

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**WAGNER DA GAMA MELO**

**Estudo e Aplicação da Norma IEEE 1459-2000 para  
Medidores Digitais de Energia Elétrica**

**PORTO ALEGRE**

**2006**

**WAGNER DA GAMA MELO**

**Estudo e Aplicação da Norma IEEE 1459-2000 para  
Medidores Digitais de Energia Elétrica**

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Elétrica pela Faculdade de  
Engenharia da Pontifícia Universidade  
Católica do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Fausto Bastos Líbano

**PORTO ALEGRE**

**2006**

**WAGNER DA GAMA MELO**

**Estudo e Aplicação da Norma IEEE 1459-2000 para  
Medidores Digitais de Energia Elétrica**

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Elétrica pela Faculdade de  
Engenharia da Pontifícia Universidade  
Católica do Rio Grande do Sul.

**APROVADA PELA BANCA EXAMINADORA**

Porto Alegre, 15 de dezembro de 2006.

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Orientador: Prof. Dr. Fausto Bastos Líbano**

---

**Prof. Dr. Sérgio Luís Haffner (PUCRS)**

---

**Prof. Dr. Yeddo Braga Blauth (UFRGS)**

*A Stefani*

## **AGRADECIMENTOS**

Sou especialmente grato aos meus familiares pelo carinho, pela compreensão e paciência que tiveram comigo no decorrer desses últimos meses de trabalho nos quais, muitas vezes, o tempo de convivência se tornou mais restrito.

Gostaria de expressar minha gratidão a RMS Sistemas Eletrônicos pelo apoio financeiro recebido e, de uma forma especial, agradecer a Roberto Giordani e Mario Azevedo não somente por terem dado esta oportunidade mas, principalmente, pela amizade, pelo valioso incentivo e pela confiança em mim depositada durante todos esses anos. Minha gratidão também a Giuliano Gasparini por sua disponibilidade em ouvir algumas de minhas considerações sobre temas relacionados a este trabalho e estimular interessantes debates.

Sou grato a Sanderson Rocha de Abreu e Júlio Ragone, do Grupo Cataguazes-Leopoldina, pelo importante incentivo recebido.

Agradecimento especial ao meu grande amigo Humberto Schwertner por incentivar meu crescimento profissional e minha evolução pessoal.

Meu muito obrigado ao pessoal do Núcleo de Eletrônica de Potência e Acionamento por toda a generosa ajuda e pelo apoio técnico que recebi ao realizar, em laboratório, algumas das medições utilizadas neste trabalho.

Sou também muito grato ao pessoal da Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia pelo excelente atendimento e, mais importante ainda, pela forma simpática e carinhosa com a qual fui tratado durante o decorrer do curso.

Agradeço a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e, em especial, ao professor Fausto Bastos Líbano pela orientação correta, pelas valiosas sugestões e pelo entusiasmo com relação ao tema deste trabalho.

Meu muito obrigado aos colegas que compartilharam experiências e conhecimentos e que, no decorrer do curso, tornaram-se amigos.

Por último quanto à ordem, mas não quanto à importância, sou profundamente grato a minha mulher Stefani Bonfiglio pelo incentivo, pelo apoio incondicional nos momentos mais difíceis, por sua dedicação, sensibilidade e, principalmente, por acreditar.

## RESUMO

O aumento de cargas não lineares conectadas aos sistemas de potência tem levado a uma revisão geral dos conceitos e das variáveis aplicáveis na avaliação dos sistemas de potência para situações em que tensões e correntes não sejam senoidais. Em paralelo, mudanças nas normas existentes, assim como o aparecimento de novas normas, tem criado a necessidade de novos procedimentos de medição. No presente trabalho um algoritmo para obtenção de variáveis em sistemas monofásicos e trifásicos, de acordo com a Norma IEEE 1459-2000, é proposto. Alguns conceitos fundamentais relacionados a sistemas de potência em regime senoidal, no que diz respeito às relações entre as diversas variáveis medidas, são apresentados, tendo sido incluídas considerações sobre algumas limitações de aplicabilidade dos mesmos em situações não senoidais. Um resumo das principais definições e conceitos propostos Norma IEEE 1459-2000, assim como nas Normas IEC 61000-4-7 e IEC 61000-4-30, é também apresentado. Desenvolvidos a partir dos conceitos propostos na Norma IEEE 1459-2000, mas considerando a aplicação para sinais amostrados, os procedimentos e equações para a obtenção das diversas grandezas são mostrados e comentados. Simulações e resultados obtidos em medições reais a partir da aplicação dos procedimentos desenvolvidos, incluindo análise de erros, são também expostos e discutidos. É demonstrado que, considerando certas limitações, os procedimentos desenvolvidos podem ser aplicados em medidores digitais visando propiciar que os mesmos forneçam valores das novas grandezas propostas.

Palavras-chave: Qualidade de Energia. Medição de Energia. Harmônicas. Desequilíbrio de Tensão.

## **ABSTRACT**

The increase of nonlinear loads connected to the power systems has created the need for a generalized revision of power concepts and quantities applicable under nonsinusoidal conditions. Parallel to this, changes in the existent standards and the new ones have shown the need for new measurement procedures. In the present work an algorithm for the IEEE Std. 1459-2000 single and three-phase quantities calculation is proposed. The power systems basic concepts related to the relationship between quantities and main definitions used under sinusoidal situations are presented, including comments about concepts limitations under nonsinusoidal conditions. IEEE Std. 1459-2000, IEC 61000-4-7 and IEC 61000-4-30 definitions and concepts overview are also presented. The equations and procedures for voltage and current signals processing, applied on discrete time power quantities evaluation and developed from the IEEE Std. 1459-2000 analog concepts, are shown and discussed. Simulations and real measurement results using the developed procedures applied to discrete time signals, including obtained quantities error analysis, are also shown and discussed. It is shown that, under certain limitations, similar procedures can be applied to digital meters for power systems new proposed quantities analysis.

**Key words:** Power Quality. Power Measurement. Harmonics. Unbalance.

## LISTA DE ABREVIATURAS

$\pi$	pi (constante cujo valor corresponde a 3,14159.....)
A	ampère
A/D	analógico-digital
ANAWIN	programa destinado a análise de dados oriundos de registradores marca RMS
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
arccos	função trigonométrica ângulo cosseno
arcsin	função trigonométrica ângulo seno
arctan	função trigonométrica ângulo tangente
cos	função trigonométrica cosseno
cotan	função trigonométrica cotangente
DFT	transformada discreta de Fourier
GPS	Global Positioning System
h	hora
Hz	hertz
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
k	quilo
MARH-21	registrador para qualidade de energia, marca RMS
ONS	Operador Nacional do Sistema
rad	radiano
rms	“root mean square”, valor médio quadrático
s	segundo
sin	função trigonométrica seno
tan	função trigonométrica tangente
V	volt
VA	volt-ampère
var	volt ampère reativo
W	watt



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha_{a1}$	ângulo do fasor de tensão fundamental da fase $a$ [rad] ou [graus]
$\alpha_{b1}$	ângulo do fasor de tensão fundamental da fase $b$ [rad] ou [graus]
$\alpha_{c1}$	ângulo do fasor de tensão fundamental da fase $c$ [rad] ou [graus]
$\alpha_h$	ângulo do fasor de tensão harmônica de ordem harmônica $h$ [rad] ou [graus]
$\alpha_h^-$	ângulo da tensão eficaz de seqüência negativa, ordem harmônica $h$ [rad] ou [graus]
$\alpha_h^+$	ângulo da tensão eficaz de seqüência positiva, ordem harmônica $h$ [rad] ou [graus]
$\alpha_h^0$	ângulo da tensão eficaz de seqüência zero, ordem harmônica $h$ [rad] ou [graus]
$\alpha_1^-$	ângulo da tensão fundamental eficaz de seqüência negativa [rad] ou [graus]
$\alpha_1^+$	ângulo da tensão fundamental eficaz de seqüência positiva [rad] ou [graus]
$\alpha_1^0$	ângulo da tensão fundamental eficaz de seqüência zero [rad] ou [graus]
$\beta_{a1}$	ângulo do fasor de corrente fundamental da fase $a$ [rad] ou [graus]
$\beta_{b1}$	ângulo do fasor de corrente fundamental da fase $b$ [rad] ou [graus]
$\beta_{c1}$	ângulo do fasor de corrente fundamental da fase $c$ [rad] ou [graus]
$\beta_{n1}$	ângulo do fasor de corrente fundamental do neutro [rad] ou [graus]
$\beta_h$	ângulo do fasor de corrente harmônica de ordem harmônica $h$ [rad] ou [graus]
$\beta_h^-$	ângulo da corrente eficaz de seqüência negativa, ordem harmônica $h$ [rad] ou [graus]
$\beta_h^+$	ângulo da corrente eficaz de seqüência positiva, ordem harmônica $h$ [rad] ou [graus]
$\beta_h^0$	ângulo da corrente eficaz de seqüência zero [rad] ou [graus]
$\beta_1^-$	ângulo da corrente fundamental eficaz de seqüência negativa [rad] ou [graus]
$\beta_1^+$	ângulo da corrente fundamental eficaz de seqüência positiva [rad] ou [graus]
$\beta_1^0$	ângulo da corrente fundamental eficaz de seqüência zero [rad] ou [graus]
$\theta_h$	ângulo entre fasor de tensão de ordem harmônica $h$ e fasor de corrente de ordem harmônica $h$ [rad] ou [graus]
$\theta$	ângulo entre fasor de tensão e fasor de corrente [rad] ou [graus]
$\theta_1$	ângulo entre fasor de tensão fundamental e fasor de corrente fundamental [rad] ou [graus]
$\theta_1^+$	ângulo entre fasor de tensão fundamental e fasor de corrente fundamental (seqüência positiva) [rad] ou [graus]
$\theta_1^-$	ângulo entre fasor de tensão fundamental e fasor de corrente fundamental (seqüência negativa) [rad] ou [graus]
$\theta_1^0$	ângulo entre fasor de tensão fundamental e fasor de corrente fundamental (seqüência zero) [rad] ou [graus]
$\phi_h$	ângulo de ordem $h$ (uso genérico)
$\varphi_k$	ângulo de referência da amostra $k$ [rad] ou [graus]
$\tau$	instante de início de um determinado período de tempo
$\omega$	velocidade angular [rad/s]

$a_h$	coeficiente $a$ de ordem $h$ da série de Fourier
$A_h$	coeficiente $A$ de ordem $h$ da série de Fourier
$b_h$	coeficiente $b$ de ordem $h$ da série de Fourier
$B_h$	coeficiente $B$ de ordem $h$ da série de Fourier
$c_h$	coeficiente $c$ de ordem $h$ da série de Fourier
$D_{eI}$	potência de distorção de corrente (efetiva) [var]
$D_I$	potência de distorção de corrente [var]
$D_{eV}$	potência de distorção de tensão (efetiva) [var]
$D_V$	potência de distorção de tensão [var]
$D_{eH}$	potência de distorção harmônica (efetiva) [var]
$D_H$	potência de distorção harmônica [var]
$DHT_I$ (ou $THD_I$ )	distorção harmônica total de corrente
$DHT_V$ (ou $THD_V$ )	distorção harmônica total de tensão
$\mathbf{F}_h$	representação eficaz fasorial do fasor genérico de ordem $h$
$f$	freqüência [Hz]
$f_1$	freqüência característica do sistema de potência, freqüência fundamental [Hz]
$f_s$	freqüência de amostragem [Hz]
$f_0$	freqüência nominal do sistema de potência [Hz]
$f(t)$	função genérica, função periódica
$h$	ordem harmônica
$\mathbf{I}$	corrente eficaz fasorial
$\mathbf{I}^*$	conjugado da corrente eficaz fasorial
$\mathbf{I}_A$	corrente eficaz fasorial ativa
$\mathbf{I}_{a1}$	corrente eficaz fasorial fundamental da fase $a$
$\mathbf{I}_{b1}$	corrente eficaz fasorial fundamental da fase $b$
$\mathbf{I}_{c1}$	corrente eficaz fasorial fundamental da fase $c$
$\mathbf{I}_{n1}$	corrente eficaz fasorial fundamental de neutro
$\mathbf{I}_1^-$	corrente eficaz fasorial fundamental de seqüência negativa
$\mathbf{I}_1^+$	corrente eficaz fasorial fundamental de seqüência positiva
$\mathbf{I}_1^0$	corrente eficaz fasorial fundamental de seqüência zero
$\mathbf{I}_Q$	corrente eficaz fasorial reativa
$\mathbf{I}_a$	corrente eficaz fasorial, fase $a$
$\mathbf{I}_b$	corrente eficaz fasorial, fase $b$
$\mathbf{I}_c$	corrente eficaz fasorial, fase $c$
$\mathbf{I}_n$	corrente eficaz fasorial, neutro
$I_e$	corrente equivalente (ou efetiva) eficaz [A]
$I_{e1}$	corrente efetiva fundamental eficaz [A]
$I_{e1cs}$	corrente efetiva fundamental eficaz (obtida via componentes simétricas) [A]
$I_a$	corrente eficaz da fase $a$ [A]

$I_{a1}$	corrente fundamental eficaz ( $h=1$ ) da fase $a$ [A]
$I_b$	corrente eficaz da fase $b$ [A]
$I_{b1}$	corrente fundamental eficaz ( $h=1$ ) da fase $b$ [A]
$I_c$	corrente eficaz da fase $c$ [A]
$I_{c1}$	corrente fundamental eficaz ( $h=1$ ) da fase $c$ [A]
$I_n$	corrente eficaz do neutro [A]
$I_{n1}$	corrente fundamental eficaz ( $h=1$ ) do neutro [A]
$I_1$	corrente fundamental eficaz [A]
$I_1^-$	corrente fundamental eficaz de seqüência negativa [A]
$I_1^+$	corrente fundamental eficaz de seqüência positiva [A]
$I_1^0$	corrente fundamental eficaz de seqüência zero [A]
$i_1$	corrente fundamental instantânea [A]
$I_H$	corrente harmônica eficaz [A]
$i_H$	corrente harmônica instantânea [A]
$I_{aH}$	corrente harmônica eficaz da fase $a$ [A]
$I_{bH}$	corrente harmônica eficaz da fase $b$ [A]
$I_{cH}$	corrente harmônica eficaz da fase $c$ [A]
$I_{nH}$	corrente harmônica eficaz do neutro [A]
$i$	corrente instantânea [A]
$i_{a_k}$	corrente da fase $a$ (amostra $k$ ) [A]
$i_{b_k}$	corrente da fase $b$ (amostra $k$ ) [A]
$i_{c_k}$	corrente da fase $c$ (amostra $k$ ) [A]
$i_{n_k}$	corrente de neutro (amostra $k$ ) [A]
$I_{eH}$	corrente efetiva harmônica eficaz [A]
$I$	corrente eficaz [A]
$I_h^-$	corrente eficaz de seqüência negativa, ordem harmônica $h$ [A]
$I_h^+$	corrente eficaz de seqüência positiva, ordem harmônica $h$ [A]
$I_h^0$	corrente eficaz de seqüência zero, ordem harmônica $h$ [A]
$j$	número imaginário $j = \sqrt{-1}$
$k$	número da amostra
$m$	número inteiro
$n$	número inteiro
$N$	potência não ativa combinada total [var]
$p_a$	potência instantânea da fase $a$ [W]
$p_b$	potência instantânea da fase $b$ [W]
$p_c$	potência instantânea da fase $c$ [W]
$p$	potência instantânea total [W]
$P_a$	potência ativa da fase $a$ [W]

$P_b$	potência ativa da fase $b$ [W]
$P_c$	potência ativa da fase $c$ [W]
$P_{a1}$	potência ativa fundamental da fase $a$ [W]
$P_{b1}$	potência ativa fundamental da fase $b$ [W]
$P_{c1}$	potência ativa fundamental da fase $c$ [W]
$P_1^+$	potência ativa fundamental de seqüência positiva [W]
$P_1$	potência ativa fundamental total [W]
$P_H$	potência ativa harmônica total [W]
$P$	potência ativa total [W]
$p_A$	parcela da potência instantânea produzida pela componente ativa da corrente [W]
$P_F$	fator de potência (genérico ou trifásico total)
$P_{FA}$	fator de potência aritmético
$P_{FV}$	fator de potência vetorial
$P_{Fa}$	fator de potência da fase $a$
$P_{Fb}$	fator de potência da fase $b$
$P_{Fc}$	fator de potência da fase $c$
$P_{Fe}$	fator de potência efetivo (ou equivalente)
$P_{Fa1}$	fator de potência fundamental da fase $a$ (ou fator de deslocamento da fase $a$ )
$P_{Fb1}$	fator de potência fundamental da fase $b$ (ou fator de deslocamento da fase $b$ )
$P_{Fc1}$	fator de potência fundamental da fase $c$ (ou fator de deslocamento da fase $c$ )
$P_{F1}^-$	fator de potência fundamental de seqüência negativa
$P_{F1}^+$	fator de potência fundamental de seqüência positiva
$P_{F1}^0$	fator de potência fundamental de seqüência zero
$P_{F1}$	fator de potência fundamental trifásico total (ou fator de deslocamento)
$p_Q$	parcela da potência instantânea produzida pela componente reativa da corrente [W]
$Q_{a1}$	potência não ativa fundamental da fase $a$ [var]
$Q_{b1}$	potência não ativa fundamental da fase $b$ [var]
$Q_{c1}$	potência não ativa fundamental da fase $c$ [var]
$Q_1^+$	potência não ativa fundamental de seqüência positiva [var]
$Q_B$	potência reativa de Budeanu [var]
$Q_F$	potência reativa de Fryze [var]
$Q_{SH}$	potência reativa de Sharon [var]
$Q_{BH}$	potência reativa harmônica de Budeanu [var]
$Q_{KM}$	potência reativa Kusters-Moore [var]
$R$	resistência [ $\Omega$ ]
$r_e$	resistência equivalente [ $\Omega$ ]
$S$	potência complexa
$S_{a1}$	potência complexa fundamental da fase $a$
$S_{b1}$	potência complexa fundamental da fase $b$
$S_{c1}$	potência complexa fundamental da fase $c$

$S_1^-$	potência complexa fundamental de seqüência negativa
$S_1^+$	potência complexa fundamental de seqüência positiva
$S_1^0$	potência complexa fundamental de seqüência zero
$S_a$	potência complexa, fase $a$
$S_b$	potência complexa, fase $b$
$S_c$	potência complexa, fase $c$
$S_e$	potência aparente efetiva [VA]
$S_{e1}$	potência aparente efetiva fundamental [VA]
$S_{eH}$	potência aparente efetiva harmônica [VA]
$S_{eN}$	potência aparente efetiva não fundamental [VA]
$S_{a1}$	potência aparente fundamental da fase $a$ [VA]
$S_{b1}$	potência aparente fundamental da fase $b$ [VA]
$S_{c1}$	potência aparente fundamental da fase $c$ [VA]
$S_{U1}$	potência aparente fundamental de desequilíbrio [VA]
$S_1^+$	potência aparente fundamental de seqüência positiva [VA]
$S_1$	potência aparente fundamental total [VA]
$S_H$	potência aparente harmônica [VA]
$S_N$	potência aparente não fundamental total [VA]
$S_A$	potência aparente total aritmética [VA]
$S_V$	potência aparente total vetorial [VA]
$t$	tempo [s]
$T$	período [s]
$T_0$	período nominal do sistema de potência [s]
$T_1$	período fundamental característico do sistema de potência [s]
$T_s$	período de amostragem [s]
$T_w$	período de janela [s]
$V$	tensão eficaz fasorial
$V_{a1}$	tensão eficaz fasorial fundamental da fase $a$
$V_{b1}$	tensão eficaz fasorial fundamental da fase $b$
$V_{c1}$	tensão eficaz fasorial fundamental da fase $c$
$V_1^-$	tensão eficaz fasorial fundamental de seqüência negativa
$V_1^+$	tensão eficaz fasorial fundamental de seqüência positiva
$V_1^0$	tensão eficaz fasorial fundamental de seqüência zero
$V_a$	tensão eficaz fasorial, fase $a$
$V_b$	tensão eficaz fasorial, fase $b$
$V_c$	tensão eficaz fasorial, fase $c$
$v_{ab_k}$	tensão da fase $a$ tendo como referência a fase $b$ (amostra $k$ ) [V]
$v_{a_k}$	tensão da fase $a$ tendo como referência o neutro (amostra $k$ ) [V]
$v_{bc_k}$	tensão da fase $b$ tendo como referência a fase $c$ (amostra $k$ ) [V]

$v_{b_k}$	tensão da fase $b$ tendo como referência o neutro (amostra $k$ ) [V]
$v_{ca_k}$	tensão da fase $c$ tendo como referência a fase $a$ (amostra $k$ ) [V]
$v_{c_k}$	tensão da fase $c$ tendo como referência o neutro (amostra $k$ ) [V]
$V_{eH}$	tensão efetiva harmônica eficaz [V]
$V$	tensão eficaz [V]
$V_{ab}$	tensão eficaz da fase $a$ tendo como referência a fase $b$ [V]
$V_a$	tensão eficaz da fase $a$ tendo como referência o neutro [V]
$V_{bc}$	tensão eficaz da fase $b$ tendo como referência a fase $c$ [V]
$V_b$	tensão eficaz da fase $b$ tendo como referência o neutro [V]
$V_{ca}$	tensão eficaz da fase $c$ tendo como referência a fase $a$ [V]
$V_c$	tensão eficaz da fase $c$ tendo como referência o neutro [V]
$V_h^-$	tensão eficaz de seqüência negativa [V]
$V_h^+$	tensão eficaz de seqüência positiva [V]
$V_h^0$	tensão eficaz de seqüência zero, ordem harmônica $h$ [V]
$V_e$	tensão equivalente (ou efetiva) eficaz [V]
$V_{e1}$	tensão efetiva fundamental eficaz [V]
$V_{e1cs}$	tensão efetiva fundamental eficaz [V]
$V_1$	tensão fundamental eficaz [V]
$V_1^-$	tensão fundamental eficaz de seqüência negativa [V]
$V_1^+$	tensão fundamental eficaz de seqüência positiva [V]
$V_1^0$	tensão fundamental eficaz de seqüência zero [V]
$v_1$	tensão fundamental instantânea [V]
$V_H$	tensão harmônica eficaz [V]
$v_H$	tensão harmônica instantânea [V]
$V_{abH}$	tensão harmônica eficaz da fase $a$ tendo como referência a fase $b$ [V]
$V_{aH}$	tensão harmônica eficaz da fase $a$ tendo como referência o neutro [V]
$V_{bcH}$	tensão harmônica eficaz da fase $b$ tendo como referência a fase $c$ [V]
$V_{bH}$	tensão harmônica eficaz da fase $b$ tendo como referência o neutro [V]
$V_{caH}$	tensão harmônica eficaz da fase $c$ tendo como referência a fase $a$ [V]
$V_{cH}$	tensão harmônica eficaz da fase $c$ tendo como referência o neutro [V]
$v$	tensão instantânea [V]
$w$	energia [Wh]
$w_a$	energia transferida pela fase $a$ [Wh]
$w_b$	energia transferida pela fase $b$ [Wh]
$w_c$	energia transferida pela fase $c$ [Wh]
$w_A$	energia ativa [Wh]
$w_Q$	energia reativa [varh]
$x(t)$	função genérica
$x(k)$	função genérica (valores amostrados)

$\mathbf{X}_h$	representação eficaz fasorial do fasor genérico de ordem $h$ (valores amostrados)
$y(t)$	função genérica
$Y_{rms}$	valor eficaz da função genérica $y(t)$
$Y_{med}$	valor médio da função genérica $y(t)$
$z$	número total de amostras da janela de amostragem considerada

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esquema genérico no qual são indicados fonte de tensão trifásica, linha de alimentação, grupos de cargas e medição de sinais de tensão de fase ( $v_a$ , $v_b$ e $v_c$ ) e corrente ( $i_a$ , $i_b$ , $i_c$ e $i_n$ ) para um grupo de cargas específico .....	45
Figura 2	Relações entre as potências ativa, reativa e aparente nos quadrantes I, II, III e IV. Relações válidas para sistemas de potência monofásicos e trifásicos equilibrados em regime senoidal .....	51
Figura 3	Representação no plano complexo da decomposição da corrente fasorial <b>I</b> nas suas componentes <b>I<sub>Q</sub></b> (reativa) e <b>I<sub>A</sub></b> (ativa) com relação ao fasor de tensão <b>V</b> . Para este exemplo específico a componente reativa é do tipo capacitiva .....	55
Figura 4	Esquema geral adotado para as simulações e testes comparativos. A entrada dos sinais é feita através das tabelas de composição harmônica. Os valores instantâneos das tensões, correntes e potências são calculados e fornecidos através de gráficos .....	125
Figura 5	Formas de onda das tensões e correntes referentes aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 7 para um intervalo de 12 ciclos da frequência fundamental .....	127
Figura 6	Formas de onda das tensões e correntes referentes aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 7. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados .....	128
Figura 7	Forma de onda da corrente de neutro, calculada a partir da soma das correntes das fases, referente à composição harmônica de correntes da Tabela 7. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	128
Figura 8	Formas de onda das potências instantâneas por fase e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicadas na Tabela 7. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	128
Figura 9	Formas de onda de transferência de energia em cada uma das fases referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicada na Tabela 7. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	129
Figura 10	Formas de onda das tensões e correntes referentes aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 10. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados .....	133



Figura 11	Formas de onda das potências instantâneas por fase e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicadas na Tabela 10. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	133
Figura 12	Formas de onda de transferência de energia em cada uma das fases e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicada na Tabela 10. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	133
Figura 13	Formas de onda das tensões e correntes referentes aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 15. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados .....	139
Figura 14	Forma de onda da corrente de neutro, calculada a partir da soma das correntes das fases, referente à composição harmônica de correntes da Tabela 15. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	139
Figura 15	Formas de onda das potências instantâneas por fase e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicadas na Tabela 15. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	143
Figura 16	Formas de onda de transferência de energia em cada uma das fases referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicada na Tabela 15. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	143
Figura 17	Formas de onda de transferência de energia em cada uma das fases e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicada na Tabela 15. O período considerado corresponde a 12 ciclos da frequência fundamental .....	144
Figura 18	Formas de onda das tensões e correntes referentes aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 19. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados .....	145
Figura 19	Forma de onda da corrente de neutro, calculada a partir da soma das correntes das fases, referente à composição harmônica de correntes da Tabela 19. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	146
Figura 20	Formas de onda das potências instantâneas por fase e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicadas na Tabela 19. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	146

Figura 21	Formas de onda de transferência de energia em cada uma das fases referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicada na Tabela 19. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	146
Figura 22	Formas de onda das tensões e correntes referentes aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 23. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados .....	151
Figura 23	Forma de onda da corrente de neutro, calculada a partir da soma das correntes das fases, referente à composição harmônica de correntes da Tabela 23. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	152
Figura 24	Formas de onda das potências instantâneas por fase e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicadas na Tabela 23. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	152
Figura 25	Formas de onda de transferência de energia em cada uma das fases e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicada na Tabela 23. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	153
Figura 26	Formas de onda das tensões e correntes referentes aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 27. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados .....	158
Figura 27	Forma de onda da corrente de neutro, calculada a partir da soma das correntes das fases, referente à composição harmônica de correntes da Tabela 27. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	159
Figura 28	Formas de onda das potências instantâneas por fase e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicadas na Tabela 27. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	159
Figura 29	Formas de onda das tensões e correntes referentes aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 30. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados .....	163
Figura 30	Forma de onda da corrente de neutro, calculada a partir da soma das correntes das fases, referente à composição harmônica de correntes da Tabela 30. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	163

Figura 31	Forma de onda da tensão referente aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 33. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados .....	167
Figura 32	Forma de onda da corrente referente aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 33. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados .....	168
Figura 33	Forma de onda da potência instantânea referente à composição harmônica de tensão e corrente indicada na Tabela 33. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	168
Figura 34	Forma de onda da transferência de energia referente à composição harmônica de tensão e corrente indicada na Tabela 33. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	168
Figura 35	Forma de onda da tensão e da corrente .....	170
Figura 36	Distribuição harmônica da tensão e da corrente .....	172
Figura 37	Formas de onda das tensões e correntes .....	174
Figura 38	Formas de onda das tensões e correntes referentes aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 39. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados .....	175
Figura 39	Forma de onda da corrente de neutro, calculada a partir da soma das correntes das fases, referente à composição harmônica de correntes da Tabela 39. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	176
Figura 40	Formas de onda das potências instantâneas por fase e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicadas na Tabela 39. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	176
Figura 41	Formas de onda de transferência de energia em cada uma das fases e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicada na Tabela 39. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	177
Figura 42	Valores propostos na resolução do exemplo .....	179
Figura 43	Formas de onda das tensões e correntes referentes aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 44. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados .....	182

Figura 44	Forma de onda da corrente de neutro, calculada a partir da soma das correntes das fases, referente à composição harmônica de correntes da Tabela 44. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	182
Figura 45	Formas de onda das tensões e correntes .....	186
Figura 46	Formas de onda de tensão e de corrente referentes aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 44. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados .....	186
Figura 47	Formas de onda da tensão e da corrente referentes aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 48. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados .....	188
Figura 48	Forma de onda da corrente de neutro, calculada a partir da soma das correntes das fases, referente à composição harmônica de correntes da Tabela 48. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	188
Figura 49	Resultados da avaliação dos valores de potência e demais índices. Os valores indicados correspondem a percentuais da potência aparente efetiva fundamental, $S_{e1}=89,70 \text{ kVA} = 100 \%$ .....	192
Figura 50	Resultados da avaliação dos valores de tensão e corrente. Representação eficaz fasorial .....	193
Figura 51	Formas de onda das potências instantâneas por fase e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicadas na Tabela 48. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	196
Figura 52	Formas de onda de transferência de energia em cada uma das fases e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicada na Tabela 48. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	196
Figura 53	Formas de onda das tensões e correntes referentes aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 48 considerando a inversão de sinal das correntes. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados .....	197
Figura 54	Forma de onda da corrente de neutro, calculada a partir da soma das correntes das fases, referente à composição harmônica de correntes da Tabela 48 e considerando a inversão do sinal das correntes das fases. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	200

