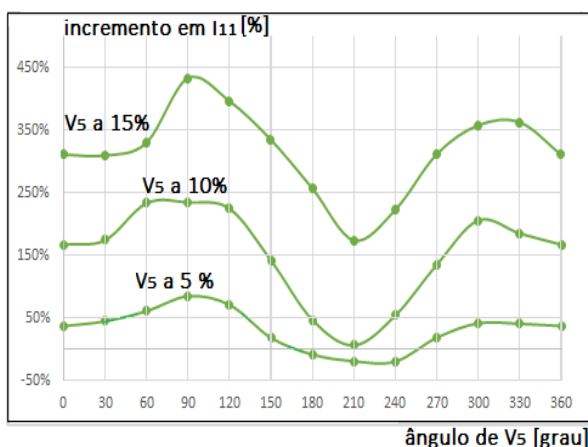


FIGURA 5.34 – VARIACÃO [%] DE I_{13} VERSUS ÂNGULO DE V_5 . I_{13} REF. = 0,007 A

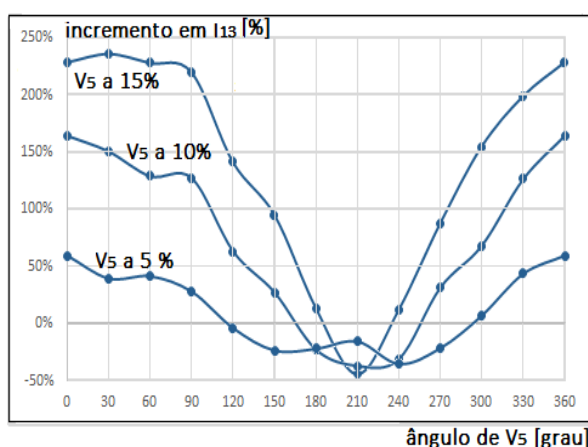


FIGURA 5.35 – VARIACÃO [%] DE I_{15} VERSUS ÂNGULO DE V_5 . I_{15} ref. = 0,005 A

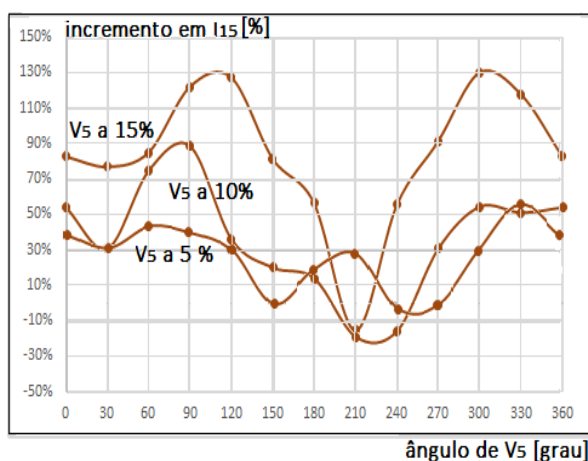
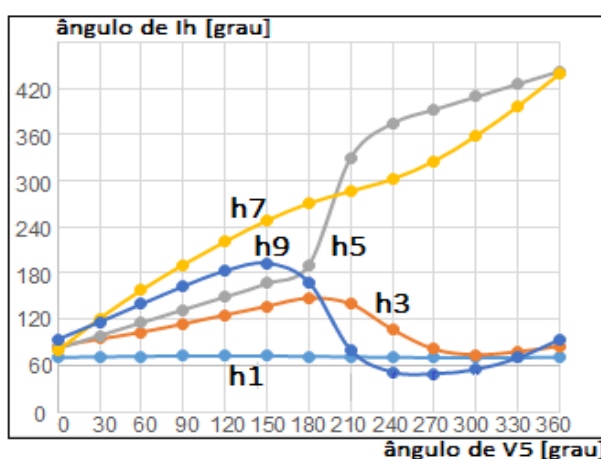


FIGURA 5.36 – VARIACÃO [%] DOS ÂNGULOS DAS ORDENS BAIXAS VERSUS ÂNGULO DA V_5



5.2.3 Ensaio 3.3 – Tensão conjunta V_1 adicionada ao 7^o harmônico V_7

Objetivo: Avaliação do comportamento dos componentes harmônicos da corrente de fase para uma luminária 2x32 W com reator marca Philips modelo EB-232A devido a uma alimentação composta pelo fundamental adicionado ao componente 7^o harmônico V_7 .

Alimentação: Senoidal pura fixa gerada através do programa LabVIEW, segundo o diagrama mostrado na Figura 4.1, com V_1 mantido em 127 Vca adicionado ao componente de 420 Hz com 3 diferentes amplitudes relativas (5%, 10% e 15%) e ângulos de defasagem variáveis de 0 grau a 330 graus elétricos em passos de 30 graus. Medidos os valores eficazes e ângulos de cada componente da corrente de fase. Todos os ângulos das tensões geradas são referenciados a $V_1 = 0$ grau.

FIGURA 5.37 – VARIACÃO [%] DE I_{RMS} VERSUS ÂNGULO DE V_7 . I_{RMS} REF. = 0,490 A

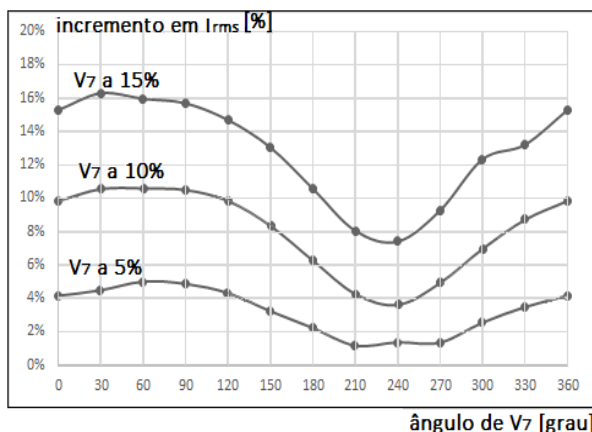


FIGURA 5.38 – VARIACÃO [%] DE I_1 VERSUS ÂNGULO DE V_7 . I_1 REF. = 0,487 A

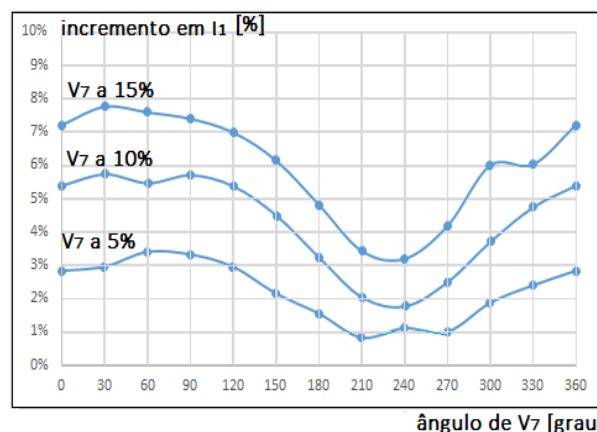


FIGURA 5.39 – VARIACÃO [%] DE I_3 VERSUS ÂNGULO DE V_7 . I_3 REF. = 0,026 A

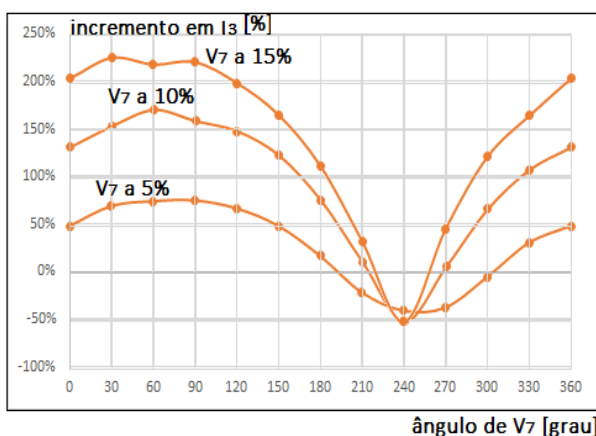


FIGURA 5.40 – VARIACÃO [%] DE I_5 VERSUS ÂNGULO DE V_7 . I_5 REF. = 0,038 A

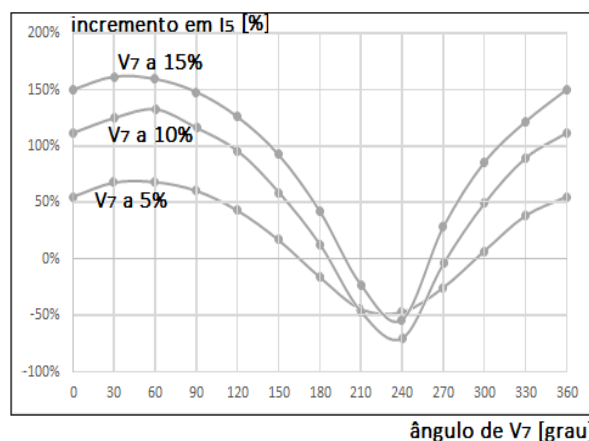


FIGURA 5.41 – VARIACÃO [%] DE I_7 VERSUS ÂNGULO DE V_7 . I_7 REF. = 0,009 A

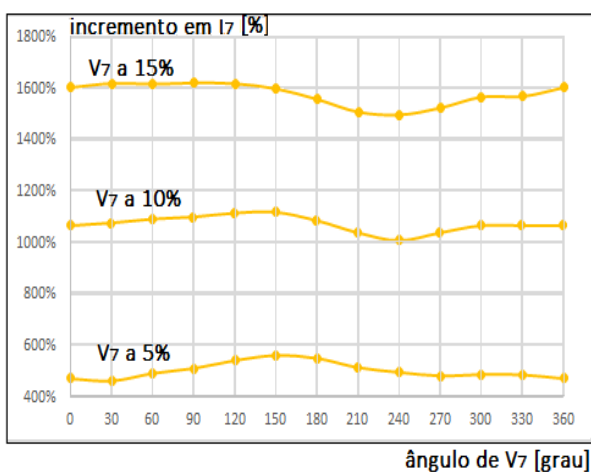


FIGURA 5.42 – VARIACÃO [%] DE I_9 VERSUS ÂNGULO DE V_7 . I_9 REF. = 0,013 A

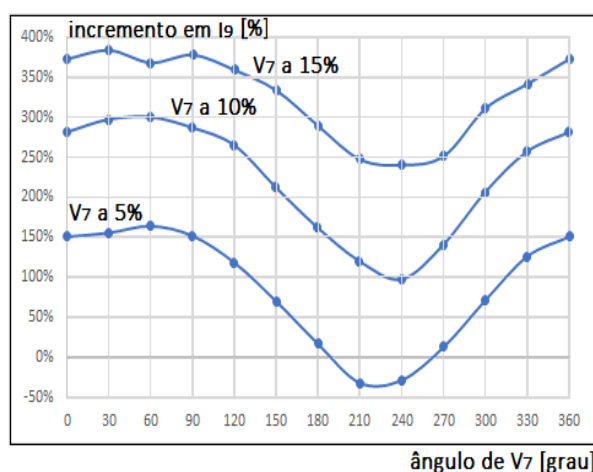


FIGURA 5.43 – VARIAÇÃO [%] DE I_{11} VERSUS ÂNGULO DE V_7 . I_{11} REF. = 0,006 A

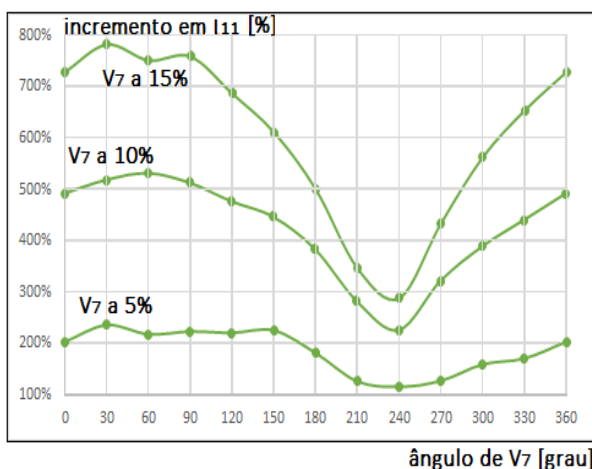


FIGURA 5.44 – VARIAÇÃO [%] DE I_{13} VERSUS ÂNGULO DE V_7 . I_{13} REF. = 0,007 A

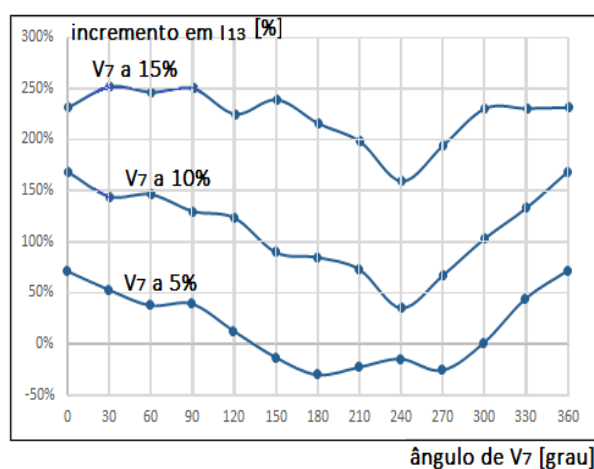


FIGURA 5.45 – VARIAÇÃO [%] DE I_{15} VERSUS ÂNGULO DE V_7 . I_{15} ref. = 0,005 A

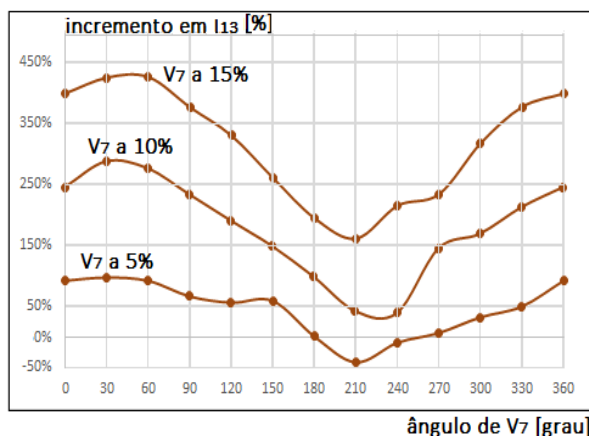
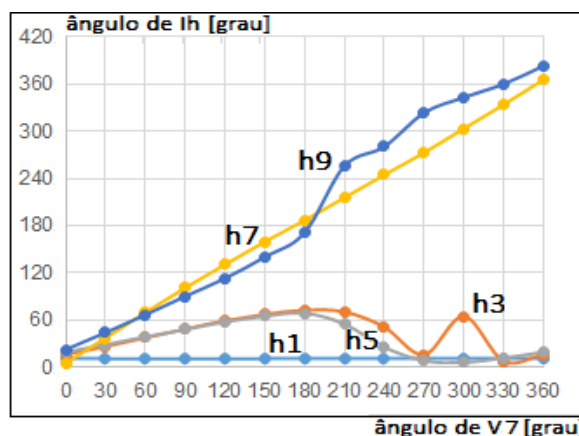


FIGURA 5.46 – VARIAÇÃO [%] DOS ÂNGULOS DAS ORDENS BAIXAS VERSUS ÂNGULO DE V_7



5.2.4 Ensaio 3.4 Teste de tensão a 3 componentes $V_1 + V_3 + V_5$ para avaliação da resposta ao componente V_5 apenas

Objetivo: Avaliação do comportamento dos componentes harmônicos da corrente de fase para uma luminária 2x32 W com reator marca Philips modelo EB-232A devido a um único componente harmônico da tensão V_5 .

Alimentação: TESTE 1 – Medição das correntes harmônicas devidas à alimentação senoidal pura fixa gerada através do programa LabVIEW, segundo o diagrama mostrado na Figura 4.1, com V_1 mantido em 127 Vca adicionado ao componente de 180 Hz com amplitude relativa de 10% com ângulo de defasagem fixo em 0 grau elétrico adicionada ao componente

de 300 Hz com amplitude relativa de 10% e com ângulo de defasagem variável de 0 grau a 330 graus elétricos em passos de 30 graus.

TESTE 2 - Medição das correntes harmônicas devidas à alimentação senoidal pura gerada através do programa LabVIEW, segundo o diagrama mostrado na Figura 4.1, com V_1 mantido em 127 Vca adicionado ao componente de 180 Hz com amplitude relativa de 10% e com ângulo de defasagem fixo em 0 grau elétrico.

TESTE 3 - Medição das correntes harmônicas devidas à alimentação senoidal pura gerada através do programa LabVIEW, segundo o diagrama mostrado na Figura 4.1, com V_1 mantido em 127 Vca adicionada ao componente de 300 Hz com amplitude relativa de 10% e com ângulo de defasagem variável de 0 grau a 330 graus elétricos em passos de 30 graus.

TESTE 4 - Medição das correntes harmônicas devidas à alimentação senoidal pura gerada através do programa LabVIEW, segundo o diagrama mostrado na Figura 4.1, com V_1 mantido em 127 Vca e cujo espectro harmônico está mostrado na Tabela 5.4.

Foram medidos os valores eficazes e ângulos de cada componente harmônico da corrente de fase. Todos os ângulos das tensões geradas são referenciadas a $V_1 = 0$ grau. Os gráficos das Figuras 5.47 e 5.48 adiante, mostram a diferença entre os valores medidos de cada ordem harmônica da corrente, calculada subtraindo-se seus componentes retangulares e transformados em Ampère eficaz. Na Figura 5.47 é mostrada a diferença dos valores medidos do Teste 1 e do Teste 2, dos quais o componente de tensão diferente é o de ordem 5. Na Figura 5.48 é mostrada a diferença dos valores medidos do Teste 3 e do Teste 4, este último que é composto apenas pelo componente fundamental, dos quais o componente de tensão diferente é também de ordem 5. O objetivo é isolar o 5^o harmônico da tensão e, caso os dois gráficos sejam similares, será possível avaliar o efeito isolado desse componente. Como visto, os gráficos não são parecidos, o que indica que, neste caso, o componente harmônico de tensão tem efeito sobre a forma de onda da corrente apenas em composição com os demais componentes.

FIGURA 5.47 – AMPLITUDE [A] DAS DIVERSAS ORDENS HARMÔNICAS DA CORRENTE REFERENTE À DIFERENÇA (TESTE 1 –TESTE 2) VERSUS ÂNGULO DE V_5

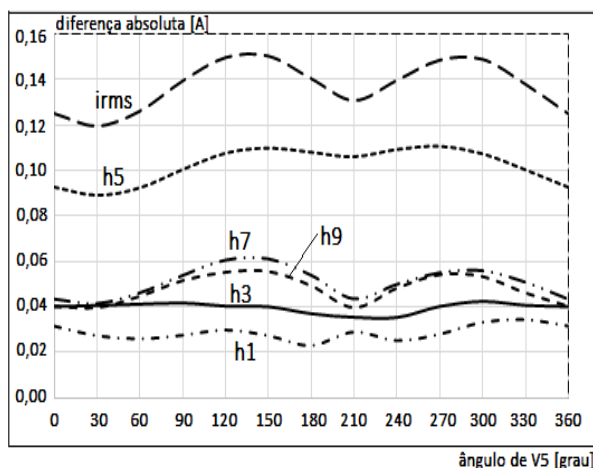
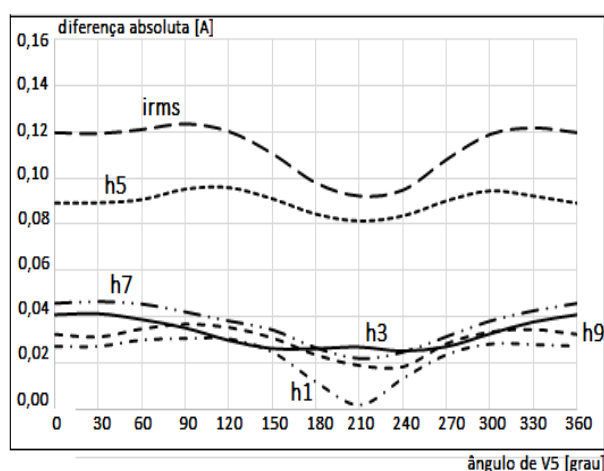


FIGURA 5.48 – AMPLITUDE [A] DAS DIVERSAS ORDENS HARMÔNICAS DA CORRENTE REFERENTE À DIFERENÇA (TESTE 3 –TESTE 4) VERSUS ÂNGULO DE V_5



Os gráficos das Figuras 5.49 e 5.50, adiante, mostram a diferença de amplitude entre os valores medidos de cada ordem harmônica da corrente, calculada subtraindo-se apenas os valores eficazes, sem a consideração dos ângulos. O objetivo é verificar se apenas o 5^o harmônico da tensão é capaz de produzir alteração na corrente de fase de um reator eletrônico a partir do espectro produzido pela tensão composta $V_1 + V_3$. Nota-se, mesmo que a tensão eficaz seja maior, devido ao 5^o harmônico, algumas ordens harmônicas da corrente mostram variação negativa, ou seja, são menores do que a referência.

FIGURA 5.49 – VARIAÇÃO ABSOLUTA DA AMPLITUDE [A] DAS DIVERSAS ORDENS DA CORRENTE HARMÔNICA DEVIDA À DIFERENÇA (TESTE 1 – TESTE 2) VERSUS ÂNGULO DE V_5 .

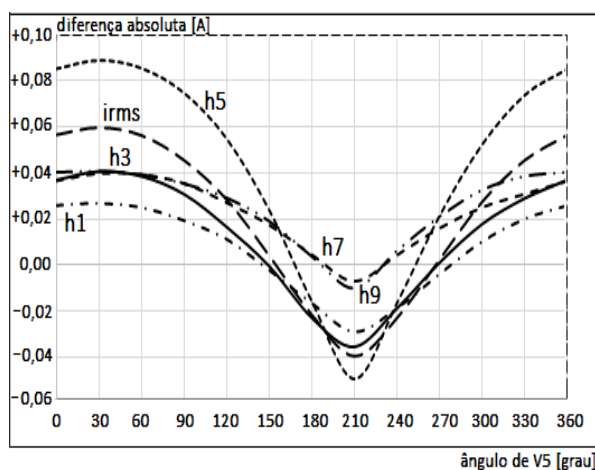
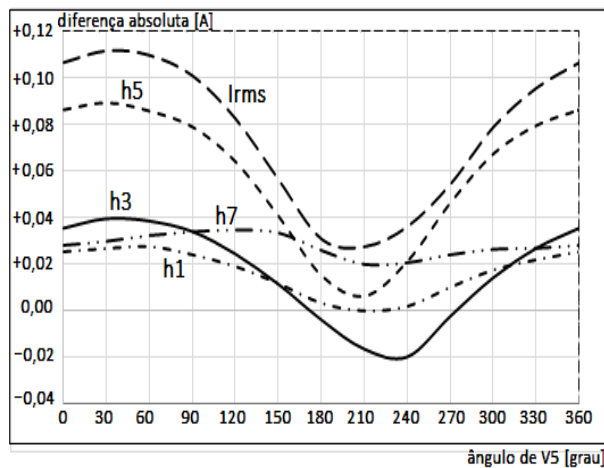


FIGURA 5.50 – VARIAÇÃO ABSOLUTA DA AMPLITUDE [A] DAS DIVERSAS ORDENS DA CORRENTE HARMÔNICA DEVIDA À DIFERENÇA (TESTE 3 – TESTE 4) VERSUS ÂNGULO DE V_5 .



As Figuras 5.51 e 5.52 mostram a variação relativa das amplitudes das ordens harmônicas da corrente devida apenas ao 5^o harmônico da tensão, obtida da diferença relativa ao (teste 1 – teste 2) e ao (teste 3 – teste 4) em relação ao espectro harmônico oriundo da alimentação senoidal pura (teste 4), este indicado na Tabela 5.4. Estes gráficos tentam estabelecer o impacto apenas do 5^o harmônico da tensão, mas mostram resultados muito diferentes, especialmente por causa da forte redução percentual das amplitudes com a tensão harmônica de quinta ordem V_5 .

FIGURA 5.51 – VARIACÃO RELATIVA DA AMPLITUDE [%] DAS DIVERSAS ORDENS DA CORRENTE HARMÔNICA DEVIDA À DIFERENÇA (TESTE 1 – TESTE 2) VERSUS ÂNGULO DE V_5 .

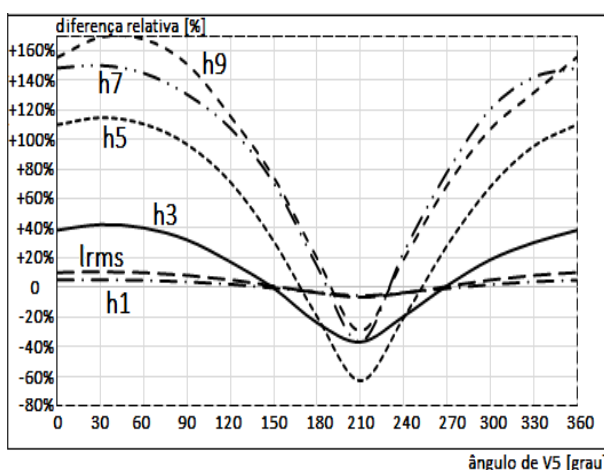
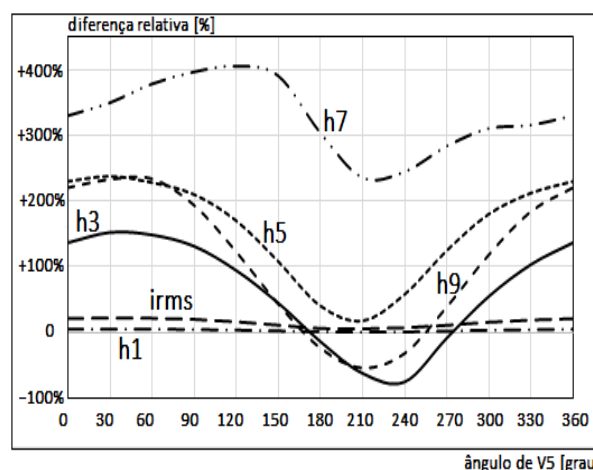


FIGURA 5.52 – VARIACÃO RELATIVA DA AMPLITUDE [%] DAS DIVERSAS ORDENS DA CORRENTE HARMÔNICA DEVIDA À DIFERENÇA (TESTE 3 – TESTE 4) VERSUS ÂNGULO DE V_5 .



As Figuras 5.53 e 5.54 mostram a variação absoluta do ângulo das ordens harmônicas da corrente devida apenas ao 5^o harmônico da tensão, obtida da diferença (teste 1 – teste 2) e (teste 3 – teste 4). Estes dois gráficos são bastante parecidos e indicam que os ângulos das diferenças entre as componentes harmônicas da corrente respondem quase linearmente ao ângulo do componente de 5^o harmônico da tensão. Nota-se que esses gráficos se referem ao vetor diferença, razão pela qual o ângulo da componente fundamental da corrente cresce linearmente com o ângulo de V_5 , apesar do fato que nenhum componente harmônico de tensão ter influência sobre esse ângulo.

FIGURA 5.53 – ÂNGULO [GRAU] DAS DIVERSAS ORDENS DA CORRENTE HARMÔNICA DEVIDA À DIFERENÇA (TESTE 1 – TESTE 2). VERSUS ÂNGULO DE V_5 .

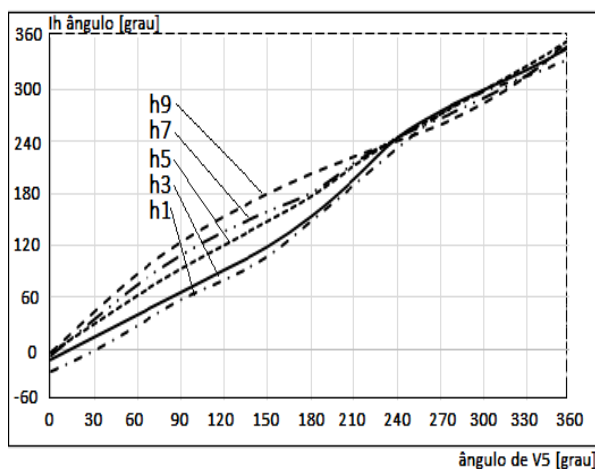
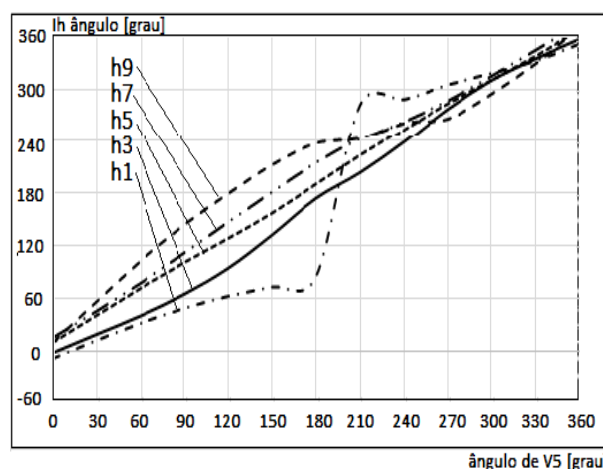


FIGURA 5.54 – ÂNGULO [GRAU] DAS DIVERSAS ORDENS DA CORRENTE HARMÔNICA DEVIDA À DIFERENÇA (TESTE 1 – TESTE 2). VERSUS ÂNGULO DE V_5 .



5.3 RESULTADOS

Pelos resultados das medições mostradas neste capítulo, pode-se observar, para a carga não linear avaliada, que:

1 – As correntes harmônicas que são produzidas por duas CNL, iguais ou não, são somadas normalmente em módulo e ângulo para compor a corrente total no alimentador. As componentes harmônicas das correntes que se agregam para formar a corrente resultante, neste caso, não são as componentes da corrente inicial devida a uma carga única e somadas algebricamente às componentes da corrente da segunda carga igual que será adicionada, mas as novas componentes harmônicas devidas à distorção da tensão terminal comum causada pelo conjunto delas. Essas correntes que se somam não correspondem ao espectro original da primeira carga colocada no circuito e nem ao espectro previamente medido da segunda carga. Cada carga inserida no circuito altera a composição harmônica da tensão terminal de todo o conjunto de cargas e essa nova tensão altera todas as componentes harmônicas das correntes de todas as cargas conectadas no mesmo ponto. Considerando a potência e a impedância do sistema elétrico, quanto maior a potência da nova carga inserida, maior a alteração que se dará na tensão terminal. Para uma carga não linear de baixa potência comparada à potência do sistema, o efeito na tensão é, quase sempre, imperceptível. As componentes harmônicas das correntes podem aumentar ou diminuir, em módulo e ângulo, a cada inclusão de carga.

O raciocínio acima não é aplicável à componente fundamental da corrente. Se a fonte puder alimentar a(s) carga(s) próximo de seu ponto nominal de operação, a cada inclusão de nova carga, a componente fundamental pré medida desta se soma à existente, não havendo alteração por causa da mudança na composição da tensão terminal.

2 – Os ângulos dos componentes harmônicos da tensão terminal alteram os ângulos das componentes harmônicas da corrente em proporção linear, em especial a componente da ordem harmônica igual à ordem do componente da tensão. Esta observação somente se aplica, no caso das medições realizadas, para inclusão de um único componente harmônico de tensão.

3 – As amplitudes dos componentes harmônicos da tensão terminal alteram as amplitudes das componentes harmônicas da corrente, com maior ênfase quando a componente da ordem harmônica da corrente é igual à ordem do componente da tensão.

4 – Quanto maior a amplitude do componente harmônico da tensão terminal, relativamente à ordem fundamental, maior a variação percentual da corrente de fase, independentemente da sua ordem.

5 – Se a tensão terminal do circuito que alimenta as cargas não lineares possuir componentes harmônicos, ou seja, não for senoidal puro, o ângulo de cada um desses componentes tem mais peso relativo do que sua amplitude na alteração do módulo das componentes harmônicas da corrente de cada carga.

6 – Se a tensão terminal apresentar diversos componentes harmônicos, não é possível determinar a influência isolada de cada um deles no espectro harmônico da corrente do alimentador. Cada componente harmônico da tensão não produz, por si só, resultados observáveis, uma vez que não se pode, em geral, alimentar a carga com tensão de frequência múltipla da fundamental para a qual foi projetada, especialmente por causa da resposta em frequência dos diodos retificadores e do transformador que é projetado para operar em frequência industrial nos conversores ca-cc das cargas não lineares.

7 – Foi feito um teste composto para se tentar inferir o efeito isolado de um componente harmônico de tensão e o resultado seria obtido das correntes medidas devidas a duas composições diferentes das quais a diferença entre elas seria apenas devido ao componente de

harmônico. O teste produziu resultados inconsistentes. O objetivo seria estimar a influência apenas do 3º harmônico da tensão, mas não foi possível inferir o efeito isolado desse componente, através do cálculo de diferença entre os dados medidos e os dados mostrados no item 5.2.2 - Ensaio 3.2 - Tensão composta por V_1 adicionada ao 5º harmônico V_5 . A causa da inconsistência reside no fato de que V_5 altera I_{h3} , mesmo com V_3 fixo.

8 – O componente fundamental da tensão terminal produz corrente de fase com componentes múltiplos inteiros dessa frequência fundamental. O mesmo não ocorre para os componentes harmônicos da tensão terminal, se houver. Nesse caso, todas as ordens harmônicas presentes na tensão terminal produzem, em menor ou maior grau, alteração em todas as amplitudes e em todos os ângulos de todas as ordens da corrente, acima e abaixo.

9 – Das observações 6, 7 e 8 acima, deduz-se que nenhuma componente harmônica da tensão pode ser vista isoladamente como responsável por produzir um determinado efeito em qualquer componente da corrente. Os componentes da tensão têm influência relacionada ao conjunto ou à forma de onda criada pela composição conjunta de todas as ordens presentes.

10 – Para o estudo de penetração harmônica e outros, o tradicional método de modelagem de uma carga não linear por várias fontes de correntes harmônicas fixas deve ser substituído por outro que contenha várias fontes com as mesmas ordens anteriores, mas com as amplitudes e ângulos dependentes da tensão de alimentação, isto é, das amplitudes das tensões harmônicas e dos seus respectivos ângulos.

11 – O teste de adição de apenas um único componente à fundamental de tensão para análise do ângulo das componentes harmônicas de corrente mostra que o ângulo da componente de ordem 1 é invariável em qualquer caso e é o mesmo para alimentação senoidal. A corrente de 3º harmônico tem resposta linear com inclinação um pouco inferior a 0,5 a partir do zero até perto de 180 graus quando volta a cair até zero novamente. Esse comportamento somente será diferente se a composição for com o 3º harmônico da tensão quando esta componente harmônica da corrente terá ângulo proporcional. Comportamento igual se observa para o 5º harmônico. O 7º harmônico de corrente é o único que sempre aumenta com o harmônico de tensão.

12 – Em um sistema elétrico ideal isento de componentes harmônicos na tensão, a corrente de fase devida a uma única carga não linear é composta apenas pelo espectro harmônico característico da carga em questão, o que pode ser obtido através de medição ou de uma fonte confiável da literatura. Em um sistema elétrico cuja tensão terminal é passível de apresentar outras ordens harmônicas além da fundamental, a corrente de fase devida a uma única carga não linear poderia ser obtida, a partir do seu espectro característico, através de várias iterações, devido à propriedade observada no item 1, cada uma delas correspondente ao tempo de propagação da corrente desde a carga até a fonte. Uma vez determinados os componentes harmônicos de tensão presentes no terminal da carga, qualquer um dos métodos iterativos mais comuns pode corrigir o espectro das correntes geradas e nova iteração dessa corrente com o sistema atualiza a tensão terminal, até a convergência. Porém, a correção dos valores das fontes de corrente controladas por tensão por correspondência entre esses dois parâmetros pelo método analítico ainda não é facilmente equacionada, pelo exposto no item 7 deste parágrafo 5.3 - RESULTADOS.

6 A SOMA DE CORRENTES HARMÔNICAS

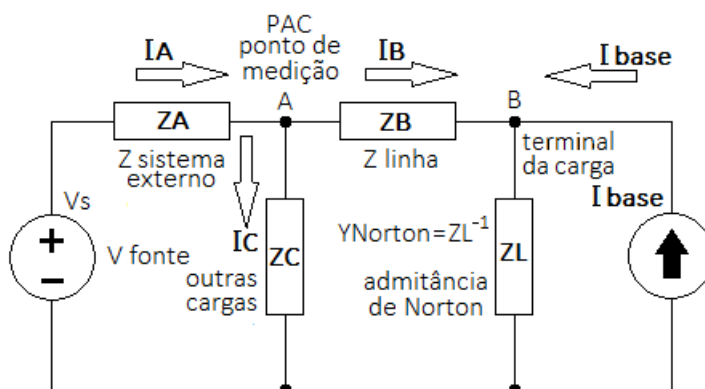
6.1 INTRODUÇÃO

O modelo apresentado de geração de correntes harmônicas é capaz de avaliar, de forma completa, o espectro da corrente gerada por uma carga não linear (CNL) inserida em um sistema elétrico não ideal. De posse da tensão terminal inicial, que deve ser conhecida, o programa de interação entre a corrente gerada e a tensão terminal da carga utiliza o modelo de modo iterativo. A tensão terminal inicial é a tensão presente nos terminais da carga em vazio e com as demais cargas do sistema elétrico a jusante do PAC conectadas e em operação normal. Considerando que a fonte externa se mantenha estável e que nenhum outro elemento do circuito tenha influência na tensão terminal, apenas por simplificação da metodologia de cálculos, é possível estimar o espectro harmônico da tensão terminal e da corrente final da carga após interações sucessivas com o sistema. Dessa forma, o mesmo método permite avaliar, também, a corrente harmônica devida a um conjunto de cargas não lineares iguais ou mesmo diferentes, desde que devidamente modeladas.

6.2 A ATUAÇÃO DA ADMITÂNCIA DE NORTON

O modelo da Figura 6.1, a seguir, é usado para mostrar como se comportam a corrente e a tensão da CNL. Assume-se que a tensão terminal da carga é, originariamente, exatamente igual a tensão que foi utilizada para modelar a matriz Y_{Norton} e que, para esta carga em particular, esta tenha sido, por simplificação, puramente senoidal.