Figura 55	Formas de onda das potências instantâneas por fase e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicadas na Tabela 48 e considerando a inversão do sinal das correntes. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	200
Figura 56	Formas de onda de transferência de energia em cada uma das fases e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicada na Tabela 48 considerando a inversão do sinal das correntes. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	201
Figura 57	Formas de onda das tensões e correntes referentes aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 48, considerando defasagem de $50^\circ$ para todos os sinais. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados .....	202
Figura 58	Formas de onda de transferência de energia em cada uma das fases e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicada na Tabela 48. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	204
Figura 59	Formas de onda de transferência de energia em cada uma das fases e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicada na Tabela 48 considerando início da janela 2,315 ms após exemplo da figura anterior. O instante inicial foi mantido como $t=0$ .....	204
Figura 60	Esquema geral adotado para os testes práticos. Os sinais de entrada correspondem a valores amostrados de tensões e correntes provenientes de medição feita com registrador digital. Os valores instantâneos das tensões, correntes e potências são calculados e fornecidos através de gráficos .....	205
Figura 61	Esquema de medição utilizado na avaliação de carga em laboratório através de registrador digital de tensões e correntes .....	206
Figura 62	Formas de onda das tensões. Valores amostrados referentes à medição feita através de registrador. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados .....	207
Figura 63	Formas de onda das correntes. Valores amostrados referentes à medição feita através de registrador. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados .....	207
Figura 64	Forma de onda da corrente de neutro, calculada a partir da soma das correntes das fases, referente à medição. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	208

Figura 65	Formas de onda das potências instantâneas por fase e total referentes à medição. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	208
Figura 66	Formas de onda de transferência de energia em cada uma das fases e total referentes à medição. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	208
Figura 67	Parte do diagrama unifilar de uma fábrica de automóveis, mostrando o ponto de medição das tensões e correntes, transformadores, chaves e dispositivos de proteção .....	212
Figura 68	Distribuição harmônica de tensão da fase <i>a</i> fornecido pelo programa de análise ANAWIN referente à medição feita no ponto indicado na Figura 67 .....	213
Figura 69	Distribuição harmônica de corrente da fase <i>a</i> fornecido pelo programa de análise ANAWIN referente à medição feita no ponto indicado na Figura 67 .....	214
Figura 70	Formas de onda das tensões referente à medição feita no circuito 5. Dois ciclos idênticos são mostrados para facilitar a visualização .....	214
Figura 71	Formas de onda das correntes referente à medição feita no circuito 5. Dois ciclos idênticos são mostrados para facilitar a visualização .....	215
Figura 72	Forma de onda da corrente de neutro, calculada a partir da soma das correntes das fases, referente à medição feita no circuito 5. O período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado .....	215
Figura 73	Formas de onda das potências instantâneas por fase e total referentes à medição feita no circuito 5. Dois ciclos idênticos são mostrados para facilitar a visualização .....	215
Figura 74	Formas de onda de transferência de energia em cada uma das fases e total referentes à medição feita no circuito 5. Dois ciclos da frequência fundamental são mostrados para facilitar a visualização .....	216
Figura 75	Primeiro caso: <i>DHT</i> das tensões em torno de 15 %. <i>DHT</i> das correntes em torno de 95 %. Erro imposto somente no valor eficaz da tensão efetiva fundamental (0 a -0,25 %) .....	220
Figura 76	Primeiro caso: <i>DHT</i> das tensões em torno de 15 %. <i>DHT</i> das correntes em torno de 95 %. Erro imposto somente no valor eficaz da tensão efetiva fundamental (0 a -0,25 %) .....	220
Figura 77	Primeiro caso: <i>DHT</i> das tensões em torno de 15 %. <i>DHT</i> das correntes em torno de 95 %. Erro imposto somente no valor eficaz da corrente efetiva fundamental (0 a -0,25 %) .....	221

Figura 78	Primeiro caso: <i>DHT</i> das tensões em torno de 15 %. <i>DHT</i> das correntes em torno de 95 %. Erro imposto somente no valor eficaz da corrente efetiva fundamental (0 a -0,25 %) .....	221
Figura 79	Segundo caso: <i>DHT</i> das tensões em torno de 3 %. <i>DHT</i> das correntes em torno de 23 %. Erro imposto somente no valor eficaz da tensão efetiva fundamental (0 a -0,25 %) .....	221
Figura 80	Segundo caso: <i>DHT</i> das tensões em torno de 3 %. <i>DHT</i> das correntes em torno de 23 %. Erro imposto somente no valor eficaz da tensão efetiva fundamental (0 a -0,25 %) .....	222
Figura 81	Segundo caso: <i>DHT</i> das tensões em torno de 3 %. <i>DHT</i> das correntes em torno de 23 %. Erro imposto somente no valor eficaz da corrente efetiva fundamental (0 a -0,25 %) .....	222
Figura 82	Segundo caso: <i>DHT</i> das tensões em torno de 3 %. <i>DHT</i> das correntes em torno de 23 %. Erro imposto somente no valor eficaz da corrente efetiva fundamental (0 a -0,25 %) .....	222

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Relações entre variáveis válidas para sistemas trifásicos equilibrados com formas de onda senoidais de tensão e corrente para o intervalo $\tau$ a $\tau+nT$ . As quatro últimas linhas correspondem aos valores trifásicos totais .....	54
Quadro 2	Relações entre as variáveis dos grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental para sistemas monofásicos segundo IEEE 1459-2000 .....	87
Quadro 3	Relações entre as variáveis dos grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental para sistemas trifásicos segundo IEEE 1459-2000 .....	94



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Potência aparente aritmética e vetorial correspondentes à definição de fator de potência total aritmético (Método 1) e vetorial (Método 2). Carga resistiva ligada entre as fases $a$ e $b$ .....	58
Tabela 2	Potência aparente aritmética e vetorial correspondentes à definição de fator de potência total aritmético (método 1) e vetorial (método 2). Carga resistiva equilibrada ligada em estrela .....	59
Tabela 3	Potência aparente aritmética e vetorial correspondentes à definição de fator de potência total aritmético (método 1) e vetorial (método 2). Carga resistiva ligada entre a fase $a$ e neutro .....	59
Tabela 4	Cálculo das potências através de dois métodos distintos, Método 1 e Método 2 .....	63
Tabela 5	Cálculo das potências através de dois métodos distintos, Método 1 e Método 2 .....	63
Tabela 6	Cálculo das potências através de dois métodos distintos, Método 1 e Método 2 .....	64
Tabela 7	Composição Harmônica das Tensões e Correntes .....	126
Tabela 8	Tensões, correntes, ângulos e $DHT$ - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	130
Tabela 9	Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	131
Tabela 10	Composição Harmônica das Tensões e Correntes .....	132
Tabela 11	Tensões, correntes, ângulos e $DHT$ - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	134
Tabela 12	Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	135
Tabela 13	Tensões, correntes, ângulos e $DHT$ - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	136
Tabela 14	Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	137
Tabela 15	Composição Harmônica das Tensões e Correntes .....	138

Tabela 16	Tensões, correntes, ângulos e <i>DHT</i> - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	140
Tabela 17	Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	141
Tabela 18	Potências e demais fatores - Resultados obtidos a partir da metodologia de abordagem para sistemas com tensão e corrente senoidais .....	142
Tabela 19	Composição Harmônica das Tensões e Correntes .....	145
Tabela 20	Tensões, correntes, ângulos e <i>DHT</i> - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	147
Tabela 21	Potências e demais fatores - Resultados obtidos a partir da metodologia de abordagem convencional tratada no capítulo 2 .....	148
Tabela 22	Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	149
Tabela 23	Composição Harmônica das Tensões e Correntes .....	151
Tabela 24	Tensões, correntes, ângulos e <i>DHT</i> - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	154
Tabela 25	Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	155
Tabela 26	Potências e demais fatores - Resultados obtidos a partir da metodologia de abordagem tradicionalmente utilizada.....	156
Tabela 27	Composição Harmônica das Tensões e Correntes .....	158
Tabela 28	Tensões, correntes, ângulos e <i>DHT</i> - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	160
Tabela 29	Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	161
Tabela 30	Composição Harmônica das Tensões e Correntes .....	162
Tabela 31	Tensões, correntes, ângulos e <i>DHT</i> - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	164
Tabela 32	Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	165
Tabela 33	Composição Harmônica das Tensões e Correntes .....	167

Tabela 34	Tensões, correntes, ângulos e <i>DHT</i> - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	169
Tabela 35	Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	169
Tabela 36	Potências e demais fatores – Valores comparativos .....	170
Tabela 37	Valores percentuais de potências e demais fatores .....	173
Tabela 38	Potências e demais fatores. Valores comparativos .....	173
Tabela 39	Composição Harmônica das Tensões e Correntes .....	175
Tabela 40	Tensões, correntes, ângulos e <i>DHT</i> - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	177
Tabela 41	Tensões, correntes, ângulos e <i>DHT</i> - Valores comparativos .....	178
Tabela 42	Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	180
Tabela 43	Potências e demais fatores – Valores comparativos .....	180
Tabela 44	Composição Harmônica das Tensões e Correntes .....	181
Tabela 45	Tensões, correntes, ângulos e <i>DHT</i> - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	183
Tabela 46	Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	184
Tabela 47	Potências e demais fatores – Valores comparativos .....	185
Tabela 48	Composição Harmônica das Tensões e Correntes .....	187
Tabela 49	Tensões, correntes, ângulos e <i>DHT</i> . Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	189
Tabela 50	Tensões, Correntes e <i>DHT</i> . Valores comparativos .....	189
Tabela 51	Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	190
Tabela 52	Potências e demais fatores – Valores comparativos .....	191
Tabela 53	Potências e demais fatores – Valores comparativos .....	193

Tabela 54	Desequilíbrio de Tensão - Resultados obtidos a partir do Método das Componentes Simétricas e a partir do Método das Tensões de Linha .....	194
Tabela 55	Desequilíbrio de Tensão - Resultados obtidos a partir do Método das Componentes Simétricas e a partir do Método das Tensões de Linha .....	195
Tabela 56	Desequilíbrio de Tensão - Resultados obtidos a partir do Método das Componentes Simétricas e a partir do Método das Tensões de Linha .....	195
Tabela 57	Tensões, correntes, ângulos e <i>DHT</i> - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	198
Tabela 58	Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	199
Tabela 59	Tensões, correntes, ângulos e <i>DHT</i> - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	202
Tabela 60	Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	203
Tabela 61	Tensões, correntes, ângulos e <i>DHT</i> - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	209
Tabela 62	Desequilíbrio de Tensão - Resultados obtidos a partir do Método das Componentes Simétricas e a partir do Método das Tensões de Linha .....	209
Tabela 63	Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	210
Tabela 64	Potências e demais fatores – Valores Percentuais em relação à potência aparente fundamental .....	211
Tabela 65	Tensões, correntes, ângulos e <i>DHT</i> - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	217
Tabela 66	Desequilíbrio de Tensão - Resultados obtidos a partir do Método das Componentes Simétricas e a partir do Método das Tensões de Linha .....	217
Tabela 67	Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental .....	218
Tabela 68	Potências e demais fatores – Valores Percentuais em relação à potência aparente fundamental .....	219

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	32
1.1 GENERALIDADES .....	32
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	33
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	37
<b>2 CONCEITOS BÁSICOS</b> .....	39
2.1 INTRODUÇÃO .....	39
2.2 VALORES MÉDIOS E EFICAZES .....	40
<b>2.2.1 Valor médio</b> .....	40
<b>2.2.2 Valor eficaz</b> .....	40
<b>2.2.3 Valor eficaz de uma série trigonométrica</b> .....	40
2.3 METODOLOGIA DE FOURIER PARA ANÁLISE DE FORMA DE ONDA .....	41
<b>2.3.1 Introdução</b> .....	41
<b>2.3.2 Séries trigonométricas de Fourier</b> .....	42
<b>2.3.3 Determinação dos coeficientes da Série de Fourier</b> .....	42
2.4 ASPECTOS GERAIS REFERENTES À MEDIÇÃO DE SINAIS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA .....	44
2.5 SISTEMAS DE POTÊNCIA EM REGIME SENOIDAL .....	45
<b>2.5.1 Tensão e corrente</b> .....	46
<b>2.5.2 Potência instantânea</b> .....	48
<b>2.5.3 Potência ativa</b> .....	48
<b>2.5.4 Potência reativa</b> .....	49
<b>2.5.5 Potência aparente</b> .....	50
<b>2.5.6 Potência complexa</b> .....	52
<b>2.5.7 Fator de potência</b> .....	52
<b>2.5.8 Energia</b> .....	53
<b>2.5.9 Tabela resumo</b> .....	53
<b>2.5.10 Abordagens alternativas para a potência instantânea e energia</b> .....	54
2.6 SISTEMAS TRIFÁSICOS DESEQUILIBRADOS .....	56
<b>2.6.1 Cargas não lineares</b> .....	61

<b>2.6.2 Sistemas de potência em regime não senoidal</b> .....	61
2.7 CONCLUSÃO .....	66
<b>3 NORMAS</b> .....	67
3.1 INTRODUÇÃO .....	67
3.2 IEC 61000-4-7 .....	67
<b>3.2.1 Aspectos gerais</b> .....	67
<b>3.2.2 Características dos sinais a serem medidos</b> .....	68
<b>3.2.3 Classificação dos instrumentos de acordo com a classe de exatidão</b> .....	68
<b>3.2.4 Especificações e requisitos para instrumentos baseados em DFT</b> .....	68
<b>3.2.5 Avaliação de sistemas com conteúdo harmônico quase-estacionário</b> .....	70
<b>3.2.6 Avaliação de sistemas com conteúdo harmônico flutuante e rápido</b> .....	71
3.3 IEC 61000-4-30 .....	72
<b>3.3.1 Introdução</b> .....	72
<b>3.3.2 Aspectos gerais</b> .....	73
<b>3.3.3 Parâmetros relacionados à qualidade de energia</b> .....	73
3.3.3.1 Determinação do valor da frequência fundamental .....	74
3.3.3.2 Determinação dos níveis de tensão eficazes .....	74
3.3.3.3 Determinação das componentes simétricas .....	75
3.3.3.4 Determinação dos valores de desequilíbrio de tensão .....	76
<b>3.3.4 Faixas de influência das grandezas</b> .....	76
<b>3.3.5 Medições de qualidade de energia</b> .....	77
3.4 CONCLUSÃO .....	77
<b>4 A NORMA IEEE1459-2000</b> .....	79
4.1 INTRODUÇÃO .....	79
4.2 ASPECTOS GERAIS .....	79
4.3 ABORDAGEM PARA SISTEMAS MONOFÁSICOS COM CONTEÚDO HARMÔNICO .....	80
<b>4.3.1 Tensões e correntes</b> .....	80
<b>4.3.2 Distorção harmônica total das tensões e correntes</b> .....	81
<b>4.3.3 Potências instantâneas</b> .....	82
<b>4.3.4 Potências ativas</b> .....	82
<b>4.3.5 Potências aparentes</b> .....	83

<b>4.3.6 Potências não ativas</b> .....	84
<b>4.3.7 Fatores de utilização de linha</b> .....	85
<b>4.3.8 Fator de poluição harmônica</b> .....	86
<b>4.3.9 Comentários gerais e tabela resumo</b> .....	86
<b>4.4 ABORDAGEM PARA SISTEMAS TRIFÁSICOS DESEQUILIBRADOS E COM CONTEÚDO HARMÔNICO</b> .....	87
<b>4.4.1 Tensões e correntes efetivas</b> .....	87
<b>4.4.2 Distorção harmônica total efetiva</b> .....	89
<b>4.4.3 Potências aparentes</b> .....	89
<b>4.4.4 Potências ativas</b> .....	91
<b>4.4.5 Potências não ativas</b> .....	92
<b>4.4.6 Fatores de utilização de linha</b> .....	93
<b>4.4.7 Fator de poluição harmônica</b> .....	93
<b>4.4.8 Fator de desequilíbrio de carga</b> .....	94
<b>4.4.9 Comentários gerais e tabela resumo</b> .....	94
<b>4.5 CONCLUSÃO</b> .....	95
<b>5 DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO</b> .....	97
<b>5.1 INTRODUÇÃO</b> .....	97
<b>5.2 OBJETIVOS GERAIS</b> .....	97
<b>5.3 PRÉ-REQUISITOS E ESPECIFICAÇÕES</b> .....	98
<b>5.4 PROCEDIMENTOS E ALGORITMOS</b> .....	99
<b>5.4.1 Desenvolvimento inicial</b> .....	99
<b>5.4.2 Cálculo dos valores eficazes das tensões e correntes</b> .....	102
<b>5.4.3 Cálculo dos valores eficazes das tensões e correntes fundamentais</b> .....	104
5.4.3.1 Obtenção dos fasores de tensão e corrente fundamentais ( $h=1$ ) .....	105
5.4.3.2 Cálculo dos valores eficazes das tensões e corrente fundamentais .....	108
5.4.3.3 Cálculo dos ângulos de fase .....	110
<b>5.4.4 Cálculo dos valores eficazes das tensões e correntes não fundamentais</b> .....	111
<b>5.4.5 Cálculo da distorção harmônica total</b> .....	112
<b>5.4.6 Cálculo das potências</b> .....	113
<b>5.4.7 Cálculo das componentes simétricas</b> .....	116
<b>5.4.8 Cálculo das potências fundamentais a partir das componentes simétricas</b> .....	118

<b>5.4.9 Obtenção das variáveis de interesse</b> .....	119
<b>5.4.10 Processos de agregação temporal das variáveis</b> .....	120
5.5 CONCLUSÃO .....	121
<b>6 APLICAÇÕES DO ALGORITMO</b> .....	124
6.1 INTRODUÇÃO .....	124
6.2 TESTES E SIMULAÇÕES INICIAIS .....	124
<b>6.2.1 Sistema trifásico equilibrado sem conteúdo harmônico</b> .....	126
6.2.1.1 Simulação de carga ativa .....	126
6.2.1.2 Simulação de carga indutiva .....	132
6.2.1.3 Simulação de carga capacitiva .....	135
<b>6.2.2 Sistema trifásico desequilibrado sem conteúdo harmônico</b> .....	138
6.2.2.1 Desequilíbrio angular nas correntes .....	138
6.2.2.2 Desequilíbrio nas correntes, carga ativa .....	144
<b>6.2.3 Sistema trifásico com conteúdo harmônico</b> .....	150
6.2.3.1 Exemplo geral 1 .....	150
6.2.3.2 Exemplo geral 2 .....	157
<b>6.2.4 Comentários gerais sobre os testes e simulações iniciais</b> .....	165
6.3 TESTES COMPARATIVOS .....	166
<b>6.3.1 Exemplo 1</b> .....	167
<b>6.3.2 Exemplo 2</b> .....	174
<b>6.3.3 Exemplo 3</b> .....	181
6.4 TESTES PRÁTICOS .....	205
<b>6.4.1 Carga trifásica não linear</b> .....	206
<b>6.4.2 Carga trifásica industrial</b> .....	211
6.5 AVALIAÇÃO DE ERROS E SENSIBILIDADE .....	219
6.6 CONCLUSÃO .....	223
<b>7 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS</b> .....	225
7.1 CONCLUSÕES .....	225
7.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	227
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	228
<b>ANEXO A – Formas de onda e composição harmônica das tensões e correntes referentes ao teste prático “carga trifásica industrial”, seção 6.4.2. Dados obtidos a partir do programa de análise ANAWIN, RMS SISTEMAS ELETRÔNICOS</b> ....	232



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 GENERALIDADES

Nas últimas décadas vem sendo observado um aumento significativo do uso de novos tipos de tecnologia aplicada aos equipamentos eletro-eletrônicos, mesmo aos de uso já popularizado, tanto nas indústrias como em unidades de consumo domésticas e comerciais. Nas mais variadas áreas, tais como iluminação, força motriz, condicionamento térmico e informação, essas novas tecnologias vêm propiciando, entre outras vantagens, maior eficiência, diminuição de tamanho relativo e, principalmente, diminuição de custos de uma forma geral.

Direta ou indiretamente tais inovações, principalmente as relacionadas aos circuitos de alimentação destes equipamentos, têm tido como conseqüência, na maioria dos casos, o consumo de energia em regime não senoidal. Enquanto no passado grande parte das cargas apresentava, como uma de suas características, corrente senoidal como resposta a uma tensão de alimentação senoidal aplicada, atualmente essa não é mais verificada nas situações existentes.

Os efeitos não desejados ou não previstos dessas tensões e correntes não senoidais nos sistemas de potência são muitos e podem, em casos mais extremos, comprometer o funcionamento de componentes importantes desses sistemas, incluindo partes relacionadas com proteção e mesmo com tarifação. Equipamentos eletromecânicos de medição de energia ativa e de energia reativa podem apresentar aumentos significativos dos erros quando estimulados por sinais de corrente e tensão não senoidais. Além disso, instrumentos baseados em tecnologias digitais podem também apresentar diferentes resultados para determinadas variáveis medidas devido ao fato de que os algoritmos utilizados podem estar baseados em diferentes definições das grandezas. Em função disto, tornaram-se importantes a avaliação e o estudo da aplicabilidade de novos conceitos assim como a verificação de dificuldades que possam ser encontradas na criação e implementação de rotinas que propiciem que medidores e registradores digitais forneçam valores de acordo com novos modelamentos matemáticos.

Baseada em diversos estudos efetuados durante os últimos anos, a Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) representa um esforço conjunto no sentido de propiciar uma nova abordagem de metodologia de avaliação aplicada a sistemas de potência monofásicos sob regime não senoidal assim como a sistemas de potência trifásicos sob condições não senoidais e de desequilíbrio de cargas. Através da proposta de novos conceitos de potência, baseados em modelamentos matemáticos em princípio mais adequados que os utilizados na maioria dos medidores e registradores atuais, esta Norma talvez represente um avanço no que se refere às variáveis que devem ser obtidas na avaliação de um sistema de potência.

O objetivo básico deste trabalho de dissertação consiste no desenvolvimento de um algoritmo que sirva para o estudo desses novos conceitos e que seja aplicável a medidores e registradores digitais, possibilitando que os mesmos forneçam valores de potências e demais fatores de acordo com a abordagem conceitual e com o modelamento matemático propostos na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000).

## 1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para que o algoritmo de cálculo aplicável a medidores e registradores pudesse ser desenvolvido e testado tornou-se necessária uma pesquisa inicial em artigos referentes a conceitos básicos e modelamentos matemáticos aplicáveis.

Para as questões relacionadas aos conceitos básicos, modelamentos iniciais e metodologia de análise de circuitos elétricos em sistemas com formas de onda senoidais, no que se refere à potência e energia ativas, potência e energia reativa, fator de potência e demais grandezas, incluído a parte de processamento de sinais amostrados, o conjunto de referências utilizado é formado por livros nos quais os respectivos temas são abordados: Edminister (1985); Medeiros Filho (1979); Oppenheim e Schaffer (1989) e Rizzi (1980). Tais referências fornecem uma base teórica dos métodos tradicionais de análise de circuitos de potência utilizados em diversas áreas, desde a parte de transmissão e distribuição até a própria utilização da energia elétrica, assim como para a parte de amostragem e processamento de sinais.

O funcionamento de grande parte dos medidores de energia, tanto reativa quanto ativa, baseia-se em princípios eletromecânicos aplicados de forma eficiente e com margens de erro aceitáveis em regime senoidal. Os algoritmos utilizados pelos equipamentos digitais de registro, incluindo os aplicados no cálculo da energia ativa e reativa, também podem, em alguns casos, basearem-se nas definições utilizadas para sistemas que apresentem somente sinais senoidais. Isso pode ser motivado por questão de coerência em relação aos equipamentos eletromecânicos, em função das características de amostragem, de processamento, ou mesmo devido às respectivas limitações de projeto dos equipamentos.

No que se refere às situações de tensão e corrente não senoidais, as principais referências utilizadas são artigos científicos obtidos na base de dados do IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) e normas IEC (International Electrotechnical Commission). Apenas no intuito de propiciar uma exposição mais sistemática desta parte da revisão bibliográfica os artigos foram divididos em quatro grupos.

No primeiro grupo, referente a conceitos e interpretações físicas, os artigos, de forma geral, abordam as questões envolvidas na definição de energia reativa e energia aparente. Czarnecki (1994) avalia algumas propriedades físicas dos circuitos elétricos, principalmente referente à energia aparente e sua definição. Uma discussão elaborada da interpretação física de tal grandeza é feita, incluindo as situações de desequilíbrio de cargas. Emanuel (1993) trata, basicamente, do mesmo assunto, incluindo situações práticas na presença de tensões e correntes desequilibradas sendo que em Emanuel (1998) e Emanuel (1999) é tratado, respectivamente, de questões relativas ao conceito de potência aparente desenvolvido por Buchhols e Goodhue e de questões relativas à definição de potência aparente para sistemas trifásicos. Fetea e Petroianu (2000) avaliam o uso do conceito de energia reativa e suas restrições, levando em conta avaliações referentes às equações básicas de fluxo de potência. Marafão, Deckmann e Marafão (2002) discutem as questões de aplicação dos conceitos de fator de potência em situações de regime não senoidal e sistemas desequilibrados. Expõem restrições relativas à aplicação das definições convencionais e propõem alternativas baseadas em fatores de conformidade. Willems e Ghijselen (2003) também tratam da definição de potência aparente em situações de desequilíbrio e presença de harmônicas, associando a definição de potência aparente com a questão do índice de aproveitamento da transmissão de energia em função das perdas na linha ou máxima potência útil que, teoricamente, poderia ser fornecida sob determinadas condições. Avaliam sob que condições as mesmas podem ser aplicadas e as respectivas restrições envolvidas. Czarnecki (2004) avalia algumas

contradições em termos de interpretações físicas da Teoria  $p-q$  (AKAGI; NABAE, 1993) no que se refere à definição de “potência reativa instantânea”, mostrando que, mesmo sob condições senoidais, algumas interpretações provenientes da mesma não podem ser aplicadas. Filipiski, Baghzouz e Cox (1994) avaliam algumas das definições de grandezas relacionadas ao tema.

O segundo grupo é composto por artigos referentes aos medidores de energia ativa e reativa, incluindo testes que vêm sendo aplicados em medidores convencionais eletromecânicos e microprocessados. Em geral estes testes visam não somente avaliar o comportamento dos medidores quando utilizados em sistemas com conteúdo harmônico como também correlacionar os resultados das medições feitas com as definições atendidas em cada caso. Filipiski e Labaj (1992) fornecem resultados de testes de 4 diferentes tipos de medidores de energia operando a partir de diferentes princípios. Avaliam os resultados obtidos de acordo com as definições de potência reativa de Budeanu, de Fryze, de Kustters-Moore e Sharon. Erros associados aos medidores analógicos e digitais de energia ativa e reativa são avaliados por Driesen, Craenenbroeck e Dommelen (1997). Discutem a questão de enquadramento dos medidores em diferentes classes de acordo com as respectivas respostas aos sinais distorcidos aplicados, fornecendo gráficos referentes aos resultados encontrados. Shikoski et al. (2002) e Siqueira, Carneiro e Oliveira (2000) fornecem estudos de campo referentes a conteúdo harmônico, sendo que Dan e Raisz (2004) avaliam as respostas dos medidores de energia quando submetidos a tensões e correntes não senoidais com a classificação dos medidores em grupos de acordo com as respectivas respostas obtidas nos testes e ensaios propostos.

Formando um terceiro grupo, têm-se os artigos relacionados a propostas de novas tecnologias, novos algoritmos ou métodos que possam ser utilizados no cálculo e registro de variáveis relacionadas à qualidade de energia de uma forma geral e, de uma forma mais específica, ao cálculo e avaliação das potências ativa, aparente e reativa. Driesen et al. (1999) apresentam o resultado de testes e avaliações de medidores em condições de erro impostas pela presença de conteúdo harmônico nos sinais aplicados. Concluem que, em sistemas que apresentam degradação na qualidade de energia, as medições de energia ativa e reativa podem ser insatisfatórias se feitas a partir dos métodos convencionais. Propõe uso de transformada “Wavelet” seguida por identificação de alguns parâmetros de qualidade de energia na obtenção de parâmetros tarifários. São propostas por Toral, Quero e Franquelo (1998), o uso de técnicas de processamento randômico de sinal e uso de tecnologia FPGA para monitoração de consumo de energia. O uso de transformada “Wavelet” também é proposto no artigo de

Yoon e Devaney (2000), trabalho no qual também são feitas considerações sobre a determinação de sentido do fluxo de energia reativa nas diversas frequências harmônicas de interesse. Staroszczyk (2002) avalia o erro existente no processamento digital de sinais de potência em função dos efeitos de fenômenos “não estacionários” existentes nos sistemas de distribuição. Tais efeitos estão associados à variação, no tempo, do conteúdo harmônico dos sinais, nas variações de frequência, entre outros. Baseados no princípio de conservação de energia aplicado a circuitos elétricos, Madrigal e Acha (2002) propõem um método de análise do fluxo de potência harmônica nos sistemas elétricos de potência. O método proposto é demonstrado para circuitos monofásicos sendo que, em princípio, o mesmo seria aplicável a sistemas trifásicos desequilibrados. Resultados experimentais, precisão do método e aspectos teóricos são discutidos por Aiello et al. (2003) ao apresentar um instrumento baseado num método de domínio tempo para detecção de potência harmônica ativa em sistemas trifásicos e que implica na não necessidade de análise espectral.

O último grupo é formado pela norma utilizada como base para o desenvolvimento do algoritmo em termos de modelamento matemático, IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), assim como pelas normas IEC 61000-4-7 (IEC, 2002) e IEC 61000-4-30 (IEC, 2003). A Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) trata das definições de grandezas em sistemas de potência sob condições não senoidais e de desequilíbrio. É o resultado de um conjunto bastante grande de pesquisas realizadas e representa um marco interessante na normalização não somente de alguns novos parâmetros relacionados à qualidade de energia como também das definições de parâmetros já existentes e que, durante os últimos anos, têm sido reavaliados. No entanto, como indica o artigo de Willens, Ghijelen e Emanuel (2005) sob o título “The Apparent Power Concept and the IEEE Standart 1459-2000”, alguns aspectos da referida Norma ainda têm causado dúvidas, principalmente em função do novo conceito de potência aparente utilizado. No desenvolvimento do algoritmo em si foram utilizados procedimentos provenientes da Norma IEC 61000.4.30 (IEC, 2003) e da Norma IEC 61000.4.7 (IEC 2002) visto que a Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), embora forneça novas definições para diversas potências e fatores, não indica procedimentos aplicáveis para o tratamento dos sinais a serem processados e que servem de base para a obtenção das variáveis propostas. Em função da possível aplicabilidade dos novos conceitos propostos pela Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) no contexto nacional brasileiro, também foram feitas consultas e acompanhamento de alguns aspectos correlacionados e tratados principalmente no Módulo 8 do PRODIST (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2006), tendo em vista

que este representará um novo marco em termos de metodologia de avaliação e determinação de parâmetros nos sistemas de distribuição de energia nacionais. Ainda referente a normas e legislação, podem ser citadas a Resolução 505 da ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2001), que trata de aspectos legais referentes aos níveis de tensão de fornecimento em âmbito nacional e a Resolução 456 da ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2000) que trata da parte de aspectos legais referentes à demanda contratada.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No Capítulo 2 são fornecidas informações que envolvem modelamentos utilizados no estudo de circuitos de potência em regime senoidal, conceitos matemáticos relacionados ao cálculo de valores eficazes e médios, definições e aspectos gerais relacionados à aplicação do Método de Fourier para análise de forma de onda. Problemas conceituais relacionados à aplicação do modelamento, situações de desequilíbrio e presença de conteúdo harmônico nas tensões e correntes, assim como algumas abordagens relativas à potência reativa propostas nas últimas décadas, também são citadas de forma resumida.