FIGURA 6.1 – MODELO DA CARGA NÃO LINEAR NO SISTEMA ELÉTRICO



O procedimento para a interação sistema-carga é mostrado a seguir:

1- Como exemplo, supõe-se que o sistema elétrico não é ideal e que a tensão no ponto A é exatamente V_{base} . Assim que a CNL é ligada essa tensão é transferida a ela que produz I_{base} .

2- Como a tensão terminal da CNL é V_{base} , a corrente drenada pela admitância de Norton é zero e $I_B = -I_{base}$, em (6.4). Uma vez que V_{base} foi usada para modelar Y_{Norton} , qualquer outra tensão irá produzir $I_Y \neq$ zero e que terá sentido positivo ou negativo.

3- A corrente I_B é injetada no sistema elétrico e causa a contaminação de V_A pelos componentes harmônicos de mesma ordem de I_{base} .

4- A tensão terminal V_B da CNL sofre uma variação ΔV_B composta por todos os harmônicos ímpares (em geral) devidos à corrente I_B .

5- V_B é agora composta por duas porções: A tensão V_{base} que sempre existe e responsável pela geração de I_{base} e ΔV_B que é a nova parcela produzida por I_B e que não existia antes. Essa parcela ΔV_B da tensão produz a corrente através da admitância Y_{Norton} , em (6.3). A tensão ΔV_B pode também ser obtida em (6.2a).

6- A corrente I_B altera I_A que, agora, é maior e mais poluída. Com isso, V_B será um pouco menor e distorcida. Com V_B mais distorcida aumenta a parcela que circula por Y_{Norton} e a corrente I_B injetada no sistema é reduzida pela porção que circula por Y_{Norton} (6.4).

7- Essa nova corrente I_B modifica I_A e o sistema irá encontrar outro estado de operação, e assim até a convergência.

$$\Delta V_B = Z_{sistema} I_{base} \quad (6.1)$$

$$\Delta V_B = -Z_{sistema} I_B = V_B - V_{base} \quad (6.2)$$

$$I_{Y_{Norton}} = Y_{Norton} (V_B - V_{base}) \quad (6.3)$$

$$I_B = I_{Y_{Norton}} - I_{base} \quad (6.4)$$

Se V_{base} for obtida de uma alimentação puramente senoidal, ou seja, $V_I = V_{base}$, e o componente fundamental V_I de qualquer tensão composta V_B for igual ao componente V_I de V_{base} , a corrente I_{base} será gerada pela CNL com suas amplitudes e ângulos exatamente como anteriormente. Nesse caso, a corrente I_B devida aos componentes harmônicos de V_B será

compensada pela corrente que circula Y_{Norton} . As amplitudes das diversas ordens harmônicas serão obtidas da primeira coluna da matriz Y_{Norton} . A corrente I_{base} não é possui espectro harmônico fixo, mas depende da tensão V_{base} usada para sua geração.

Então, pelas equações (6.3) e (6.4), para uma CNL típica, como o reator eletrônico para iluminação fluorescente, quanto mais distorcida a sua tensão terminal, maior a porção de corrente desviada por Y_{Norton} e a corrente de fase I_B seguirá as premissas básicas da teoria de circuitos. Qualquer componente adicional de tensão causa alteração das amplitudes das correntes harmônicas em todas as ordens abaixo e acima da ordem deste. Duas partes sempre formam a corrente de fase que será a única mensurável: a corrente representada por seu espectro harmônico característico e a parcela injetada ou drenada por Y_{Norton} . Essas duas componentes de corrente não são acessíveis em condições de operação normal da carga.

6.3 O COMPORTAMENTO DO MODELO

6.3.1 Para um conjunto de CNL iguais

O problema da soma de correntes harmônicas pode ser resumido em duas questões: Como se somam as correntes? Não há outra forma de se somar fasores determinísticos em um plano de duas dimensões. Elas são somadas algebricamente, adicionando ou subtraindo suas partes reais ou imaginárias separadamente, se são de mesma frequência. A segunda questão é: Quais correntes são somadas? Não são aquelas do espectro harmônico característico da CNL. Os métodos comumente encontrados somam I_{base} que é invariável. A soma deve ser feita pelas correntes de fase que são variáveis segundo a tensão presente nos seus terminais. A admitância de Norton permite ajustar/variá-las essas correntes, como visto na equação (6.7).

Para um conjunto de CNL iguais, por simplicidade, todas elas estão reunidas em um aglomerado, de forma que a tensão terminal é a mesma para todas elas. Caso elas estejam reunidas em subgrupos dispersos sequencialmente ao longo de um alimentador, o cálculo da tensão terminal de um subgrupo específico segue o mesmo princípio, apenas com o complicador da necessidade do cálculo e da atualização da tensão terminal e da corrente de fase para todos os demais subgrupos.

Para um grupo de p cargas similares reunidas em um aglomerado que possa ser considerado como que provedor de uma tensão terminal variável, mas que é a mesma para todas as cargas, a sequência de avaliação é a seguinte:

1- Reunir todas as cargas que possuem as mesmas matrizes de admitâncias e que foram modeladas sob a mesma tensão de base V_{base} .

2- A corrente base I_{base} dessas cargas deve ser multiplicada pela quantidade p de cargas.

3- Usando a equação (6.5) obtém-se a distorção da tensão terminal provocada pela corrente devida às p cargas.

$$\Delta V_B = Z_{sistema} p I_{base} \quad (6.5)$$

4- Atualizar a tensão terminal V_B e a matriz Y_{Norton} , uma vez que V_B não é o mesmo. Estabelece-se que Y_{Norton} , nesse caso de soma, representa a totalidade das p cargas.

5- Usando a equação (6.6) obtém-se a corrente através de Y_{Norton} .

$$I_{Y_{Norton}} = Y_{Norton} (V_B - V_{base}) \quad (6.6)$$

6- Usando a equação (6.7) obtém-se a corrente de fase devida às p cargas.

$$I_B = I_{Y_{Norton}} - p I_{base} \quad (6.7)$$

7- Usando a equação (6.8) atualizar ΔV_B devido à nova corrente no alimentador.

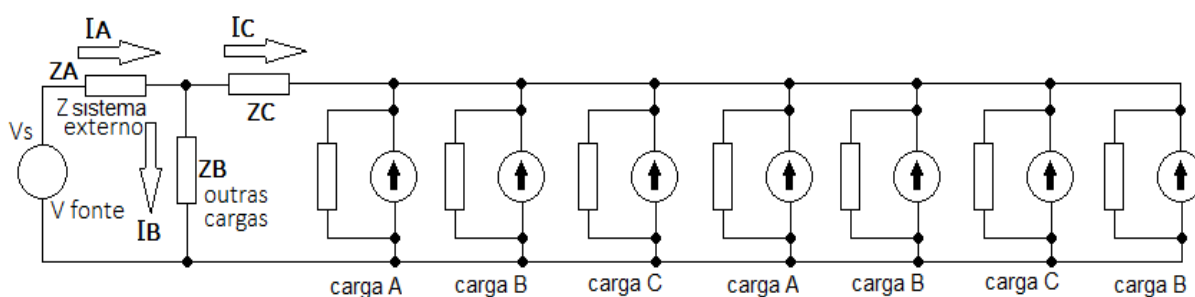
$$\Delta V_B = Z_{sistema} (-I_B) \quad (6.8)$$

8- De volta ao item 5, revisar o valor das correntes por Y_{Norton} e no alimentador I_B e a tensão terminal das cargas V_B usando (6.2), até a convergência, quando V_B atinge o valor de estado estacionário. Uma vez que V_B atinja seu valor final, a corrente no alimentador será a corrente total das p cargas.

6.3.2 Para um conjunto de CNL diferentes

Para dois ou mais grupos de CNL diferentes, como na Figura 6.2, o modelo considera que cada grupo de cargas iguais está reunido em um aglomerado específico ao longo do alimentador. Por aglomerado entende-se uma reunião de cargas iguais para as quais a tensão terminal pode ser considerada a mesma. Caso as cargas iguais estejam dispersas ao longo de um ou mais alimentadores e não reunidas, a modelagem continua a ser verdadeira, apenas com o agravante de que as interações carga-sistema irão demandar maior esforço matemático, já que cada interação de um grupo com o sistema altera a tensão para os demais. A agregação mostrada na Figura 6.3 é possível se as diversas CNL enxergam a mesma impedância até a barra principal. A sequência de avaliação para as cargas reunidas é a seguinte:

FIGURA 6.2 – CARGAS NÃO LINEARES DIFERENTES INSERIDAS NO SISTEMA ELÉTRICO



1- Agrupar todos as $N \times 1$, $N \times 2$... $N \times n$ CNL que possuem exatamente a mesma matriz Y_{Norton} , conforme a Figura 6.2. O sub índice de x representa a quantidade de cargas similares e N é o número do grupo. Haverá, portanto, n cargas ($x_1 + x_2 + \dots + x_n$) e N grupos.

2- Computar separadamente a contribuição de cada grupo de cargas similares usando (6.9) e encontrar cada ΔV_B relativo aos diferentes grupos numerados de 1 até N .

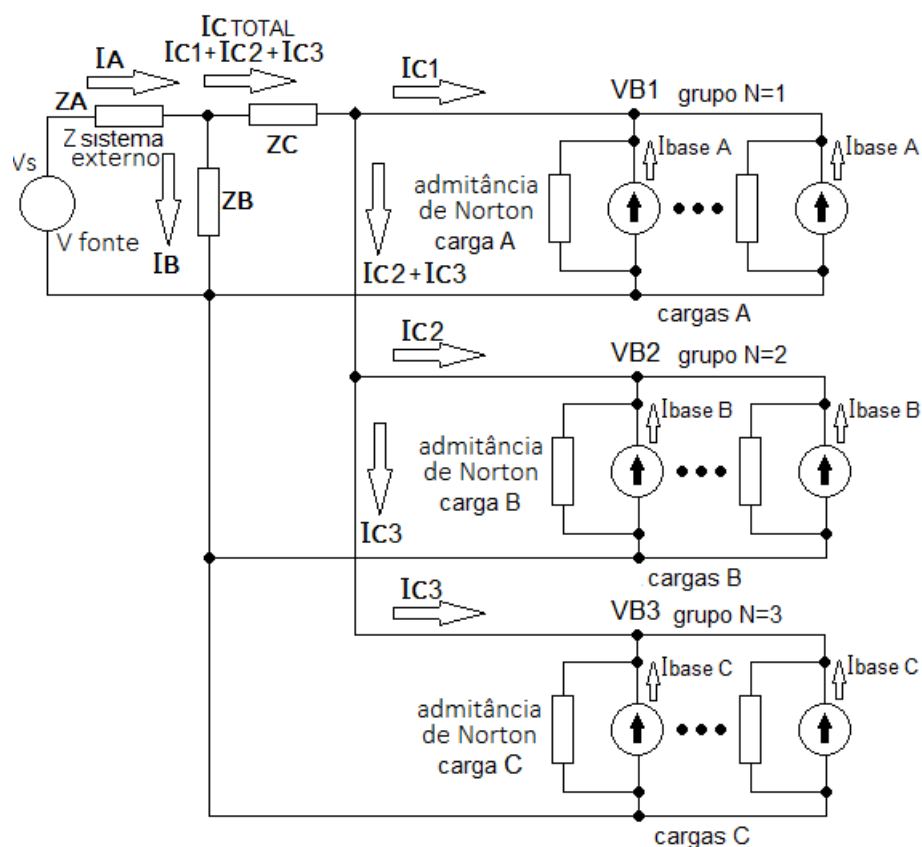
$$\Delta V_{B(N)} = Z_{sistema} \mathbf{C}_{(N)} I_{base(N)} \quad (6.9)$$

3- Atualizar a tensão complexa V_B nos terminais das cargas.

4- Usando (6.10) encontrar o espectro da corrente que circula por cada Y_{Norton} .

$$I_{Y_{Norton}(N)} = \mathbf{Y}_{Norton(N)} \mathbf{C}_{(N)} (V_{B(N)} - V_{base}) \quad (6.10)$$

FIGURA 6.3 – REDISTRIBUIÇÃO DAS CARGAS IGUAIS EM AGLOMERADOS



5- Usando (6.11), encontrar a corrente de fase I_B devida ao N -ésimo grupo.

$$I_{B(N)} = I_{Y_{Norton}(N)} - x_{(N)} I_{base(N)} \quad (6.11)$$

6- De volta ao passo 3 recalcular cada tensão $V_{B(N)}$, uma vez que $I_{B(N)}$ irá alterar todas as tensões de nó (ponto B) e as demais do sistema.

6.4 INTERAÇÕES COM O SISTEMA EXTERNO PARA GRUPO DE CARGAS

6.4.1 Com o sistema elétrico fixo

Nessa modelagem, conforme a Figura 6.1, o sistema externo é fixo e tem as seguintes características elétricas:

Tensão nominal do sistema externo: 13,8 kV, Potência de curto-circuito: 10 MVA.

Cabo do ramal de entrada: EPR Classe 15 kV, # 25 mm², $l = 30$ m.

Transformador de distribuição: ligação Δ -Y, $S = 400$ kVA, relação 13,8-0,22 kV, $Z_{SC} = 5\%$.

Cabo SE-QGBT Quadro Geral de Baixa Tensão: Classe 1 kV, # 240 mm², $l = 30$ m.

Cargas lineares adicionais Z_C : 100 kVA, motor 0,8 fp, cabo 2 x # 120 mm², $l = 80$ m.

+ 50 kVA de carga indutiva, 0,9 fp, cabo # 120 mm², $l = 110$ m.

O aglomerado de cargas não lineares é alimentado pelo QGBT por cabo # 120 mm², $l = 50$ m.

As Figuras 6.4 a 6.17 seguintes mostram o comportamento oscilatório das correntes devido à interação com o sistema externo. Nessas figuras cada iteração corresponde à propagação da corrente de fase I_B em direção à fonte e a alteração de todas as tensões ao longo do alimentador. Na primeira iteração as cargas estão desligadas e não há tensão terminal, conduzindo a $I_B = \text{zero}$. Na segunda iteração a tensão aplicada à carga é, deliberadamente, senoidal pura, a mesma utilizada para a modelagem de Y_{Norton} . Usando a equação (6.6), a corrente circulante por Y_{Norton} é zero, o que significa que a corrente de fase terá a amplitude harmônica $I_{B(h)} = 100 \times I_{base(h)}$ em todas as figuras.

Caso a tensão terminal se mantenha como inicialmente, as correntes devidas às CNL se somam algebricamente no alimentador comum a elas. Caso aconteça da tensão não se manter constante, significa que o sistema elétrico a montante não é ideal e a tensão terminal apresentará contaminação harmônica adicional, o que irá alterar as amplitudes e ângulos de todas as ordens harmônicas da corrente de fase, conforme demonstrado no capítulo 5 ENSAIOS. Dessa forma, as correntes a serem somadas de cada CNL não serão as anteriormente modeladas ou medidas e, portanto, diferentes de I_{base} . Medições em laboratório mostram que, em geral, quanto mais poluída a tensão terminal, em relação à tensão de base, menores as amplitudes da corrente I_B nas diversas ordens harmônicas.

O processo requer interações sucessivas entre a corrente de fase e as tensões ao longo do alimentador, de forma a atualizar a tensão terminal das CNL. A modelagem computacional necessita promover a interação entre a corrente de fase e a tensão terminal da carga, visto que uma modifica a outra.

TABELA 6.1 – VALORES DAS CORRENTES RELATIVAS A UMA CNL E A UM CONJUNTO DE 100 CNL IGUAIS, OBTIDAS DO MATLAB SCRIPT

I 1x	h ₁	h ₃	h ₅	h ₇	h ₉	h ₁₁	h ₁₃	h ₁₅
I [A]	0,4984	0,0184	0,0351	0,0083	0,0101	0,0029	0,0021	0,0026
βh [°]	10	49	28	-159	43	-153	54	104
I 100 x	h ₁	h ₃	h ₅	h ₇	h ₉	h ₁₁	h ₁₃	h ₁₅
I [A]	49,2	1,07	1,82	0,52	0,52	0,20	0,14	0,21
βh [°]	10	69	33	-155	54	-151	74	94
Fator	99	58	52	63	52	69	67	81

Na Tabela 6.1, a parte superior corresponde à amplitude e ângulo relativos ao espectro harmônico característico de uma única carga sob alimentação senoidal pura. A parte inferior corresponde à amplitude e ângulo relativos ao espectro harmônico obtido de 100 unidades iguais reunidas em um aglomerado e sob alimentação estabilizada do sistema elétrico acima.

Os gráficos das Figuras 6.4 até 6.9, a seguir, mostram o comportamento da corrente de fase devida a 100 luminárias equipadas com reatores duplos para 2 lâmpadas fluorescentes e modeladas no Matlab Script. A iteração 1 corresponde à situação na qual a tensão terminal foi estabelecida em V_{base} , para efeito de comparação, de forma que a corrente de cada ordem harmônica é exatamente o valor original obtido do seu espectro harmônico característico multiplicado por 100. Após algo em torno de 80 iterações o valor eficaz da corrente de cada ordem harmônica se estabiliza ao redor de 60% do valor inicial, para o sistema elétrico particularmente modelado. Na linha “Fator” a Tabela 6.1 mostra as amplitudes estabilizadas de 100 luminárias, em pu dos valores relativos à de uma única luminária. Note-se que apenas a componente fundamental responde quase linearmente com a quantidade de luminárias, conforme capítulo 5 ENSAIOS, e não apresenta movimento oscilatório de acomodação.

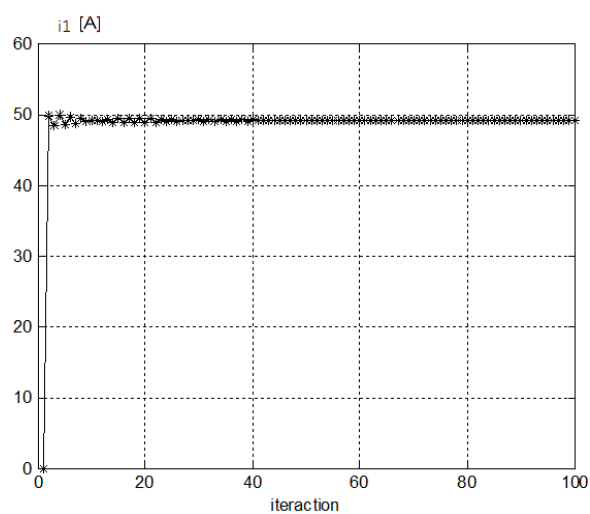
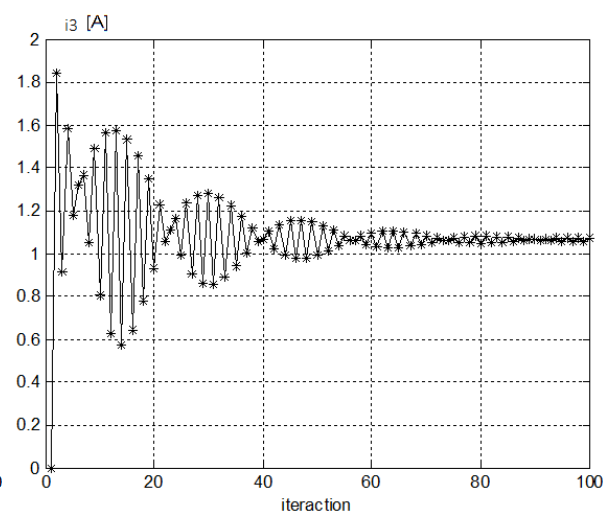
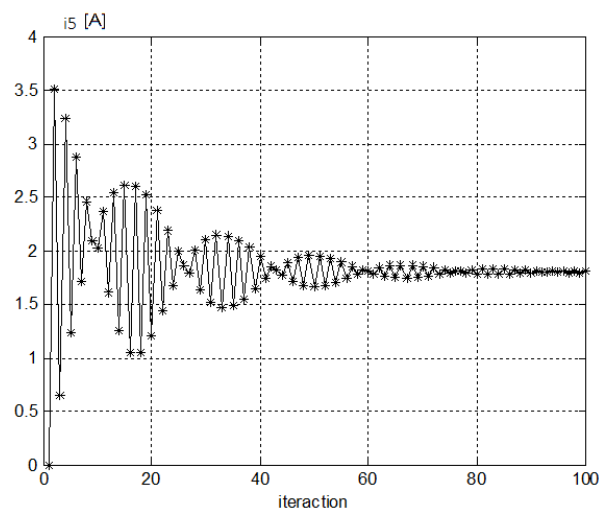
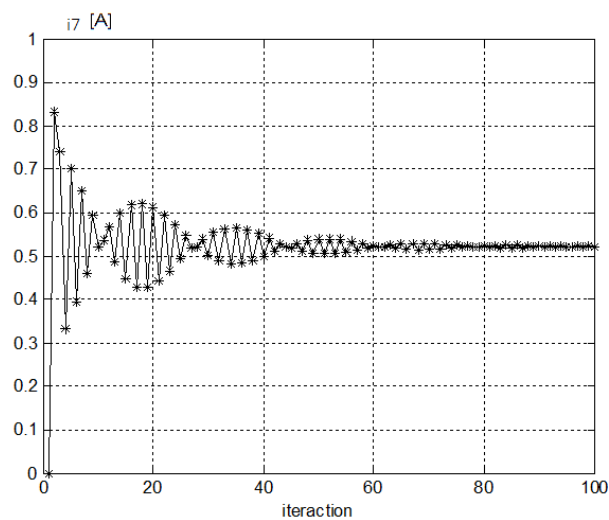
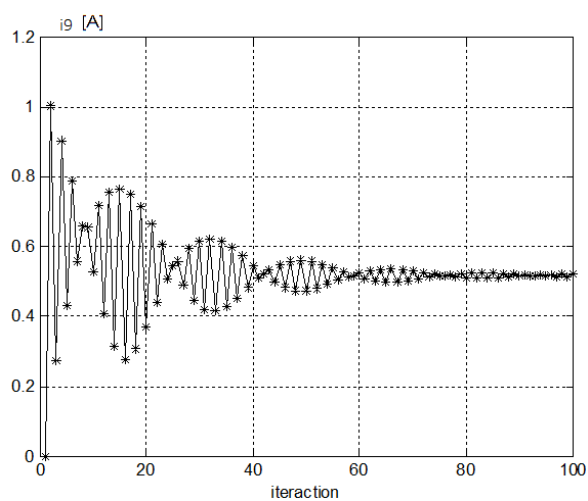
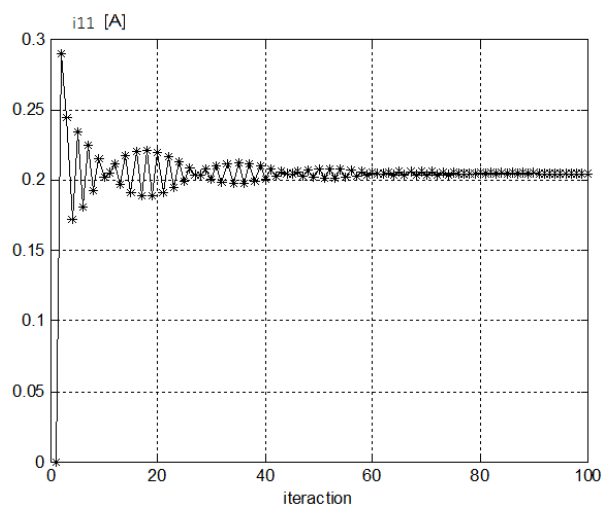
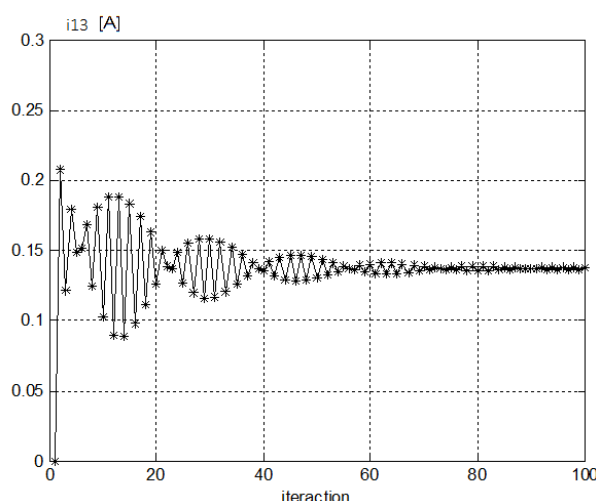
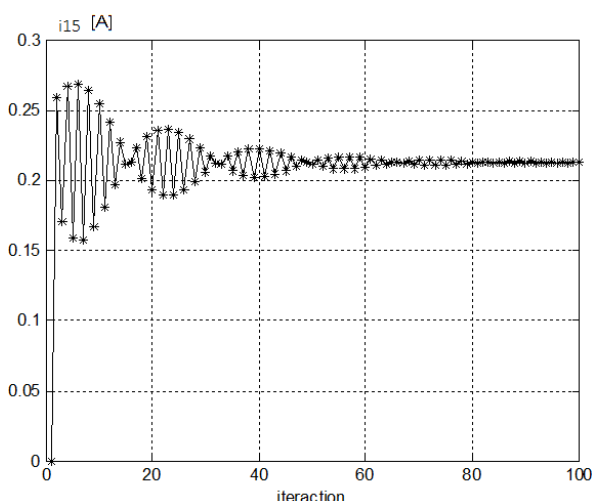
FIGURA 6.4 – AMPLITUDE DE I_1 x ITERAÇÃOFIGURA 6.5 – AMPLITUDE DE I_3 x ITERAÇÃOFIGURA 6.6 – AMPLITUDE DE I_5 x ITERAÇÃOFIGURA 6.7 – AMPLITUDE DE I_7 x ITERAÇÃOFIGURA 6.8 – AMPLITUDE DE I_9 x ITERAÇÃOFIGURA 6.9 – AMPLITUDE DE I_{11} x ITERAÇÃO

FIGURA 6.10 – AMPLITUDE DE I_{13} x ITERAÇÃOFIGURA 6.11 – AMPLITUDE DE I_{15} x ITERAÇÃO

Nos gráficos das Figuras 6.4 a 6.11 as diversas ordens da corrente de fase apresentam um comportamento oscilatório até a estabilização que se dá quando V_B não mais é alterado, isto é, quando o sistema encontra o equilíbrio elétrico se todos os demais parâmetros elétricos das tensões e das correntes se mantêm.

Os seguintes gráficos das Figuras 6.12 a 6.19 mostram o comportamento do ângulo de defasagem das diversas ordens harmônicas da corrente de fase devida a 100 luminárias modeladas no Matlab Script. A iteração 1 corresponde à situação em que a tensão terminal é V_{base} , de forma que o ângulo inicial é igual ao valor apresentado em seu espectro harmônico característico da Tabela 6.1. Todos os ângulos estão referidos a V_1 com zero grau elétrico.

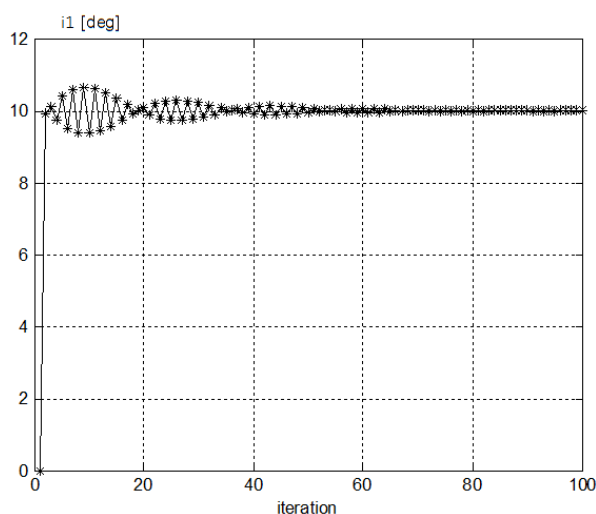
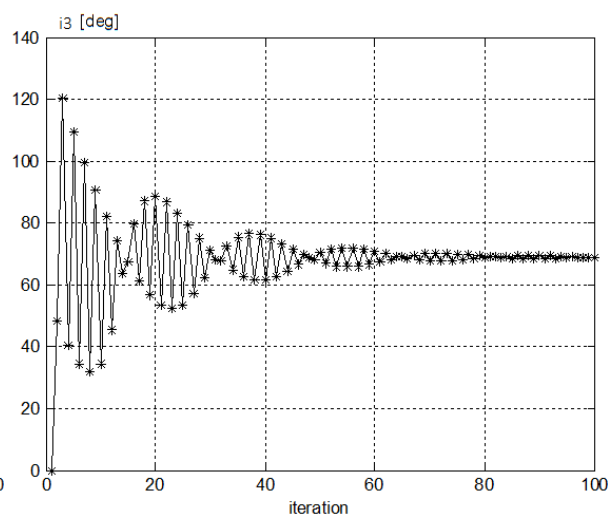
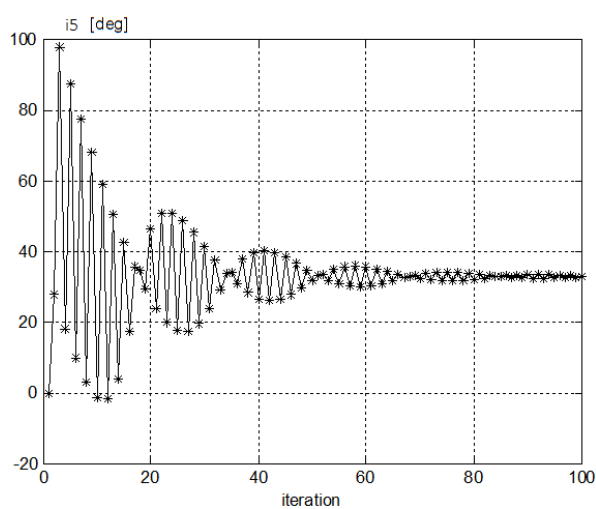
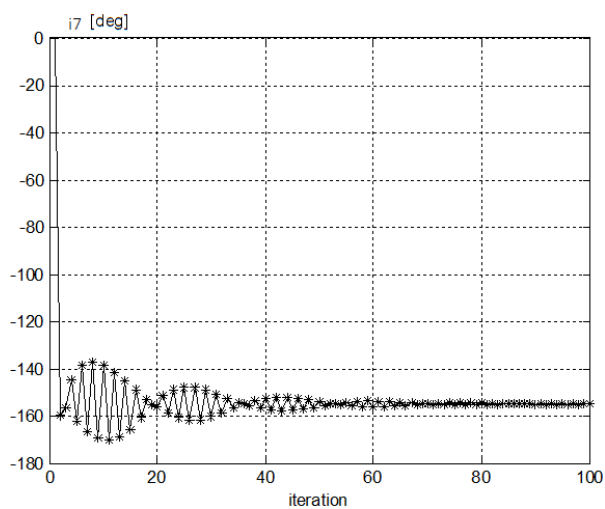
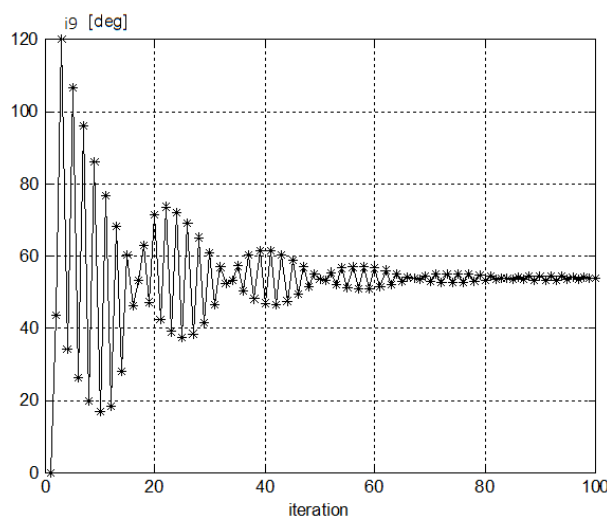
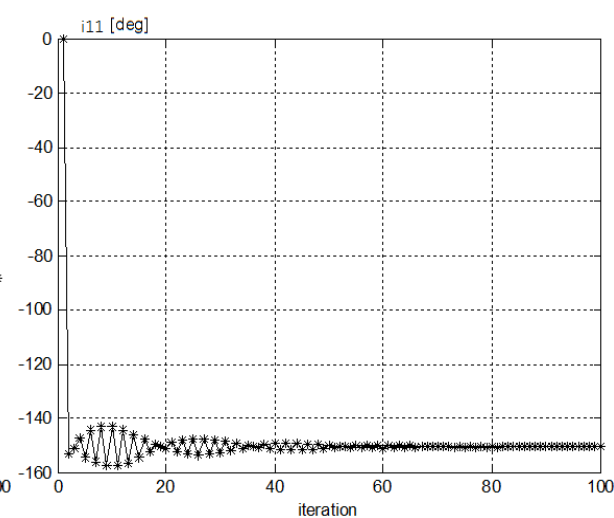
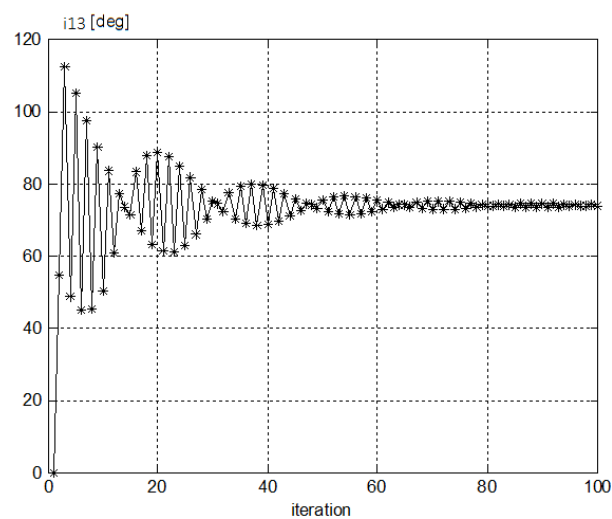
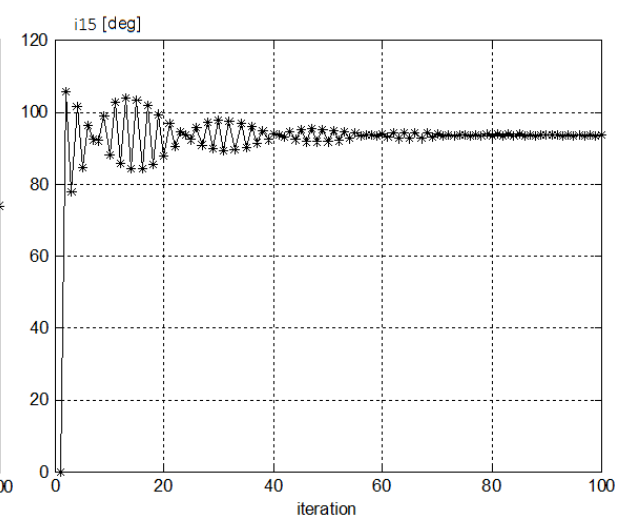
FIGURA 6.12 – ÂNGULO DE I_1 x ITERAÇÃOFIGURA 6.13 – ÂNGULO DE I_3 x ITERAÇÃO

FIGURA 6.14 – ÂNGULO DE I_5 x ITERAÇÃOFIGURA 6.15 – ÂNGULO DE I_7 x ITERAÇÃOFIGURA 6.16 – ÂNGULO DE I_9 x ITERAÇÃOFIGURA 6.17 – ÂNGULO DE I_{11} x ITERAÇÃOFIGURA 6.18 – ÂNGULO DE I_{13} x ITERAÇÃOFIGURA 6.19 – ÂNGULO DE I_{15} x ITERAÇÃO

6.4.2 Dependência da impedância da fonte no espectro das CNL

O objetivo é determinar a influência do sistema externo na estabilização das corrente das cargas. Nessa modelagem utilizou-se o mesmo sistema elétrico relacionado no item anterior 6.4.1 - Com o sistema elétrico fixo.

As alterações no sistema elétrico podem ser:

1 - Na rede de média tensão, como aumento ou redução na potência de curto-circuito da rede externa ou na impedância dos cabos de entrada/ligação de MT.

2 - Na capacidade da subestação, como aumento ou redução na potência nominal ou da reatância de curto-circuito do transformador.

3 - Na impedância dos cabos de BT desde a subestação até o quadro de distribuição das cargas.

Nessa modelagem, qualquer das alterações relacionadas acima terão como resposta um aumento de impedância desde o aglomerado das cargas até o sistema externo inclusive. Os gráficos das Figuras 6.20 e 6.21 mostram como a corrente harmônica de terceiro e quinto harmônicos se estabiliza em valores diferentes, segundo a impedância do sistema elétrico a montante das cargas. As mudanças no sistema elétrico supramencionado podem ser resumidas na alteração da impedância do cabo representado por Z_B da Figura 6.1. Nesses gráficos $Z_{B \text{ original}} = 0,0095 + j 0,0053 \Omega$ à frequência industrial e corrigido para cada ordem harmônica da corrente circulante, conforme a equação (3.3). O mesmo procedimento é feito para todos os demais parâmetros do sistema, conforme as equações (3.1) a (3.7).

Nota-se que a corrente final é pouco alterada em relação à amplitude do espectro harmônico da Tabela 6.1 e apresenta rápida convergência para um sistema externo mais forte (com menor impedância interna).

Os gráficos das Figuras 6.22 e 6.23 mostram o ângulo da corrente total de 100 luminárias 2x32 W e referente ao terceiro e quinto harmônicos. Uma vez que o ângulo inicial do terceiro harmônico é 49 graus, pela Tabela 6.1, seu valor aumenta para próximo a 60 graus com o aumento da impedância do cabo alimentador. Valores menores de impedância do cabo alimentador Z_B ocasionam acomodação mais rápida do ângulo da corrente.

FIGURA 6.20 – AMPLITUDE DA 3^A HARMÔNICA DA CORRENTE DE FASE
x ALTERAÇÃO DA IMPEDÂNCIA DO CABO Z_B .