A seguir, no Capítulo 3, são tratados os aspectos mais relevantes das Normas IEC 61000-4-7 (IEC, 2002) e IEC 61000-4-30 (IEC, 2003) no que diz respeito a algumas referências que se tornaram necessárias no desenvolvimento do algoritmo proposto.

O Capítulo 4 foi reservado exclusivamente a apresentação da abordagem proposta na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000). Os conceitos tradicionalmente utilizados assim como os novos conceitos propostos são expostos de forma a fornecer uma visão resumida da metodologia indicada.

No Capítulo 5, referente ao desenvolvimento do algoritmo, são fornecidas informações sobre o método utilizado para tornar os conceitos propostos na Norma (IEEE, 2000) aplicáveis a valores amostrados das tensões e correntes. São indicadas as decisões tomadas no que diz respeito a procedimentos de formatação das janelas que contém as amostras dos sinais de tensões e corrente, cálculo dos valores eficazes, obtenção de componentes fundamentais entre outros.

O Capítulo 6 consiste na apresentação dos resultados da aplicação do algoritmo na forma de simulações, testes comparativos e a partir de medições reais. Um estudo referente à avaliação de erros e sensibilidade foi adicionado no sentido de indicar possíveis limitações verificadas.

As conclusões gerais são descritas no Capítulo 7, sendo também indicados os futuros desenvolvimentos associados ao tema.

## 2 CONCEITOS BÁSICOS

### 2.1 INTRODUÇÃO

As informações fornecidas neste capítulo visam apenas criar uma referência comum em termos conceituais para a compreensão, tanto dos aspectos referentes às dificuldades encontradas ao aplicar metodologias de análise de sistemas de potência em situações em que tensões e correntes apresentam conteúdo harmônico, quanto do desenvolvimento do algoritmo em si e da simbologia utilizada na representação das grandezas envolvidas.

Serão tratados aspectos relativos a sistemas de potência em regime senoidal e, posteriormente, na parte referente a sistemas de potência em regime não senoidal, serão avaliadas as questões básicas relativas a cargas não lineares, definição de fator de potência assim como algumas implicações referentes a metodologias utilizadas para análise sistemas de potência quando aplicada a sistemas com cargas não lineares. Alguns aspectos relevantes para o trabalho, no que se refere às informações básicas sobre o método utilizado para a determinação de componentes harmônicas, também serão tratados.

Um aspecto importante relacionado a esta apresentação de conceitos é que a mesma será feita tendo como ponto central a medição ou registro de variáveis em um determinado ponto de um sistema de potência não sendo dada ênfase, de forma específica, ao tipo de carga que gera ou determina uma condição particular. Embora, obviamente, as características das cargas em si sejam determinantes das correntes e, conseqüentemente, de possíveis distorções existentes nas tensões, o resultado da interação dinâmica de diversas diferentes espécies de cargas num determinado ponto de medição somente será analisado aqui sob o ponto de vista das variáveis efetivamente medidas ou registradas neste ponto.

Com a intenção de manter uma coerência geral em todo este trabalho de dissertação, no que se refere à simbologia empregada, o símbolo utilizado para representar alguma determinada variável pode não corresponder ao utilizado mais freqüentemente para esta variável específica, seja em função de aspectos regionais, formais, ou mesmo em função de diferenças oriundas de idioma.



## 2.2 VALORES MÉDIOS E EFICAZES

### 2.2.1 Valor médio

Uma função periódica geral  $y(t)$ , com um período  $T$ , tem um valor médio,  $Y_{med}$ , dado pela Equação (2.1).

$$Y_{med} = \frac{1}{T} \int_0^T y(t) dt = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} y(t) dt \quad (2.1)$$

### 2.2.2 Valor eficaz

Uma função periódica geral  $y(t)$ , com um período  $T$ , tem um valor eficaz (ou rms),  $Y_{rms}$ , dado pela Equação (2.2) onde  $t$  corresponde ao tempo.

$$Y_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [y(t)]^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [y(t)]^2 dt} \quad (2.2)$$

### 2.2.3 Valor eficaz de uma série trigonométrica

O valor eficaz,  $Y_{rms}$ , de uma série trigonométrica  $y(t)$ , expressa conforme indicado na Equação (2.3), é obtido através de (2.4) ou diretamente através de (2.5) considerando que  $A_h$  seja o valor eficaz de  $a_h \cos(h\omega t)$  e  $B_h$  seja o valor eficaz de  $b_h \cos(h\omega t)$  onde  $\omega = 2\pi/T$  corresponde a velocidade angular e  $h$  corresponde a um número inteiro.

$$y(t) = a_0 + [a_1 \cos(\omega t) + a_2 \cos(2\omega t) + \dots] + [b_1 \sin(\omega t) + b_2 \sin(2\omega t) + \dots] \quad (2.3)$$

$$Y_{rms} = \sqrt{a_0^2 + (\frac{1}{2}a_1^2 + \frac{1}{2}a_2^2 + \dots) + (\frac{1}{2}b_1^2 + \frac{1}{2}b_2^2 + \dots)} \quad (2.4)$$

$$Y_{rms} = \sqrt{a_0^2 + (A_1^2 + A_2^2 + \dots) + (B_1^2 + B_2^2 + \dots)} \quad (2.5)$$

Se considerarmos que, com exceção do coeficiente  $b_1$ , todos os coeficientes  $a_h$  e  $b_h$  da série trigonométrica (2.3) sejam iguais a zero, será possível verificar que o valor eficaz da função

$$y(t) = b_1 \sin(\omega t) \quad (2.6)$$

será dado por

$$Y_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2} b_1^2} = \frac{b_1}{\sqrt{2}} \quad (2.7).$$

Por analogia, o valor eficaz das demais funções do tipo seno e cosseno componentes de  $y(t)$ , quando consideradas individualmente, será também fornecido por expressão similar a expressão (2.7) considerando, no entanto, que o numerador será do tipo  $a_h$  ou  $b_h$  de acordo com cada caso.

## 2.3 METODOLOGIA DE FOURIER PARA ANÁLISE DE FORMA DE ONDA

### 2.3.1 Introdução

O método de Fourier de análise de forma de onda consiste na possibilidade de representar uma função periódica  $f(t)$  por uma soma de funções do tipo seno (ou tipo cosseno). A exposição dos conceitos a seguir não visa uma análise detalhada do método, restringindo-se a fornecer apenas as suas características principais e a simbologia utilizada.

### 2.3.2 Séries trigonométricas de Fourier

Uma forma de onda periódica, para a qual  $f(t)=f(t+T)$ , pode ser representada por uma série de Fourier se satisfizer as seguintes condições:

Condição 1: Existe apenas um número finito de descontinuidades no período  $T$  considerado.

Condição 2: A função apresenta um número finito de máximos negativos e positivos no período  $T$  considerado.

Condição 3: O valor médio da função durante o período  $T$  é finito.

Se as condições acima são satisfeitas, então a série de Fourier que representa a função  $f(t)$  existe e poderá ser expressa em sua forma trigonométrica de acordo com a Equação (2.8) ou na forma expressa na Equação (2.9), onde  $\omega$  corresponde à velocidade angular da componente fundamental.

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + [a_1 \cos(\omega t) + a_2 \cos(2\omega t) + \dots] + [b_1 \sin(\omega t) + b_2 \sin(2\omega t) + \dots] \quad (2.8)$$

$$= \frac{1}{2}a_0 + \sum_{h=1}^{h=\infty} a_h \sin(h\omega t) + \sum_{h=1}^{h=\infty} b_h \cos(h\omega t) \quad (2.9)$$

### 2.3.3 Determinação dos coeficientes da Série de Fourier

Os coeficientes  $a_h$  e  $b_h$  da série de Fourier que representa a função  $f(t)=f(t+T)$  são obtidos, respectivamente, a partir da expressão dada pela Equação (2.10) e pela Equação (2.11).

$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos \frac{2\pi ht}{T} dt \quad (2.10)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin \frac{2\pi ht}{T} dt \quad (2.11)$$

O valor do coeficiente  $a_0$  pode ser obtido fazendo  $h=0$  e calculando diretamente o valor de  $a_h$ . Se os termos em seno e cosseno de mesma frequência da série fornecida através da Equação (2.3) são combinados em um único termo seno com um ângulo de fase, a função  $f(t)$  pode ser representada por uma série em senos como a indicada na Equação (2.12).

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{h=1}^{h=\infty} c_h \sin(h\omega t + \phi_h) \quad (2.12)$$

Na expressão acima,  $c_h$  corresponde ao módulo da componente harmônica de ordem  $h$  e  $\phi_h$  corresponde ao ângulo de fase desta componente. As expressões para obtenção dos valores do módulo e do ângulo dos fasores que correspondem a cada componente harmônica são dadas em (2.13) e (2.14), respectivamente. A expressão (2.14) apresenta valores coerentes para o primeiro (I) e quarto (IV) quadrantes, não podendo ser utilizada nos demais. A componente harmônica de ordem  $h=1$  é também denominada fundamental e tem período igual a  $T$ , podendo o mesmo ser representado, também, através da adição do índice  $h=1$ , como  $T_1$ .

$$c_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \quad (2.13)$$

$$\phi_h = \arctan\left(\frac{a_h}{b_h}\right) \quad (2.14)$$

Considerando que a função  $f(t)$  é expressa, então, pela soma de funções seno conforme (2.12), a representação eficaz fasorial do fasor harmônico de ordem  $h$ ,  $\mathbf{F}_h$ , poderá ser feita conforme (2.15).

$$\mathbf{F}_h = \frac{b_h}{\sqrt{2}} + j \frac{a_h}{\sqrt{2}} \quad (2.15)$$

Substituindo  $a_h$  e  $b_h$  pelas respectivas expressões (2.10) e (2.11), resulta:

$$\mathbf{F}_h = \frac{\sqrt{2}}{T} \int_0^T f(t) \sin \frac{2\pi ht}{T} dt + j \frac{\sqrt{2}}{T} \int_0^T f(t) \cos \frac{2\pi ht}{T} dt \quad (2.16)$$

Um aspecto interessante é que a avaliação das integrais em (2.10) e (2.11), pode ser feita tanto considerando limites de integração de 0 a  $T$ , de  $-T/2$  a  $T/2$ , assim como para

qualquer outro limite inicial de integração desde que a diferença entre o limite final e o limite inicial corresponda ao período  $T$  ou a um número inteiro de períodos  $nT$ .

## 2.4 ASPECTOS GERAIS REFERENTES À MEDIÇÃO DE SINAIS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

O esquema simplificado da Figura 1 mostra grupos de cargas ligadas a um sistema genérico, indicando, também, no grupo definido como cargas 2, um medidor cuja função seja o fornecimento de variáveis referentes a este grupo de cargas. Para que este medidor forneça os valores de tensão eficaz, corrente eficaz, potências, energia, entre outras associadas à qualidade de energia, seu funcionamento deve estar baseado em definições das variáveis a serem obtidas a partir dos sinais de tensão e corrente medidos. Medidores digitais realizam amostras dos sinais das tensões e correntes com uma determinada taxa de amostragem e processam estes sinais de forma a fornecer ou registrar as grandezas de interesse.

O esquema simplificado desta abordagem cujo principal aspecto é a medição de sinais em determinado ponto do circuito de potência é fornecido na Figura 1, onde é indicado o ponto de medição dos sinais de tensões e correntes de um conjunto específico de cargas alimentado por uma fonte de tensão trifásica que também alimenta outros grupos de cargas. A simbologia adotada para as variáveis que representam os sinais de tensão e corrente medidos será a mesma utilizada nos capítulos subseqüentes.

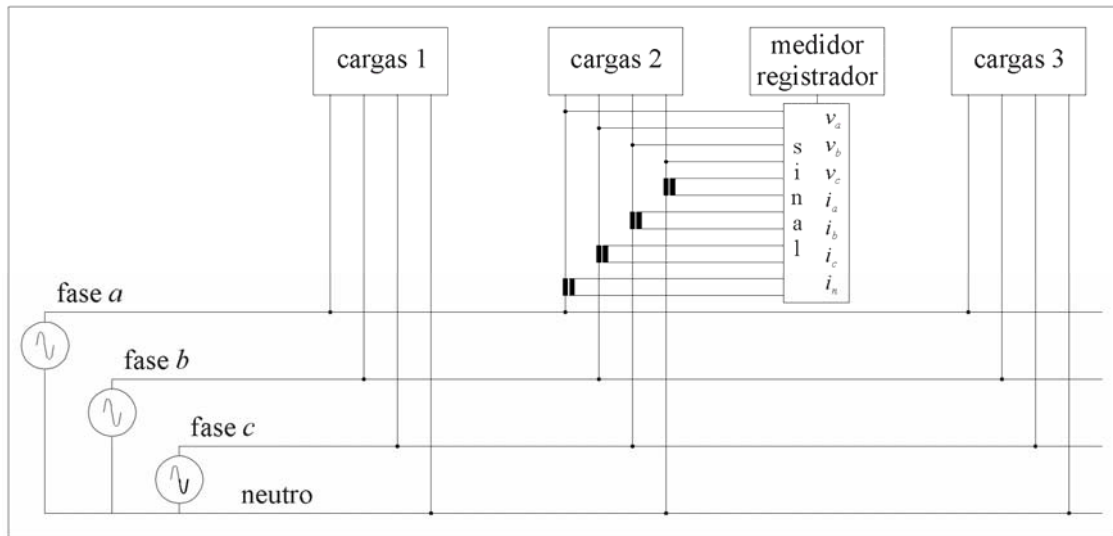


Figura 1 - Esquema genérico no qual são indicados fonte de tensão trifásica, linha de alimentação, grupos de cargas e medição de sinais de tensão de fase ( $v_a$ ,  $v_b$  e  $v_c$ ) e corrente ( $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  e  $i_n$ ) para um grupo de cargas específico.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tal abordagem, ainda que simplificada, constitui a grande maioria das situações de medição existentes na prática, visto que, em geral, nem todas as variáveis relacionadas com as características das demais cargas ligadas ao sistema são conhecidas ou modeladas ao ser executada uma medição em um determinado ponto.

## 2.5 SISTEMAS DE POTÊNCIA EM REGIME SENOIDAL

Considerando o exposto anteriormente, serão indicadas as relações existentes entre as diversas variáveis obtidas a partir dos sinais de tensão e corrente das fases. Estas relações, quando consideradas em conjunto, constituem um modelamento que vem sendo utilizado nas últimas décadas e que está baseado no pressuposto de que tensões e correntes sejam senoidais.

### 2.5.1 Tensão e corrente

Para sistemas de potência monofásicos, nos quais as formas de onda da tensão e da corrente têm forma senoidal, são válidas as relações fornecidas na Equação (2.17) e na Equação (2.18) para expressão, respectivamente, do valor instantâneo da tensão  $v$  e da corrente  $i$ .

$$v = \sqrt{2}V \sin(\omega t) \quad (2.17)$$

$$i = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \theta) \quad (2.18)$$

Nas expressões acima,  $V$  [V] corresponde ao valor eficaz da tensão,  $I$  [A] corresponde ao valor eficaz da corrente e  $\theta$  [rad] é o ângulo formado entre o fasor de tensão e o fasor de corrente. Em ambas as expressões,  $\omega$  [rad/s] corresponde à velocidade angular e  $t$  [s] ao tempo.

Como as tensões são senóides, uma outra forma conveniente de expressá-las corresponde ao tipo de representação denominada “tensão eficaz fasorial” dada por

$$\mathbf{V} = V \angle \alpha = V \cos \alpha + jV \sin \alpha \quad (2.19)$$

onde  $V$  [V] corresponde ao valor eficaz da tensão,  $\alpha$  [radianos] corresponde ao ângulo do fasor e  $j = \sqrt{-1}$ . De forma análoga, a expressão para a “corrente eficaz fasorial” é dada por

$$\mathbf{I} = I \angle \beta = I \cos \beta + jI \sin \beta \quad (2.20)$$

onde  $I$  [A] corresponde ao valor eficaz da corrente,  $\beta$  corresponde ao ângulo do fasor de corrente e a referência angular adotada. O ângulo formado pelos fasores de tensão e corrente é dado por

$$\theta = \alpha - \beta. \quad (2.21)$$

Para sistemas trifásicos a simbologia utilizada neste trabalho de dissertação será similar à utilizada para sistemas monofásicos, sendo feita através das letras  $a$ ,  $b$  e  $c$  a identificação

das tensões fase-neutro (tensões de fase) e correntes, da letra  $n$  a corrente de neutro e dos conjuntos de letras  $ab$ ,  $bc$  e  $ca$  a identificação das tensões de linha. Considerando tensões de fase senoidais, as mesmas serão expressas através das seguintes relações:

$$v_a = \sqrt{2}V_a \sin(\omega t + \alpha_a) \quad (2.22)$$

$$v_b = \sqrt{2}V_b \sin(\omega t + \alpha_b) \quad (2.23)$$

$$v_c = \sqrt{2}V_c \sin(\omega t + \alpha_c) \quad (2.24)$$

Num sistema de seqüência direta (ABC), se as tensões de fase do sistema trifásico estiverem equilibradas em termos de ângulo e considerarmos que o fasor que representa a fase  $a$  de tensão apresenta defasagem nula em relação à referência angular adotada,  $\alpha_a$  [graus]= $0^\circ$ ,  $\alpha_b$  [graus]= $240^\circ$  e  $\alpha_c$  [graus]= $120^\circ$ . Variações dos valores destes ângulos em torno dos valores indicados, assim como situações em que os valores eficazes das tensões expressos por  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  apresentem diferenças entre si, irão caracterizar assimetrias nas tensões de fornecimento denominadas desequilíbrios de tensão.

As expressões adotadas para as correntes são análogas às adotadas para as tensões:

$$i_a = \sqrt{2}I_a \sin(\omega t + \beta_a) \quad (2.25)$$

$$i_b = \sqrt{2}I_b \sin(\omega t + \beta_b) \quad (2.26)$$

$$i_c = \sqrt{2}I_c \sin(\omega t + \beta_c) \quad (2.27)$$

As defasagens existentes entre os respectivos fasores de tensão e corrente para cada fase serão dadas pelas seguintes expressões:

$$\theta_a = \alpha_a - \beta_a \quad (2.28)$$

$$\theta_b = \alpha_b - \beta_b \quad (2.29)$$

$$\theta_c = \alpha_c - \beta_c \quad (2.30)$$

As expressões da tensão eficaz fasorial e da corrente eficaz fasorial serão análogas às apresentadas em (2.19) e (2.20), acompanhadas dos respectivos índices indicadores de fase  $a$ ,



$b$  ou  $c$ . A seguir, para exemplificar a simbologia adotada, será fornecida a expressão eficaz fasorial da tensão da fase  $a$  em relação ao neutro (tensão de fase), da tensão de linha entre as fases  $a$  e  $b$  e da corrente de neutro:

$$\mathbf{V}_a = V_a \angle \alpha_a = V_a \cos \alpha_a + jV_a \sin \alpha_a \quad (2.31)$$

$$\mathbf{V}_{ab} = V_{ab} \angle \alpha_{ab} = V_{ab} \cos \alpha_{ab} + jV_{ab} \sin \alpha_{ab} \quad (2.32)$$

$$\mathbf{I}_n = I_n \angle \beta_n = I_n \cos \beta_n + jI_n \sin \beta_n \quad (2.33)$$

### 2.5.2 Potência instantânea

A potência instantânea  $p(t)$ , para um circuito monofásico, é dada pela Equação (2.34) e corresponde ao produto do valor instantâneo da tensão e do valor instantâneo da corrente. A unidade da potência instantânea é o watt [W].

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (2.34)$$

Para sistemas trifásicos, a potência instantânea  $p$ [W] total pode ser expressa como a soma das potências instantâneas de cada fase, conforme Equação (2.35).

$$p = p_a + p_b + p_c = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (2.35)$$

### 2.5.3 Potência ativa

A potência ativa corresponde ao valor médio da potência instantânea durante um determinado número de períodos que tem início em  $t=\tau$  e término em  $t=\tau+nT$ , sendo  $n$  um número inteiro e  $T$  o período.

$$P = \frac{1}{nT} \int_{\tau}^{\tau+nT} p dt \quad (2.36)$$

Considerando a aplicação das equações (2.34), (2.17) e (2.18) em (2.36) teremos, para o caso monofásico, que a potência ativa média [W] para o intervalo considerado será dada pela Equação (2.37).

$$P = VI \cos \theta \quad (2.37)$$

Para o caso trifásico, a potência média total no intervalo considerado será a soma algébrica das potências médias para cada uma das fases conforme indicado em (2.38).

$$P = P_a + P_b + P_c = V_a I_a \cos \theta_a + V_b I_b \cos \theta_b + V_c I_c \cos \theta_c \quad (2.38)$$

#### 2.5.4 Potência reativa

Para circuitos monofásicos com tensões e correntes senoidais, a potência reativa pode ser calculada através da expressão indicada na Equação (2.39). A integral deve ser avaliada num período correspondente a, no mínimo, um ciclo da frequência fundamental característica do sistema de potência, sendo  $\tau$  o instante inicial de avaliação da integral e  $nT$  o número inteiro de períodos avaliados.

$$Q = \frac{\omega}{nT} \int_{\tau}^{\tau+nT} i \left[ \int v dt \right] dt \quad (2.39)$$

Considerando a aplicação das equações (2.17) e (2.18) em (2.39) teremos a potência reativa  $Q$  [var], para o intervalo considerado, dada pela Equação (2.40).

$$Q = VI \sin \theta \quad (2.40)$$

A potência reativa é também denominada, em algumas publicações, potência de quadratura em função do fato de ser representada por um vetor defasado em  $90^\circ$  com relação ao vetor que representa a potência ativa. Por convenção, o valor da potência reativa apresenta valor positivo quando o fasor de corrente está atrasado em relação ao fasor de tensão (carga

com característica indutiva), assumindo valor negativo quando o fasor de corrente está adiantado em relação ao fasor de tensão (carga com característica capacitiva).

Para circuitos trifásicos equilibrados e com tensões e correntes senoidais, o valor reativo total corresponde à soma aritmética das potências reativas das fases conforme (2.41).

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c = V_a I_a \sin \theta_a + V_b I_b \sin \theta_b + V_c I_c \sin \theta_c \quad (2.41)$$

### 2.5.5 Potência aparente

A potência aparente  $S$  [VA] pode ser obtida, para sistemas monofásicos, através da multiplicação dos valores de tensão e corrente eficazes, avaliada em um determinado intervalo, conforme Equação (2.42).

$$S = VI \quad (2.42)$$

A relação entre a potência aparente e as potências ativa e reativa será então fornecida através da Equação (2.43), sendo que na Figura 2 são indicadas convenções adotadas para situações de medição de energia fornecida (considerada por convenção positiva, I e IV quadrantes), assim como para situações de medição de energia consumida (considerada por convenção negativa, II e III quadrantes).

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.43)$$

Para o caso de sistemas trifásicos equilibrados, com tensões e correntes senoidais, o valor da potência aparente total será fornecido utilizando a Equação (2.43) e considerando os valores de potência ativa e reativa totais fornecidos respectivamente através das Equações (2.38) e (2.41).

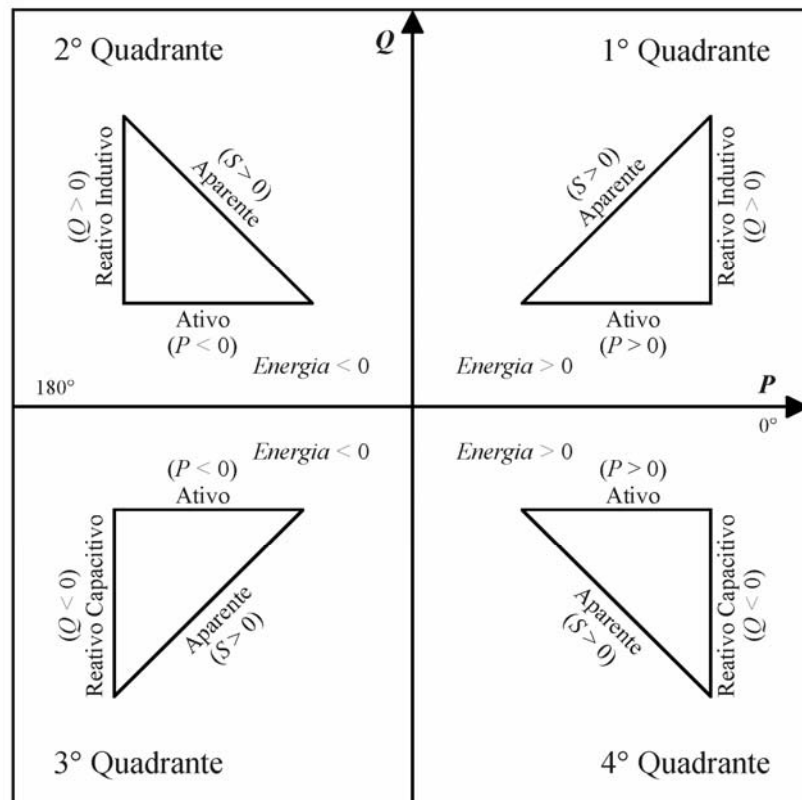


Figura 2 - Relações entre as potências ativa, reativa e aparente nos quadrantes I, II, III e IV. Relações válidas para sistemas de potência monofásicos e trifásicos equilibrados em regime senoidal  
Fonte: Elaborada pelo autor.

Para circuitos monofásicos com tensão e corrente senoidal, considerando que os valores da potência ativa e da potência aparente tenham sido obtidos, respectivamente, a partir das Equações (2.36) e (2.42), o valor da potência reativa poderá ser calculado conforme Equação (2.44).

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.44)$$

Aplicando a Equação (2.44) para cada uma das fases, torna-se possível determinar o valor da potência reativa total através da Equação (2.41), que corresponde a soma das potências reativas de cada fase.

Como a Equação (2.44) sempre fornece valores positivos de potência reativa, ou seja, não determina se a característica da carga é indutiva ou capacitiva, a sua aplicação em medidores digitais se torna restritiva por exigir rotinas extras que sejam capazes de determinar se o sinal de tensão está adiantado ou atrasado em relação ao sinal de corrente. Isto não acontece se a rotina implementada no medidor consistir na aplicação da Equação (2.39),

sendo esta capaz de fornecer diretamente o sinal da potência reativa. É importante frisar que estas considerações são válidas para sistemas em que tensões e correntes sejam senoidais.

### 2.5.6 Potência complexa

Para sistemas monofásicos com ondas de tensão e corrente senoidais, as potências ativa e reativa podem, por conveniência, ser derivadas da definição de potência complexa. A expressão da potência complexa  $\mathbf{S}$  é fornecida na Equação (2.45), na qual  $\mathbf{V}$  corresponde à tensão eficaz fasorial,  $\mathbf{I}^*$  corresponde ao complexo conjugado da corrente eficaz fasorial e  $\theta$  corresponde ao ângulo formado pelo vetor que representa a potência aparente e o vetor que representa a potência ativa.

$$\mathbf{S} \equiv \mathbf{V}\mathbf{I}^* = S\angle\theta = P + jQ \quad (2.45)$$

No caso de sistemas trifásicos equilibrados, a potência complexa de cada fase pode ser expressa conforme indicado em (2.46), (2.47) e (2.48).

$$\mathbf{S}_a \equiv \mathbf{V}_a\mathbf{I}_a^* = S_a\angle\theta_a = P_a + jQ_a \quad (2.46)$$

$$\mathbf{S}_b \equiv \mathbf{V}_b\mathbf{I}_b^* = S_b\angle\theta_b = P_b + jQ_b \quad (2.47)$$

$$\mathbf{S}_c \equiv \mathbf{V}_c\mathbf{I}_c^* = S_c\angle\theta_c = P_c + jQ_c \quad (2.48)$$

### 2.5.7 Fator de potência

A grandeza definida como fator de potência,  $P_F$ , corresponde, para circuito monofásicos com formas de onda de tensão e corrente senoidais, à relação entre a potência ativa e a potência aparente, conforme indicado na Equação (2.49).

$$P_F = \frac{P}{S} \quad (2.49)$$

Para a situação acima, o valor do fator de potência corresponderá ao cosseno do ângulo formado pelos fasores de tensão e corrente, conforme Equação (2.50).

$$P_F = \cos \theta \quad (2.50)$$

No caso de circuitos trifásicos equilibrados com sinais senoidais de tensão e corrente, o fator de potência total é obtido através da aplicação da Equação (2.51), na qual o numerador corresponde ao valor da potência ativa total e o denominador corresponde ao valor da potência aparente total expressa como o módulo da potência complexa total.

$$P_F = \frac{(P_a + P_b + P_c)}{|P_a + P_b + P_c + j(Q_a + Q_b + Q_c)|} \quad (2.51)$$

### 2.5.8 Energia

A energia transferida é definida para um período de acordo com a Equação (2.52), sendo que para sistemas trifásicos é válida a Equação (2.53) para a expressão da energia total.

$$w = \int p(t) dt \quad (2.52)$$

$$w = w_a + w_b + w_c \quad (2.53)$$

### 2.5.9 Tabela resumo

No Quadro 1 são indicadas as relações entre as diversas variáveis referentes ao modelamento tratado. Por uma questão de coerência, os intervalos de integração no cálculo da energia são iguais aos demais. Um sistema monofásico constituirá um caso específico em que somente as relações referentes a uma das fases serão necessárias. As expressões das tensões e correntes correspondem à aplicação da definição de valor eficaz, conforme Equação (2.2), aos sinais de tensão fase-neutro e corrente de cada fase.

$V_a = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+nT} [v_a(t)]^2 dt}$	$V_b = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+nT} [v_b(t)]^2 dt}$	$V_c = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+nT} [v_c(t)]^2 dt}$
$I_a = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+nT} [i_a(t)]^2 dt}$	$I_b = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+nT} [i_b(t)]^2 dt}$	$I_c = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+nT} [i_c(t)]^2 dt}$
$p_a = v_a i_a$	$p_b = v_b i_b$	$p_c = v_c i_c$
$P_a = \frac{1}{nT} \int_{\tau}^{\tau+nT} p_a dt$	$P_b = \frac{1}{nT} \int_{\tau}^{\tau+nT} p_b dt$	$P_c = \frac{1}{nT} \int_{\tau}^{\tau+nT} p_c dt$
$Q_a = \frac{\omega}{nT} \int_{\tau}^{\tau+nT} i_a \left[ \int v_a dt \right] dt$	$Q_b = \frac{\omega}{nT} \int_{\tau}^{\tau+nT} i_b \left[ \int v_b dt \right] dt$	$Q_c = \frac{\omega}{nT} \int_{\tau}^{\tau+nT} i_c \left[ \int v_c dt \right] dt$
$S_a = V_a I_a = \sqrt{P_a^2 + Q_a^2}$	$S_b = V_b I_b = \sqrt{P_b^2 + Q_b^2}$	$S_c = V_c I_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2}$
$P_{Fa} = \frac{P_a}{S_a} = \cos \theta_a$	$P_{Fb} = \frac{P_b}{S_b} = \cos \theta_b$	$P_{Fc} = \frac{P_c}{S_c} = \cos \theta_c$
$w_a = \int_{\tau}^{\tau+nT} p_a dt$	$w_b = \int_{\tau}^{\tau+nT} p_b dt$	$w_c = \int_{\tau}^{\tau+nT} p_c dt$
$P = P_a + P_b + P_c$		
$Q = Q_a + Q_b + Q_c$		
$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$		
$P_F = \frac{P}{S}$		
$w = w_a + w_b + w_c$		

Quadro 1 - Relações entre variáveis válidas para sistemas trifásicos equilibrados com formas de onda senoidais de tensão e corrente para o intervalo  $\tau$  a  $\tau+nT$ . As quatro últimas linhas correspondem aos valores trifásicos totais.

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 2.5.10 Abordagens alternativas para a potência instantânea e energia

Uma abordagem interessante proposta por Fryze (1932 apud FILIPSKI; LABAJ, 1992), também citada e utilizada por diversos autores como Fetea e Petroianu (2000) entre outros, assim como na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), consiste em representar a potência

instantânea por uma soma de duas componentes de potência instantânea, conforme indicado em (2.54).

$$p = p_A + p_Q \quad (2.54)$$

Para isto, é necessário considerar que a corrente senoidal fasorial seja representada pela soma de dois fasores, um deles em fase com a tensão fasorial  $\mathbf{V}$  (componente ativa da corrente fasorial,  $\mathbf{I}_A$ ) e outro em quadratura com relação ao fasor de tensão (componente reativa da corrente fasorial,  $\mathbf{I}_Q$ ). Na Figura 3 é fornecido um exemplo desta possível abordagem.

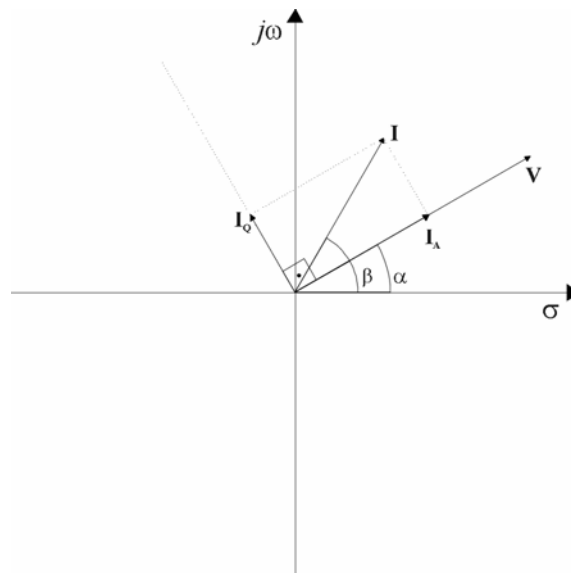


Figura 3 - Representação no plano complexo da decomposição da corrente fasorial  $\mathbf{I}$  nas suas componentes  $\mathbf{I}_Q$  (reativa) e  $\mathbf{I}_A$  (ativa) com relação ao fasor de tensão  $\mathbf{V}$ . Para este exemplo específico a componente reativa é do tipo capacitiva.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Desta forma, o produto entre os valores instantâneos da tensão e os valores instantâneos de corrente ativa fornece uma potência instantânea ativa, e o produto entre os valores instantâneos da tensão e os valores instantâneos de corrente reativa fornece uma potência instantânea reativa. As expressões para as potências instantâneas ativa e reativa, a partir desta abordagem, são as seguintes, considerando que  $V$  e  $I$  sejam os valores eficazes da tensão e da corrente, respectivamente:

$$p_A = VI \cos \theta [1 - \cos(2\omega t)] = P[1 - \cos(2\omega t)] \quad (2.55)$$



$$p_Q = -VI \sin \theta \sin(2\omega t) = -Q \sin(2\omega t) \quad (2.56)$$

A parcela de energia que flui unidirecionalmente da fonte para a carga, denominada energia ativa  $w_A$ , seria dada, segundo IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), por

$$w_A = \int p_A dt = tP - \frac{P}{2\omega} \sin(2\omega t) \quad (2.57)$$

e a energia que oscila entre a carga e a fonte, denominada energia reativa  $w_Q$ , seria, então, fornecida, também segundo IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) por

$$w_Q = \int p_Q dt = \frac{Q}{2\omega} \cos(2\omega t) \quad (2.58)$$

A energia reativa,  $w_Q$ , então, possui um valor médio igual a zero e, de acordo com a abordagem feita, seria a parcela de energia que é trocada entre, por exemplo, um capacitor e uma fonte de tensão alternada. O fluxo de energia existe, sendo que o valor total de energia transferida da fonte para a carga, considerando um período inteiro  $T_0$  (característico do sistema de potência), é igual a zero. Interessante também atentar para o fato de que o valor  $Q$  é a amplitude total da forma de onda que representa a transferência de energia reativa e não um valor médio. No caso da transferência da parcela de energia ativa, como pode ser observado na Equação (2.57), existe um valor médio para a forma de onda de transferência de energia dado pelo produto entre o tempo e a potência,  $tP$  [sW].

## 2.6 SISTEMAS TRIFÁSICOS DESEQUILIBRADOS

Para sistemas monofásicos com tensões e correntes senoidais as perdas na linha apresentam proporcionalidade em relação à potência aparente dada por  $S = VI$ . Esse é um dos motivos pelos quais existe cobrança de excedentes reativos por parte dos fornecedores de energia. Torna-se, então, interessante verificar se, para sistemas trifásicos com formas de onda senoidais, esta característica se mantém no que se refere à potência aparente total.

Conforme Emanuel (1993), para situações de carga equilibrada, com tensões simétricas e defasadas de  $120^\circ$ , a definição de fator de potência aritmético, apresentada em (2.59) e a definição de fator de potência vetorial em (2.60) fornecem resultados idênticos para o fator de potência total.

$$P_{FA} = \frac{(P_a + P_b + P_c)}{(S_a + S_b + S_c)} \quad (2.59)$$

$$P_{FV} = \frac{(P_a + P_b + P_c)}{|P_a + P_b + P_c + j(Q_a + Q_b + Q_c)|} \quad (2.60)$$

É citada em Emanuel (1993) uma situação hipotética na qual um sistema apresenta desequilíbrio de carga de forma que os valores das potências complexas sejam dados por (2.61) e (2.62).

$$\mathbf{S}_a = \mathbf{S}_b = P(1 + j) \quad (2.61)$$

$$\mathbf{S}_c = 2P(1 - j) \quad (2.62)$$

Se for utilizada a definição de fator de potência conforme (2.59) o resultado obtido para esta grandeza será  $P_F = 0,707$  e se for usada definição conforme (2.60),  $P_F = 1$ . Isto levaria então, segundo Emanuel (1993), a duas possíveis definições para a potência aparente total característica de uma carga trifásica desequilibrada que apresenta, como resposta a tensões senoidais aplicadas, correntes senoidais: A potência aparente aritmética  $S_A$  e a potência aparente vetorial  $S_V$ , dadas respectivamente pelas expressões (2.63) e (2.64). Tais definições também são citadas na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000).

$$S_A = S_a + S_b + S_c \quad (2.63)$$

$$S_V = |P_a + P_b + P_c + j(Q_a + Q_b + Q_c)| \quad (2.64)$$

O mais relevante em relação às definições expressas nas equações (2.63) e (2.64) consiste no fato de que, independente de estarem de alguma forma corretas ou não, conforme demonstrado na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), nenhuma delas fornece valores de alguma forma proporcionais às perdas na linha trifásica a quatro fios (com neutro) para o caso

de cargas desequilibradas. Em outras palavras, a utilização de um sistema trifásico na transferência de uma determinada quantidade de energia é mais eficiente se a carga estiver equilibrada, sendo que o fator de potência total poderia ser um indicador de eficiência de utilização da linha trifásica. Isso, no entanto, será válido como definição se for considerado que fator de potência total unitário corresponde ao máximo aproveitamento do sistema trifásico em termos de perdas na linha.

A Tabela 1 abaixo mostra uma situação hipotética na qual uma carga puramente resistiva é conectada entre as fases  $a$  e  $b$  de um sistema trifásico a quatro fios com tensões senoidais equilibradas  $V_a = V_b = V_c = 100$  V. O Método 1 mostra a aplicação da definição de potência aparente aritmética, e o Método 2 mostra a aplicação do conceito de potência aparente vetorial.

Tabela 1 - Potência aparente aritmética e vetorial correspondentes à definição de fator de potência total aritmético (Método 1) e vetorial (Método 2). Carga resistiva ligada entre as fases  $a$  e  $b$

	Método 1		Método 2	
<b>Aparente</b> [VA]	$S_a$	17.320,5	$S_a$	17.320,5
	$S_b$	17.320,5	$S_b$	17.320,5
	$S_c$	0,0	$S_c$	0,0
	$S_A$	34.641,0	$S_V$	30.000,0
<b>Ativo</b> [W]	$P_a$	15.000,0	$P_a$	15.000,0
	$P_b$	15.000,0	$P_b$	15.000,0
	$P_c$	0,0	$P_c$	0,0
	$P$	30.000,0	$P$	30.000,0
<b>Reativo</b> [var]	$Q_a$	8.660,3	$Q_a$	-8.660,3
	$Q_b$	8.660,3	$Q_b$	8.660,3
	$Q_c$	0,0	$Q_c$	0,0
	$Q$	17.320,5	$Q$	0,0
<b>Fatores</b>	$P_{Fa}$	0,8660	$P_{Fa}$	0,8660
	$P_{Fb}$	0,8660	$P_{Fb}$	0,8660
	$P_{Fc}$	1,0000	$P_{Fc}$	1,0000
	$P_{FA}$	0,8660	$P_{FV}$	1,0000

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 2, a seguir, mostra os valores de potências por fase e totais de uma carga trifásica resistiva equilibrada, ligada em estrela com neutro interligado ao neutro do sistema trifásico de alimentação que apresenta as mesmas características de tensão que o anterior. A potência ativa total desta carga é equivalente a potência ativa da carga desequilibrada da Tabela 1.

Tabela 2 - Potência aparente aritmética e vetorial correspondentes a definição de fator de potência total aritmético (método 1) e vetorial (método 2). Carga resistiva equilibrada ligada em estrela

	Método 1		Método 2	
<b>Aparente</b> [VA]	$S_a$	10.000,0	$S_a$	10.000,0
	$S_b$	10.000,0	$S_b$	10.000,0
	$S_c$	10.000,0	$S_c$	10.000,0
	$S_A$	30.000,0	$S_V$	30.000,0
<b>Ativo</b> [W]	$P_a$	10.000,0	$P_a$	10.000,0
	$P_b$	10.000,0	$P_b$	10.000,0
	$P_c$	10.000,0	$P_c$	10.000,0
	$P$	30.000,0	$P$	30.000,0
<b>Reativo</b> [var]	$Q_a$	0,0	$Q_a$	0,0
	$Q_b$	0,0	$Q_b$	0,0
	$Q_c$	0,0	$Q_c$	0,0
	$Q$	0,0	$Q$	0,0
<b>Fatores</b>	$P_{Fa}$	1,0000	$P_{Fa}$	1,0000
	$P_{Fb}$	1,0000	$P_{Fb}$	1,0000
	$P_{Fc}$	1,0000	$P_{Fc}$	1,0000
	$P_{FA}$	1,0000	$P_{FV}$	1,0000

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 3 mostra, para o mesmo sistema trifásico com tensões equilibradas das tabelas anteriores, uma carga puramente resistiva ligada entre a fase  $a$  e o neutro. Esta carga apresenta a mesma potência ativa que as cargas dos exemplos das Tabelas 1 e 2.

Tabela 3 - Potência aparente aritmética e vetorial correspondentes a definição de fator de potência total aritmético (método 1) e vetorial (método 2). Carga resistiva ligada entre a fase  $a$  e neutro

	Método 1		Método 2	
<b>Aparente</b> [VA]	$S_a$	30.000,0	$S_a$	30.000,0
	$S_b$	0,0	$S_b$	0,0
	$S_c$	0,0	$S_c$	0,0
	$S_A$	30.000,0	$S_V$	30.000,0
<b>Ativo</b> [W]	$P_a$	30.000,0	$P_a$	30.000,0
	$P_b$	0,0	$P_b$	0,0
	$P_c$	0,0	$P_c$	0,0
	$P$	30.000,0	$P$	30.000,0
<b>Reativo</b> [var]	$Q_a$	0,0	$Q_a$	0,0
	$Q_b$	0,0	$Q_b$	0,0
	$Q_c$	0,0	$Q_c$	0,0
	$Q$	0,0	$Q$	0,0
<b>Fatores</b>	$P_{Fa}$	1,0000	$P_{Fa}$	1,0000
	$P_{Fb}$	1,0000	$P_{Fb}$	1,0000
	$P_{Fc}$	1,0000	$P_{Fc}$	1,0000
	$P_{FA}$	1,0000	$P_{FV}$	1,0000

Fonte: Elaborada pelo autor.

Considerando que a resistência dos três condutores das fases e do neutro entre fonte e carga seja igual a um valor hipotético de  $0,001 \Omega$ , os valores calculados para as perdas na linha de alimentação serão respectivamente 60 W, 30W e 90W. É possível concluir, então, que a menor perda de energia por efeito Joule é apresentada no caso em que a carga é equilibrada. Além disso, nos casos em que as cargas são desequilibradas (Tabelas 1 e 3) tanto a definição de fator de potência vetorial quanto a definição de fator de potência aritmético não seriam capazes, em princípio, de quantificar ou representar um índice de utilização de linha satisfatório. Isto pode ser concluído a partir do fato de que o fator de potência vetorial apresenta valor unitário para as duas situações de desequilíbrio e o fator de potência aritmético apresenta valor unitário para a situação de desequilíbrio da Tabela 3.

Conforme Filipki, Baghzouz e Cox (1994), o método mais comum de avaliação do fator de potência médio de instalações consiste no uso de medidor de energia ativa e medidor de energia reativa de tal forma que, através da relação (2.65) onde  $w_A$  [kWh] corresponde ao valor da energia ativa e  $w_Q$  [kvarh] corresponde ao valor da energia reativa, seja fornecido o valor do fator de potência médio da instalação para um determinado período de tempo.

$$P_F = \frac{w_A}{\sqrt{w_A^2 + w_Q^2}} \quad (2.65)$$

Para situações em que o medidor de energia reativa tenha uma característica de resposta tal que o valor de potência reativa total medida seja o resultado da soma algébrica dos valores de energia reativa das três fases, torna-se possível o resultado  $P_F = 1$  ainda que uma das fases apresente característica indutiva, outra fase característica capacitiva de módulo igual ou próximo ao da fase anterior e a terceira fase característica puramente resistiva. Obviamente, isto aconteceria em situação de desequilíbrio de carga, e tal situação não é a mais comum na prática. O exemplo, no entanto, é útil no sentido de mostrar a questão conceitual envolvida se considerarmos o importante fato de que excedentes reativos são cobrados pelas concessionárias de energia.

### **2.6.1 Cargas não lineares**

O aparecimento de situações em que a forma de onda da corrente e, conseqüentemente, em função das impedâncias dos circuitos de alimentação em geral, a forma de onda de tensão seja não senoidal está relacionado, entre outros motivos, ao surgimento de cargas classificadas como não lineares. Durante as últimas décadas, o aumento de tais tipos de cargas conectadas aos sistemas de fornecimento de energia em geral tem sido de tal forma significativo que, não raro, podem representar a parte mais significativa em termos de potência total instalada em residências e mesmo em indústrias.

### **2.6.2 Sistemas de potência em regime não senoidal**

O método de análise de sistemas de potência apresentado no início deste capítulo, quando aplicado a sistemas de potência nos quais as formas de onda das tensões e correntes não sejam senoidais, pode levar, em alguns casos, a resultados em princípio incoerentes devido ao fato de que algumas variáveis não terão o mesmo significado que o apresentado em situações senoidais. Tais situações têm sido tratadas e discutidas em diversos trabalhos. Conforme citado por Filipiski, Baghzouz e Cox (1994), algumas controvérsias a respeito dos possíveis significados das definições de potência aparente, potência reativa e fator de potência envolvendo formas de onda não senoidais tiveram início em torno de 1920 e, após mais de meio século, ainda permanecem sem conclusões finais ou estabelecimento de um consenso. Ainda conforme Filipiski, Baghzouz e Cox (1994), potência aparente e fator de potência são grandezas úteis em situações em que formas de onda de tensão e corrente sejam senoidais em função do fato de que geradores, transformadores e cabos são geralmente dimensionados em termos de potência aparente e não de potência ativa porque as perdas nos equipamentos são proporcionais ao produto tensão e corrente eficazes. No entanto, em situações não senoidais o produto entre a tensão e a corrente (eficazes) não é suficientemente preciso para dimensionamento visto que as perdas em alguns destes elementos do circuito são função da frequência.

Uma das divergências ainda existentes consiste justamente na definição de potência reativa e das correlações que tais definições possam ter em termos de significado físico, interpretações e de possíveis conseqüências destas interpretações.

Inicialmente, considerando que a tensão e a corrente instantâneas num circuito monofásico possam ser expressas por séries de Fourier, teremos os valores da tensão instantânea  $v$  e da corrente instantânea  $i$  dadas, respectivamente, pelas Equações

$$v = \sqrt{2} \sum_{h=0}^{h=\infty} V_h \sin(h\omega t + \alpha_h) \quad (2.66)$$

e

$$i = \sqrt{2} \sum_{h=0}^{h=\infty} I_h \sin(h\omega t + \beta_h) \quad (2.67)$$

onde  $V_h$  corresponde ao valor eficaz da componente de tensão harmônica de ordem  $h$ ,  $\alpha_h$  corresponde ao ângulo da componente harmônica de tensão de ordem  $h$ ,  $I_h$  corresponde ao valor eficaz da componente de corrente harmônica de ordem  $h$  e  $\beta_h$  corresponde ao ângulo da componente harmônica de corrente de ordem  $h$ .

Suponhamos que um determinado circuito monofásico seja alimentado por uma fonte de tensão puramente senoidal, sendo a componente fundamental  $V_1 = 100$  V e o ângulo  $\alpha_1 = 0$ , ou seja, a tensão seja representada por (2.66) fazendo  $V_h = 0$  para todo  $h \neq 0$  conforme (2.68).

$$v = \sqrt{2}(100)\sin(\omega t) \quad (2.68)$$

Supondo, ainda, que este circuito apresente uma corrente com componente fundamental ( $h=1$ ) de corrente eficaz  $I_1 = 100$  A e ângulo  $\beta_1 = 0$  e, também, somada a esta corrente fundamental, uma componente harmônica de corrente de terceira ordem ( $h=3$ ) de valor  $I_3 = 30$  A e ângulo  $\beta_3 = 0$  conforme (2.69).

$$i = \sqrt{2}(100)\sin(\omega t) + \sqrt{2}(30)\sin(3\omega t) \quad (2.69)$$

Calculando o valor eficaz da corrente utilizando a Equação (2.4) o resultado obtido será  $I=104,40$  A, sendo o valor eficaz da tensão  $V=100$  V. O valor da potência aparente será dado pela multiplicação do valor eficaz da corrente pelo valor eficaz da tensão correspondendo a

$S=VI = 10.440,3$  VA. Se for calculado o valor da potência ativa deste circuito usando (2.36) será obtido o valor  $P=10.000$  W. Através da relação clássica  $S^2 = P^2 + Q^2$  poderia ser concluído que o valor da potência reativa seria dado por  $Q= 3.000,0$  var e o fator de potência seria então  $P_F = 0,9578$ . Na Tabela 4 este procedimento corresponde ao Método 1. No entanto, se inicialmente o valor da potência reativa fosse obtido através da Equação (2.39), e após, fosse então aplicado o triângulo de potências para obter o valor da potência aparente, o resultado seria  $Q = 0$  para a potência reativa e  $S=10.000$  VA o que entraria em contradição com o valor da potência aparente definida por  $S=VI$ . Este procedimento corresponde, na Tabela 4, ao Método 2.

Tabela 4 - Cálculo das potências através de dois métodos distintos, Método 1 e Método 2.

	Método 1		Método 2	
<b>Aparente [VA]</b>	$S$	10.440,3	$S$	10.000,0
<b>Ativo [W]</b>	$P$	10.000,0	$P$	10.000,0
<b>Reativo [var]</b>	$Q$	3.000,0	$Q$	0,0
<b>Fator de Potência</b>	$P_F$	0,95783	$P_F$	1,00000

Fonte: Elaborada pelo autor.

Se tivéssemos como objetivo, no exemplo anterior, tornar o fator de potência unitário através da inserção de potência reativa capacitiva,  $Q = -3.000$  kvar, isto levaria ao resultado mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Cálculo das potências através de dois métodos distintos, Método 1 e Método 2.

	Método 1		Método 2	
<b>Aparente [VA]</b>	$S$	10.862,8	$S$	10.440,3
<b>Ativo [W]</b>	$P$	10.000,0	$P$	10.000,0
<b>Reativo [var]</b>	$Q$	4.242,6	$Q$	-3.000,0
<b>Fator de Potência</b>	$P_F$	0,92057	$P_F$	0,95783

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 6 é mostrado o resultado da inserção de potência reativa indutiva,  $Q = 3.000$  kvar, com o mesmo objetivo anterior.



Tabela 6 - Cálculo das potências através de dois métodos distintos, Método 1 Método 2.

	Método 1		Método 2	
<b>Aparente [VA]</b>	$S$	10.862,8	$S$	10.440,3
<b>Ativo [W]</b>	$P$	10.000,0	$P$	10.000,0
<b>Reativo [var]</b>	$Q$	4.242,6	$Q$	3.000,0
<b>Fator de Potência</b>	$P_F$	0,92057	$P_F$	0,95783

Fonte: Elaborada pelo autor.

Em ambos os casos anteriores, tanto com inserção de potência reativa indutiva quanto de potência reativa capacitiva, o novo valor de corrente eficaz seria  $I=108,63$  A. Este valor seria então superior ao verificado originalmente para o circuito, mostrando a ineficácia do suposto processo de correção do fator de potência aplicado. Se for considerada a definição de potência reativa como uma parcela da potência aparente que pode ser diminuída através da inserção de potência reativa, o método 1 falha. Se considerarmos que deve haver uma relação vetorial entre a potência ativa, a potência reativa e a potência aparente, formando o triângulo de potências, o método 2 falha visto que a relação  $S=VI$  não se verifica.

Este exemplo simples serve para ilustrar que, em situações nas quais a corrente apresenta componentes harmônicas de ordem  $h>1$ , o triângulo de potências da metodologia utilizada para sistemas com tensões e correntes senoidais não mantém as mesmas propriedades que em situações nas quais somente componentes fundamentais de corrente estão presentes. Nos casos em que tanto a corrente quanto a tensão são caracterizadas por presença de conteúdo harmônico, situações ainda mais complexas podem ocorrer.

Se a potência reativa num circuito for definida como uma parcela da potência que pode ser compensada pela inserção de elementos lineares de característica reativa, poderemos concluir, a princípio, que a metodologia de cálculo anteriormente denominada Método 1 não corresponde a esta definição. Se potência reativa for definida como uma relação quadrática entre a potência aparente e a potência ativa, o Método 2 de cálculo citado anteriormente não atenderá a esta definição ou, pelo menos, a definição de potência aparente será comprometida. Além disso, a consequência imediata dessas diferentes definições de potência reativa implica, também, em diferentes definições de fator de potência em situações em que tensões e correntes não sejam senoidais. A definição de um fator de potência fundamental, também denominado fator de deslocamento na literatura em geral, têm sido utilizada e alguns medidores e registradores fornecem este valor. No caso do fator de deslocamento, somente as componentes fundamentais de tensão e corrente são consideradas, indicando que outras

variáveis específicas se tornam necessárias na medida em que a complexidade do sistema aumenta em função da existência de componentes harmônicas.

Durante as últimas décadas várias novas definições de potência reativa foram propostas, entre as quais a definição de Budeanu, conforme citada em (IEEE, 2000), segundo a qual a potência reativa  $Q_B$  é definida por

$$Q_B = \sum_h V_h I_h \sin \theta_h \quad (2.70),$$

a definição de Fryze, conforme indicado por Filipski e Labaj (1992), segundo a qual a potência reativa denominada  $Q_F$  é dada pela divisão ou separação da corrente em duas componentes, uma ativa e outra reativa, num processo similar ao descrito anteriormente, e que fornece então

$$Q_F = VI_Q \quad (2.71),$$

onde  $I_Q$  é o valor eficaz da componente reativa da corrente. Além destas definições, outras ainda, conforme Filipski e Labaj (1992), podem ser citadas tal como a definição de Sharon, para a qual o valor de reativo  $Q_{SH}$  é dado por

$$Q_{SH} = V \sqrt{\sum_h I_h^2 \sin^2 \theta_h} \quad (2.72)$$

e o reativo de Kusters-Moore,  $Q_{KM}$  avaliado segundo a expressão (2.73).

$$Q_{KM} = -\sum_h h V_h I_h \sin \theta_h \sqrt{\frac{\sum_h V_h^2}{\sum_h h^2 V_h^2}} \quad (2.73)$$

De uma forma geral, essas definições implicam, também, em respectivas definições de potência aparente e, conseqüentemente, em respectivas definições de fator de potência cujo objetivo básico é a tentativa de formar metodologias aplicáveis a sistemas em que tensões e correntes não sejam senoidais. Segundo Filipski e Labaj (1992), em situações em que as tensões e correntes não sejam senoidais não existe uma grandeza que apresente as mesmas propriedades que a potência reativa tem nas situações de tensão e corrente senoidais. Considerando uma visão mais ampla sobre estas questões, conforme a Norma IEEE 1459-

2000 (IEEE, 2000) ainda não existe uma teoria geral de sistemas de potência que, simultaneamente, dê conta de aspectos relacionados com tarifação, avaliação da qualidade de energia, detecção de fontes de distorção harmônica e dos métodos, e cálculos teóricos utilizados na área de filtragem ativa e compensação quando aplicadas a tentativas de diminuir ou eliminar problemas causados por deterioração da qualidade de energia.

## 2.7 CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentados alguns conceitos básicos necessários para a avaliação dos capítulos subseqüentes, sendo dada ênfase às definições de valores médios e eficazes, representação de funções através de Séries de Fourier, assim como a metodologia mais utilizada na abordagem de circuitos de potência para sistemas com tensões e correntes senoidais no que se refere à definição das potências e demais grandezas envolvidas.

Em relação à aplicação do modelamento matemático utilizado tradicionalmente (para circuitos com tensões e correntes senoidais) em situações em que tanto tensões quanto correntes apresentem formas de onda não senoidais, foram apresentados alguns exemplos simples que mostram algumas limitações existentes. Adicionalmente foram apresentadas, de forma resumida, algumas das definições de potência reativa aplicáveis a situações em que sinais de frequência superior à frequência característica de fornecimento de energia estejam presentes e que foram desenvolvidas nas últimas décadas.

Torna-se possível, então, concluir que, sendo a metodologia indicada insuficiente na abordagem de sistemas de potência sob condições de conteúdo harmônico nas correntes, assim como na presença de conteúdo harmônico nas tensões e correntes, há uma crescente necessidade de estudos que possibilitem, na medida do possível, levar a uma padronização no que se refere a novas variáveis e conceitos aplicáveis a essas situações.

## **3 NORMAS**

### **3.1 INTRODUÇÃO**

Neste capítulo serão comentados aspectos relevantes em relação à Norma IEC 61000-4-30 (IEC, 2003) e da Norma IEC 61000-4-7 (IEC, 2002), sendo dada ênfase aos aspectos normativos que foram utilizados no desenvolvimento do algoritmo destinado a obtenção das variáveis segundo a Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000).

### **3.2 IEC 61000-4-7**

#### **3.2.1 Aspectos gerais**

A Norma IEC 61000, parte 4-7 (IEC, 2002) trata, basicamente, de técnicas de medição a serem empregadas em instrumentos destinados ao registro de componentes de tensão e corrente na faixa de frequências de 0 a 2500 Hz presentes nas tensões e correntes de frequências de 50 e 60 Hz características dos sistemas de fornecimento de energia.

De uma forma geral as recomendações citadas na Norma (IEC, 2002) abrangem aspectos relacionados com a classificação dos instrumentos de acordo com o tipo de sinal a ser medido, classes de exatidão e tipos de medidas a serem efetuadas. São fornecidas, também, instruções específicas para instrumentos que utilizem algoritmos de detecção de componentes harmônicas baseados tanto em filtragem como no emprego de DFT (Transformada Discreta de Fourier), assim como recomendações especiais para os casos em que os instrumentos devam fornecer informações referentes aos ângulos de fase das componentes harmônicas, índices de distorção dos sinais de tensão e corrente, componentes simétricas e valores associados à existência de harmônicas de ordem não inteira nos sinais de tensão e corrente.

A parte mais significativa desta Norma (IEC, 2002), no que se refere ao desenvolvimento do algoritmo feito para atender a Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) e que será exposto posteriormente, está relacionada às especificações de uso da Transformada Discreta de Fourier (DFT) para análise de componentes harmônicos em sistemas de potência.

### **3.2.2 Características dos sinais a serem medidos**

A Norma (IEC, 2002) classifica os sistemas de acordo com a dinâmica de variação das componentes harmônicas dos sinais de tensão e de corrente em sistemas do tipo quase-estacionário, flutuante e rápido, embora a linha limite entre esses grupos seja de difícil definição. De uma forma geral, os sistemas com variação rápida de conteúdo harmônico são aqueles que apresentam situações classificáveis como surtos ou perturbações para as quais há uma mudança muito rápida na composição harmônica. De acordo com o indicado, tais surtos teriam duração em torno de 1 segundo ou menos. Sistemas com variações harmônicas que ocorrem em períodos superiores a este podem ser classificados como do tipo flutuante e, no caso de variações ainda mais lentas, quase-estacionário.

### **3.2.3 Classificação dos instrumentos de acordo com a classe de exatidão**

Os instrumentos, de uma forma geral e de acordo com as características de exatidão apresentadas na medição de um determinado parâmetro de interesse, são classificados em Classe A e B. Algumas informações sobre esta classificação serão fornecidas na parte referente à Norma IEC 61000-4-30 (IEC, 2003).