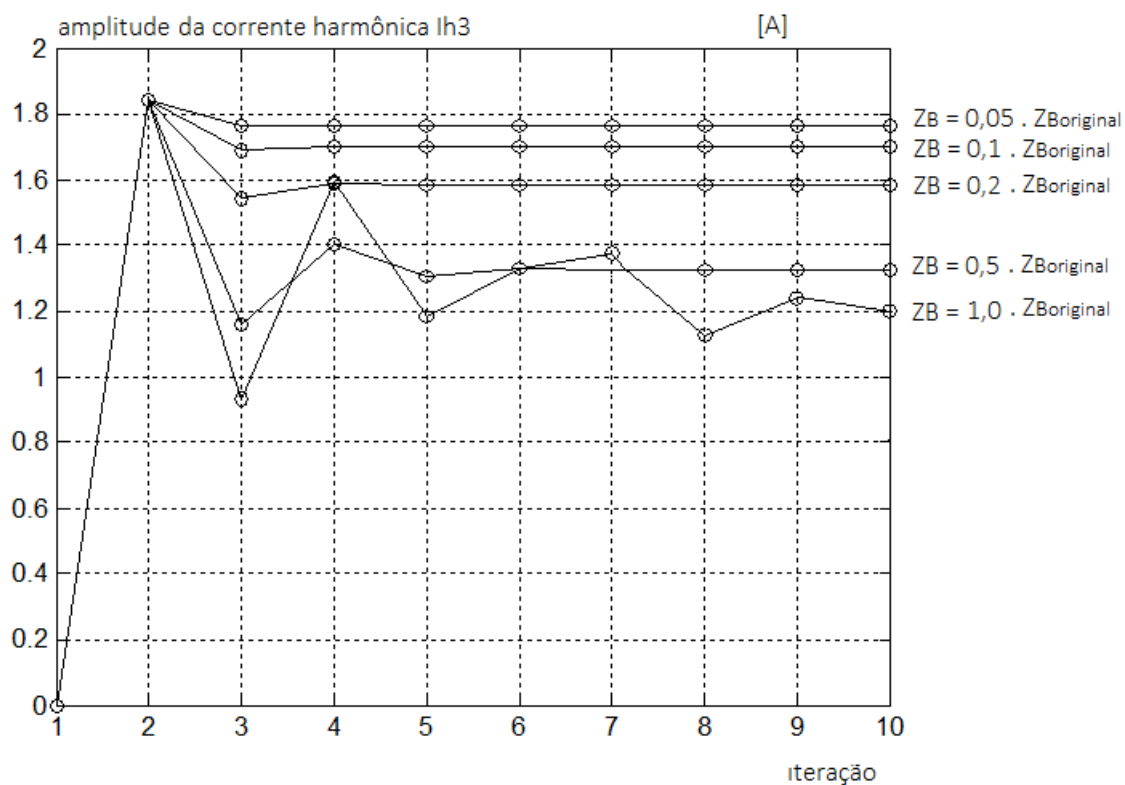


FIGURA 6.21 – AMPLITUDE DA 5^A HARMÔNICA DA CORRENTE DE FASE
x ALTERAÇÃO DA IMPEDÂNCIA DO CABO Z_B .

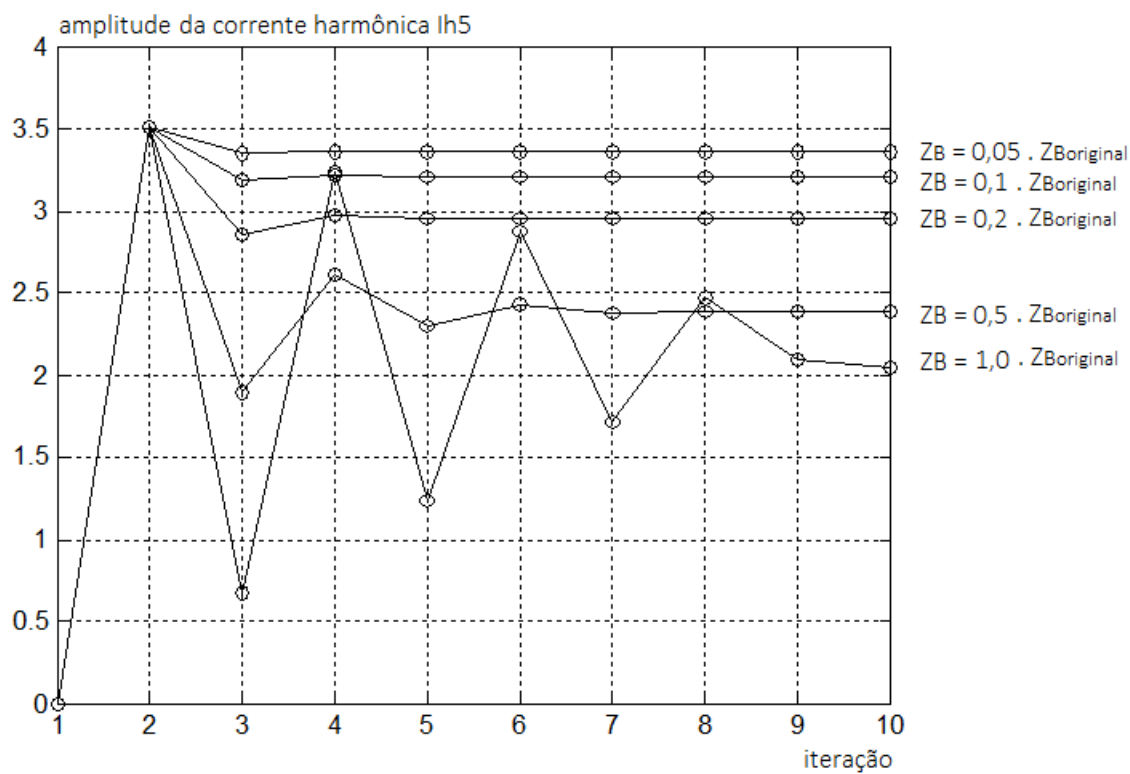


FIGURA 6.22 – ÂNGULO DA 3^A HARMÔNICA DA CORRENTE DE FASE
x ALTERAÇÃO DA IMPEDÂNCIA DO SISTEMA

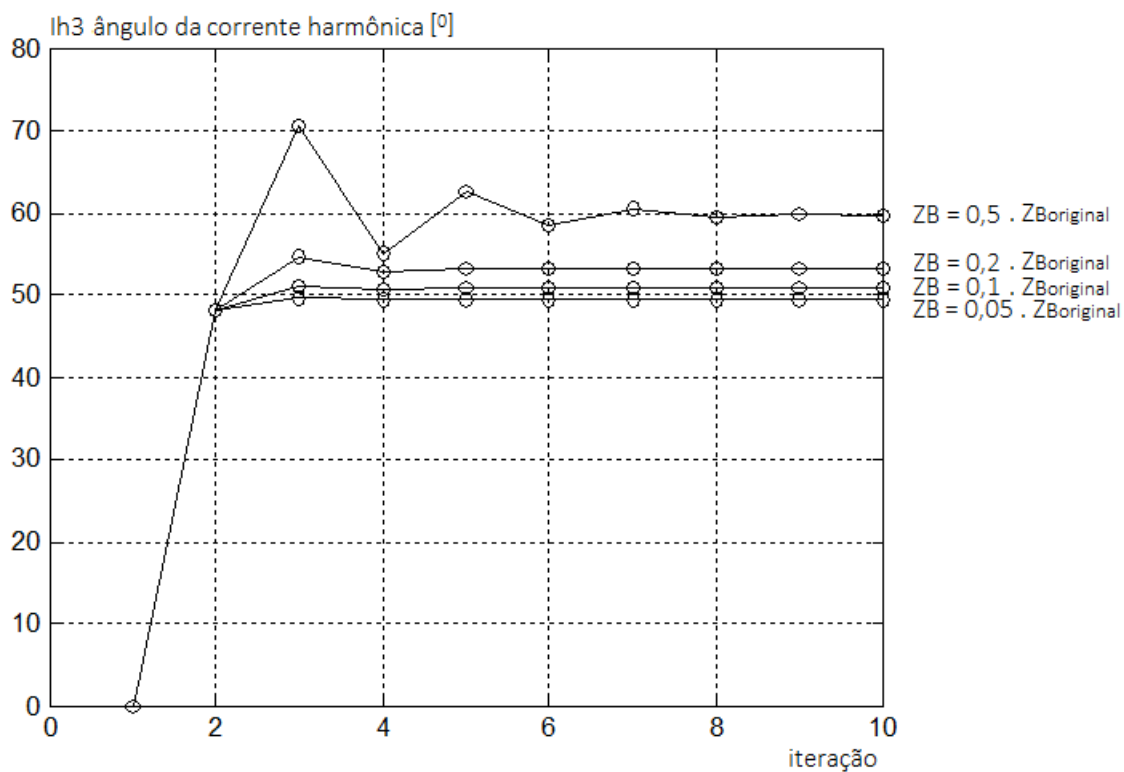
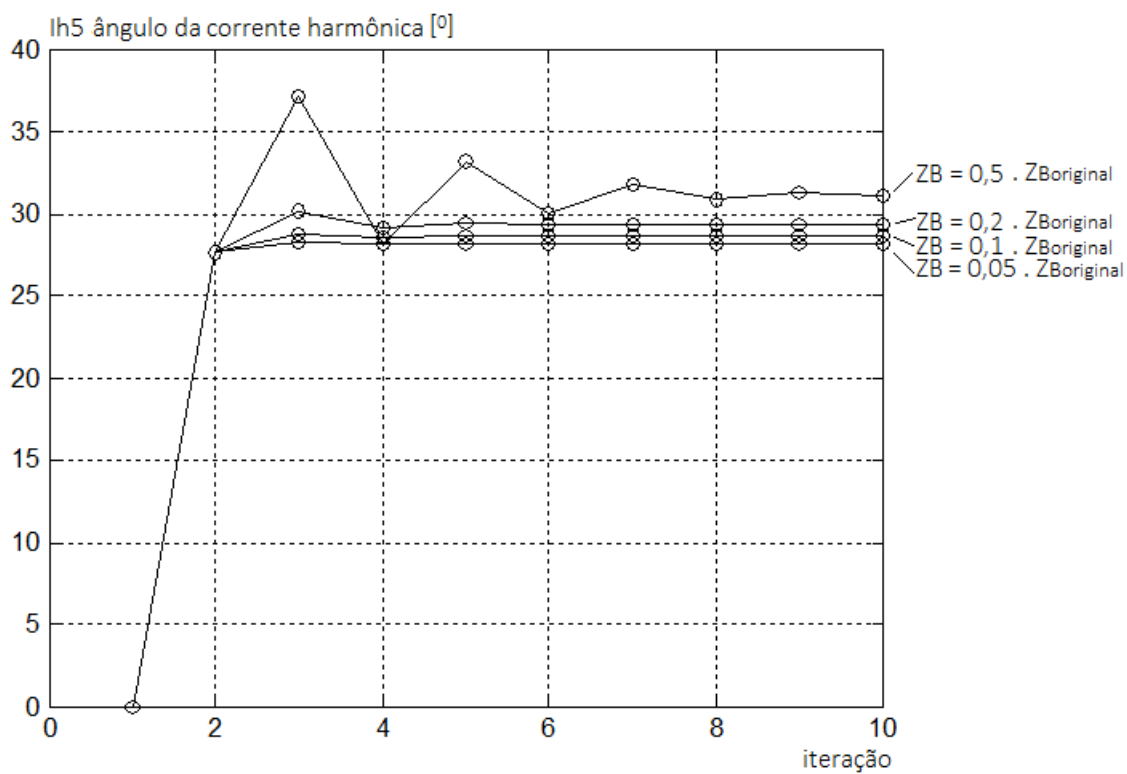


FIGURA 6.23 – ÂNGULO DA 5^A HARMÔNICA DA CORRENTE DE FASE
x ALTERAÇÃO DA IMPEDÂNCIA DO SISTEMA



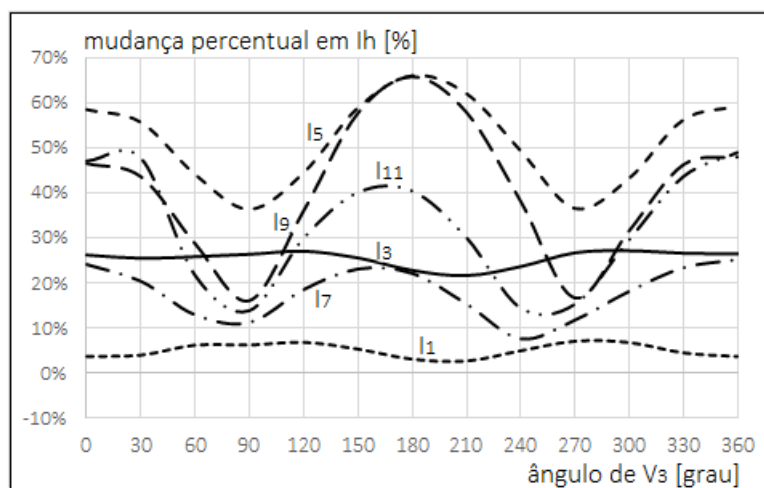
6.5 COMPARAÇÕES COM A MODELAGEM SOB O DOMÍNIO DO TEMPO

A fim de verificar a exatidão do método proposto, os resultados das iterações carga-sistema em Matlab script foram comparados com os resultados das simulações no domínio do tempo em ambiente Simulink para um reator eletrônico como a carga não linear e modelada como um conversor monofásico ca-cc formado por um retificador de onda completa a diodos e uma carga cc composta por um RC paralelo de resistência 330Ω com uma capacitância de $15 \mu\text{F}$ alimentada por uma fonte trifásica de tensão programável. O espectro harmônico característico dessa carga está listado na Tabela 6.2. O comportamento da carga é avaliado sob alimentação com tensão composta pelo componente fundamental a 127 V adicionado ao terceiro harmônico a 5% e está mostrado na Figura 6.24 com base no espectro característico da Tabela 6.2, com o fim de mostrar que o modelo, apesar de não ter o mesmo espectro harmônico do reator real, ainda responde às mudanças nos ângulos de fase das tensões harmônicas, no caso do 3^o harmônico.

TABELA 6.2. ESPECTRO HARMÔNICO CARACTERÍSTICO PARA O REATOR SIMULADO

ordem	h_1	h_3	h_5	h_7	h_9	h_{11}	h_{13}	h_{15}
V [V]	127							
α_h [°]	0							
I [A]	0,5309	0,2575	0,0875	0,0845	0,0545	0,0500	0,0384	0,0353
β_h [°]	31,5	-75,7	-113,5	-169,8	152,0	96,3	57,2	10,5

FIGURA 6.24 – RESULTADO DAS SIMULAÇÕES NO MODELO: MUDANÇA PERCENTUAL [%] NAS AMPLITUDES DAS CORRENTES HARMÔNICAS EM RELAÇÃO AOS VALORES DA TABELA 6.2 VERSUS ÂNGULO DE V_3 .



Os valores listados na Tabela 6.2 foram utilizados como I_{base} e V_{base} para todas as matrizes de admitâncias. Os Y_{kj} foram calculados para $j = 1, 3$ e 5 apenas e para $k = 1, 3, \dots, 15$, todos ímpares. O objetivo desse ensaio é determinar o espectro harmônico gerado pelo reator modelado sob diferentes distorções de tensão, comparando os resultados dos dois testes.

O teste 1 usa uma simulação no domínio do tempo, tomada como referência, e que intrinsecamente considera o comportamento não linear da carga. A tensão terminal na carga do teste 1 é a referida na Tabela 6.2 com o componente V_1 aumentado em 1%, o componente V_3 ajustado em 0,5 % com ângulo de 30 graus e o componente V_5 ajustado em 2,5 % com ângulo de 60 graus.

O teste 2 usa a metodologia proposta para iterativamente produzir a solução de regime permanente, usando os valores de Y_{kj} e as matrizes Y_{Norton} . A tensão terminal na carga do teste 2 é a referida na Tabela 6.2 com o componente V_1 aumentado em 1,5%, o componente V_3 ajustado em 2,5 % com ângulo de 60 graus e o componente V_5 ajustado em 0,5 % com ângulo de 30 graus.

TABELA 6.3. ESPECTRO HARMÔNICO SIMULADO DAS CORRENTES PARA A CARGA MODELADA.

ordem	h_1	h_3	h_5	h_7	h_9	h_{11}	h_{13}	h_{15}
V [V]	127,00	1,27	1,27					
αh [$^\circ$]	0	0	0					
I [A]	0,528	0,253	0,074	0,081	0,054	0,049	0,039	0,035
βh [$^\circ$]	32	-75	-106	-156	164	111	73	21

A tensão composta de cada teste é aplicada ao Matlab Simulink[®] e Matlab[®] script, este que implementa o presente método. Os valores listados nas Tabelas 6.4 e 6.5 mostram os resultados do teste 1 e teste 2, respectivamente.

TABELA 6.4. ESPECTROS HARMÔNICOS SIMULADOS DA CORRENTE PARA O TESTE 1.

MATLAB SCRIPT - FLUXO HARMÔNICO								
ordem	h_1	h_3	h_5	h_7	h_9	h_{11}	h_{13}	h_{15}
I [A]	0,5286	0,2386	0,0903	0,0768	0,0573	0,0463	0,0419	0,0329
βh [$^\circ$]	30,5	-75,4	-103,5	-165,4	165,0	106,5	72,3	18,6

OBTIDAS NO SIMULINK								
ordem	h_1	h_3	h_5	h_7	h_9	h_{11}	h_{13}	h_{15}
I [A]	0,5306	0,2333	0,0922	0,0748	0,0579	0,0447	0,0415	0,0319
βh [$^\circ$]	30,7	-75,5	-103,3	-164,1	164,3	107,8	70,7	20,6

TABELA 6.5. ESPECTROS HARMÔNICOS SIMULADOS DA CORRENTE PARA O TESTE 2.

MATLAB SCRIPT - FLUXO HARMÔNICO								
ordem	h_1	h_3	h_5	h_7	h_9	h_{11}	h_{13}	h_{15}
I [A]	0,5370	0,2806	0,0834	0,0533	0,0518	0,0381	0,0365	0,0279
βh [°]	32,1	-75,6	-138,7	-162,2	157,6	106,0	63,6	16,3

OBTIDAS NO SIMULINK								
ordem	h_1	h_3	h_5	h_7	h_9	h_{11}	h_{13}	h_{15}
I [A]	0,5332	0,2813	0,0823	0,0547	0,0513	0,0396	0,0365	0,0293
βh [°]	32,4	-75,1	-139,1	-160,8	158,9	107,7	65,7	18,1

Nas Tabelas 6.4 e 6.5 são mostradas as correntes de regime permanente. Comparações indicam bom grau de concordância. Como mostrado na Tabela 6.6, para o reator eletrônico modelado, algumas ordens harmônicas da corrente demonstram redução de 50% em relação à amplitude correspondente à alimentação senoidal, mesmo sob tensão mais elevada.

TABELA 6.6. COMPARAÇÃO ENTRE A CORRENTE GERADA SOB TENSÃO PURAMENTE SENOIDAL E SOB TENSÃO DISTORCIDA (TESTE 1).