### **3.2.4 Especificações e requisitos para instrumentos baseados em DFT**

A Norma (IEC, 2002) fornece requisitos especiais para o caso de instrumentos que operem com o uso de Transformada Discreta de Fourier (DFT) no que se refere ao tamanho

da janela a ser utilizada no processo obtenção dos coeficientes de Fourier. O sinal a ser avaliado,  $x(t)$ , deverá ser amostrado durante um período  $T_w$  denominado período de janela de amostragem ou simplesmente janela, caracterizado por conter um número inteiro  $n$  de ciclos do sinal de frequência fundamental  $f_l$ . Considerando que  $k$  seja o número da amostra, os valores das  $z$  amostras obtidas no período  $T_w$  deverão ser aplicadas nas equações (3.1) e (3.2) que fornecerão o coeficientes de Fourier de ordem harmônica  $h$  do sinal  $x(k)$  amostrado. Nas equações (3.1) e (3.2) os símbolos originalmente utilizados na Norma (IEC, 2002) para a representação de algumas das variáveis foram alterados com o objetivo de manter a coerência com a simbologia utilizada nesta dissertação.

$$a_h = \frac{2}{z} \sum_{k=1}^{k=z} x_k \cos \left[ \frac{2\pi h(k-1)}{z} \right] \quad (3.1)$$

$$b_h = \frac{2}{z} \sum_{k=1}^{k=z} x_k \sin \left[ \frac{2\pi h(k-1)}{z} \right] \quad (3.2)$$

A determinação do módulo e do respectivo ângulo de cada uma das componentes harmônicas é feita a partir dos coeficientes  $a_h$  e  $b_h$  de forma similar ao exposto na parte referente aos conceitos básicos da Transformada de Fourier, Capítulo 2.

De acordo com a Norma (IEC, 2002) os instrumentos que realizam este procedimento devem ser dotados de filtros “anti-aliasing”, cuja função é eliminar frequências superiores à frequência de operação do instrumento. Devem ser dotados de conversor analógico-digital (A/D) para a obtenção das amostras, dispositivo de sincronização de amostragem que acompanhe as variações da frequência fundamental do sinal, de uma unidade de formatação das amostras, se aplicável, e de uma unidade ou algoritmo que forneça os coeficientes  $a_h$  e  $b_h$  de acordo com (3.1) e (3.2).

Em alguns casos, se aplicável, na unidade de formatação as amostras podem ter seus valores alterados através da multiplicação do conjunto de amostras por funções simétricas especiais cuja função é atenuar os valores de determinadas amostras, dando uma nova formatação para a janela em termos de amplitudes. Quando este procedimento não é feito e as amostras processadas correspondem às amostras originalmente feitas pelo sistema de conversão A/D utilizado, a janela obtida é denominada “janela retangular”.

De uma forma geral o processamento das amostras obtidas a partir de uma determinada forma de onda, cujo objetivo seja a avaliação do conteúdo harmônico do sinal para instrumentos baseados em DFT, está vinculado a dois aspectos: O primeiro relacionado ao tamanho da janela ser utilizado e o segundo relacionado à formatação dos valores amostrados que compõe a mesma, conforme descrito anteriormente.

### 3.2.5 Avaliação de sistemas com conteúdo harmônico quase-estacionário

Para avaliação de sistemas em situação do tipo quase-estacionária, a escolha do período de janela  $T_w$  tem a ver com a seletividade desejada no que se refere à atenuação dos sinais de frequências com valores próximos da frequência ou componente a ser determinada. Além disso, conforme indicado na Norma (IEC, 2002), em situações nas quais seja necessária a determinação do ângulo que cada componente harmônica de tensão de ordem  $h \geq 1$  apresenta em relação à respectiva harmônica de corrente de mesma ordem, torna-se necessário uma exata sincronização entre a frequência de amostragem,  $f_s$ , e a frequência do sinal fundamental  $f_1$ .

Para este caso, se utilizado o janelamento retangular, a duração de janela deverá ser tal que contenha de 6 a 18 ciclos inteiros da fundamental para sistemas operando na frequência nominal de 60 Hz o que implica em um valor de  $T_w$  [s] que atenda  $0,1 \leq T_w \leq 0,3$ . A aplicação de janelas com outros formatos poderá implicar, em alguns casos, na necessidade de inserção de filtragem extra. Este é o caso em que uma janela de Hanning seja utilizada.

O janelamento tipo Hanning, conforme Oppenheim e Schaffer (1989), consiste em que os valores das amostras  $x_k$ , originalmente obtidos para a janela de  $z$  amostras considerada, sejam multiplicados por uma função cosseno de tal forma que o novo conjunto de valores da janela seja dado por

$$y_k = x_k (0,5 - 0,5 \cos(2\pi k / z)) \quad (3.3).$$

O procedimento de obtenção dos coeficientes de Fourier seria, então, aplicado ao conjunto de novos valores obtidos. De acordo com a Norma (IEC, 2002), a aplicação de

janela de Hanning implicaria numa melhor atenuação das frequências próximas a frequência da harmônica de interesse a ser determinada, aumentando a seletividade. No entanto, implicaria, também, em algumas desvantagens entre as quais o acréscimo de novas linhas espectrais na função original causando a necessidade, conforme citado, de filtragem extra para atenuação de tais sinais.

### **3.2.6 Avaliação de sistemas com conteúdo harmônico flutuante e rápido**

As recomendações citadas para medição de sistemas caracterizados por variação no conteúdo harmônico do tipo flutuante e rápido são similares às indicadas para o caso anterior, considerando, no entanto, diferenças em relação ao valor de período de janela  $T_w$ .

Para o caso de variações de conteúdo harmônico do tipo flutuante é aconselhado o uso de janelas retangulares de tamanho correspondente a 16 ciclos ou janelas tipo Hanning de 24 a 30 ciclos do período fundamental. A avaliação deve ser feita de forma contínua, sem intervalos ou sobreposições, ao utilizar janelamento retangular e sem intervalos, mas com sobreposição de meia janela, se a mesma for do tipo Hanning.

Para avaliação de mudanças rápidas no conteúdo harmônico dos sinais e avaliação de transitórios harmônicos devem ser usadas janelas que contenham cerca de 8 ciclos ( $0,1 \leq T_w \leq 0,3$ ) inteiros de frequência fundamental devido ao compromisso existente entre seletividade, tempo de resposta e filtragem de outros transientes que não aqueles relacionados ao conteúdo harmônico em especial como, por exemplo, os que ocorrem em operações de chaveamento.



### 3.3 IEC 61000-4-30

#### 3.3.1 Introdução

Um aspecto importante referente à medição e registro de parâmetros em geral, e de forma específica a registros de parâmetros de qualidade de energia, está relacionado ao procedimento de cálculo aplicado pelo medidor ou registrador utilizado. A situação ideal corresponde àquela em que o resultado referente a algum parâmetro obtido por diferentes medidores, de diferentes fabricantes ou marcas, seja, dentro de faixas de erro aceitáveis ou pré-definidas, o mesmo quando esses medidores recebem os mesmos sinais de entrada.

Esta situação ideal, no entanto, pode não ser verificada na prática. Em alguns casos, seja em função de questões conceituais do tipo de tratamento dos sinais, sistemática de cálculo aplicada, algoritmo utilizado, ou mesmo em função de diferenças relacionadas à falta de sincronismo entre os diversos registradores, diferentes resultados podem ser obtidos para um mesmo parâmetro ainda que os sinais de entrada sejam idênticos para todos os medidores ou registradores. Dependendo da faixa de valores dentro das quais os diferentes resultados obtidos se encontram a viabilidade de avaliação deste determinado parâmetro, visando estabelecimento de limites legais permissíveis, enquadramento em relação a algum tipo de legislação vigente ou mesmo tomada de decisão técnica, pode ser comprometida em função da impossibilidade de estabelecimento de uma referência básica.

A Norma IEC 61000, parte 4-30 (IEC, 2003) trata da definição de métodos de medição e interpretação de resultados no que se refere à medição e ao registro de variáveis e índices relacionados com a qualidade em sistemas de fornecimento de energia elétrica. Seu objetivo básico é servir como referência em termos de desempenho de equipamentos destinados à avaliação dos parâmetros de qualidade de energia no sentido de padronizar procedimentos de medição.

### 3.3.2 Aspectos gerais

De acordo com a Norma IEC 61000-4-30 (IEC, 2003) os instrumentos destinados à avaliação da qualidade de energia são classificados em duas classes de acordo com o desempenho. Classe A quando medições de alta precisão são exigidas, principalmente nos casos de disputas contratuais ou de comparações de instrumentos com relação a alguma norma estabelecida. Dois medidores Classe A fornecerão os mesmos resultados a partir dos mesmos sinais dentro das faixas de exatidão estabelecidas por esta Norma (IEC, 2003). Os medidores classificados como Classe B serão, então, destinados a medições de propósitos estatísticos, avaliações técnicas gerais e na avaliação de situações envolvendo falhas em equipamentos onde alta precisão não seja necessária.

Para instrumentos Classe A é recomendado na medição de tensão, harmônicas e desequilíbrio de tensão, a utilização de janelas de 12 ciclos da frequência fundamental de 60 Hz. Cada janela, então, constitui o intervalo de tempo base na avaliação dos valores eficazes e estes valores deverão ser agregados no tempo (cálculo do valor médio da variável para um intervalo de tempo determinado) usando a raiz quadrada da média aritmética dos valores obtidos para cada conjunto de 12 ciclos. Os tempos de agregação deverão ser de 3 segundos, 10 minutos e 2 horas. Algumas considerações são, também, feitas com relação à incerteza da base de tempo de referência utilizada no equipamento Classe A, que não deve exceder 1 s para cada período de 24 horas, assim como ao possível uso de referência de tempo com sincronização periódica via GPS.

Para instrumentos Classe B, o fabricante do mesmo, segundo indicado em IEC 61000-4-30 (IEC, 2003), determinará os tempos de agregação disponíveis assim como duração da janela base e incertezas em termos de base de tempo utilizada.

### 3.3.3 Parâmetros relacionados à qualidade de energia

Os parâmetros a serem medidos, no que se refere à tensão, serão a frequência do sinal fundamental, o valor eficaz, cintilação (“flicker”), variações momentâneas (“sag”, “swell”), interrupção, transientes, desequilíbrio, harmônicas, interharmônicas, e sinais utilizados para

comando sobrepostos à tensão de fornecimento. A seguir serão feitas algumas considerações sobre alguns destes parâmetros que estão relacionados ao desenvolvimento do algoritmo proposto.

#### 3.3.3.1 Determinação do valor da frequência fundamental

Para instrumentos Classe A, as leituras de frequência devem ser obtidas para períodos de 10 segundos. A frequência deve ser determinada a partir da divisão entre o número de ciclos integrais (de 50 ou 60 Hz), contados no intervalo de 10 segundos, pelo tempo total de duração do número inteiro de ciclos. A incerteza da medição de frequência não deve exceder  $\pm 0,01$  Hz e ser feita em um canal de referência. Para instrumentos Classe B, outros métodos poderão ser utilizados na avaliação deste parâmetro e o fabricante do instrumento deve informar qual foi escolhido.

#### 3.3.3.2 Determinação dos níveis de tensão eficazes

No que se refere aos instrumentos Classe A, para sistemas com frequência nominal de 60 Hz, os valores de tensão eficaz deverão ser determinados a partir de janelas consecutivas de 12 ciclos de duração, enquanto para sistemas operando com frequência nominal de 50 Hz, janelas consecutivas de 10 ciclos. As janelas deverão ser adjacentes e não deverá haver sobreposições. Este método deverá ser aplicado para avaliação de valores eficazes de sinais de tensão “quase-estacionários”, não sendo indicado para avaliação de situações envolvendo transientes, interrupções ou variações momentâneas de tensão. Nos valores eficazes da tensão e da corrente estarão inclusas as influências das componentes harmônicas e interharmônicas do sinal dentro da faixa de frequências disponibilizada pela taxa de amostragem utilizada. Isto implica no importante fato de que os valores eficazes de tensão e corrente, para medidores digitais, são função, também, da taxa de amostragem. A incerteza da avaliação não deverá exceder  $\pm 0,1$  %. Os tempos de agregação padrão deverão ser de 3 segundos, 10 minutos e 2 horas.

Para instrumentos Classe B, a duração da janela poderá ser especificada pelo fabricante e a incerteza não deverá exceder  $\pm 0,5\%$ , sendo os tempos de agregação da mesma forma determinados.

### 3.3.3.3 Determinação das componentes simétricas

As componentes simétricas de tensão e de corrente, para as diversas frequências harmônicas de ordem  $h$ , são determinadas através do uso da matriz de decomposição conforme Equação (3.4) para as tensões e Equação (3.5) para as correntes, ambas representadas na forma eficaz fasorial.

$$\begin{bmatrix} V_h^0 \angle (\alpha_h^0)^\circ \\ V_h^+ \angle (\alpha_h^+)^\circ \\ V_h^- \angle (\alpha_h^-)^\circ \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1\angle 120^\circ & 1\angle 240^\circ \\ 1 & 1\angle 240^\circ & 1\angle 120^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ah} \angle \alpha_{ah}^\circ \\ V_{bh} \angle \alpha_{bh}^\circ \\ V_{ch} \angle \alpha_{ch}^\circ \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\begin{bmatrix} I_h^0 \angle (\alpha_h^0)^\circ \\ I_h^+ \angle (\alpha_h^+)^\circ \\ I_h^- \angle (\alpha_h^-)^\circ \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1\angle 120^\circ & 1\angle 240^\circ \\ 1 & 1\angle 240^\circ & 1\angle 120^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ah} \angle \alpha_{ah}^\circ \\ I_{bh} \angle \alpha_{bh}^\circ \\ I_{ch} \angle \alpha_{ch}^\circ \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Na Equação (3.4), a variável  $V_h^0$  é denominada tensão de seqüência zero de ordem harmônica  $h$ , sendo o ângulo da mesma dado por  $\alpha_h^0$ . A tensão de seqüência positiva de ordem harmônica  $h$  e seu ângulo, assim como a tensão de seqüência negativa de ordem harmônica  $h$  e seu ângulo, são simbolizados, respectivamente, por  $V_h^+$ ,  $\alpha_h^+$ ,  $V_h^-$  e  $\alpha_h^-$ . Nomenclatura e simbologia análogas são utilizadas para as correntes, Equação (3.5).

Qualquer sistema trifásico desequilibrado em termos de tensões (ou correntes) pode ser representado pela soma de três sistemas simétricos denominados (i) sistema de seqüência positiva, (ii) sistema de seqüência negativa e (iii) sistema de seqüência zero. De acordo com a Norma IEC 61000-4-30 (IEC, 2003), o conceito de componentes simétricas pode ser útil na avaliação de alguns tipos de falhas em sistemas trifásicos. A partir da avaliação das componentes simétricas de tensões e correntes presentes, algumas conclusões podem ser

tiradas a respeito de possíveis falhas como, por exemplo, queima de fusível em uma única fase, assimetrias em bancos trifásicos de capacitores, etc.

#### 3.3.3.4 Determinação dos valores de desequilíbrio de tensão

O desequilíbrio de tensão, para instrumentos Classe A, deverá ser avaliado através do método das componentes simétricas. O desequilíbrio será obtido através da divisão do valor da componente simétrica de seqüência negativa pelo valor da componente simétrica de seqüência positiva das tensões fundamentais obtidas através do uso de DFT (Transformada Discreta de Fourier) ou através de filtragem para minimização dos efeitos das componentes harmônicas. A incerteza deverá ser menor que  $\pm 0,15$  do valor percentual indicado. Desta forma, um instrumento cujos sinais de tensão aplicados apresentem desequilíbrio de 1% deverá indicar uma leitura entre 0,85 % e 1,15 %. Da mesma forma que para os parâmetros anteriores, a janela a ser considerada deverá ser de 12 ciclos da fundamental de 60 Hz.

Para instrumentos Classe B, o método de cálculo e as incertezas serão determinados de acordo com o fabricante.

#### **3.3.4 Faixas de influência das grandezas**

Como a medição de um determinado parâmetro por um instrumento pode ser afetada pela influência do valor de outro parâmetro, a Norma IEC 61000-4-30 (IEC, 2003) estabelece as faixas aceitáveis de erro na medição de um determinado parâmetro considerando as possíveis variações ou situações de distúrbio dos demais dentro de determinadas faixas. São propostas tabelas a serem utilizadas para testes de instrumentos que efetivamente forneçam tais parâmetros relacionados à qualidade de energia. O uso deste procedimento irá determinar, então, se um instrumento pode ser classificado como Classe A para todos ou somente para alguns parâmetros específicos.

### 3.3.5 Medições de qualidade de energia

Parte das informações e orientação fornecidas na Norma IEC 61000-4-30 (IEC, 2003) está relacionada aos procedimentos a serem adotados para realização de medições para avaliação de parâmetros de qualidade de energia. São fornecidas informações gerais sobre precauções a serem tomadas durante a instalação de medidores, características dos transdutores de tensão e corrente, classificação de eventos entre outros. Estes aspectos não serão comentados aqui em função de que, embora importantes no contexto geral, não são significativos no que se refere ao trabalho desenvolvido em si.

### 3.4 CONCLUSÃO

Tendo em vista que o ponto central de estudo é o desenvolvimento do algoritmo a ser aplicado a medidores e registradores para obtenção dos valores propostos na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), alguns dos testes propostos na Norma IEC 61000-4-30 (IEC, 2003), principalmente os referentes a faixas de exatidão de algumas variáveis medidas, somente serão aplicáveis após a implementação deste algoritmo nas rotinas do medidor ou registrador. O motivo para isto consiste no fato de que, embora o correto desenvolvimento do algoritmo de cálculo implique na obtenção de rotinas nas quais as propagações de erro sejam reduzidas, a avaliação dos erros totais somente será completa quando consideradas também as características construtivas do equipamento. Esta etapa é então obrigatoriamente posterior à implementação de qualquer uma das rotinas desenvolvidas. Obviamente que se alguma variável for avaliada através de rotina que apresente propagação de erro em índice superior ao admitido pela Norma IEC 61000-4-30 (IEC, 2003), para a classe a ser atendida, a faixa de precisão do conjunto não atenderá a especificação no que diz respeito àquela variável específica, independente das características do medidor ou registrador no qual a rotina foi implementada. Este aspecto foi observado durante os testes comparativos efetuados no algoritmo e será devidamente avaliado durante a exposição dos mesmos no capítulo referente a aplicações do algoritmo na parte de testes comparativos e também na parte referente à avaliação de erros e sensibilidade.

No que diz respeito à aplicação da DFT, em função das variáveis a serem calculadas para que sejam obtidos os diversos valores de potência de acordo com as definições da IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), optou-se pelo uso de janelamento de 12 ciclos ( $T_w = 0,2$  s , frequência nominal de 60 Hz) conforme indicado em IEC (2002) e IEC (2003) tendo em vista que esta especificação estaria ainda em consonância com as determinações existentes na Resolução 505 da ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2001) e no Módulo 8 do PRODIST (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2006) no que tange as características de amostragem mínimas para registradores e medidores a serem usados em nível nacional. Em relação ao janelamento retangular, o principal motivo da opção pelo seu uso refere-se à questão da medição de harmônicos em sistemas considerados de característica flutuante. A sobreposição de janelas, indicada na Norma IEC 61000-4-7 (IEC, 2002) para o caso de aplicação de janela de Hanning na medição de harmônicos flutuantes, traria dificuldades técnicas importantes em função da necessidade de cálculo de potências, não sendo desta forma aplicável.

## **4 A NORMA IEEE 1459-2000**

### **4.1 INTRODUÇÃO**

Segundo a Introdução da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), é proposto um conjunto de novas definições de grandezas aplicáveis em situações nas quais o sistema de potência é caracterizado pela presença de conteúdo harmônico nas tensões e correntes, desequilíbrio de carga e assimetria das tensões de fornecimento. Tais novas definições, associadas aos conceitos já estabelecidos, são propostas no sentido de servir de referência tanto na indicação dos valores a serem medidos em tais situações, assim como no desenvolvimento de instrumentos de medição aplicáveis.

### **4.2 ASPECTOS GERAIS**

O desenvolvimento proposto na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) parte de sistemas monofásicos com tensões e correntes senoidais, evoluindo para sistemas monofásicos com tensões e correntes não senoidais, sistemas trifásicos senoidais equilibrados, sistemas trifásicos senoidais desequilibrados e sistemas trifásicos não senoidais desequilibrados, sendo este último o caso mais abrangente.

Nesta apresentação resumida da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) serão tratados os casos mais gerais, iniciando com as definições básicas, abordando os sistemas monofásicos com conteúdo harmônico e posteriormente os sistemas trifásicos desequilibrados com conteúdo harmônico. Embora sejam consideradas ainda algumas relações correspondentes à resolução de Budeanu, as mesmas não serão tratadas neste resumo em função de limitações nas mesmas expressas na própria Norma (IEEE, 2000).

Basicamente, o procedimento adotado na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) consiste em separar as potências aparentes, ativas e não ativas em três grupos: (i) combinado, no qual são consideradas conjuntamente as influências das componentes fundamentais e das



componentes harmônicas; (ii) fundamental, no qual somente a parcela referente à frequência de 60 Hz (ou 50 Hz) é considerada; (iii) não fundamental, no qual somente a influência das componentes harmônicas e contínuas é considerada. Algumas relações entre as variáveis de cada grupo fornecem índices relativos à utilização de linha, poluição harmônica e desequilíbrio de carga.

### 4.3 ABORDAGEM PARA SISTEMAS MONOFÁSICOS COM CONTEÚDO HARMÔNICO

#### 4.3.1 Tensões e correntes

Segundo a Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), para um sistema de potência em estado permanente, uma tensão ou corrente alternada não senoidal é composta de duas componentes: A componente de frequência característica do sistema de potência da tensão e da corrente,  $v_1$  e  $i_1$ , e os termos restantes,  $v_H$  e  $i_H$ , que contém todas as componentes harmônicas de ordem inteira e não inteira, incluindo as componentes contínuas ( $h=0$ ). Desta forma são válidas as seguintes relações:

$$v_1 = \sqrt{2}V_1 \sin(\omega t + \alpha_1) \quad (4.1)$$

$$i_1 = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t + \beta_1) \quad (4.2)$$

$$v_H = \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} V_h \sin(h\omega t + \alpha_h) \quad (4.3)$$

$$i_H = \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} I_h \sin(h\omega t + \beta_h) \quad (4.4)$$

Na Equação (4.3),  $v_H$  corresponde ao valor instantâneo da soma das tensões harmônicas instantâneas e  $V_h$  corresponde ao valor eficaz da tensão harmônica de ordem  $h$ . A variável  $\alpha_h$  corresponde ao valor do ângulo do fasor da tensão de ordem  $h$  em relação à referência escolhida. De forma análoga, para a corrente harmônica, é válida a relação fornecida na

Equação (4.4). Para as ondas fundamentais de tensão e corrente são válidas as relações (4.1) e (4.2) para a expressão dos respectivos valores instantâneos.

As seguintes equações fornecem o quadrado dos valores eficazes das tensões e das correntes, avaliados para  $n$  períodos inteiros  $T$ , considerando o instante inicial  $\tau$  :

$$V^2 = \frac{1}{nT} \int_{\tau}^{\tau+nT} v^2 dt = V_1^2 + V_H^2 \quad (4.5)$$

$$I^2 = \frac{1}{nT} \int_{\tau}^{\tau+nT} i^2 dt = I_1^2 + I_H^2 \quad (4.6)$$

onde

$$V_H^2 = \sum_{h \neq 1} V_h^2 = V^2 - V_1^2 \quad (4.7)$$

$$I_H^2 = \sum_{h \neq 1} I_h^2 = I^2 - I_1^2 \quad (4.8)$$

### 4.3.2 Distorção harmônica total das tensões e correntes

O desvio total de uma onda distorcida em relação à respectiva fundamental pode ser avaliado através do índice de distorção harmônica total  $DHT$  (ou  $THD$ ). A distorção harmônica total de tensão é fornecida pela Equação (4.9) e, de forma análoga, a distorção total de corrente é fornecida pela Equação (4.10).

$$DHT_V = \frac{V_H}{V_1} \quad (4.9)$$

$$DHT_I = \frac{I_H}{I_1} \quad (4.10)$$

### 4.3.3 Potências instantâneas

Para avaliação da potência instantânea, dada pela Equação (4.11), esta variável é dividida em duas componentes conforme a Equação (4.12).

$$p = vi \quad (4.11)$$

$$p = p_A + p_Q \quad (4.12)$$

A primeira parcela, representada por  $p_A$ , corresponde ao termo que contém todas as componentes de potência que possuem valor médio diferente de zero.

$$p_A = \sum_h V_h I_h \cos \theta_h [1 - \cos(2h\omega t)] \quad (4.13)$$

A segunda parcela é formada pelos termos que não contribuem para a transferência de energia, sendo o valor médio no intervalo considerado igual a zero.

$$p_Q = \sum_h V_h I_h \sin \theta_h \sin(2h\omega t) + \sum_{\substack{m \neq n \\ m, n \neq 1}} 2V_m I_n \sin(m\omega t + \alpha_m) \sin(n\omega t + \beta_n) \quad (4.14)$$

Na Equação (4.15) é fornecida a definição da variável  $\theta_h$ , que corresponde ao ângulo formado pelos fasores de tensão e corrente de ordem harmônica  $h$ .

$$\theta_h = \alpha_h - \beta_h \quad (4.15)$$

### 4.3.4 Potências ativas

Para as potências ativas, são válidas a Equação (4.16) e a Equação (4.17), onde  $P$  é a potência ativa total,  $P_1$  representa a potência ativa fundamental e  $P_H$  a potência ativa harmônica ou potência ativa não fundamental.

$$P = \frac{1}{nT} \int_{\tau}^{\tau+nT} p dt \quad (4.16)$$

$$P = P_1 + P_H \quad (4.17)$$

A potência ativa fundamental (para sistema que operem em 60 ou 50 Hz) e a potência ativa harmônica são obtidas através da Equação (4.18) e da Equação (4.19), respectivamente.

$$P_1 = \frac{1}{nT} \int_{\tau}^{\tau+nT} v_1 i_1 dt = V_1 I_1 \cos \theta_1 \quad (4.18)$$

$$P_H = \sum_{h \neq 1} V_h I_h \cos \theta_h = P - P_1 \quad (4.19)$$

#### 4.3.5 Potências aparentes

A potência aparente é fornecida pela Equação (4.20). Na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) é citado como uma importante propriedade da potência aparente o fato de que, segundo Emanuel (1999), a perda numa linha de alimentação é uma função quase proporcional, na maioria dos casos, ao quadrado da potência aparente.

$$S = VI \quad (4.20)$$

O fluxo de energia associado com a frequência fundamental característica do sistema de potência é definido, de forma geral, pela potência aparente fundamental e suas componentes ativa e reativa fundamentais, dadas respectivamente por  $P_1$  e  $Q_1$ . A avaliação destas variáveis, segundo a Norma (IEEE, 2000), é de grande interesse tanto para o fornecedor quanto para o usuário de energia. A Equação (4.21) e a Equação (4.22) fornecem as respectivas relações entre tais grandezas.

$$S_1 = V_1 I_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} \quad (4.21)$$

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin \theta_1 \quad (4.22)$$

A separação dos valores eficazes, aplicada na tensão e na corrente conforme a Equação (4.7) e a Equação (4.8), em componente harmônica eficaz e componente fundamental eficaz, fornece a separação da potência aparente em diversas componentes conforme o desenvolvimento mostrado na Equação (4.23).

$$S^2 = (VI)^2 = (V_1^2 + V_H^2)(I_1^2 + I_H^2) = (V_1I_1)^2 + (V_1I_H)^2 + (V_HI_1)^2 + (V_HI_H)^2 \quad (4.23)$$

Considerando que a expressão para o quadrado da potência aparente fundamental seja  $S_1^2 = (V_1I_1)^2$ , e que a soma dos termos que incluem tensões ou correntes eficazes harmônicas na Equação (4.23) seja definida como potência aparente não fundamental,  $S_N$ , esta será então fornecida pela relação (4.24).

$$S_N = \sqrt{(V_1I_H)^2 + (V_HI_1)^2 + (V_HI_H)^2} = \sqrt{S^2 - S_1^2} \quad (4.24)$$

A potência aparente harmônica, resultante da multiplicação da tensão eficaz harmônica e da corrente eficaz harmônica, é então definida como indicado em (4.25).

$$S_H = V_HI_H = S_1(DHT_I)(DHT_V) \quad (4.25)$$

#### 4.3.6 Potências não ativas

A potência aparente não fundamental  $S_N$ , como pode ser verificado na Equação (4.24), é composta por diversos termos. O termo  $D_I$  é definido como potência de distorção de corrente,  $D_V$  corresponde à potência de distorção de tensão,  $S_H$  é a potência aparente harmônica e,  $D_H$ , a potência de distorção harmônica. As equações a seguir fornecem as respectivas relações em as diversas variáveis.

$$S_N^2 = D_I^2 + D_V^2 + S_H^2 \quad (4.26)$$

$$D_I = V_1I_H = S_1(DHT_I) \quad (4.27)$$

$$D_V = V_H I_1 = S_1 (DHT_V) \quad (4.28)$$

$$D_H = \sqrt{S_H^2 - P_H^2} \quad (4.29)$$

A potência reativa, definição válida para sistemas em que as tensões e as correntes são puramente senoidais, passa a ser denominada, para sistemas com conteúdo harmônico, potência não ativa  $N$ , conforme equação (4.30).

$$N = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (4.30)$$

De acordo com esta definição, na potência não ativa estão incluídos componentes de potência não ativa fundamental e componentes de potência não fundamentais.

Para a avaliação da potência reativa fundamental, segundo a Norma (IEEE, 2000), é válida a seguinte relação:

$$Q_1 = \frac{\omega_1}{nT} \int_{\tau}^{\tau+nT} i_1 \left[ \int v_1 dt \right] dt = V_1 I_1 \sin \theta_1 \quad (4.31)$$

#### 4.3.7 Fatores de utilização de linha

Teremos como fator de potência fundamental a relação indicada na Equação (4.32) e como fator de potência a relação indicada em (4.33).

$$P_{F1} = \cos \theta_1 = \frac{P_1}{S_1} \quad (4.32)$$

$$P_F = \frac{P}{S} \quad (4.33)$$

A variável  $P_{F1}$  é também denominada fator de deslocamento e corresponde a antiga definição de fator de potência quando aplicada a sistemas com tensões e correntes puramente senoidais.

#### 4.3.8 Fator de poluição harmônica

O grau total de injeção harmônica produzido por uma carga não linear ou por um grupo de cargas não lineares pode ser estimado através da relação  $S_N/S_1$  ou  $(\sqrt{S^2 - S_1^2})/S_1$ . Para sistemas sem conteúdo harmônico, o valor da potência aparente não fundamental é nulo e o índice assume o valor zero.

#### 4.3.9 Comentários gerais e tabela resumo

Segundo a Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), a potência aparente  $S$  pode ser considerada a máxima potência ativa que pode ser transmitida para uma carga considerando constantes a tensão na carga e as perdas na linha. Isso resulta no fato de que, para um dado valor de  $S$  e de  $V$ , a máxima utilização de linha é obtida quando  $S = P$ . Desta forma, a relação  $P/S$  denominada fator de potência pode ser interpretada como um índice ou indicador de utilização de linha.

Outra consideração importante citada na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) corresponde ao fato de que o grau total de injeção harmônica produzido por uma carga não linear ou por um grupo de cargas não lineares pode ser estimado através da relação  $S_N/S_1$ . Ainda, segundo esta norma, a eficiência relativa ao uso de filtragem ativa pode ser avaliada através desta relação.

Também é citado que na maioria das situações práticas a componente harmônica da potência ativa corresponde a uma pequena fração da componente ativa da potência o que implica em  $P_H \ll P_1$ . Além disso, as componentes harmônicas mais altas de  $P_H$  podem ser de difícil avaliação tendo em vista as características da maioria dos medidores existentes atualmente.

O Quadro 2 consiste num sumário geral das grandezas para sistemas monofásicos. Algumas fórmulas foram adicionadas na tabela original, proposta na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), com o intuito de tornar mais clara tanto a origem de cada termo assim como as

relações entre os mesmos. Também foram adicionadas duas linhas iniciais contendo tensões e correntes e as relações entre as mesmas.

<b>Grandeza/Indicador</b>	<b>Combinado</b>	<b>Fundamental</b>	<b>Não Fundamental</b>
Tensão [V]	$V$	$V_1$	$V_H = \sqrt{V^2 - V_1^2}$
Corrente [A]	$I$	$I_1$	$I_H = \sqrt{I^2 - I_1^2}$
Aparente [VA]	$S = V I$	$S_1 = V_1 I_1$	$S_N = \sqrt{S^2 - S_1^2}$ $S_H = V_H I_H$
Ativo [W]	$P = \frac{1}{nT} \int_{\tau}^{\tau+nT} p dt$	$P_1 = V_1 I_1 \cos \theta_1$	$P_H = P - P_1$
Não Ativo [var]	$N = \sqrt{S^2 - P^2}$	$Q_1 = V_1 I_1 \sin \theta_1$	$D_I = V_1 I_H$ $D_V = V_H I_1$ $D_H = \sqrt{S_H^2 - P_H^2}$
Utilização de linha	$P_F = P / S$	$P_{F1} = P_1 / S_1$	
Poluição harmônica			$S_N / S_1$

Quadro 2 - Relações entre as variáveis dos grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental para sistemas monofásicos segundo IEEE 1459-2000

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.4 ABORDAGEM PARA SISTEMAS TRIFÁSICOS DESEQUILIBRADOS E COM CONTEÚDO HARMÔNICO

Os sistemas trifásicos com conteúdo harmônico são tratados de maneira análoga aos sistemas monofásicos descritos anteriormente. O desenvolvimento é feito para sistemas trifásicos com neutro. Para sistemas trifásicos sem neutro é indicado na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) o uso de uma referência virtual para a obtenção das tensões entre fase e neutro.

##### 4.4.1 Tensões e correntes efetivas

A separação dos valores eficazes das tensões e das correntes em duas componentes, uma fundamental e outra harmônica, num sistema trifásico, é obtida a partir das aplicações



das equações genéricas (4.34) e (4.35) nas tensões entre fase e neutro, tensões entre fases, correntes nas fases e corrente de neutro.

$$V^2 = V_1^2 + V_H^2 \quad (4.34)$$

$$I^2 = I_1^2 + I_H^2 \quad (4.35)$$

A diferença básica entre o tratamento utilizado para sistemas monofásicos e trifásicos consiste no fato de que, segundo a Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), uma linha de alimentação trifásica fornecendo energia para um ou mais consumidores deve ser vista como um único caminho, um único sistema que transmite energia elétrica para locais onde a mesma é transformada em outros tipos de energia. Ainda, segundo esta, não é correto considerar cada fase como uma rota de energia independente. Desta forma, é proposto o uso do conceito de tensão efetiva e corrente efetiva para a obtenção das diversas variáveis. Esta definição é proveniente do conceito de potência aparente efetiva ou “equivalente” obtida ao considerar um circuito virtual e equilibrado, em termos de carga e tensões, que apresente as mesmas perdas na linha que o circuito original. Cargas trifásicas desequilibradas, assimetrias nas tensões de fornecimento e assimetria nos valores das correntes nas fases implicam em aumento de perdas em função da circulação de corrente pelos condutores dos circuitos de neutro. Tais assimetrias são consideradas no desenvolvimento do conceito de potência aparente efetiva, através do cálculo das tensões e correntes efetivas. O desenvolvimento deste conceito, aspectos teóricos e práticos envolvidos, assim como a respectiva fundamentação matemática, podem ser obtidos na própria Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) e, também, em Emanuel (1993) e Emanuel (1998).

Para sistemas trifásicos não senoidais e desequilibrados é então aplicado o conceito de tensão efetiva (ou equivalente) e corrente efetiva (ou equivalente). A Equação (4.36) e Equação (4.37) mostram como os valores de tensão efetiva e de tensão efetiva fundamental são obtidos a partir deste conceito.

$$V_e = \sqrt{\left( \frac{1}{18} (3(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2) \right)} \quad (4.36)$$

$$V_{e1} = \sqrt{\left( \frac{1}{18} (3(V_{a1}^2 + V_{b1}^2 + V_{c1}^2) + V_{ab1}^2 + V_{bc1}^2 + V_{ca1}^2) \right)} \quad (4.37)$$

Para a obtenção da corrente efetiva e da corrente efetiva fundamental são utilizadas a Equação (4.38) e a Equação (4.39) respectivamente.

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2}{3}} \quad (4.38)$$

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2 + I_{n1}^2}{3}} \quad (4.39)$$

#### 4.4.2 Distorção harmônica total efetiva

A distorção harmônica total efetiva de tensão é definida a partir da tensão efetiva e da tensão efetiva fundamental, conforme a Equação (4.40). De forma análoga, a definição de distorção harmônica total efetiva de corrente será dada pela equação (4.41).

$$DHT_{eV} = \frac{\sqrt{V_e^2 - V_{e1}^2}}{V_{e1}} \quad (4.40)$$

$$DHT_{eI} = \frac{\sqrt{I_e^2 - I_{e1}^2}}{I_{e1}} \quad (4.41)$$

#### 4.4.3 Potências aparentes

A aplicação do conceito de tensão efetiva e corrente efetiva leva a seguinte expressão para a potência aparente total efetiva:

$$S_e = 3V_e I_e \quad (4.42)$$

A decomposição da tensão e da corrente em componente fundamental eficaz e componente harmônica eficaz, feita para sistemas monofásicos, é aplicada de forma análoga para a tensão efetiva e para a corrente efetiva, resultando desta forma nas seguintes relações:

$$V_e^2 = V_{e1}^2 + V_{eH}^2 \quad (4.43)$$

$$I_e^2 = I_{e1}^2 + I_{eH}^2 \quad (4.44)$$

O desenvolvimento obtido para o quadrado da potência aparente efetiva considerando (4.33) e (4.34), assim como a aplicação destas em (4.42), é mostrado a seguir:

$$S_e^2 = (3V_e I_e)^2 = 9(V_{e1}^2 + V_{eH}^2)(I_{e1}^2 + I_{eH}^2) \quad (4.45)$$

$$S_e^2 = (3V_{e1} I_{e1})^2 + (3V_{e1} I_{eH})^2 + (3V_{eH} I_{e1})^2 + (3V_{eH} I_{eH})^2 \quad (4.46)$$

A potência aparente efetiva é composta de uma parcela fundamental, correspondente ao produto de tensão efetiva fundamental e da corrente efetiva fundamental, e de termos que envolvem a tensão efetiva harmônica ou a corrente efetiva harmônica. Desta forma, são definidas a potência aparente efetiva fundamental (4.47) e a potência aparente efetiva não fundamental (4.48). A relação entre essas variáveis e a potência aparente fundamental é dada por (4.49).

$$S_{e1} = 3V_{e1} I_{e1} \quad (4.47)$$

$$S_{eN} = \sqrt{(3V_{e1} I_{eH})^2 + (3V_{eH} I_{e1})^2 + (3V_{eH} I_{eH})^2} \quad (4.48)$$

$$S_e^2 = (S_{e1}^2 + S_{eN}^2) \quad (4.49)$$

O termo formado pelo produto entre a corrente efetiva harmônica e a tensão efetiva harmônica é denominado potência aparente efetiva harmônica,  $S_{eH}$ .

$$S_{eH} = 3V_{eH} I_{eH} \quad (4.50)$$

A potência aparente fundamental ( $h=1$ ) de seqüência positiva,  $S_1^+$ , proveniente da aplicação do conceito de componentes simétricas tratado no Capítulo 3, é composta pela potência ativa fundamental de seqüência positiva,  $P_1^+$ , e pela potência reativa fundamental de seqüência positiva  $Q_1^+$ . As relações entre essas variáveis estão expressas nas equações (4.51), (4.52) e (4.53).

$$S_1^+ = \sqrt{(P_1^+)^2 + (Q_1^+)^2} \quad (4.51)$$

$$P_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \cos \theta_1^+ \quad (4.52)$$

$$Q_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \sin \theta_1^+ \quad (4.53)$$

Para a avaliação da potência aparente de desequilíbrio fundamental de carga é utilizada a seguinte expressão:

$$S_{U1} = \sqrt{S_{e1}^2 - (S_1^+)^2} \quad (4.54)$$

#### 4.4.4 Potências ativas

Considerando que a potência ativa total é fornecida pela soma das potências ativas de cada uma das fases e que a potência ativa fundamental total é obtida através da soma das potências ativas fundamentais de cada fase, são válidas as seguintes expressões para a obtenção de  $P_H$  :

$$P = P_a + P_b + P_c \quad (4.55)$$

$$P_1 = P_{a1} + P_{b1} + P_{c1} \quad (4.56)$$

$$P_H = P - P_1 \quad (4.57)$$

Para a avaliação da potência ativa fundamental de seqüência positiva a Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) indica a expressão (4.58) a seguir.

$$P_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \cos \theta_1^+ \quad (4.58)$$

#### 4.4.5 Potências não ativas

A potência não ativa combinada  $N$  corresponde a

$$N = \sqrt{S_e^2 - P^2} \quad (4.59),$$

sendo que a potência reativa fundamental de seqüência positiva é dada por

$$Q_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \sin \theta_1^+ \quad (4.60).$$

Na expressão da potência aparente efetiva, Equação (4.46), o termo formado pelo produto entre a tensão fundamental e corrente harmônica é definido como potência não ativa efetiva de distorção de corrente. De forma análoga, o termo formado pelo produto da tensão harmônica e da corrente fundamental é definido como potência não ativa efetiva de distorção de tensão. As respectivas expressões são fornecidas a seguir.

$$D_{eI} = 3V_{e1} I_{eH} \quad (4.61)$$

$$D_{eV} = 3V_{eH} I_{e1} \quad (4.62)$$

A potência não ativa efetiva de distorção harmônica, que relaciona potência aparente efetiva harmônica e a potência ativa harmônica, é dada por (4.63).

$$D_{eH} = \sqrt{S_{eH}^2 - P_H^2} \quad (4.63)$$

Desta forma, a potência efetiva de distorção de tensão,  $D_{eV}$ , a potência efetiva de distorção de corrente,  $D_{eI}$ , e a potência efetiva harmônica,  $S_{eH}$ , estão relacionadas com a potência aparente efetiva não fundamental efetiva de acordo com a seguinte expressão:

$$S_{eN}^2 = D_{eI}^2 + D_{eV}^2 + S_{eH}^2 \quad (4.64)$$

#### 4.4.6 Fatores de utilização de linha

O fator de potência fundamental de seqüência positiva é obtido através da relação entre a potência ativa fundamental de seqüência positiva e a potência aparente fundamental de seqüência positiva conforme a Equação (4.65), sendo o fator de potência do grupo Combinado fornecido através da Equação (4.66).

$$P_{F1}^+ = P_1^+ / S_1^+ \quad (4.65)$$

$$P_F = P / S_e \quad (4.66)$$

#### 4.4.7 Fator de poluição harmônica

Segundo a Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), a relação entre a potência aparente efetiva não fundamental e a potência aparente efetiva fundamental fornece um índice ou fator de poluição harmônica. Não é fornecida nomenclatura ou símbolo específico, sendo a representação deste índice proposto restrita a relação  $S_{eN} / S_{e1}$ .

#### 4.4.8 Fator de desequilíbrio de carga

O desequilíbrio de carga no sistema é dado pela relação entre a potência aparente de desequilíbrio e a potência aparente fundamental de seqüência positiva,  $S_{U1} / S_1^+$ .

#### 4.4.9 Comentários gerais e tabela resumo

No Quadro 3 é apresentado um sumário geral para sistemas trifásicos considerando o conceito de valores efetivos (ou equivalentes). Da mesma forma que na tabela sumário de sistemas monofásicos, tensões e correntes, assim como as fórmulas básicas, foram incluídas no sentido de tornar mais clara a base de origem da separação de grupos proposta.

Grandeza/Indicador	Combinado	Fundamental	Não Fundamental
Tensão [V]	$V_e$	$V_{e1}$	$V_{eH} = \sqrt{V_e^2 - V_{e1}^2}$
Corrente [A]	$I_e$	$I_{e1}$	$I_{eH} = \sqrt{I_e^2 - I_{e1}^2}$
Aparente [VA]	$S_e = 3V_e I_e$	$S_{e1} = 3V_{e1} I_{e1}$ $S_1^+ = \sqrt{(P_1^+)^2 + (Q_1^+)^2}$ $S_{U1} = \sqrt{S_{e1}^2 - (S_1^+)^2}$	$S_{eN} = \sqrt{S_e^2 - S_{e1}^2}$ $S_{eH} = 3V_{eH} I_{eH}$
Ativo [W]	$P = P_a + P_b + P_c$	$P_1 = P_{a1} + P_{b1} + P_{c1}$ $P_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \cos \theta_1^+$	$P_H = P - P_1$
Não Ativo [var]	$N = \sqrt{S_e^2 - P^2}$	$Q_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \sin \theta_1^+$	$D_{e1} = 3V_{e1} I_{eH}$ $D_{eV} = 3V_{eH} I_{e1}$ $D_{eH} = \sqrt{S_{eH}^2 - P_H^2}$
Utilização de linha	$P_F = P / S_e$	$P_{F1}^+ = P_1^+ / S_1^+$	
Poluição harmônica			$S_{eN} / S_{e1}$
Desequilíbrio		$S_{U1} / S_1^+$	

Quadro 3 - Relações entre as variáveis dos grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental para sistemas trifásicos segundo IEEE 1459-2000

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4.5 CONCLUSÃO

De uma forma geral, a metodologia de abordagem para sistemas desequilibrados e com conteúdo harmônico proposta na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) consiste na divisão das diversas potências e fatores em três grandes grupos denominados: (i) combinado, (ii) fundamental e (iii) não fundamental. Em função do modelamento aplicado, são gerados novos tipos ou classes de variáveis quando feita comparação com as variáveis usuais provenientes da abordagem utilizada na análise de sistemas de potência para sistemas senoidais. Além da divisão das variáveis nos grupos descritos acima, cada grupo é dividido, no que diz respeito aos fatores e potências, em (i) ativo, (ii) não ativo, (iii) aparente, (iv) fatores de utilização, (v) fatores de poluição harmônica e (vi) fatores de desequilíbrio. Fazendo um paralelo com a abordagem utilizada para análise circuitos de potência nos quais apenas tensões e correntes fundamentais (de 60 ou 50 Hz) estão presentes, algumas diferenças conceituais importantes tornam-se bastante evidentes.

Em primeiro lugar, o termo potência reativa, utilizado para classificar a potência ou tipo de potência característica de sistemas com elementos capacitivos ou indutivos é substituído por um termo, a princípio, mais abrangente. Desta forma a potência reativa seria agora classificada como uma das potências não ativas do sistema, tendo seu uso restrito ao grupo fundamental.

No caso de sistemas trifásicos, a potência reativa total, que no modelo clássico corresponde à soma das potências reativas das fases, não é utilizada, sendo esta substituída, em termos de significado, pela potência reativa fundamental de seqüência positiva. O fator de potência é classificado, de forma geral, como um fator de utilização de linha, ficando bastante explícito o possível significado físico atribuído a esta grandeza tanto para o caso de sistemas monofásicos quanto trifásicos. Assume, então, o significado de índice de desempenho em termos de aproveitamento da linha de alimentação. O fator de utilização relativo à parte fundamental dos sinais é denominado fator de potência fundamental. A potência ativa, tanto para sistemas monofásicos quanto a potência ativa total dos sistemas trifásicos, fica sendo equivalente à soma da potência ativa fundamental e da potência ativa harmônica.

A diferença conceitual mais importante proposta refere-se ao cálculo da potência aparente para sistemas trifásicos, denominada potência aparente efetiva. Embora, conforme



comentado no capítulo referente aos conceitos básicos, a definição desta grandeza tenha gerado algumas controvérsias ao longo das últimas décadas, controvérsias estas que ainda permanecem atualmente, a definição de potência aparente efetiva aparece na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) atrelada à questão das perdas e do desequilíbrio de tensões e cargas. Deve, no entanto, ser levado em conta que, a princípio, ao definir potência aparente efetiva está sendo definida uma nova variável sem relação direta com a variável potência aparente definida para sistemas trifásicos com tensão e corrente senoidais, visto que o método de cálculo de ambas difere por ser considerado na avaliação da potência aparente efetiva o desequilíbrio existente no sistema.

## 5 DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO

### 5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será abordado o desenvolvimento de rotinas destinadas à obtenção dos valores das grandezas propostas pela Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000).

O algoritmo foi desenvolvido com a intenção de atender o caso mais abrangente considerado na Norma (IEEE, 2000), sendo este a avaliação de sistemas de potência trifásicos desequilibrados e com formas de onda de tensão e corrente com conteúdo harmônico.

### 5.2 OBJETIVOS GERAIS

De uma forma geral os objetivos consistem em:

- a) desenvolvimento de algoritmo que possibilite, a partir de sinais amostrados de tensões e correntes, a obtenção das diversas grandezas segundo os conceitos estabelecidos na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000);
- b) simular a aplicação do algoritmo, obtendo os valores das diversas variáveis propostas na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), para diferentes composições harmônicas, dos sinais de tensão e corrente, escolhidas;
- c) verificar a aplicação e os respectivos resultados do algoritmo quando sinais amostrados de tensões e correntes, obtidos através de registradores em situações práticas de medição, são utilizados como entrada de dados para o mesmo.

### 5.3 PRÉ-REQUISITOS E ESPECIFICAÇÕES

Embora, a princípio, a Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) estabeleça a validade de aplicação dos conceitos apenas para estado permanente, deve ser considerada a possível implementação do algoritmo em medidores e registradores de uso prático. Tais medidores, ou registradores, ao serem conectados em diferentes pontos do sistema de potência e efetuar medições nas mais diversas situações de carga, devem produzir resultados coerentes e dentro de faixas de erro previsíveis. Na prática, sistemas de potência raramente se encontram em situação totalmente estável. Desta forma, deve ser considerado o fato de que estudos efetuados para estas condições podem fornecer informações importantes sobre a amplitude geral de aplicabilidade desta norma, indicando limitações tanto do algoritmo proposto assim como dos próprios conceitos apresentados.

As especificações básicas podem ser resumidas nos itens a seguir:

- a) obtenção das variáveis de interesse tanto a partir de tabelas de composição harmônica das tensões e correntes, assim como diretamente a partir de sinais amostrados das tensões e correntes obtidos através do uso de registradores;
- b) funcionamento nos quatro quadrantes, ou seja, avaliação das grandezas propostas na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) tanto em situações de medição de energia fornecida quanto de energia recebida;
- c) quando a entrada de dados for proveniente de tabelas de composição harmônica efetuar a reconstrução das ondas de tensão e corrente realizando, então, a amostragem das mesmas. O algoritmo para o cálculo das grandezas deve ser aplicado nos sinais amostrados, mantendo independência total em relação às informações dispostas nas tabelas de composição harmônica utilizadas como entrada de dados;
- d) canais independentes de tensão e corrente para aplicação em sistemas monofásicos e trifásicos. São considerados três canais para as tensões, três canais para as correntes nas fases e um canal para corrente de neutro;

- e) fornecimento das grandezas tanto de acordo com os conceitos já utilizados assim como usando as definições e conceitos propostos na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), no sentido de possibilitar a comparação entre os mesmos;
- f) estrutura de algoritmo que possibilite o processamento dos sinais em tempo real, ou seja, deve permitir a aplicação do mesmo em registradores e medidores de uso prático, permitindo a obtenção de valores agregados no tempo, segundo algum critério estabelecido, ou aplicável, para as variáveis calculadas;
- g) obtenção dos valores propostos para o caso mais geral, sistemas de potência trifásicos, desequilibrados e com conteúdo harmônico de tensão e corrente.

## 5.4 PROCEDIMENTOS E ALGORITMOS

### 5.4.1 Desenvolvimento inicial

Para a determinação da estrutura básica de um algoritmo que pudesse fornecer, em tempo real, as diversas variáveis de interesse propostas na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), foram relevantes os seguintes pontos:

- a) o principal aspecto da abordagem proposta na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) consiste na divisão analítica das influências das componentes harmônicas das tensões e correntes em três grandes grupos, (i) combinado, (ii) fundamental e (iii) não fundamental;
- b) no grupo *combinado* estão presentes as influências de todo o espectro de frequências harmônicas de tensão e corrente, incluindo o nível contínuo e as próprias fundamentais. No grupo denominado *fundamental* somente componentes harmônicas de tensão e corrente de ordem  $h=1$  são consideradas e no grupo denominado *não fundamental* devem ser consideradas as componentes harmônicas de ordem harmônica  $h \neq 1$  das correntes e tensões. O efeito destas

componentes harmônicas, no entanto, é considerado de forma conjunta como pode ser observado na avaliação das equações (4.1), (4.2), (4.3) e (4.4);

- c) as relações existentes entre as variáveis dos diferentes grupos;
- d) as variáveis do grupo *combinado* podem ser obtidas a partir do simples cálculo dos valores eficazes tensões de fase, tensões de linha, correntes nas fases e corrente de neutro considerando a faixa de frequência disponibilizada pela taxa de amostragem utilizada;
- e) o valor eficaz da tensão e da corrente, ao ser avaliado tendo por base a amostragem das ondas originais, é função da faixa de frequências harmônicas presentes no sinal.

Levando em conta o exposto nas alíneas a), b), c), d) e e) anteriores, é possível concluir que não é necessária a obtenção dos valores correspondentes a cada uma das componentes harmônicas das tensões e correntes dentro do espectro de frequências disponibilizado pela amostragem efetuada. Desta forma, somente a detecção das componentes fundamentais, módulo e ângulo, de cada um dos sinais das tensões de fase, das tensões de linha e das correntes, incluindo a corrente de neutro, possibilita a obtenção de todas as diversas variáveis de interesse.

O fato de não ser necessária a aplicação de um procedimento de análise harmônica para toda a faixa de frequência disponibilizada pela taxa de amostragem utilizada representa, obviamente, uma grande vantagem em termos de processamento e implica numa maior facilidade de implementação prática do algoritmo em tempo real, visto que o esforço de processamento será destinado somente a obtenção dos valores das componentes fundamentais das tensões e correntes. No entanto, deve ser observado que os valores da tensão e da corrente eficaz harmônica ( $V_H$  e  $I_H$ ) são obtidos a partir da relação entre os respectivos valores eficazes totais ( $V$  e  $I$ ) e fundamentais ( $V_1$  e  $I_1$ ), sendo diretamente influenciados tanto pela taxa de amostragem utilizada na obtenção de  $V$  e  $I$ , assim como pela precisão do método utilizado para determinação de  $V_1$  e  $I_1$ . O mesmo é válido para os valores de tensão efetiva e de corrente efetiva no caso de sistemas trifásicos.

Um aspecto importante reside no fato de que, na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), não é especificado o procedimento a ser utilizado para a determinação das componentes

fundamentais dos sinais de tensão e corrente. Segundo as normas IEC 61000-4-30 (IEC, 2003) e IEC 61000-4-7 (IEC, 2002), um procedimento aplicável para avaliação de composição harmônica de sinais de tensão e corrente em sistemas de potência consiste no uso da Transformada Discreta de Fourier, denominada de forma abreviada, DFT.

O procedimento utilizado para obtenção das componentes fundamentais das tensões e correntes no algoritmo proposto consiste no indicado na Norma IEC 61000-4-7 (IEC, 2002) para sinais denominados quase-estacionários em termos de dinâmica de variação da composição harmônica. Ainda conforme a IEC (2002), o uso de janela retangular de amostragem implica na necessidade de sincronismo entre a frequência de amostragem e a frequência fundamental característica do sistema, conforme tratado no capítulo referente a normas.

Para os trabalhos desenvolvidos, no que se refere às simulações, o sincronismo é inerente a aplicação visto que as simulações são feitas considerando que não existem variações de frequência do sinal da fundamental. No caso das aplicações em que as amostras processadas pelo algoritmo são provenientes do registrador utilizado para as medições práticas, o sincronismo é característica do modo de registro do mesmo, que fornece um número constante de amostras para o período fundamental característico do sistema, sendo consideradas as variações de frequência do sinal fundamental. O registrador utilizado para as medições práticas foi o MARH-21/993, de fabricação da RMS Sistemas Eletrônicos, aprovado para medição e registro de harmônicas em sistemas de potência pelo Operador Nacional do Sistema (ONS).

O programa utilizado para desenvolvimento das simulações foi o Excel por possibilitar o desenvolvimento das rotinas de forma totalmente aberta, com fácil acesso a cada um dos inúmeros dados processados. Foram geradas planilhas de entrada de dados na forma de composições harmônicas, planilhas para entrada de dados amostrados (formas de onda das tensões e correntes) previamente registrados através de registrador digital de formas de onda, planilhas para transformação das composições harmônicas de tensões e correntes em sinais amostrados, planilhas para cálculo das diversas variáveis indicadas na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) (cálculos efetuados sempre a partir das planilhas que contém as formas de onda amostradas), planilhas para determinação da componente fundamental dos diversos sinais de tensão e corrente a partir do conceito de DFT, planilhas de impressão de resultados, gráficos com as formas de onda de tensões, correntes, potências instantâneas, energia em

diversas diferentes configurações em termos de número de ciclos mostrados, etc. Variáveis como número de dígitos significativos, taxa de amostragem, número de ciclos que compõe as janelas de cálculo dos valores eficazes entre outras possibilitaram inúmeros e diferentes tipos de testes. As planilhas foram desenvolvidas de forma a simular o procedimento de entrada de amostras em tempo real visando, desta forma, a fácil implementação do algoritmo em medidores digitais sem necessidade de alteração da sistemática básica de cálculo utilizada.

#### 5.4.2 Cálculo dos valores eficazes das tensões e correntes

Sendo  $v_{a_k}$  a amostra  $k$  de tensão de fase  $a$ ,  $v_{b_k}$  a amostra  $k$  da tensão de fase  $b$ ,  $v_{c_k}$  a amostra  $k$  de tensão de fase  $c$  e  $z$  o número total de amostras (consideradas em um número inteiro  $n$  de períodos fundamentais  $T_1$  característicos do sistema de potência e constituindo desta forma uma janela de período  $T_w = nT_1$ ), o quadrado do valor eficaz da tensão de cada fase pode ser obtido através das seguintes relações:

$$V_a^2 = \frac{1}{z} \sum_{k=1}^{k=z} v_{a_k}^2 \quad (5.1)$$

$$V_b^2 = \frac{1}{z} \sum_{k=1}^{k=z} v_{b_k}^2 \quad (5.2)$$

$$V_c^2 = \frac{1}{z} \sum_{k=1}^{k=z} v_{c_k}^2 \quad (5.3)$$

De forma análoga, sendo  $i_{a_k}$ ,  $i_{b_k}$  e  $i_{c_k}$ , respectivamente, a amostra  $k$  da corrente da fase  $a$ , da fase  $b$  e da fase  $c$ , teremos para o quadrado do valor eficaz das correntes as seguintes relações:

$$I_a^2 = \frac{1}{z} \sum_{k=1}^{k=z} i_{a_k}^2 \quad (5.4)$$

$$I_b^2 = \frac{1}{z} \sum_{k=1}^{k=z} i_{b_k}^2 \quad (5.5)$$

$$I_c^2 = \frac{1}{Z} \sum_{k=1}^{k=z} i_{c_k}^2 \quad (5.6)$$

Como, para a obtenção da tensão efetiva, também são necessários os valores eficazes das tensões entre fases (tensões de linha), no algoritmo proposto as equações básicas (5.7), (5.8) e (5.9) são aplicadas de forma a fornecer as amostras das tensões de linha.

$$v_{ab_k} = v_{a_k} - v_{b_k} \quad (5.7)$$

$$v_{bc_k} = v_{b_k} - v_{c_k} \quad (5.8)$$

$$v_{ca_k} = v_{c_k} - v_{a_k} \quad (5.9)$$

Da mesma forma que para as tensões de fase, a avaliação dos valores eficazes das tensões de linha é feita usando as equações (5.10), (5.11) e (5.12) para a janela considerada.

$$V_{ab}^2 = \frac{1}{Z} \sum_{k=1}^{k=z} v_{ab_k}^2 \quad (5.10)$$

$$V_{bc}^2 = \frac{1}{Z} \sum_{k=1}^{k=z} v_{bc_k}^2 \quad (5.11)$$

$$V_{ca}^2 = \frac{1}{Z} \sum_{k=1}^{k=z} v_{ca_k}^2 \quad (5.12)$$

Um aspecto importante da aplicação da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) refere-se à obtenção da corrente de neutro. Na prática, considerando o uso de um medidor instalado em algum ponto do circuito trifásico com neutro isolado (sem conexão a circuitos de aterramento), a corrente de neutro pode ser obtida, basicamente, de duas maneiras diferentes: a primeira através da aplicação da Lei de Kirchhoff, considerando a corrente de neutro como a soma das correntes das fases; e a segunda, através de um canal específico para medição da corrente de neutro que esteja disponível no medidor, conforme esquema indicado na Figura 1.

Os resultados obtidos através dos dois métodos podem apresentar diferenças significativas se for considerado, por exemplo, a existência de fluxo de corrente através de circuitos de aterramento (neutro aterrado). Nesta situação a aplicação da Lei de Kirchhoff no cálculo da corrente de neutro a partir das correntes das fases falha em função de que pode



haver fluxo de corrente pelo aterramento. A medição da corrente de neutro, através de um canal específico do medidor, fornecerá uma informação mais completa sobre o sistema através da comparação dos valores obtidos pelos dois métodos. No entanto, o ponto principal de consideração consiste, justamente, na validade de aplicação do conceito de corrente efetiva nas diferentes situações.