V. SENOIDAL	h_1	h_3	h_5	h_7	h_9	h_{11}	h_{13}	h_{15}
V [V]	127							
αh [°]	0							
I [A]	0,5309	0,4851	0,1649	0,1591	0,1020	0,0941	0,0723	0,0665
βh [°]	31,5	-75,7	-113,5	-169,8	152,0	96,3	57,2	10,5
TESTE 1	h_1	h_3	h_5	h_7	h_9	h_{11}	h_{13}	h_{15}
V [V]	128.27	0.635	3.175					
αh [°]	0	30	60					
I [A]	0,5286	0,2386	0,0903	0,0768	0,0573	0,0463	0,0419	0,0329
βh [°]	30,5	-75,4	-103,5	-165,4	165,0	106,5	72,3	18,6
% var. I [A]	-0.4%	-50.8%	-45.2%	-51.7%	-43.8%	-50.8%	-42.0%	-50.5%

A última linha da Tabela 6.6 mostra que a corrente apresenta significativa mudança em amplitude e ângulo face à mudança na tensão de alimentação.

6.6 A CORRENTE SOMA DE CARGAS DIFERENTES

Nesse teste foram reunidos dois grupos de CNL de mesma ordem de grandeza quanto à potência elétrica. As cargas relacionadas como cargas A são os reatores eletrônicos de marca PHILIPS e modelo EB 232A já medidos anteriormente e cujo espectro característico está relacionado na Tabela 6.7. A carga B é a mesma descrita no item 6.5 COMPARAÇÕES COM A MODELAGEM SOB O DOMÍNIO DO TEMPO e foi modelada no Matlab Simulink. A pequena diferença em relação ao conteúdo harmônico anteriormente mostrado é devido à alteração na fonte de tensão de “*Three-Phase Programmable Voltage Source*” para “*Three-Phase Source*”, o que permite alteração na impedância do sistema alimentador. A Tabela 6.7 mostra que as cargas A e B são bastantes distintas na composição harmônica, tanto nas amplitudes relativas à corrente fundamental, através da linha COMPOSIÇÃO [%], quanto nos deslocamentos angulares das componentes de corrente em relação ao componente fundamental da tensão, através da linha βh [$^{\circ}$]. As respostas às variações angulares dos componentes harmônicos de tensão também são diferentes. As alterações nas correntes das diversas ordens harmônicas da carga A estão descritas nos gráficos do capítulo 5 - **ENSAIOS** e as alterações nas correntes das diversas ordens harmônicas da carga B estão descritas nos gráficos da Figura 6.22. Portanto, as alterações nas tensões terminais das duas cargas produzem diferentes respostas no espectro harmônico da corrente de fase.

TABELA 6.7 – ESPECTRO HARMÔNICO DAS CARGAS A E B DA FIGURA 5.23

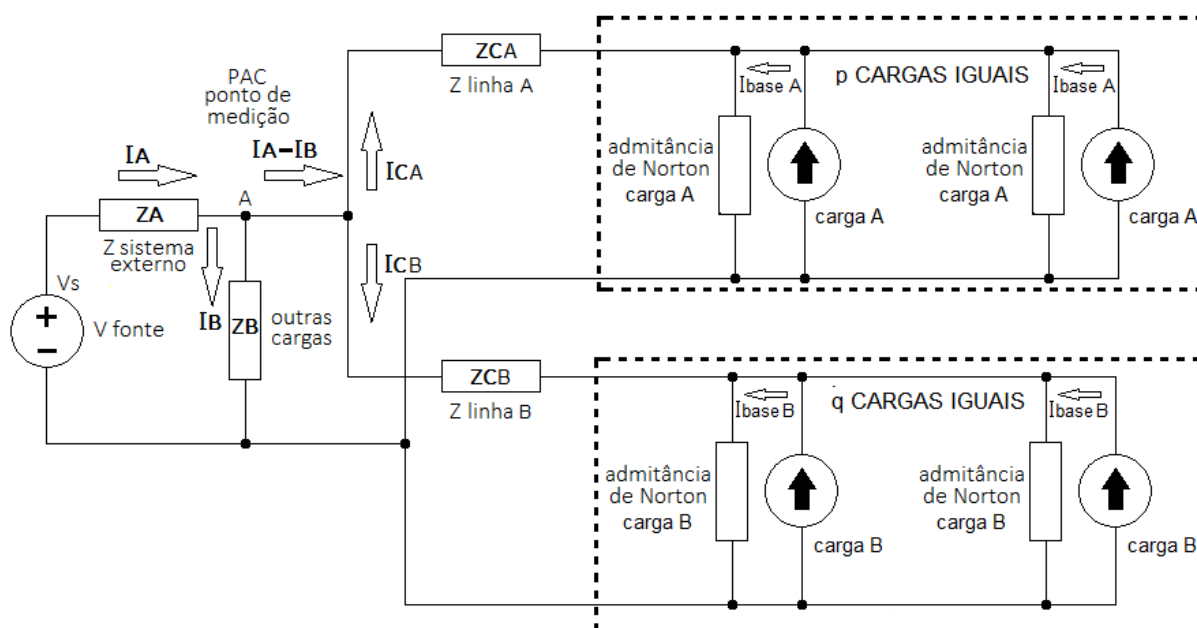
CARGA A	h_1	h_3	h_5	h_7	h_9	h_{11}	h_{13}	h_{15}
V base [V]	125,5	0,362	0,421	0,146	0,290	0,110	0,076	0,078
αh [$^{\circ}$]	0	-79,8	93,2	85,0	-69,3	84,4	-92,4	-84,7
I [A]	0,4984	0,0184	0,0351	0,0083	0,0101	0,0029	0,0021	0,0026
βh [$^{\circ}$]	10	49	28	-159	43	-153	54	104
COMPOSIÇÃO [%]		3,7	7,0	1,7	2,0	0,5	0,4	0,5

CARGA B	h_1	h_3	h_5	h_7	h_9	h_{11}	h_{13}	h_{15}
V base [V]	126,4	0,025	0,050	0	0	0	0	0
αh [$^{\circ}$]	0	104,4	1,3	-	-	-	-	-
I [A]	0,5286	0,2564	0,0872	0,0840	0,0529	0,0482	0,0382	0,0351
βh [$^{\circ}$]	32	-76	-113	-170	152	96	58	3
COMPOSIÇÃO [%]		48,5	16,5	15,9	10,0	9,4	7,2	6,6

O diagrama de conexões das duas cargas relacionadas acima está indicado na Figura 6.23. A carga A foi reunida em um grupo de 100 unidades iguais e a carga B foi reunida em um grupo de 50 ou 100 unidades iguais. O procedimento para a determinação da corrente soma dos dois conjunto de CNL está descrito no item 6.3.2 - Para um conjunto de CNL diferentes.

Para a realização da simulação do comportamento do sistema elétrico, foi determinado que a carga representada pela impedância Z_B (outras cargas) se manteria constante ao longo do tempo de interação, de forma que apenas as variações na amplitude da tensão no ponto A do diagrama iriam causar alterações na corrente drenada por ela e estas foram consideradas.

FIGURA 6.25 – DIAGRAMA DE CONEXÕES PARA AS CARGAS A E B DO TESTE DE SOMA DE CORRENTES DE CARGAS DIFERENTES.



Para este ensaio, as impedâncias do sistema elétrico montado são:

$$Z_A = (3,058 \cdot 10^{-4} + j 1,6343 \cdot 10^{-4}) \Omega$$

$$Z_B = (28,1 \cdot 10^{-3} + j 120,4 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{CA} = Z_{CB} = (9,53 \cdot 10^{-3} + j 5,3 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$V_S = 125,5 \text{ Vca}$$

Após a convergência das correntes foram determinadas as correntes IA, IB, ICA e ICB. A diferença entre as duas primeiras correntes deve ser exatamente igual à soma das duas últimas. Algumas diferenças nos valores são devidas aos arredondamentos apresentados. A Tabela 6.8 mostra os valores obtidos das correntes no nó A do circuito, através do Matlab Script para 100 cargas iguais do grupo A e 50 cargas iguais do grupo B. A Tabela 6.9 mostra os valores obtidos do Matlab Script para 100 cargas iguais do grupo A e 100 cargas iguais do grupo B.

TABELA 6.8 – VALORES DAS CORRENTES APÓS A ESTABILIZAÇÃO DO SISTEMA PARA GRUPOS DE 100 CNL DO TIPO A E 50 CNL DO TIPO B.

IA	h_1	h_3	h_5	h_7	h_9	h_{11}	h_{13}	h_{15}
I [A]	1031,6	8,1	9,0	3,5	3,2	2,4	2,2	1,2
$\beta h [^\circ]$	-72,8	79,0	1,9	134,9	15,3	118,1	12,9	167,0
IB	h_1	h_3	h_5	h_7	h_9	h_{11}	h_{13}	h_{15}
I [A]	1014,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\beta h [^\circ]$	-76,9	-	-	-	-	-	-	-
ICA	h_1	h_3	h_5	h_7	h_9	h_{11}	h_{13}	h_{15}
I [A]	52,4	4,3	8,3	1,0	2,4	0,0	0,05	0,04
$\beta h [^\circ]$	10,0	29,7	22,2	29,5	34,6	-176,9	38,2	123,7
ICB	h_1	h_3	h_5	h_7	h_9	h_{11}	h_{13}	h_{15}
I [A]	23,8	6,2	7,1	3,8	1,2	2,4	1,8	0,9
$-174,3\beta h [^\circ]$	-15,5	110,4	-66,4	1494	-24,8	117,5	6,6	-174,3
IA - IB	h_1	h_3	h_5	h_7	h_9	h_{11}	h_{13}	h_{15}
I [A]	75,0	8,1	9,0	3,5	3,2	2,4	2,2	1,2
$\beta h [^\circ]$	87,9	10,6	88,1	-45,0	75,5	-27,6	76,6	-76,0
ICA + ICB	h_1	h_3	h_5	h_7	h_9	h_{11}	h_{13}	h_{15}
I [A]	74,5	8,0	8,9	3,4	3,2	2,4	2,2	1,1
$\beta h [^\circ]$	87,9	10,7	88,1	-45,0	73,8	-27,6	77,2	-74,7

TABELA 6.9 – VALORES DAS CORRENTES APÓS A ESTABILIZAÇÃO DO SISTEMA PARA GRUPOS DE 100 CNL DO TIPO A E 100 CNL DO TIPO B.

IA	h ₁	h ₃	h ₅	h ₇	h ₉	h ₁₁	h ₁₃	h ₁₅
I [A]	1054,1	23,5	11,6	7,4	5,7	4,9	4,3	3,4
βh [°]	-72,0	92,8	-6,7	131,7	-8,1	122,7	-1,4	174,4
IB	h ₁	h ₃	h ₅	h ₇	h ₉	h ₁₁	h ₁₃	h ₁₅
I [A]	1014,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
βh [°]	-76,6	-	-	-	-	-	-	-
ICA	h ₁	h ₃	h ₅	h ₇	h ₉	h ₁₁	h ₁₃	h ₁₅
I [A]	52,4	4,3	8,1	1,0	2,4	0,0	0,04	0,04
βh [°]	10,0	30,0	22,4	30,2	34,8	-173,6	38,3	123,7
ICB	h ₁	h ₃	h ₅	h ₇	h ₉	h ₁₁	h ₁₃	h ₁₅
I [A]	49,9	21,8	5,9	7,6	4,3	4,9	3,9	3,2
βh [°]	-27,8	102,9	-49,9	139,0	-30,3	122,4	-5,7	-179,5
IA – IB	h ₁	h ₃	h ₅	h ₇	h ₉	h ₁₁	h ₁₃	h ₁₅
I [A]	96,8	23,5	11,6	7,4	5,6	4,8	4,3	3,4
βh [°]	98,6	-2,8	96,9	-41,7	98,1	-32,4	91,3	-85,0
ICA + ICB	h ₁	h ₃	h ₅	h ₇	h ₉	h ₁₁	h ₁₃	h ₁₅
I [A]	96,7	23,4	11,3	7,3	5,8	4,8	4,3	3,4
βh [°]	98,4	-2,9	97,1	-41,1	98,0	-32,4	91,3	-85,0

O processo para a obtenção da corrente soma devida a duas cargas não lineares distintas, apresentado no item 6.3.2 - Para um conjunto de CNL diferentes, é baseado no mesmo princípio utilizado para uma única carga não linear, o qual foi validado por meio de comparações entre a simulação no domínio do tempo e a o script proposto, vide Tabelas 6.4 e 6.5. Neste sentido, uma vez que o script utilizado para cargas não lineares distintas apresentou convergência, dada sua similaridade com o caso de uma CNL única, infere-se que o mesmo apresenta resultados corretos para a estimativa completa do espectro harmônico gerado pelo conjunto de CNL e pode ser aplicado a duas ou mais CNL simples ou aglomeradas. Assim, é possível estimar a corrente a jusante de cada disjuntor do quadro elétrico alimentador e a corrente a montante do quadro. O erro nessa estimativa é devido à eventual impossibilidade de se obter a matriz parcial de admitâncias que tenha sido montada com o ângulo exato de cada componente harmônico da tensão terminal, à inexatidão das medidas das tensões e correntes que a montaram e ao erro na estimativa da tensão terminal.

7 CONCLUSÕES, CONTRIBUIÇÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1 INTRODUÇÃO

Este trabalho teve como objetivo estudar o comportamento das correntes harmônicas produzidas por uma carga não linear específica que seja representativa no contexto das CNL existentes, estabelecer uma metodologia para a ação de geração das correntes por esta CNL ou por qualquer outra e procurar produzir uma forma de obtenção do espectro da corrente de fase devida a um conjunto homogêneo ou heterogêneo de CNL previamente modeladas.

Este documento foi iniciado pela revisão da bibliografia sobre a soma de correntes harmônicas ou, genericamente, de vetores. Na visão determinística, em muitas pesquisas se utilizam as componentes harmônicas da corrente, medidas anteriormente em condições ideais, que são conduzidas à soma pela aplicação de um fator de multiplicação que justifique o fato da corrente soma ser menor do que a soma das correntes. Outra vertente nessa mesma linha usa fatores de ponderação a serem aplicados, diferentemente, a cada ordem harmônica para produzir somas simples, ponderadas (*weighted*) ou quadráticas das parcelas. As publicações mostram que esses últimos métodos estão sendo pouco utilizados, já que não há concordância nos fatores utilizados. A explicação está no fato das correntes previamente medidas não mais existirem da forma original no momento em que um conjunto de CNL altera a tensão terminal que existia antes desse conjunto ser inserido e, assim, a soma não deverá se dar por essas parcelas, mas por outras que a metodologia proposta não é capaz de prever.

Na abordagem estocástica, boa parte dos trabalhos publicados usa métodos puramente matemáticos para resolver a soma de vetores, a partir da distribuição de probabilidades normal ou uniforme para as amplitudes e uniforme para os ângulos. A validação prática do método se dá através de simulações computacionais para uma grande quantidade de vetores, utilizando o método de Monte Carlo. Nesse caso, os valores estimados e calculados são bastante concordantes e se referem ao comportamento médio das cargas durante determinado intervalo de tempo. A aplicação destes métodos para a obtenção da corrente de um conjunto de CNL em determinada condição específica, caso abordado neste trabalho, é dificultada. Outra parcela de publicações resolve a soma de vetores por um enfoque estritamente analítico que demanda a transformação de um conjunto de valores medidos em uma equação que represente a *pdf* da amplitude e a resolução por cálculo integral. Esse processo, apesar de se apresentar elegantemente, requer um tratamento estatístico prévio e um tratamento

matemático posterior para transformar o conjunto de dados de medição em uma equação que o represente.

Todas essas abordagens tentam resolver um problema de cadeia longa através de uma solução localizada, considerando que todas as causas e consequências podem ser transferidas para uma estância mais tranquila, o que simplifica, mas não resolve.

Quase todos os modelos existentes de penetração harmônica utilizam fonte fixa de tensão e um conjunto de CNL reunidas em uma grande carga com potência constante e pré-definida pela soma simples das potências unitárias ou, no máximo, pela potência demandada do grupo com a contabilização de um fator de utilização global. Nestes, uma vez estabelecidas as condições iniciais, a inserção das CNL no sistema elétrico não altera a tensão terminal delas. Essa suposição se faz necessária para esses modelos já que, se a tensão terminal das CNL for alterada à revelia do comportamento esperado do sistema, não há meios de estabelecimento de qualquer correspondência matemática ou estocástica entre a corrente do conjunto de CNL e a tensão final que se estabelece após a acomodação do sistema. Essa metodologia não corrige a corrente pela correspondente tensão terminal das cargas.

O fato das CNL estarem dispostas em aglomerados específicos facilita o desenvolvimento dos cálculos das tensões terminais, em razão do efeito de todas ser computado em conjunto, como uma carga grande e única. Nos projetos elétricos comerciais e industriais atualmente produzidos, é quase uma imposição técnica, apesar de poucas vezes formalmente solicitado, a reunião de todas as cargas iguais ou similares de um mesmo pavimento ou de um setor de pavimento ou de um alimentador em um quadro elétrico exclusivo. Essa distinção não é item obrigatório pelas normas da ABNT ou das empresas concessionárias de energia elétrica, estas que, em última instância, determinam a metodologia de cálculo da demanda em todos os quadros elétricos internos e do alimentador principal, seja um transformador ou a subestação inteira. A escolha pela metodologia de se reunir cargas iguais em um único quadro elétrico adquire notória importância face ao sempre crescente apelo pela previsão ou implantação dos dispositivos de automação predial, das medidas de contabilização financeira por centros de custo e dos sistemas de gerenciamento da eficiência energética, além das facilidades técnicas quanto à sua montagem, operação e manutenção.

7.2 CONCLUSÕES

O modelo apresentado neste trabalho é suficientemente exato para estabelecer a corrente de fase de um conjunto aglomerado de CNL em um único terminal comum e bastante preciso na avaliação das amplitudes e ângulos de todas as suas componentes harmônicas, desde que seja possível observar ou estimar as alterações das tensões ao longo do alimentador pela inclusão dessas cargas ou de outras. Quando diferentes tipos de CNL são reunidas em grupos homogêneos e distintos, o modelo também consegue a mesma exatidão e precisão na avaliação da corrente soma originada de um quadro elétrico comum, desde que essas CNL sejam convenientemente modeladas para o estabelecimento de sua matriz de admitâncias. O espectro harmônico da corrente mostrada em publicações técnicas para uma única CNL não tem utilidade prática. Essa corrente somente será medida em um caso muito especial de coincidência quando a tensão que alimenta a carga for exatamente igual à tensão que a alimentava à época da medição para a publicação, o que ocorrerá, caso ocorra, por um curtíssimo período de tempo e logo desaparecerá devido à estocasticidade do sistema.

A principal conclusão deste trabalho é que a corrente de fase de uma CNL é fortemente dependente da sua tensão terminal. Com base em medições prévias de tensão e de corrente, a matriz de admitâncias consegue modular a corrente harmônica injetada no sistema, conforme varia a tensão terminal. Em geral, quanto mais esta se afasta da tensão de base, maior a corrente drenada pela admitância de Norton e menor a corrente injetada no sistema, que é a diferença entre as duas.

7.3 CONTRIBUIÇÕES

O projeto de modelagem apresentado permite a avaliação da corrente gerada por uma ou mais CNL sob qualquer tensão senoidal pura ou não senoidal composta cuja amplitude média quadrática devida a todos os seus componentes se situe em torno do valor nominal de operação. Apesar das não linearidades, que são mais pronunciadas ao longo do sistema nos elementos intermediários sob excesso de carregamento, a modelagem proposta e as iterações carga-sistema conseguem estimar corretamente o comportamento da tensão terminal das cargas e as correntes geradas a qualquer momento até a estabilização. A estabilização é um recurso teórico utilizado para se chegar a um ponto em que as tensões terminais não mais se modifiquem e que as iterações não são mais necessárias. No mundo real essa estabilização

não existe, por causa das contínuas flutuações das cargas no próprio sistema e/ou nos sistemas adjacentes. Evidentemente, a corrente gerada é referida a uma tensão terminal específica e sem a determinação dessa tensão é impossível avaliar a corrente.

Os trabalhos nessa área, especialmente os que utilizam a admitância de Norton, não detalham o tratamento que se deve dar e nem a correção de discrepâncias obtidas dos valores medidos de tensão e de corrente. Grande parte deles utiliza cargas e sistemas elétricos que são todos modelados computacionalmente, o que produz resultados livres de ruídos de medição e quase perfeitamente simétricos. Cargas não lineares reais, cujos parâmetros são obtidos de medição, mostram formas assimétricas e distorcidas. São muito raros os trabalhos que utilizam valores medidos e mesmo nestes casos, nem sempre, o completo procedimento de processamento dos dados é explicitado. O presente trabalho utiliza cargas medidas e mostra alguns métodos de linearização dos dados. Mostra também outros meios, novos ou já consolidados, de se utilizar esses valores sem a necessidade de linearização, o que reduz a complexidade do tratamento matemático, mas, por outro lado, aumenta razoavelmente o banco de dados a ser manipulado. Cargas não lineares compostas por um reator eletrônico ou outras com conversores de operação similar devem produzir, idealmente, admitâncias cujo lugar geométrico no plano condutância x susceptância é uma circunferência perfeita. Uma das alternativas para a solução é utilizar os dados das admitâncias para construir uma circunferência média e tratar os novos valores como um tensor. Há a possibilidade de algum outro tipo de CNL não produzir uma circunferência e o tratamento por tensor não é aplicável. Dessa forma, a utilização dos dados sem linearização pode ser uma alternativa única.

Além dessa facilidade, foi desenvolvido um método de interação sistema-carga em ambiente Matlab script que calcula, iterativamente, a tensão da carga a partir das condições iniciais. Esse procedimento específico, que não é descrito na literatura pesquisada, permite, a partir da modelagem de todo o sistema elétrico, avaliar a tensão terminal em condições de estabilização e, conseqüentemente, a corrente final do conjunto de CNL.

Utilizando um processo de aglutinação das CNL de mesma natureza em aglomerados específicos, por razões de simplificação, é possível estabelecer um meio do aglomerado se comportar como uma única carga e estimar sua corrente total, ou seja, a corrente soma das CNL modeladas. Cargas não lineares diferentes possuem três alternativas de solução, em ordem de complexidade. A primeira é reunir todas em um aglomerado, como anteriormente, desprezando as impedâncias dos cabos de conexão, desde que dispostas ao longo de um único alimentador, o que não é tecnicamente comum. A segunda é uma variante da primeira com a contabilização das impedâncias harmônicas dos cabos. A terceira é tratar cada CNL ou

subconjunto de CNL independentemente. Nesse caso, o programa deverá interagir cada subconjunto com o sistema elétrico e atualizar os efeitos da contabilização das correntes para todos os demais conjuntos de CNL, um a um. Esse método pode criar uma interação demorada, em termos de carregamento e complexidade computacional, até que todos os subconjuntos estejam atualizados, mas as equações de interação são as mesmas apresentadas.

Uma vez que as correntes harmônicas geradas por uma CNL são totalmente dependentes das amplitudes e, principalmente, dos ângulos dos componentes harmônicos da sua tensão terminal, é imperativo o controle absoluto da tensão para estabelecer e medir corretamente essa correspondência. Assim, foi desenvolvido um programa em ambiente LabVIEW, a partir de um módulo DAC específico deste mesmo fabricante, para produzir as tensões programadas e ler as correntes medidas das cargas, para cada ordem harmônica com resolução de 5 Hz e reunidos de subgrupos, conforme a IEC 61000-4.7.

7.4 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O presente trabalho de pesquisa esteve restrito à modelagem de uma carga não linear específica: reator eletrônico para lâmpadas fluorescentes. Apesar desta CNL ser de apenas um tipo dos muitos existentes, e mesmo para esse tipo de carga há inúmeras variantes, o processo para a modelagem de outras CNL é similar. Dos problemas mais imediatos para a extensão a cargas mais robustas, o primeiro é a disponibilização de *driver* que apresente potência suficiente para acionar a carga e o segundo é que ele consiga transferir os parâmetros da tensão programada para sua saída, de forma que os erros de *offset* e/ou de linearidade possam ser desprezados. Utilizando o programa LabVIEW[®] mostrado anteriormente, os erros de *offset* são facilmente compensados, mas os erros de linearidade deverão ser corrigidos, a priori, para cada componente harmônico de tensão adicionado. Outra correção a ser implementada é quanto aos dados enviados ao Excel[®]. No processo utilizado aqui, cada conjunto é tratado separadamente e os cálculos de média quadrática das amplitudes e das médias simples dos ângulos são feitos manualmente, o que demanda grande tempo de pós processamento.

A partir dos desenvolvimentos apresentados neste trabalho, alguns projetos de pesquisa iniciativa ou de pesquisa de extensão ao existente podem ser implementados. Dos caminhos de aproximação há a vertente determinística e a estocástica. No caminho determinístico as possibilidades de pesquisas são:

1 - Desenvolver um estudo sobre a variabilidade do comportamento do reator eletrônico face às mudanças de temperatura interna e externa. Esse estudo pode ocasionar uma revisão em alguns elementos das matrizes parciais de admitâncias ou sua comprovação ou produzir um ou mais conjuntos de matrizes parciais. Se todas as medições do método desenvolvido neste documento são realizadas em determinado instante da operação das luminárias, a validade do método não depende desse aspecto operacional, mas se o objetivo for estimar o espectro harmônico após certo período a partir da ligação da carga ou na estabilização, as medições devem ser realizadas neste decurso temporal. É possível, nesse caso, que haja alguma alteração nas admitâncias parciais.

2 - Estender o método para outras cargas não lineares de interesse. A proposta de um método que trata de correntes harmônicas deve ser baseada em alguma CNL em particular, e este foi desenvolvido para o reator eletrônico para 2 lâmpadas fluorescentes, por ser esta, seguramente, a CNL mais disseminada e quase obrigatória em qualquer ambiente e, especialmente, em posto de trabalho. Outra característica vantajosa é sua baixa potência nominal, o que demanda dispositivos de acionamento também de baixa potência. O fato de seu regime de trabalho ser fixo, a despeito do observado no item 1 deste parágrafo, facilita a confecção das matrizes. Na bibliografia a respeito das admitâncias de Norton, encontram-se trabalhos sobre HVdc, conversores e reatores para iluminação fluorescente apenas. Microcomputadores e demais dispositivos eletrônicos ou de informática não constam de nenhum estudo pesquisado, em razão da dificuldade de estabelecimento do seu ponto de operação nominal. Para estes, mesmo que se estabeleça seu ponto de operação, este se dará na realização de uma única tarefa, o que demandará mais de um conjunto de matrizes para cobrir toda a gama de operações possíveis.

3 - Uma vez estabelecidas as matrizes parciais para um tipo de CNL, o presente modelo permite criar um banco de dados para essa carga particular, já que a tensão de base deve ser conhecida e reproduzível. O modelo proposto permite a criação dessa biblioteca de valores medidos para que possa ser arquivado e compartilhado com outros pesquisadores.

4 - Estender o método para cargas e sistemas trifásicos a 3 fios, já que a metodologia é a mesma. O estudo em questão foi direcionado para uma carga monofásica que pode ser estendido para cargas trifásicas a 4 fios. O sistema de alimentação fase-neutro é mais simples e implica, necessariamente, em circuitos a 4 fios, não cabendo considerações sobre os ângulos

das tensões fase-fase e nem sobre o cancelamento das ordens triplas da corrente. No sistema monofásico todas as ordens harmônicas ímpares de corrente estão presentes. Excetuando-se o modelo de matrizes para componentes simétricos que foram desenvolvidos para cargas e sistemas trifásicos, os demais modelos estão mostrados para uma única fase.

5 - O método descrito neste trabalho teve o objetivo de tentar resolver o problema de soma de correntes e foi direcionado para aplicação em baixa tensão, podendo se estender até o barramento geral do QGBT, utilizando o mesmo método. Como cada disjuntor desse quadro deve alimentar um conjunto homogêneo de cargas, lineares ou não, o princípio da soma de correntes baseado nos valores atualizados pode ser aplicado, uma vez que a tensão do barramento comum é conhecida e a mesma para todas as cargas. As prováveis desigualdades das tensões terminais irão modular as correntes de cada conjunto de cargas, mas no quadro geral todas as tensões são iguais. Assim, utilizando o método deste trabalho, é possível estimar a corrente secundária do transformador de distribuição, com certo trabalho computacional para ajuste das correntes de cada grupo de carga.

6 - O modelo apresentado utilizou as frequências harmônicas até a 15ª ordem, inclusive, de forma a não estender demasiadamente a quantidade de dados a serem manipulados e nem atingir uma frequência na qual alguns efeitos prejudiciais são mais pronunciados, como o efeito pelicular e acoplamentos capacitivos nos cabos e transformadores. Pela mesma razão, as impedâncias do transformador de distribuição e dos cabos do sistema elétrico foram representadas por uma simples impedância indutiva série cujos módulo e ângulo são corrigidos para cada ordem harmônica da corrente circulante. A mesma metodologia foi estendida às cargas que compartilham o PAC com as CNL, sendo estas consideradas lineares e não geradoras de correntes harmônicas. O modelo apresentado é razoavelmente exato para as condições mencionadas, mas poderia ser melhor se considerasse todas as impedâncias de forma mais completa, as não linearidades dos componentes e os acoplamentos indutivos e capacitivos dos cabos, no mínimo, até a 25ª ordem harmônica, conforme PRODIST módulo 8.

7 - O programa desenvolvido na LabVIEW tem a função de produzir a tensão da carga com os harmônicos, amplitudes e ângulos de defasagem relativos ao componente fundamental, em valores específicos. Os erros angulares e de ganho produzidos pelo *driver* intermediário são compensados no programa em modo de malha aberta. Como a potência da carga é fixa e bastante inferior à potência do driver, o sistema, uma vez estabilizado, continua

nesse estágio operacional. Para uma carga variável ou para melhor monitoração das grandezas elétricas envolvidas é necessário expandir o programa existente e criar uma forma de controle da tensão gerada, em malha fechada. Dessa forma, eventuais desvios na tensão medida, em relação à desejada, deverão ser corrigidos automaticamente.

8 - Desenvolver uma distribuição de probabilidades que tenha uma aproximação mais realista para a tensão terminal das CNL em redes de baixa tensão comerciais ou industriais. Nas redes comerciais, a entrada de energia, seja em BT ou em AT, produz distribuições similares, mas com parâmetros característicos diferentes, como a média, intervalo, variância etc. Nas redes industriais, normalmente, há grande disponibilidade de potência para qualquer carga e a distribuição tem menor variância. Na grande parte dos trabalhos publicados que tentam definir o vetor soma de uma quantidade N de vetores parciais, consideram-se as amplitudes variáveis dentro da faixa 0 a 1,0 pu e os ângulos uniformemente distribuídos entre 0 e 2π , mas com a amplitude e o ângulo desses vetores independentes entre si. Em alguns, supõem-se que os componentes ortogonais x e y dos vetores parciais sejam correlacionados. Aparentemente, todas essas considerações se afastam da realidade, ao tentar produzir uma solução mais elegante ou mais simples. Os ângulos dos fasores parciais não são uniformemente distribuídos e suas amplitudes não possuem *pdf* apenas uniforme ou normal. Ainda não foi encontrado um estudo consolidado sobre a aparência matemática da distribuição probabilística dos vetores parciais de um sistema elétrico comum de baixa tensão e como essa distribuição é alterada pelo regime ou tipo de carga e pelo sistema elétrico adjacente. Uma vez estabelecidas as matrizes de admitâncias para as cargas, os vetores parciais relatados acima podem ser as tensões terminais das CNL que, reunidas em uma distribuição estocástica, irão determinar a distribuição da corrente do grupo de cargas. A média e a variância das tensões irão determinar a média e a variância das correntes. A maioria dos trabalhos publicados na área estocástica usa $2 \leq N \leq 5$ ou N elevado. No mundo real, a quantidade N de vetores parciais não é um valor elevado, de forma que as simulações que utilizam o método de Monte Carlo não podem ser aplicadas indiscriminadamente para comprovar a eficácia do modelo. As situações reais são apresentadas com N entre uma dezena e poucas dezenas de vetores parciais, uma vez que não é padrão dos projetos de engenharia elétrica agrupar mais de uma centena de cargas iguais em um único quadro elétrico, mesmo em se tratando de cargas muito leves, como luminárias de menos de 70 VA de potência unitária. Do ponto de vista da proteção termomagnética, o limite para um quadro elétrico trifásico fica próximo a 20 kVA em 220 V.

9 - Uma vez desenvolvida uma distribuição de probabilidades que considere a dinâmica do sistema elétrico para consumidores típicos comerciais, poderia ser encontrado um fator multiplicador, como o fator de diversidade que, a partir da *pdf* média e dos dados do sistema, estabeleça um valor estatístico de ponderação para cada ordem harmônica. Nessa dinâmica, a distribuição da tensão terminal das CNL depende, além da oscilação do sistema, das demais cargas que compartilham o PAC. O resultado é uma *pdf* da corrente que estima os valores máximo e mínimo para cada ordem e que teria enorme utilização na estimativa do ponto de operação e das correntes harmônicas máxima e mínima dos transformadores da subestação, cabos alimentadores e barramentos de painéis elétricos.

7.5 TRABALHOS PUBLICADOS

1 - Senra, R.; Boaventura, W. C.; Mendes, E. M. A. M.: **An Investigation of the Harmonic Currents Behavior due to Fluorescent Lighting**. 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Belo Horizonte, Brasil. Nov. 2016. DOI 10.1109/ICHQP.2016.7783444

2 - Senra, R.; Boaventura, W. C.; Mendes, E. M. A. M.: **Assessment of the Harmonic Currents Generated by Single-phase Nonlinear Loads**. Electric Power System Research. Volume 147, Jun. 2017, Pages 272–279. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.02.028>

REFERÊNCIAS

- ABDELKADER, S.; ABDEL-RAHMAN, M. H.; Osman, M. G.: **A Norton Equivalent Model for Nonlinear Loads**. IEEE Conference on Large Engineering Systems, Halifax, NS, USA. p 63-67. 2001.
- ABDI, A.; HASHEMI, H.; NADER-ESPHAHANI, S.: **On the PDF of Sum of Random Vectors**. IEEE Transactions on Communications. Vol. 48, no. 1. Jan. 2000.
- ACARKAN, B.; KILIÇ, O.: **Electrical Harmonics Modeling of Office Equipment Using Matlab and Simulink**. Department of Electrical Engineering, Yildiz Technical University Istanbul, Turkey. 2005.
- ACARKAN, B.; ERKAN, K.: **Harmonics Modeling and Harmonic Activity Analysis of Equipment with Switch Mode Power Supply using MATLAB and Simulink**. IEEE International Electric Machines & Drives Conference. Antalya, Turkey. Vol. 1, p 508-513. May 2007.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – **PRODIST Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica** ANEEL. Revisão 8 de 2017.
- ALMEIDA, C. F. M.; KAGAN, N.: **A Novel Technique for Modeling Aggregated Harmonic-Producing Loads**. 21st International Conference on Electricity Distribution. Frankfurt, Germany. 6-9 Jun. 2011.
- ARRILLAGA, J.; WATSON, N.R.; SMITH, B. C.; WOOD. A. R **Power System Harmonics Analysis**. Ed. John Wiley & Sons, Ltd. England. 1st Edition. 1997
- BAGHZOUZ, Y.; TAN, O. T.: **Probabilistic Modeling of Power System Harmonics**. IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 1A-23, no. 1. Jan. 1987.
- BAGHZOUZ, Y.: **An Overview on Probabilistic Aspects of Harmonics in Power Systems**. IEEE Power Engineering Society General Meeting. Vol. 3, p 2394-2396. Jun. 2005.
- BAGHZOUZ, Y.; BURCH. R. F.; CAPASSO, A.; CAVALINI, A.; EMANUEL, A. E.; HALPIN, M.; LANGELLA, R.; MONTANARI, G.; OLEJNICZACK, K. J.; RIBEIRO, P.; RIOS-MARCUELLO, S.; RIGGIERO, F.; THALLAM, R.; TESLA, A.; VERDE, P.: **Time-Varying Harmonics: Part II - Harmonic Summation and Propagation**. IEEE Transactions on Power System. Vol. 17, no. 1. Jan. 2002.
- BALCI, M. E.; OZTURK, D.; KARACASU, O.; HOCAOGLU, M. H.: **Experimental Verification of Harmonic Load Models**. 43rd International Universities Power Engineering Conference UPEC. Padova, Italy. Apr. 2008.
- BaSUDAN, P.; HEGAZY, Y. G.: **Probabilistic Modeling of Distribution System Loads for Harmonic Studies**. Electrical Technology Department, Riyadh College of Technology. Saudi Arabia. IEEE Proceedings, p 1778-1781. 2001.

BLANCO, A. M.; PARRA, E. E.: **Effects of High Penetration of CFLs and LEDs on the Distribution Networks**. 10th International Conference of Electrical Power Quality and Utilization. Łódź, Poland. Set. 2009.

BHATTACHARYYA, S.; MYRZIK, J.; KLING, W.; COBBEN, S.; ALLIENDER, J.: **Harmonic Current Interaction of a Low Voltage Customer's Installation**. 10th International Conference of Electrical Power Quality and Utilization. Łódź, Poland. Set. 2009.

BILIK, P.: **Measurement of Voltage and Current Harmonics for Frequencies up to 9 kHz According IEC-61000-4.7**. 10th International Conference of Electrical Power Quality and Utilization. Łódź, Poland. Set. 2009.

BRACALE, A.; CARPINELLI, G.; LEONOWICZ, Z.; LOBOS, T.; REZMER, J.: **Measurement of IEC Groups and Subgroups Using Advanced Spectrum Estimation Methods. Instrument for Power Quality Monitoring According to IEC Standards**. IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference. Victoria, Canada. May. 2008.

CAMILO, C.; CIDRÁS, J.: **Harmonic Model for the Fluorescent Lamp**. 8th International Conference on Harmonics and Power Quality ICHQP, Athens, Greece. 1998.

CANESIN C. A., OLIVEIRA L. C.; O SOUZA J. B.; LIMA, D. O.; BURATTI, R. P.: **A Time Domain Harmonic Power-Flow Analysis in Electrical Energy Networks Using Norton Models for Non-Linear Loads**. IEEE 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Bucharest, Hungary. Jun. 2014.

CAVALINI, A.; CACCIARI, M.; LOGGINI, M.; MONTANARI, G. C.: **Evaluation of Harmonic Levels in Electrical Networks by Statistical Indexes**. IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 30, no. 4. Jul/Aug. 1994.