No algoritmo proposto, a corrente de neutro é obtida através da Lei de Kirchhoff aplicada seqüencialmente a cada uma das amostras das correntes das fases; nada impedindo, no entanto, que a outra alternativa possa ser implementada. Teremos, então, para a obtenção de cada amostra da corrente de neutro e para o respectivo cálculo do quadrado do valor eficaz para um determinado número inteiro de períodos  $T_1$ , de forma análoga ao aplicado para as demais correntes, as seguintes equações:

$$i_{n_k} = i_{a_k} + i_{b_k} + i_{c_k} \quad (5.13)$$

$$I_n^2 = \frac{1}{Z} \sum_{k=1}^{k=Z} i_{n_k}^2 \quad (5.14)$$

Os valores de tensão efetiva e corrente efetiva são então obtidos, respectivamente, a partir da relação (5.15) e (5.16).

$$V_e = \sqrt{\left( \frac{1}{18} (3(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2) \right)} \quad (5.15)$$

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2}{3}} \quad (5.16)$$

### 5.4.3 Cálculo dos valores eficazes das tensões e correntes fundamentais

Embora para a obtenção dos valores de potências e índices propostos na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) seja necessária, tanto no caso monofásico quanto no caso trifásico, a separação dos valores eficazes das ondas de tensão e corrente em duas componentes, uma fundamental e outra harmônica, não é definido o procedimento a ser usado para efetuar tal

separação. Considerando a necessidade de processamento em tempo real, é interessante o uso de algum procedimento que possa ser facilmente implementado e que não represente uma carga computacional elevada.

A solução utilizada no algoritmo está baseada no uso da DFT, Transformada Discreta de Fourier, aplicada às amostras de tensão e corrente de forma a fornecer somente os valores eficazes das componentes fundamentais das tensões e correntes. A necessidade de determinar somente a componente fundamental pode ser facilmente verificada através das Equações (5.17) e (5.18) propostas na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000).

$$V_H^2 = \sum_{h \neq 1} V_h^2 = V^2 - V_1^2 \quad (5.17)$$

$$I_H^2 = \sum_{h \neq 1} I_h^2 = I^2 - I_1^2 \quad (5.18)$$

Fica claro, através da análise dessas equações, que, uma vez determinados os valores eficazes de tensão e de corrente e os valores eficazes de tensão e de corrente fundamentais, é possível determinar o valor eficaz da parcela referente às harmônicas considerando que o nível contínuo ( $h=0$ ) também estará incluso na parcela harmônica. Os possíveis erros oriundos do processo da determinação do valor eficaz da componente fundamental e as conseqüências destes erros na avaliação das demais variáveis serão avaliados no Capítulo 6.

#### 5.4.3.1 Obtenção dos fasores de tensão e corrente fundamentais ( $h=1$ )

De acordo com a IEC 61000-4-7 (IEC, 2002), considerando sinais de tensão e corrente do tipo quase-estacionário, os coeficientes de ordem harmônica  $h$  da série de Fourier para um sinal  $x(k)$  amostrado, podem ser obtidos através da aplicação da DFT conforme (5.19) e (5.20), onde  $k$  representa o número da amostra e  $z$  representa o número de amostras efetuadas no período  $T_l$  da onda fundamental. Neste caso específico, o período de janela de amostragem  $T_w$  equivale ao período  $T_l$  da onda fundamental, ou seja, somente são consideradas as amostras efetuadas em um único ciclo.

$$a_h = \frac{2}{z} \sum_{k=1}^{k=z} x_k \cos \left[ \frac{2\pi h(k-1)}{z} \right] \quad (5.19)$$

$$b_h = \frac{2}{z} \sum_{k=1}^{k=z} x_k \sin \left[ \frac{2\pi h(k-1)}{z} \right] \quad (5.20)$$

Considerando um desenvolvimento análogo ao indicado na parte referente aos conceitos básicos sobre Séries de Fourier, a expressão eficaz fasorial da componente harmônica de ordem  $h$ ,  $\mathbf{X}_h$ , será dada por (5.21).

$$\mathbf{X}_h = \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} x_k \sin \left[ \frac{2\pi h(k-1)}{z} \right] + j \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} x_k \cos \left[ \frac{2\pi h(k-1)}{z} \right] \quad (5.21)$$

O procedimento para obtenção da componente real do fasor eficaz harmônico de ordem  $h$  consiste então em multiplicar o valor de cada amostra da função  $x(k)$  pelo valor da amostra  $k$  de uma função cosseno de frequência equivalente à ordem harmônica desejada e, então, obter o valor médio desta soma. De forma análoga para a obtenção da componente imaginária, considerando, no entanto, a multiplicação pela função seno.

Como o objetivo é a determinação da componente fundamental de cada sinal, as expressões do tipo eficaz fasorial das tensões (de linha e de fase) e das correntes fundamentais, incluindo a corrente de neutro, serão as seguintes (válidas para uma janela de período  $T_w$  contendo  $n$  ciclos inteiros do sinal fundamental de período  $T_1$ ):

$$\mathbf{V}_{a1} = \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} (v_{a_k} \sin \varphi_k) + j \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} (v_{a_k} \cos \varphi_k) \quad (5.22)$$

$$\mathbf{V}_{b1} = \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} (v_{b_k} \sin \varphi_k) + j \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} (v_{b_k} \cos \varphi_k) \quad (5.23)$$

$$\mathbf{V}_{c1} = \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} (v_{c_k} \sin \varphi_k) + j \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} (v_{c_k} \cos \varphi_k) \quad (5.24)$$

$$\mathbf{V}_{ab1} = \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} (v_{ab_k} \sin \varphi_k) + j \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} (v_{ab_k} \cos \varphi_k) \quad (5.25)$$

$$\mathbf{V}_{bc1} = \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} (v_{bc_k} \sin \varphi_k) + j \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} (v_{bc_k} \cos \varphi_k) \quad (5.26)$$

$$\mathbf{V}_{ca1} = \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} (v_{ca_k} \sin \varphi_k) + j \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} (v_{ca_k} \cos \varphi_k) \quad (5.27)$$

$$\mathbf{I}_{a1} = \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} (i_{a_k} \sin \varphi_k) + j \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} (i_{a_k} \cos \varphi_k) \quad (5.28)$$

$$\mathbf{I}_{b1} = \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} (i_{b_k} \sin \varphi_k) + j \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} (i_{b_k} \cos \varphi_k) \quad (5.29)$$

$$\mathbf{I}_{c1} = \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} (i_{c_k} \sin \varphi_k) + j \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} (i_{c_k} \cos \varphi_k) \quad (5.30)$$

$$\mathbf{I}_{n1} = \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} (i_{n_k} \sin \varphi_k) + j \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} (i_{n_k} \cos \varphi_k) \quad (5.31)$$

O ângulo  $\varphi_k$ , denominado neste trabalho de dissertação como ângulo de referência, é obtido através da Equação (5.32), sendo  $f_1$  a frequência característica do sistema de potência,  $f_s$  a frequência de amostragem utilizada,  $h$  a ordem harmônica ( $h=1$ ) e  $k$  o número da amostra.

$$\varphi_k = 2\pi h(k-1) \frac{f_1}{f_s} \quad (h=1) \quad (5.32)$$

Para que o número de amostras efetuadas em cada ciclo seja constante, a relação  $f_1/f_s$  deve ser constante, ou seja, a frequência de amostragem deve ser função da frequência do sistema de potência. Na prática, a frequência fundamental característica de um sistema de potência oscila, exigindo que a frequência de amostragem se adapte a mesma. Uma das soluções consiste em medir constantemente a frequência fundamental do sistema e utilizar o último valor medido que antecede cada janela de período  $T_w$ . Obviamente, desta forma, ao serem consideradas janelas de amostragem contendo vários ciclos da fundamental, poderão ocorrer erros provenientes de mudanças no valor da frequência característica do sistema de potência ocorridas durante a amostragem de uma determinada janela. Essas considerações, além do formato de janela utilizada (retangular ou Hanning), são amplamente discutidas em

IEC 61000-4-7 (IEC, 2002) e deverão ser levadas em conta para o caso de implementação prática do algoritmo proposto no sentido de minimizar erros inerentes à avaliação da componente fundamental.

Outra maneira de expressar os fasores de tensão e corrente consiste na indicação do valor eficaz da grandeza acompanhado do respectivo ângulo de fase conforme indicado a seguir. Esta representação será utilizada para a apresentação dos resultados obtidos a partir do algoritmo desenvolvido no que se refere aos valores de tensões e correntes do grupo fundamental.

$$\mathbf{V}_{a1} = V_{a1} \angle \alpha_{a1}^{\circ} \quad (5.33)$$

$$\mathbf{V}_{b1} = V_{b1} \angle \alpha_{b1}^{\circ} \quad (5.34)$$

$$\mathbf{V}_{c1} = V_{c1} \angle \alpha_{c1}^{\circ} \quad (5.35)$$

$$\mathbf{I}_{a1} = I_{a1} \angle \beta_{a1}^{\circ} \quad (5.36)$$

$$\mathbf{I}_{b1} = I_{b1} \angle \beta_{b1}^{\circ} \quad (5.37)$$

$$\mathbf{I}_{c1} = I_{c1} \angle \beta_{c1}^{\circ} \quad (5.38)$$

$$\mathbf{I}_{n1} = I_{n1} \angle \beta_{n1}^{\circ} \quad (5.39)$$

#### 5.4.3.2 Cálculo dos valores eficazes das tensões e corrente fundamentais

O quadrado do valor eficaz de cada uma das tensões e correntes fundamentais é obtido através da aplicação das seguintes relações, que correspondem ao quadrado do módulo de cada um dos fasores fundamentais:

$$V_{a1}^2 = \left[ \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} v_{a_k} \cos(\varphi_k) \right]^2 + \left[ \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} v_{a_k} \sin(\varphi_k) \right]^2 \quad (5.40)$$

$$V_{b1}^2 = \left[ \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} v_{b_k} \cos(\varphi_k) \right]^2 + \left[ \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} v_{b_k} \sin(\varphi_k) \right]^2 \quad (5.41)$$

$$V_{c1}^2 = \left[ \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} v_{c_k} \cos(\varphi_k) \right]^2 + \left[ \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} v_{c_k} \sin(\varphi_k) \right]^2 \quad (5.42)$$

$$V_{ab1}^2 = \left[ \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} v_{ab_k} \cos(\varphi_k) \right]^2 + \left[ \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} v_{ab_k} \sin(\varphi_k) \right]^2 \quad (5.43)$$

$$V_{bc1}^2 = \left[ \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} v_{bc_k} \cos(\varphi_k) \right]^2 + \left[ \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} v_{bc_k} \sin(\varphi_k) \right]^2 \quad (5.44)$$

$$V_{ca1}^2 = \left[ \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} v_{ca_k} \cos(\varphi_k) \right]^2 + \left[ \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} v_{ca_k} \sin(\varphi_k) \right]^2 \quad (5.45)$$

$$I_{a1}^2 = \left[ \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} i_{a_k} \cos(\varphi_k) \right]^2 + \left[ \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} i_{a_k} \sin(\varphi_k) \right]^2 \quad (5.46)$$

$$I_{b1}^2 = \left[ \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} i_{b_k} \cos(\varphi_k) \right]^2 + \left[ \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} i_{b_k} \sin(\varphi_k) \right]^2 \quad (5.47)$$

$$I_{c1}^2 = \left[ \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} i_{c_k} \cos(\varphi_k) \right]^2 + \left[ \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} i_{c_k} \sin(\varphi_k) \right]^2 \quad (5.48)$$

$$I_{n1}^2 = \left[ \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} i_{n_k} \cos(\varphi_k) \right]^2 + \left[ \frac{\sqrt{2}}{z} \sum_{k=1}^{k=z} i_{n_k} \sin(\varphi_k) \right]^2 \quad (5.49)$$

Os valores da tensão fundamental efetiva e da corrente fundamental efetiva podem então ser obtidos usando as relações (5.50) e (5.51).

$$V_{e1} = \sqrt{\left( \frac{1}{18} (3(V_{a1}^2 + V_{b1}^2 + V_{c1}^2) + V_{ab1}^2 + V_{bc1}^2 + V_{ca1}^2) \right)} \quad (5.50)$$

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2 + I_{n1}^2}{3}} \quad (5.51)$$

#### 5.4.3.3 Cálculo dos ângulos de fase

Para a obtenção dos valores dos ângulos dos fasores fundamentais a relação mais direta, proveniente dos conceitos básicos de aplicação da Transformada de Fourier, consiste em considerar que a tangente deste ângulo corresponde à divisão do coeficiente  $a_1$ , dado por (5.19) pelo coeficiente  $b_1$  (5.20) da série de Fourier. No entanto, como devemos considerar a obtenção de resultados nos quatro quadrantes, alguns cuidados especiais foram tomados. Isto é necessário devido às características de paridade das funções  $\arcsin(x)$ ,  $\arccos(x)$  e  $\arctan(x)$ .

Uma das soluções encontradas consiste na aplicação de um teste inicial para verificar se o módulo do fasor é igual a zero. Nesse caso, a rotina de detecção de quadrante não é aplicada e o respectivo ângulo é nulo. Se a componente real do fasor for maior que zero, a função  $\arctan(x)$  é utilizada. Se o componente real do fasor for menor que zero, utiliza-se a função  $\arctan(x)$ , sendo que  $180^\circ$  devem ser adicionados ao resultado. Se a parte real for zero, a função  $\arcsin(x)$  é então utilizada. Abaixo são fornecidas as expressões para a correta determinação do ângulo para o fasor que representa a tensão fundamental da fase  $a$ . Procedimento idêntico é feito para os demais fasores.

$$\text{Se } V_{a1}^2 = 0, \text{ então} \quad \alpha_{a1} = 0. \quad (5.52)$$

$$\text{Se } \left( \sum_{k=1}^{k=z} v_{a_k} \sin(\varphi_k) \right) > 0, \text{ então} \quad \alpha_{a1} = \arctan \left[ \frac{\sum_{k=1}^{k=z} v_{a_k} \cos(\varphi_k)}{\sum_{k=1}^{k=z} v_{a_k} \sin(\varphi_k)} \right]. \quad (5.53)$$

$$\text{Se } \left( \sum_{k=1}^{k=z} v_{a_k} \sin(\varphi_k) \right) < 0, \text{ então} \quad \alpha_{a1} = \arctan \left[ \frac{\sum_{k=1}^{k=z} v_{a_k} \cos(\varphi_k)}{\sum_{k=1}^{k=z} v_{a_k} \sin(\varphi_k)} \right] + \pi. \quad (5.54)$$

$$\text{Se } \left( \sum_{k=1}^{k=z} v_{a_k} \sin(\varphi_k) \right) = 0, \text{ então } \alpha_{a1} = \arcsin \left[ \frac{\sum_{k=1}^{k=z} v_{a_k} \cos(\varphi_k)}{\sum_{k=1}^{k=z} v_{a_k} \cos(\varphi_k)} \right]. \quad (5.55)$$

O procedimento utilizado para a obtenção dos fasores fundamentais, então, consiste na multiplicação sucessiva de cada amostra de tensão (valores fase-neutro e fase-fase) e de cada amostra de corrente (aplicado também à amostra da corrente de neutro) pelo seno de  $\varphi_k$  e pelo cosseno de  $\varphi_k$ . A vantagem deste procedimento, no caso de aplicação do mesmo a medidores e registradores que venham a fornecer os valores de potências e fatores indicados pela IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), consiste no fato de que o mesmo pode ser feito à medida que as amostras são obtidas pelo sistema de conversão A/D do medidor, em tempo real.

#### 5.4.4 Cálculo dos valores eficazes das tensões e correntes não fundamentais

Para a determinação das tensões harmônicas e das correntes harmônicas são utilizadas as equações (5.56) a (5.65).

$$V_{aH} = \sqrt{V_a^2 - V_{a1}^2} \quad (5.56)$$

$$V_{bH} = \sqrt{V_b^2 - V_{b1}^2} \quad (5.57)$$

$$V_{cH} = \sqrt{V_c^2 - V_{c1}^2} \quad (5.58)$$

$$V_{abH} = \sqrt{V_{ab}^2 - V_{ab1}^2} \quad (5.59)$$

$$V_{bcH} = \sqrt{V_{bc}^2 - V_{bc1}^2} \quad (5.60)$$

$$V_{caH} = \sqrt{V_{ca}^2 - V_{ca1}^2} \quad (5.61)$$

$$I_{aH} = \sqrt{I_a^2 - I_{a1}^2} \quad (5.62)$$

$$I_{bH} = \sqrt{I_b^2 - I_{b1}^2} \quad (5.63)$$



$$I_{cH} = \sqrt{I_c^2 - I_{c1}^2} \quad (5.64)$$

$$I_{nH} = \sqrt{I_n^2 - I_{n1}^2} \quad (5.65)$$

Os valores da tensão efetiva harmônica e da corrente efetiva harmônica são obtidos, respectivamente, através das equações (5.66) e (5.67).

$$V_{eH} = \sqrt{V_e^2 - V_{e1}^2} \quad (5.66)$$

$$I_{eH} = \sqrt{I_e^2 - I_{e1}^2} \quad (5.67)$$

#### 5.4.5 Cálculo da distorção harmônica total

As relações (5.68) e (5.69) propiciam o cálculo dos valores de distorção harmônica total da tensão efetiva e de distorção harmônica total da corrente efetiva da janela.

$$DHT_{eV} = \frac{V_{eH}}{V_{e1}} \quad (5.68)$$

$$DHT_{eI} = \frac{I_{eH}}{I_{e1}} \quad (5.69)$$

Os valores de distorção harmônica total das demais tensões e correntes, importantes na consideração de sistemas monofásicos, são obtidos de forma idêntica utilizando as expressões genéricas (5.70) e (5.71).

$$DHT_V = \frac{V_H}{V_1} \quad (5.70)$$

$$DHT_I = \frac{I_H}{I_1} \quad (5.71)$$

Apenas como exemplo indicativo da simbologia utilizada, é mostrado em (5.72) a fórmula da distorção harmônica total da corrente da fase  $a$ . A simbologia utilizada para as demais é análoga, substituindo o índice  $a$  pelos índices  $b$ ,  $c$ , etc. O mesmo é válido para as tensões e demais correntes, incluindo a corrente de neutro.

$$DHT_{I_a} = \frac{I_{aH}}{I_{a1}} \quad (5.72)$$

Um aspecto importante relacionado à definição de distorção harmônica total ( $DHT$ ) utilizada na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) reside no fato de que a parcela referente à parte contínua do sinal é levada em conta na avaliação deste índice por estar incluída em  $V_H$  (ou  $I_H$ ). Outras abordagens sugerem, no entanto, que a parte contínua do sinal não seja adicionada à parte harmônica na avaliação da distorção harmônica total. Para situações em que não existe componente contínua no sinal os valores de  $DHT$  calculados a partir das duas diferentes definições serão iguais.

#### 5.4.6 Cálculo das potências

A potência ativa total  $P$ , para a janela considerada, correspondente à soma das potências ativas de cada uma das fases de acordo com (5.73).

$$P = P_a + P_b + P_c \quad (5.73)$$

Para o cálculo da potência ativa de cada fase são, então, utilizadas as fórmulas básicas da potência ativa em sistemas amostrados (5.74), (5.75) e (5.76).

$$P_a = \frac{1}{z} \sum_{k=1}^{k=z} v_{a_k} i_{a_k} \quad (5.74)$$

$$P_b = \frac{1}{z} \sum_{k=1}^{k=z} v_{b_k} i_{b_k} \quad (5.75)$$

$$P_c = \frac{1}{z} \sum_{k=1}^{k=z} v_{c_k} i_{c_k} \quad (5.76)$$

As potências complexas fundamentais são expressas através das equações (5.77), (5.78) e (5.79), onde o asterisco representa o complexo conjugado do respectivo fasor de corrente fundamental.

$$\mathbf{S}_{a1} = \mathbf{V}_{a1} \mathbf{I}_{a1}^* = P_{a1} + jQ_{a1} \quad (5.77)$$

$$\mathbf{S}_{b1} = \mathbf{V}_{b1} \mathbf{I}_{b1}^* = P_{b1} + jQ_{b1} \quad (5.78)$$

$$\mathbf{S}_{c1} = \mathbf{V}_{c1} \mathbf{I}_{c1}^* = P_{c1} + jQ_{c1} \quad (5.79)$$

O desenvolvimento de cada uma dessas expressões para  $P$  e  $Q$ , quando aplicados os valores amostrados das tensões e correntes e considerando os respectivos fasores expressos em coordenadas retangulares, leva as seguintes relações que fornecem a potência ativa fundamental e a potência reativa fundamental para cada uma das fases:

$$P_{a1} = \frac{2}{(z^2)} \left[ \sum_{k=1}^{k=z} v_{a_k} \sin(\varphi_k) \right] \left[ \sum_{k=1}^{k=z} i_{a_k} \sin(\varphi_k) \right] + \frac{2}{(z^2)} \left[ \sum_{k=1}^{k=z} v_{a_k} \cos(\varphi_k) \right] \left[ \sum_{k=1}^{k=z} i_{a_k} \cos(\varphi_k) \right] \quad (5.80)$$

$$P_{b1} = \frac{2}{(z^2)} \left[ \sum_{k=1}^{k=z} v_{b_k} \sin(\varphi_k) \right] \left[ \sum_{k=1}^{k=z} i_{b_k} \sin(\varphi_k) \right] + \frac{2}{(z^2)} \left[ \sum_{k=1}^{k=z} v_{b_k} \cos(\varphi_k) \right] \left[ \sum_{k=1}^{k=z} i_{b_k} \cos(\varphi_k) \right] \quad (5.81)$$

$$P_{c1} = \frac{2}{(z^2)} \left[ \sum_{k=1}^{k=z} v_{c_k} \sin(\varphi_k) \right] \left[ \sum_{k=1}^{k=z} i_{c_k} \sin(\varphi_k) \right] + \frac{2}{(z^2)} \left[ \sum_{k=1}^{k=z} v_{c_k} \cos(\varphi_k) \right] \left[ \sum_{k=1}^{k=z} i_{c_k} \cos(\varphi_k) \right] \quad (5.82)$$

$$Q_{a1} = \frac{2}{(z^2)} \left[ \sum_{k=1}^{k=z} v_{a_k} \cos(\varphi_k) \right] \left[ \sum_{k=1}^{k=z} i_{a_k} \sin(\varphi_k) \right] - \frac{2}{(z^2)} \left[ \sum_{k=1}^{k=z} v_{a_k} \sin(\varphi_k) \right] \left[ \sum_{k=1}^{k=z} i_{a_k} \cos(\varphi_k) \right] \quad (5.83)$$

$$Q_{b1} = \frac{2}{(z^2)} \left[ \sum_{k=1}^{k=z} v_{b_k} \cos(\varphi_k) \right] \left[ \sum_{k=1}^{k=z} i_{b_k} \sin(\varphi_k) \right] - \frac{2}{(z^2)} \left[ \sum_{k=1}^{k=z} v_{b_k} \sin(\varphi_k) \right] \left[ \sum_{k=1}^{k=z} i_{b_k} \cos(\varphi_k) \right] \quad (5.84)$$

$$Q_{c1} = \frac{2}{(z^2)} \left[ \sum_{k=1}^{k=z} v_{c_k} \cos(\varphi_k) \right] \left[ \sum_{k=1}^{k=z} i_{c_k} \sin(\varphi_k) \right] - \frac{2}{(z^2)} \left[ \sum_{k=1}^{k=z} v_{c_k} \sin(\varphi_k) \right] \left[ \sum_{k=1}^{k=z} i_{c_k} \cos(\varphi_k) \right] \quad (5.85)$$

Um aspecto significativo na aplicação do desenvolvimento acima se refere à operação em quatro quadrantes. Para que seja mantida a coerência do sinal da potência reativa fundamental, ou seja, assumam valores negativos para sistemas nos quais os fasores de tensão fundamental estejam atrasados em relação aos respectivos fasores de corrente fundamental, é necessário que seja feito um teste de verificação do sinal da potência ativa fundamental. Se a mesma for negativa, o sinal da componente reativa fundamental deverá ser invertido.

As expressões abaixo mostram como são obtidos os valores das potências ativa e reativa fundamentais totais.

$$P_1 = P_{a1} + P_{b1} + P_{c1} \quad (5.86)$$

$$Q_1 = Q_{a1} + Q_{b1} + Q_{c1} \quad (5.87)$$

Na abordagem para circuitos de potência em sistemas puramente senoidais, é válida a relação  $S^2 = P^2 + Q^2$ , sendo  $S$  a potência aparente total,  $P$  a potência ativa total, resultado da soma aritmética das potências ativas das fases, e  $Q$  a potência reativa total, resultado da soma aritmética das potências reativas das fases. Para sistemas de potência sem conteúdo harmônico, independente de desequilíbrio das tensões e correntes ou do conteúdo reativo em cada uma das fases, a relação citada permanece válida. Na abordagem proveniente da Norma IEEE 1459 (IEEE, 2000), no entanto, mesmo quando considerada somente a parcela fundamental das potências, a analogia não é válida, ou seja,  $S_{e1}^2 \neq P_1^2 + Q_1^2$ . Essa diferença provém da própria definição de potência aparente proposta na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000). Uma discussão mais ampla sobre aspectos relacionados a este tema pode ser obtida em Emanuel (1993, 1998, 1999), Willems, Ghijselen e Emanuel (2005), Marafão, Deckmann e Marafão (2002) e Willems e Ghijselen (2003).

### 5.4.7 Cálculo das componentes simétricas

O algoritmo utilizado para obtenção das componentes de seqüência zero, positiva e negativa, necessárias, segundo a IEEE (2000), na avaliação da potência reativa e ativa fundamental de seqüência positiva, está baseado no conhecido conceito segundo o qual qualquer sistema de tensões trifásicas pode ser substituído pela soma de três sistemas simétricos de mesma freqüência. Este conceito é aplicado no algoritmo desenvolvido somente para a parte fundamental das tensões e correntes a partir dos valores das tensões eficazes fasoriais calculadas através da DFT.

Considerando que as equações (5.33), (5.34) e (5.35) são expressões das tensões fundamentais, a aplicação do conceito de componentes simétricas consiste na resolução do seguinte sistema de matrizes:

$$\begin{bmatrix} V_1^0 \angle (\alpha_1^0)^\circ \\ V_1^+ \angle (\alpha_1^+)^\circ \\ V_1^- \angle (\alpha_1^-)^\circ \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1\angle 120^\circ & 1\angle 240^\circ \\ 1 & 1\angle 240^\circ & 1\angle 120^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a1} \angle \alpha_{a1}^\circ \\ V_{b1} \angle \alpha_{b1}^\circ \\ V_{c1} \angle \alpha_{c1}^\circ \end{bmatrix} \quad (5.88)$$

Considerando, ainda, que os valores das tensões fundamentais, assim como os respectivos ângulos, foram obtidos a partir da aplicação da DFT aos sinais de tensão, a obtenção dos valores eficazes das tensões simétricas fundamentais e dos respectivos ângulos consistirá em simples operações de multiplicação e soma de vetores. O uso de coordenadas retangulares propicia a otimização da rotina visto que os coeficientes da série de Fourier podem ser usados diretamente no cálculo. De forma análoga, a expressão mais utilizada para as correntes é fornecida pela relação de matrizes em (5.89).

$$\begin{bmatrix} I_1^0 \angle (\alpha_1^0)^\circ \\ I_1^+ \angle (\alpha_1^+)^\circ \\ I_1^- \angle (\alpha_1^-)^\circ \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1\angle 120^\circ & 1\angle 240^\circ \\ 1 & 1\angle 240^\circ & 1\angle 120^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a1} \angle \alpha_{a1}^\circ \\ I_{b1} \angle \alpha_{b1}^\circ \\ I_{c1} \angle \alpha_{c1}^\circ \end{bmatrix} \quad (5.89)$$

De acordo com as simulações feitas, a aplicação do conceito de componente simétricas, além de possibilitar o cálculo das potências ativa e reativa fundamental de seqüência positiva,

também pode ser utilizado para avaliação do valor da tensão efetiva fundamental e da corrente efetiva fundamental. Isso é feito através da aplicação das seguintes relações propostas na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000):

$$V_{e1} = \sqrt{\left(\frac{1}{18}(3(V_{a1}^2 + V_{b1}^2 + V_{c1}^2) + V_{ab1}^2 + V_{bc1}^2 + V_{ca1}^2)\right)} = \sqrt{(V_1^+)^2 + (V_1^-)^2 + \frac{(V_1^0)^2}{2}} \quad (5.90)$$

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2 + I_{n1}^2}{3}} = \sqrt{(I_1^+)^2 + (I_1^-)^2 + 4(I_1^0)^2} \quad (5.91)$$

Durante o desenvolvimento do algoritmo, testes feitos considerando sistemas desequilibrados com conteúdo harmônico, nos quais os valores das tensões e correntes efetivas fundamentais foram obtidos através dos dois métodos, o primeiro a partir dos valores eficazes das correntes e tensões fundamentais e o segundo a partir das componentes simétricas de tensão fundamentais, forneceram resultados idênticos, independente do método usado. O uso dos dois métodos tornou-se necessário devido a discrepâncias entre os valores fornecidos nos exemplos práticos da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) e os encontrados nas simulações feitas. A devida análise de tais discrepâncias será feita com detalhes no Capítulo 6.

Uma interessante possibilidade consiste no cálculo da potência ativa fundamental total e da potência reativa fundamental total a partir das componentes simétricas fundamentais. No algoritmo desenvolvido, para fins de comprovação e comparação, foram usados dois diferentes métodos para o cálculo da potência ativa fundamental total e para a potência reativa fundamental total. Além da utilização do desenvolvimento exposto anteriormente, considerando fasores de corrente e tensão fundamentais provenientes da aplicação da DFT, a expressão da potência complexa de cada fase e a soma algébrica dos respectivos valores obtidos, foi também feita avaliação da potência ativa fundamental e da potência reativa fundamental a partir do conceito de componentes simétricas aplicado aos fasores fundamentais de tensão e corrente.