CAVALLINI, A.; MONTANARI, G. C.; CACCIARI, M.: **Stochastic Evaluation of Harmonic in Network Buses**. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 10, no. 3. Jul. 1995.

CAVALINI, A.; LANGELLA, R. A.; RUGGIERO, F.: **Gaussian Modeling of Harmonic Vectors in Power Systems**. 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power ICHQP. Athens, Greece. Oct. 1998.

CHANG, G. W.; RIBEIRO, P. F.; LAI, G. G.; HUANG, H. M.; CHANG, C. T.: **A New Approach for Prediction of Harmonic Currents Generated by a Cluster of AC/DC Converters**. 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Vol. 1 p 373-377. 2002.

CHANG, G. W.: **Characterizing Harmonic Currents Generated by Fluorescent Lamps in Harmonic Domain**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, no. 4. Oct. 2003.

COLLIN, A. J.; CRESSWELL, C. E.; DJOKIĆ, S. Z.: **Harmonic Cancellation of Modern Switch-Mode Power Supply Load**. 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Bergamo, Italy. Sep. 2010.

CORBYN, D. B.: **This Business of Harmonics**, Electronics & Power, p. 219-223. 1972.

CRUCQ, J. M.; ROBERT, A.: **Statistical Approach for Harmonics Measurements and Calculations**. 10th International Conference on Electricity Distribution CIRED. pp 91-96. Brighton, UK. May 1989.

ĆUK, V.; COBBEN, J. F. G.; RIBEIRO, P. F.; KLING, W. L.: **Summation of Harmonic Currents of Variable-Speed Induction Motor Drives**. IEEE Power and Energy Society General Meeting. Vancouver BC. Canada. Jul. 2013.

ĆUK, V.; COBBEN, J. F. G.; KLING, W. L.; RIBEIRO, P. F.: **Analysis of Harmonic Current Summation Based on Field Measurements**. IET Generation Transmission and Distribution. Vol. 7, no. 12, pp 1391-1400. 2013.

DAS, J. C.: **Unbalanced Fault Analysis in Power Systems Analysis**. Marcel Dekker Inc. New York. 2002.

De la ROSA, F. C.: **Harmonics and Power Systems**. Ed. Taylor & Francis Group. Boca Raton, Florida, USA. 1st Edition. 2006.

DELL'AQUILA, A.; LASSANDRO, A.; ZANCHETTA, P.: **Modeling of Line Side Harmonics Currents Produced by Variable Speed Induction Motor Drives**. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 13, no. 3. Sep. 1998.

DOBINSON, L. G.: **Closer Accords on Harmonics**. Electronics & Power. Vol. 21, no. 9. May 1975.

ELPHICK, S.; CIUFO, P.; PERERA, S.: **Laboratory Investigation of the Input Current Characteristics of Modern Domestic Appliances for Varying Supply Voltage Conditions**. 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Bergamo, Italy. Sep. 2010.

EMANUEL, A. E.: **On the Assessment of Harmonic Pollution**. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 10, no. 3. Jul. 1995.

EMANUEL, A. E.: **Harmonics in the Early Years of Electrical Engineering: A Brief Review of Events, People and Documents**. 9th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Orlando, Florida. Oct. 2000.

FARHAD Yahyaie, F.; LEHN, P. W.: **Using Frequency Coupling Matrix Techniques for the Analysis of Harmonic Interactions**. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 31, no. 1. Feb. 2016.

FAURI, M.: **Harmonic Modeling of Non-linear Load by Means of Crossed-Frequency Admittance Matrix**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 12, no. 4. Nov. 1997.

FORTESCUE, C. L.: **Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Poly-phase Network**. Trans. AIEE, part II, vol. 37. 1918.

FRATER, L. P.; WOOD, A. R.; WATSON, N. R.: **Linearization of Non-Linear Loads by Phase Dependent Frequency Coupling Admittance Matrices**. 16th PSCC Power System Computation Conference. Glasgow, Scotland. Jul. 14-18, 2008.

FRÖBEL, A.; VICK, R.: **Chosen Aspects for Harmonic Analysis in Distribution Network**. 22nd International Conference on Electricity Distribution. CIRED. Stockholm, Sweden. 10-13 Jun. 2013.

FRÖBEL, A.; VICK, R.: **Performance Analysis for Non-linear Load Modeling with Frequency Coupling Admittance Matrix**. 23rd International Conference on Electricity Distribution. CIRED. Lion, France. 15-18 Jun. 2015.

FUENTES, J. A.; GALBADÓN, A.; CÁNOVAS, F. J.; MOLINA, A.: **Harmonic Model of Electronically Controlled Loads**. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Seattle, Washington, USA. Jul. 2000.

GIFUNI, A.; SORRENTINO, A.; FERRARA, G.; MIGLIACCIO, M.: **An Estimate of the Probability Density Function of the Sum of a Random Number N of Independent Random Variables**. Journal of Computational Engineering. Vol. 2015. Hindawi Publishing Corp. 2015.

GOLOVANOV, N.; LAZAROIU, G. C.; ROSCIA, M.; ZANINELLI, D.: **Harmonic Summation in Power Systems with Power Electronic Interfaced Loads**. 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). Bergamo, Italy. Sep. 2010.

GRADY, W. M.; MANSOOR, A.; FUCHS, E. F.; VERDE, P.; DOYLE, M.: **Estimating the Net Harmonic Currents Produced by Selected Distributed Single-phase Loads: Computers, Television and Incandescent Light Dimmers**. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. New York, New York, USA. Jan. 2002.

GRÖTZBACH, M.; BAUTA, M.: **Significance of Working Point Determining Line Current Harmonics in Controlled AC/DC Converter**. University of Federal Defence Munich, Neubiberg, Germany. 1996.

GÚL, O.; KAYPMAZ, A.: **Power Components in Unbalanced and Distorted Poly-phase Systems**. 9th Mediterranean Electrotechnical Conference. Tel-Aviv, Israel. May. 1998.

GUNTHER, E.: **Harmonic and Interharmonic Measurement According to IEEE 519 and IEC 61000-4-7**. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. May. 2006.

HEGAZY, Y. G.; SALAMA, M. M. A.: **Probabilistic Representation of Harmonic Currents Produced by AC/DC Static Power Inverters**. Proceedings on the IEEE Industry Applications Society. Orlando, Florida, USA. Vol. 2, p 1869-1895. Oct. 1995.

HEGAZY, Y. G.; SALAMA, M. M. A.: **Calculations of Diversified Harmonic Currents in Multiple Converter Systems**. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Vol. 2, p 727-731. Seattle, Washington, USA. Jul. 2000.

HEIDT, D. C.: **A Detailed Derivation of a Newton-Raphson Based Harmonic Power Flow**. Faculty of the Russ College of Engineering and Technology of Ohio University. Dissertação de Mestrado. Athens, Ohio, USA. 1994.

HOLEY, D. M.; CHANDRAKAR, V. K.: **Harmonic Analysis Techniques of Power System. A Review**. International Research Journal of Engineering and Technology IRJET. Vol. 3, no 2. Feb. 2014.

HUAISHU, L.; LANGNI L.; WEIMING M.: **A Novel Method to Calculate the Harmonic Currents in a Three-phase Bridge Rectifier**. IEEE Proceeding on Power System Technology. Vol. 2, p 1551-1555. 1998.

HUME, D. J.; WOOD, A. R.; SMITH, B. C.; ARRILLAGA, J.: **Linearized Direct Harmonic Solution Method for a Back-to-back HVdc Link**. 8th International Conference on Harmonics and Power Quality ICHQP, Athens, Greece. 1998.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61000-3-6. **Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 3: Limits – Section 6: Assessment of Emission Limits for Distorting Loads in MV and HV Power Systems** 2nd edition. Feb. 2008.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61000-4-7. **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4 - Testing and Measurement Techniques – Section 7: General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation, for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto**. 2nd edition. Jun. 2008.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61000-4-30. **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4 - Testing and Measurement Techniques – Power Quality Measurement Methods**. 3rd edition. 2015.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61400-21 **Wind turbines – Part 21: Measurement and Assessment of Power Quality Characteristics of Grid Connected Wind Turbines**, 2nd edition. Ago. 2008.

IEEE std 519-2014. **IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**. 2014.

JAHANIKIA, A. H.; ABBASPOUR, M.: **Studying the Effects of Using Compact Fluorescent Lamps in Power Systems**. 10th International Conference of Electrical Power Quality and Utilization. Łódź, Poland. Set. 2009.

KARIMI, E.; NAJMI, V.; MOKHTARI, H.: **Using Frequency Coupling Matrix for Estimation of Distribution Network Losses**. 4th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference. Tehran, Iran. Feb 13-14. 2013.

KAZIBWE, W. E.; ORMEYER, T. H.; HAMMAM, M. S. A. A.: **Summation of Probabilistic Harmonic Vectors**. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 4, no. 1. Jan. 1989.

KENDALL P. G.: Comments on **Summation of Harmonics with Random Phase Angles**. Power Engineering Div. Electrical Research Association, Cleeve Road, Leatherhead, Surrey, England. Sep. 1972.

KNIEL, R.; SCHNIEPER, P. A.: Comments on **Harmonics with Random Phase Angles**. IEEE Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. Vol. 121, no. 7, Jul. 1974.

KRON, G.: **Tensors for Circuits**. Dover Publications, Inc. New York, USA. 2nd Ed. 1959.

KUS, V.; JOSEFOVA, T.; BILIK, P.: **Harmonic Generated by the Voltage-Source Active Rectifier**. 10th International Conference of Electrical Power Quality and Utilization. Łódź, Poland. Set. 2009.

LEVA, S.: **Power Network Asymmetrical Faults Analysis Using Instantaneous Symmetrical Component**. Journal of Electromagnetic Analysis & Applications. pp 205-213. 2009.

LIANG, X.; JACKSON, W.: **Investigation of Non-Linear Devices Modeled as a Harmonic Current Source**. IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference. Clearwater Beach, Florida, USA. May 2008.

MANSOOR, A.; GRADY, W. M.; THALLAN, R. S.; DOYLE, M. T.; KREIN, S. D.; SAMOTYJ, M. J.: **Effect of Supply Voltage Harmonics on the Input Current of Single-phase Diode Bridge Rectifier Loads**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, no. 3. Jul. 1995.

MANSOOR, A.; GRADY, W. M.; CHOWDHURY, A. H.; SAMOTYJ, M. J.: **An Investigation of Harmonics Attenuation and Diversity among Distributed Single-Phase Power Electronics Loads**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, no. 1. Jan. 1995.

MANSOOR, A.; GRADY, W. M.; STAATS, P. T.; THALLAN, R. S.; DOYLE, M. T.; SAMOTYJ, M. J.: **Predicting the Net Harmonic Currents by Large Numbers of Distributed Single-phase Computer Loads**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, no. 4. Oct. 1995.

MEDEIROS, F.; DALTON C.; RIBEIRO, P. F.; MARQUES, C. A. G.; DUQUE, C. A.: **A New Approach for Harmonic Summation Using the Methodology of IEC 61400-21**. 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). Bergamo, Italy. Sep. 2010.

METZ-NOBLAT, B.: **Analysis of Three-phase Networks in Disturbed Operating Conditions Using Symmetrical Components**. Schneider Cahiers Technique no. 18. 2005.

NATIONAL INSTRUMENTS CORP. **NI-USB 621x User Manual**. 2006.

MOO, C. S.; HSIEH, Y. C.; YEN, H. C.; LEE, C. R.: **Fluorescent Lamp Model with Power and Temperature Dependence for High-Frequency Electronic Ballasts**. IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 39, no. 1. Jan/Feb. 2003.

NASSIF, A. B.; XU, W.: **Characterizing of Harmonic Attenuation Effect of Compact Fluorescent Lamps**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 3. 2009.

NGANDUI, E.; MOHAMMED, J.; CHÉRITI, A.; SICARD, P.: **Probabilistic Modeling of Harmonic Currents Produced by a Twelve-Pulse AC/DC Converter under Unbalanced Supply Voltage**. Power Engineering Society Summer Meeting 2000 IEEE. Vol. 2, p 721-726. Seattle, Washington, USA. Jul. 2000.

OLIVEIRA, G. H. G.; GARCIA, F.; SANCHES, T. P.: **Análise de Protocolos de Medição de Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência**. XVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Uberlândia, Brasil. Out. 2003.

PAAP, G.: **Symmetrical Components in the Time Domain and Their Application to Power Network Calculations**. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, no. 2. May 2000.

PAWELEK, R.; GBURCZYK, P.; WASIAK, I.: **Analysis of Current Distortion of Unsteady Non-linear Loads**. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, no. 2. May 2008.

RANADE, S. J.; XU, W.: **An Overview of Harmonic Modelling and Simulation. Chapter 1**. New Mexico State University, Las Cruces, NM, USA and University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada. 1996.

RAWA, M. J. H.; THOMAS, D. W. P.; SUMMER, M.: **Factors Affecting the Harmonics Generated by a Cluster of Personal Computers**. 16th ICHQP. Bucharest, Romania. 25-28 May. 2014.

RICE, D. E.: **A Detailed Analysis of Six-Pulse Converter Harmonic Currents**. Paper no. PCIC-92-51. GE Company. Houston, Texas. USA. 1992.

ROBERT, A.; DEFLANDRE, T.: CIDRE/CIRED WORKING GROUP CC02: **Guide for Assessing the Network Harmonic Impedance**. Conference Publication No 438. CIRED 2-5 Jun. 1997.

RYLANDER, M.; GRADY, W. M.: **Problems in the Use of Norton Equivalent Models for Single- Phase Nonlinear Loads**. IEEE Power and Energy Society General Meeting. Jul. 2010.

ROWE, N. B.: **The Summation of Randomly Varying Phasors or Vectors with Particular Reference to Harmonic Levels**. IEE Conf. Publ. 110, p. 177-181. 1974.

SAKUI, M.; FUJITA, H.; SHIOYA M.: **A Method for Calculating Harmonic Currents of a Three-phase Bridge Uncontrolled Rectifier with DC Filter**. IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 36, no. 3. Aug. 1989.

SASAKI, R. I.: **The Impact of Electronic Ballast Compact Fluorescent Lighting on Power Distribution Systems**. School of Electrical Engineering Purdue University. TR-EE-94-28. West Lafayette, Indiana, USA. Sep. 1994.

SENRA, R.: **Energia Elétrica: Medição, Qualidade e Eficiência**. Editora Baraúna. SP. 1a Edição. 2015.

SHERMAN, W. G.: **Summation of Harmonics with Random Phase Angles**. IEEE Proceedings. Vol. 119, no. 11, Nov. 1972.

SLACK, M.: **The Probability Distributions of Sinusoidal Oscillations Combined in Random Phase**. Journal of Institution of Electrical Engineers - Part III Radio and Communication Engineering. Vol 93, no. 22. Mar. 1946.

SMITH, B. C.; WATSON, N. R.; WOOD, A. R.; ARRILLAGA, J.: **Harmonic Tensor Linearization of HVDC Converters**. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand. IEEE Transactions on Power Delivery. vol. 13, no. 4, p. 1244–1250. Oct. 1998.

SOUZA, L. F. E.; ROSS, R. P. D.; HIROKAZU, E.: **Uma Discussão sobre Harmônicos Produzidos por Equipamentos de Eletrônica de Potência**. VI Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica. Belém, PA, Brasil. Ago. 2005.

STAATS. P. T.; GRADY, W. M.; ARAPOSTATHIS A.; THALLAN, R. S.: **A Statistical Method for predicting the Net Harmonic Current Generated by a Concentration of Electric Vehicles Battery Chargers**. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 12, no. 3. Jul. 1997.

SUAREZ, J. A.; DI MAURO, G. F.; ANAUT, D. O.; AGÜERO, C. A.: **Cancelación Parcial de Corrientes Armónicas Provocadas por Cargas Residenciales No Lineares**. Revista Electricidad y Electrónica, Información Tecnológica. Vol. 16, no. 3, p 63-70. Mar del Plata, Argentina, 2005.

SUN, Y.; ZHANG, G.; XU, W.; MAYORDOMO, J. G.: **A Harmonically Coupled Admittance Matrix Model for AC/DC Converters** IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, no. 4. Nov. 2007.

TANG, Q.; WANG, Y.; GUO, S.: **Design of Power System Harmonic Measurement System Based on LabVIEW**. Fourth International Conference on Natural Computation. Jinan, Shandong, China. Oct. 2008.

THUNBERG, E.; SUDER, L.: **A Norton Approach to Distribution Network Modeling for Harmonic Studies**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, no. 1. Jan. 1999.

THUNBERG, E.; SUDER, L.: **Influence of the Network Impedance on Distribution System Harmonic Norton Models**. IEEE International Conference on Power Systems Technology, vol. 3, p 1143 - 1148. Dec. 2000.

UMEH, K. C.; MOHAMED, A.; MOHAMED, R.: **Determining Harmonic Characteristics of Typical Single Phase Non-Linear Loads**. Student Conference on Research and Development (SCOReD). Proceedings, Putrajaya, Malaysia. 2003.

VENKATESH, C.; SRIKANTH K. D.; SARMA, D. V. S. S. SYDULU, M.: **Modelling of Nonlinear Loads and Estimation of Harmonics in Industrial Distribution System**. 15th National Power Systems Conference (NPSC), Bombay, India. Dec. 2008.

WANG, Y. J.; PIERRAT, L.; WANG, L.: **Summation of Harmonic Current Produced by AC/DC Static Power Converters with Randomly Fluctuating Loads**. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 9, no. 2. Apr. 1994.

WANG L.; CHEN, Y. M.: **Bivariate Normal Distribution and Direct Normal Distribution on Randomly Varying Harmonic Currents**. Dept. of Electrical Engineering, National Cheng Kung University. Tainan, Taiwan. 1998.

WANG, L.; LIU, K.: **A Study on Randomly Varying Harmonic Currents and Total Harmonic Distortion of Currents in Power Systems**. Dept. of Electrical Engineering, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan. 2005.

WEI, Z.: **Compact Fluorescent Lamps Phase Dependency Modelling and Harmonic Assessment of Their Widespread Use in Distribution Systems**. Dissertação de Mestrado. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand. Sep. 2009.

XIA, D.; HEYDT, G. T.: **Harmonic Power Flow Studies - Part I. Formulation and Solution**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, no. 6. Jun. 1982.

XIA, D.; HEYDT, G. T.: **Harmonic Power Flow Studies - Part II. Implementation and Practical Application**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, no. 6. Jun. 1982.

XIAO, Y.; YANG, X.: **A Grid Harmonic Summation Method Based on the Probability Assessment of Harmonic Phase Angles**. 14th International Conference on Harmonics and Power Quality ICHQP. Bergamo, Italy. Sep. 2010.

XU, W. W.: **A Practical Harmonic Guideline for Adjustable Speed Drive Applications**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, no. 1. Jan. 1992.

YONG, J.; CHEN, L.; NASSIF, A. B.; XU, W.: **A Frequency Domain Harmonic Model for Compact Fluorescent Lamps**. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 27, no. 2. Apr. 2010.

ZONG, X.; GRAY, P. A.; LEHN, P. W.: **New Metric Recommended for IEEE Std. 1547 to Limit Harmonics Injected into Distorted Grids**. DOI 10.1109/TPWRD. 2015.2403278. IEEE Transactions on Power Delivery.