### 5.4.8 Cálculo das potências fundamentais a partir das componentes simétricas

O conceito de potência aparente fundamental de seqüência positiva, tratado na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), foi generalizado aqui através da aplicação do conceito de potência complexa. O uso deste conceito, no que se refere às relações que os fasores que representam as componentes simétricas de tensão e corrente teriam com a definição de uma potência complexa de seqüência zero, positiva e negativa, implicam, então, nas seguintes relações:

$$\mathbf{S}_1^0 = 3\mathbf{V}_1^0 (\mathbf{I}_1^0)^* = P_1^0 + jQ_1^0 \quad (5.92)$$

$$\mathbf{S}_1^+ = 3\mathbf{V}_1^+ (\mathbf{I}_1^+)^* = P_1^+ + jQ_1^+ \quad (5.93)$$

$$\mathbf{S}_1^- = 3\mathbf{V}_1^- (\mathbf{I}_1^-)^* = P_1^- + jQ_1^- \quad (5.94)$$

onde:

$$\mathbf{V}_1^0 = V_1^0 \angle (\alpha_1^0)^\circ \quad (5.95)$$

$$\mathbf{V}_1^+ = V_1^+ \angle (\alpha_1^+)^\circ \quad (5.96)$$

$$\mathbf{V}_1^- = V_1^- \angle (\alpha_1^-)^\circ \quad (5.97)$$

$$\mathbf{I}_1^0 = I_1^0 \angle (\beta_1^0)^\circ \quad (5.98)$$

$$\mathbf{I}_1^+ = I_1^+ \angle (\beta_1^+)^\circ \quad (5.99)$$

$$\mathbf{I}_1^- = I_1^- \angle (\beta_1^-)^\circ \quad (5.100)$$

O conceito foi aplicado e, nas simulações feitas, independente do desequilíbrio ou do conteúdo harmônico das correntes e tensões, os resultados para a potência ativa fundamental total e para a potência reativa fundamental total foram os mesmos quer estes valores tenham sido obtidos através de (5.101) e (5.102) ou de (5.86) e (5.87).

$$P_1 = P_1^0 + P_1^+ + P_1^- \quad (5.101)$$

$$Q_1 = Q_1^0 + Q_1^+ + Q_1^- \quad (5.102)$$

Esta coerência observada, além de confirmar durante os testes o funcionamento de algumas das rotinas desenvolvidas, permitiu, também, confirmar a consistência do modelamento matemático utilizado. No entanto, um detalhe importante com relação a este aspecto consiste no fato de que para sistemas trifásicos desequilibrados a abordagem da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), que utiliza o conceito de potência aparente efetiva desenvolvido por Buchholz e Goodhue (EMANUEL, 1998), não permite a correlação direta e tradicional entre a potência reativa fundamental total e potência ativa fundamental total (formando um triângulo de potências). Isto ocorre devido ao fato de que a hipotenusa deste triângulo corresponderia à definição tradicionalmente usada de potência aparente e não a definição de potência aparente efetiva. Nas situações de equilíbrio, no entanto, a potência aparente efetiva e a potência aparente apresentam os mesmos valores e a aplicação do triângulo de potências tradicionalmente usado seria válida. Em função disto será possível perceber que, ao fornecer os resultados para as potências fundamentais totais tanto na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) quanto nas tabelas que mostram as potências obtidas pelas rotinas desenvolvidas, a potência ativa total é fornecida, mas a potência reativa total não é fornecida.

#### **5.4.9 Obtenção das variáveis de interesse**

A partir dos valores das variáveis calculados segundo o desenvolvimento indicado e considerando as relações propostas na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) e expostas no Capítulo 4, torna-se então possível a obtenção dos valores das potências e fatores dos grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental para o período de  $n$  ciclos inteiros que compõe a janela de duração  $T_w$  considerada.



#### 5.4.10 Processos de agregação temporal das variáveis

Em geral, análises de sistemas trifásicos de potência, no que se refere aos valores de tensão, corrente, potências ou mesmo valores relativos a índices relacionados à qualidade de energia, são feitas durante períodos de tempo que podem variar de segundos ou minutos até meses ou anos. Em função da quantidade de dados para períodos mais longos, em geral, as variáveis de interesse são agregadas no tempo de forma que os valores registrados correspondam a valores médios dessas variáveis.

Os tempos de agregação escolhidos para cada situação variam em função do tipo de análise a ser feita, do período total da avaliação do sistema, das grandezas de interesse, de alguma norma ou legislação vigente, ou mesmo de características do registrador ou medidor utilizado.

Um exemplo bastante conhecido de agregação no tempo é utilizado pelas concessionárias de energia no que se refere à máxima demanda de potência que uma determinada instalação pode solicitar do sistema ao qual está ligada. Neste caso, o tempo de agregação determinado pela ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2000) é de 15 minutos.

Outro exemplo de agregação no tempo pode ser encontrado na Resolução 505 da ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2001). Neste caso, o tempo de agregação dos valores de tensão é de 10 minutos. Isso significa que a cada 10 minutos será calculada uma tensão média correspondente a este intervalo. Os valores utilizados para o cálculo do valor médio de 10 minutos, segundo esta resolução, devem ser provenientes da aplicação da definição de valor eficaz para janelas consecutivas, sem intervalos e que contenham 12 ciclos inteiros de frequência fundamental característica do sistema de potência. A amostragem mínima recomendada corresponde a 64 amostras por ciclo da fundamental, implicando que a cada 3.840 amostras seja calculado um valor eficaz de tensão.

Os diferentes tempos de agregação propostos na Norma IEC 61000-4-30 (IEC, 2003) são de 3 segundos, 10 minutos e 2 horas, sendo determinadas condições específicas de sincronismo para instrumentos que sejam classificados como Classe A, principalmente no que se refere à obtenção do valor agregado de 3 segundos para uma determinada variável.

## 5.5 CONCLUSÃO

Neste Capítulo foram tratadas as questões relativas ao desenvolvimento de uma metodologia de cálculo dos valores propostos na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) considerando que os valores eficazes das tensões e correntes e os valores médios das potências e demais fatores sejam calculadas a partir de amostras feitas nos sinais de tensão e corrente.

Partindo do pressuposto de que seria possível a obtenção dos valores das diversas potências propostas na Norma (IEEE, 2000) se fossem determinadas as componentes fundamentais das tensões e correntes, foi desenvolvido um procedimento de cálculo baseado nos sinais amostrados das tensões e correntes. Deve ser considerado que, devido à estrutura geral do modelamento proposto na Norma (IEEE, 2000), não haveria a necessidade de determinar a composição harmônica completa dos sinais de tensão e corrente. Como para a determinação da componente fundamental o método escolhido consiste na utilização da DFT, foram necessários estudos referentes à metodologia de aplicação deste método, sendo levados, então, em conta recomendações disponíveis nas normas IEC 61000-4-7 (IEC, 2002) e IEC 61000-4-30 (IEC, 2003) no que se refere à avaliação de componentes harmônicos em sistemas de potência.

Um importante aspecto referente ao algoritmo desenvolvido é que as rotinas são aplicáveis para diferentes taxas de amostragem, assim como para diferentes períodos de janela. A questão da taxa de amostragem, no entanto, torna-se importante à medida que o cálculo dos valores eficazes é função da amostragem utilizada. Maiores taxas de amostragem implicam em consideração de uma faixa de frequências na qual harmônicas de maior ordem sejam consideradas e, conseqüentemente, numa melhor avaliação da parte não fundamental dos sinais de tensão e corrente, principalmente no que se refere à potência harmônica  $P_H$ . A princípio, uma maior taxa de amostragem representa um menor erro na avaliação das tensões e correntes não fundamentais e, conseqüentemente, menores erros na avaliação das potências não fundamentais se harmônicas de ordens mais elevadas estiverem presentes nos sinais de tensão e corrente.

Outra consideração importante está relacionada com a necessidade de aplicação da DFT na determinação das componentes fundamentais das tensões de linha e da corrente de neutro.

A princípio, tal aplicação não seria necessária visto que, uma vez determinadas as tensões de fase fundamentais na forma eficaz fasorial, simples operações de subtração vetorial forneceriam os fasores fundamentais das tensões de linha. O mesmo é válido na avaliação da corrente de neutro. Levando em conta o fato de que a determinação dos fasores fundamentais via DFT, ainda que na sua forma retangular, exige uma considerável carga de cálculos a serem feitos para cada janela, não ser necessário efetuar os mesmos para as três tensões de linha e para a corrente de neutro representa uma diminuição significativa de processamento necessário. Outro detalhe importante com relação à determinação dos fasores fundamentais é que, via de regra, numa aplicação prática em que somente valores médios relativos a períodos que envolvam um grande número de janelas (valores agregados) devam ser fornecidos, não é necessária a determinação dos ângulos dos fasores para cada janela, a não ser que estes valores tenham que, por conveniência, serem apresentados constantemente no mostrador do medidor ou registrador. O cálculo das componentes simétricas fundamentais também pode ser feito a partir dos fasores fundamentais em sua forma retangular, sem necessidade de determinação dos valores angulares das tensões e correntes. Na sua estrutura original o algoritmo está apto para a avaliação de todas as tensões e corrente fundamentais a partir da aplicação da DFT nada impedindo, no entanto, que a avaliação seja feita conforme descrito anteriormente.

No desenvolvimento feito, o foco principal está centrado na determinação dos valores de potência e demais fatores apenas para uma janela. Algoritmos de agregação de valores de janela com o objetivo de obtenção das grandezas médias para períodos de, por exemplo, 10 minutos ainda devem ser desenvolvidos. Na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) estes processos de agregação temporal não foram disponibilizados ou propostos nem na parte conceitual nem na parte de exemplos práticos.

Como foi descrito na parte referente à aplicação da DFT aos sinais de corrente e tensão, sendo também enfatizado em IEC 61000-4-7 (IEC, 2002), o sincronismo entre a frequência fundamental e a frequência de amostragem torna-se importante à medida que pequenos desvios nestes valores podem resultar em erros significativos na avaliação dos fasores das tensões e correntes fundamentais e, conseqüentemente, no valor eficaz dessas tensões, o que implicaria em erros na avaliação das potências fundamentais e não fundamentais. Os processos de sincronismo adequados devem ser determinados para o caso de implementação do algoritmo em registradores, e deverão ser consideradas as características construtivas dos mesmos. A questão dos possíveis procedimentos usados na medição de frequência com erros

máximos compatíveis com alguma norma aplicável, talvez a Norma IEC 61000-4-30 (IEC, 2003), deverá também ser levada em conta.

## 6 APLICAÇÕES DO ALGORITMO

### 6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão fornecidos os resultados provenientes da aplicação do algoritmo no processamento de sinais amostrados de tensões e correntes.

Inicialmente serão mostrados os resultados obtidos em situações de simulação de diferentes tipos de carga, através de sinais amostrados de tensão e corrente gerados a partir de tabelas de composição harmônica. Começando com situações nas quais correntes e tensões fundamentais estão equilibradas e progredindo sucessivamente até o caso mais geral de desequilíbrio com conteúdo harmônico alguns exemplos serão mostrados. Os exemplos nos testes iniciais servirão também como apresentação das tabelas de resultados e gráficos, com comentários e esclarecimentos sobre a apresentação dos resultados de forma geral. Posteriormente, na parte de testes comparativos, os resultados obtidos através da aplicação do algoritmo desenvolvido serão comparados com os resultados fornecidos no Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) para os exemplos propostos.

Após os testes comparativos, o algoritmo será utilizado para fornecer os valores de potência e demais fatores, de acordo com o modelamento proposto na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), para duas situações práticas nas quais os sinais amostrados das tensões e correntes foram obtidos em situações reais de medição. Nos testes práticos os valores amostrados das tensões e correntes, obtidos em medições em laboratório e também em plantas industriais através de registrador adequado, servirão de base de dados de entrada para a aplicação do algoritmo.

### 6.2 TESTES E SIMULAÇÕES INICIAIS

Para os testes e simulações iniciais, assim como para os testes comparativos, a base de dados de entrada é formada pelas tabelas de composição harmônica. O esquema geral

fornecido na Figura 4 indica a seqüência seguida para estas simulações. É importante frisar que, de acordo com a Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), para sistemas trifásicos, a avaliação das potências e demais fatores deve ser feita somente considerando valores totais e não os valores de cada fase. No entanto, para fins comparativos e de análise, nas tabelas de resultados os valores obtidos para cada fase também são mostrados. Os gráficos apresentados para os valores de tensões instantâneas, correntes instantâneas, potências instantâneas e energia transferida são obtidos diretamente dos sinais amostrados no caso das tensões e correntes e a partir da multiplicação destes valores instantâneos para o caso das potências instantâneas e energia transferida. Estes gráficos são fornecidos para propiciar uma melhor avaliação de cada situação não sendo, no entanto, provenientes da metodologia proposta pela Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) em si.

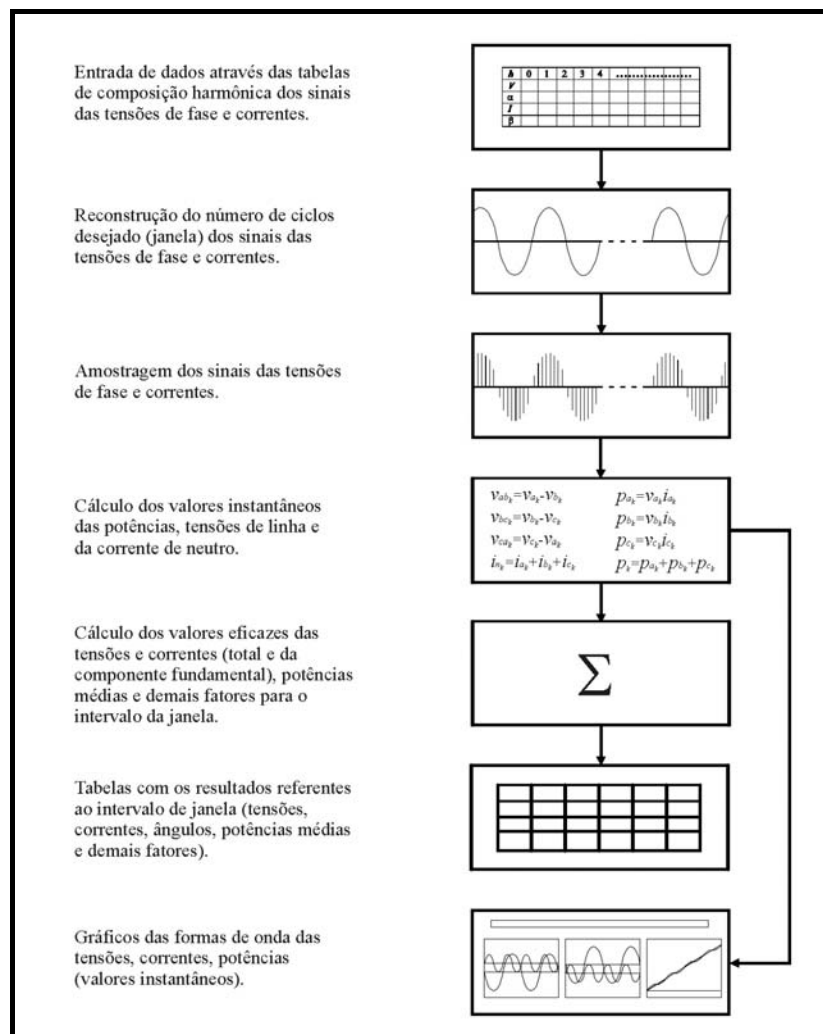


Figura 4 - Esquema geral adotado para as simulações e testes comparativos. A entrada dos sinais é feita através das Tabelas de Composição Harmônica. Os valores instantâneos das tensões, correntes e potências são calculados e fornecidos através de gráficos

Fonte: Elaborada pelo autor.

## 6.2.1 Sistema trifásico equilibrado sem conteúdo harmônico

### 6.2.1.1 Simulação de carga ativa

Nesta simulação somente tensões e correntes fundamentais de 60 Hz são aplicadas como valores de entrada no algoritmo, simulando, desta forma, um hipotético sistema de potência perfeitamente equilibrado em termos de tensões e correntes. A Tabela 7 a seguir mostra os valores de módulo e ângulo dos sinais de tensão e corrente simulados. Foi escolhida, para esta simulação, a tensão eficaz padrão de 127 V e correntes eficazes de 100 A.

Tabela 7 - Composição Harmônica das Tensões e Correntes

Ref.:  $V_{a1} = 127,00$  V

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{ah}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\alpha_{ah}$ [graus]		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $I_{a1} = 100,00$  A

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{ah}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\beta_{ah}$ [graus]		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $V_{b1} = 127,00$  V

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{bh}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\alpha_{bh}$ [graus]		240,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $I_{b1} = 100,00$  A

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{bh}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\beta_{bh}$ [graus]		240,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $V_{c1} = 127,00$  V

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{ch}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\alpha_{ch}$ [graus]		120,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $I_{c1} = 100,00$  A

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{ch}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\beta_{ch}$ [graus]		120,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Na Tabela 7, e nas demais tabelas de composição harmônica apresentadas, os valores eficazes das tensões e correntes fundamentais são usados como referência (100%) para a distribuição harmônica percentual. Este padrão foi adotado por estar de acordo com o padrão

adotado na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000). Outra forma bastante utilizada na literatura consiste em expressar o valor percentual de cada componente harmônica em relação ao valor de pico da tensão fundamental. Ambas as formas são equivalentes desde que respeitadas as relações entre valores de pico e valores eficazes.

O gráfico da Figura 5 fornece as formas de onda das tensões e correntes considerando a duração total da janela de 12 ciclos avaliada, equivalente a 200 ms. A recomposição das ondas a partir das tabelas de composição harmônica pode ser feita para um ou mais ciclos da fundamental. Recomposições que gerem um maior número de ciclos, desde que considerado um número inteiro de períodos da fundamental, não acarretam em diferenças nos valores das variáveis consideradas porque os sinais são constantes. Em função de determinações referentes a janelas de cálculo para valores eficazes indicadas na Resolução 505 da ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2001), IEC (2002) e IEC (2003) as simulações serão feitas, sempre que aplicável, para janelas de doze ciclos.

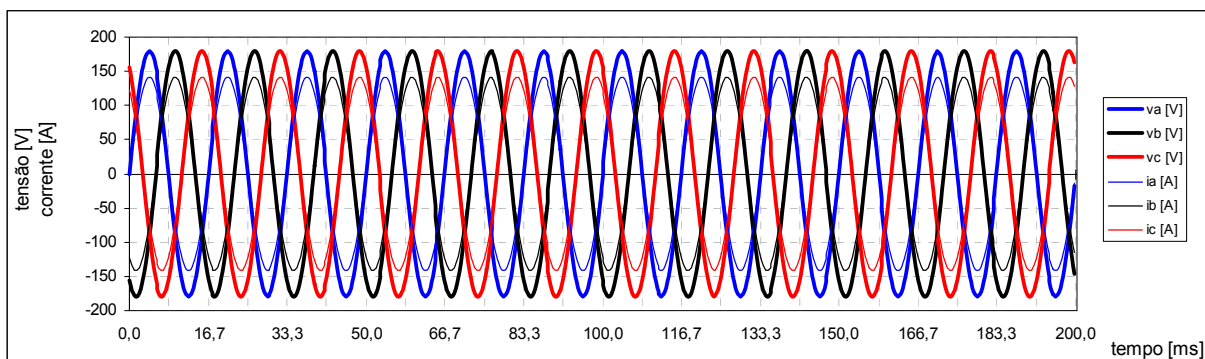


Figura 5 - Formas de onda das tensões e correntes referentes aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 7 para um intervalo de 12 ciclos da frequência fundamental  
Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Na maioria dos casos, para uma melhor visualização das formas de onda, somente uma fração da janela será mostrada ainda que os cálculos sejam feitos considerando janela de 12 ciclos. É importante salientar que para sinais constantes não há diferença entre o uso de janelas de um ou mais ciclos inteiros no cálculo dos diversos valores. Diferenças, no entanto, podem surgir se ocorrerem variações nos valores eficazes das tensões e correntes dentro de cada janela considerada.

O gráfico da Figura 6, a seguir, mostra dois ciclos das tensões e correntes e o gráfico da Figura 7 mostra a corrente de neutro nula em função do equilíbrio das correntes fundamentais e da inexistência de componentes harmônicas de ordem superior a fundamental.



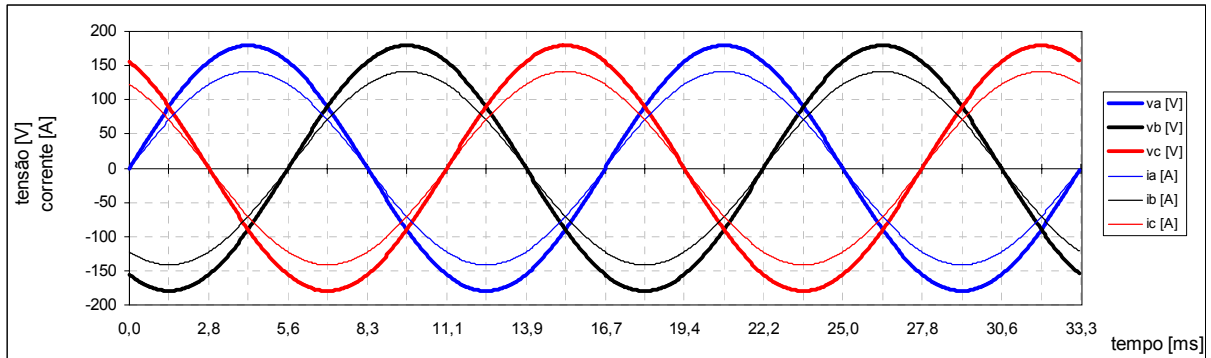


Figura 6 - Formas de onda das tensões e correntes referentes aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 7. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados.  
Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

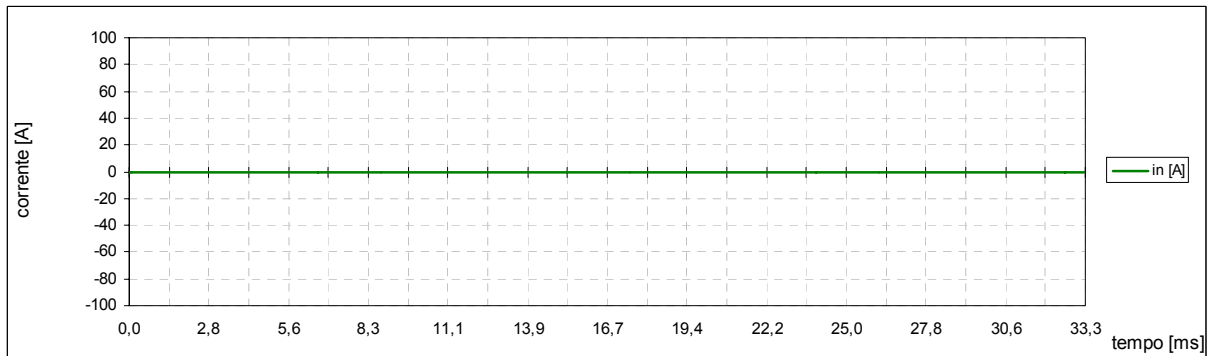


Figura 7 - Forma de onda da corrente de neutro, calculada a partir da soma das correntes das fases, referente à composição harmônica de correntes da Tabela 7. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Além das formas de onda de tensão e corrente, principalmente em função de comparações com os exemplos posteriores, é interessante a observação das formas de ondas das potências instantâneas, Figura 8.

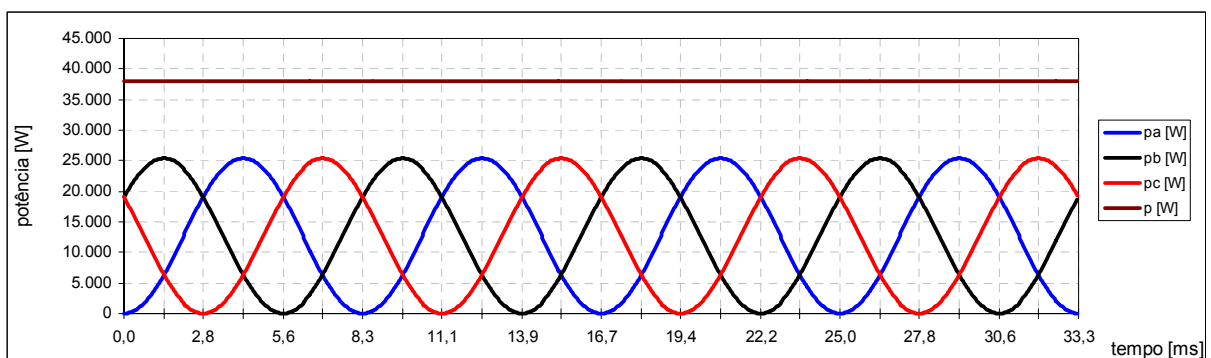


Figura 8 - Formas de onda das potências instantâneas por fase e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicadas na Tabela 7. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

A forma de onda da potência instantânea em cada fase é senoidal com frequência duas vezes maior que a frequência da tensão fundamental. Além disso, para este caso, pode ser verificado que a potência total instantânea  $p$ , sendo para cada instante o somatório das potências instantâneas de cada fase, não apresenta oscilações. As oscilações nos valores da potência instantânea de cada fase implicam no fato de que a transferência de energia (Figura 9) em cada fase não seja constante, visto que a potência pode ser considerada como uma taxa de transferência de energia.

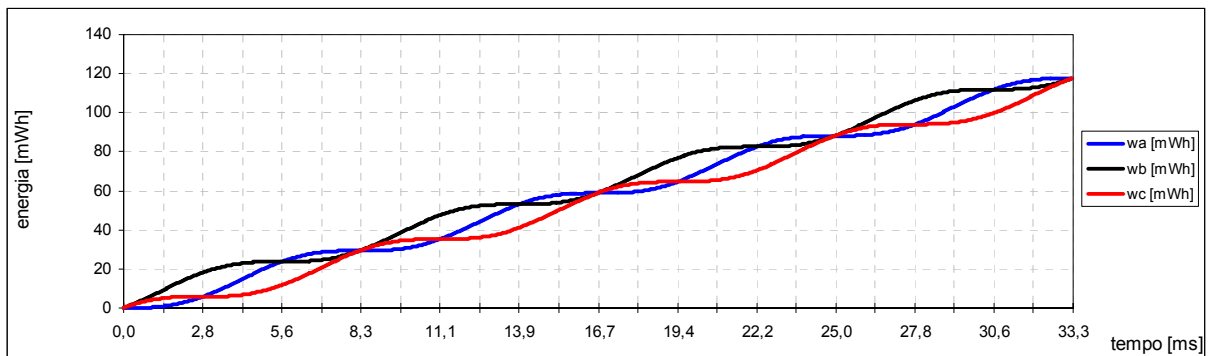


Figura 9 - Formas de onda de transferência de energia em cada uma das fases referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicada na Tabela 7. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

A partir dos valores amostrados para cada fase, neste caso 64 amostras por ciclo, considerando uma janela de 12 ciclos de duração correspondente a 200 ms (frequência característica de 60 Hz), são feitos os cálculos para os valores eficazes das tensões e correntes separando cada uma, conforme descrito no Capítulo 5, em componente fundamental e harmônica. A Tabela 8 mostra o resultado da aplicação do algoritmo desenvolvido para o cálculo das tensões e correntes do grupo combinado, fundamental e não fundamental. Os valores eficazes das tensões e correntes, valores eficazes das tensões e correntes harmônicas, valores eficazes das tensões e correntes fundamentais assim como os respectivos ângulos para as tensões e correntes fundamentais e valores de distorção harmônica total são indicados. Além das tensões e correntes efetivas também são indicados os valores das componentes simétricas das tensões e correntes fundamentais. A forma utilizada, tanto para as tensões e correntes fundamentais quanto para as componentes simétricas das tensões e correntes fundamentais, é a eficaz fasorial com ângulos expressos em graus.

A frequência de amostragem utilizada é de 64 amostras por ciclo da fundamental tanto em função de características mínimas de amostragem sugeridas na Resolução 505 da ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2001) assim como, para os casos de medições práticas, em função das características do registrador utilizado. O uso de taxas de amostragem maiores é possível e alguns testes foram feitos neste sentido. No entanto, as diferenças encontradas não foram significativas em função de que todos os exemplos a serem tratados correspondem a situações em que as composições harmônicas incluem, no máximo, termos de ordem  $h=15$ . Desta forma, o Critério de Nyquist (OPPENHEIM; SCHAFER, 1989) é atendido plenamente em todas as situações tratadas.

Tabela 8 - Tensões, correntes, ângulos e *DHT* - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado		Fundamental			Não-Fundamental				
<b>Tensões</b> $V$ [V] $\alpha$ [graus]	$V_a$	127,00	$V_{a1}$	127,00	$\alpha_{a1}$	0,00	$V_{aH}$	0,00	$DHT_{Va}$	0,0000
	$V_b$	127,00	$V_{b1}$	127,00	$\alpha_{b1}$	240,00	$V_{bH}$	0,00	$DHT_{Vb}$	0,0000
	$V_c$	127,00	$V_{c1}$	127,00	$\alpha_{c1}$	120,00	$V_{cH}$	0,00	$DHT_{Vc}$	0,0000
	$V_{ab}$	219,97	$V_{ab1}$	219,97	$\alpha_{ab1}$	30,00	$V_{abH}$	0,00	$DHT_{Vab}$	0,0000
	$V_{bc}$	219,97	$V_{bc1}$	219,97	$\alpha_{bc1}$	270,00	$V_{bcH}$	0,00	$DHT_{Vbc}$	0,0000
	$V_{ca}$	219,97	$V_{ca1}$	219,97	$\alpha_{ca1}$	150,00	$V_{caH}$	0,00	$DHT_{Vca}$	0,0000
	$V_e$	127,00	$V_{e1}$	127,00			$V_{eH}$	0,00	$DHT_{Ve}$	0,0000
			$V_{1+}$	127,00	$\alpha_{1+}$	0,00				
			$V_{1-}$	0,00	$\alpha_{1-}$	0,00				
			$V_{1o}$	0,00	$\alpha_{1o}$	0,00				
		$V_{e1cs}$	127,00							
<b>Correntes</b> $I$ [A] $\beta$ [graus]	$I_a$	100,00	$I_{a1}$	100,00	$\beta_{a1}$	0,00	$I_{aH}$	0,00	$DHT_{Ia}$	0,0000
	$I_b$	100,00	$I_{b1}$	100,00	$\beta_{b1}$	240,00	$I_{bH}$	0,00	$DHT_{Ib}$	0,0000
	$I_c$	100,00	$I_{c1}$	100,00	$\beta_{c1}$	120,00	$I_{cH}$	0,00	$DHT_{Ic}$	0,0000
	$I_n$	0,00	$I_{n1}$	0,00	$\beta_{n1}$	0,00	$I_{nH}$	0,00	$DHT_{In}$	fund=0
	$I_e$	100,00	$I_{e1}$	100,00			$I_{eH}$	0,00	$DHT_{Ie}$	0,0000
			$I_{1+}$	100,00	$\beta_{1+}$	0,00				
			$I_{1-}$	0,00	$\beta_{1-}$	0,00				
			$I_{1o}$	0,00	$\beta_{1o}$	0,00				
			$I_{e1cs}$	100,00						

Valores referentes a uma janela de 12 ciclos, com 64 amostras por ciclo da fundamental de 60 Hz.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Os valores de tensão e corrente fundamentais efetivas, indicados como  $V_{e1}$  e  $I_{e1}$ , foram obtidos a partir dos valores eficazes das tensões e correntes fundamentais. Os valores indicados como  $V_{e1cs}$  e  $I_{e1cs}$  foram obtidos a partir dos valores das componentes simétricas de tensão e corrente fundamentais, respectivamente conforme a Equação (5.90) e a Equação (5.91). Ainda que devam fornecer resultados idênticos, os dois diferentes métodos são usados e os valores obtidos fornecidos para fins comparativos. A indicação “fund=0”, no campo reservado ao valor de distorção harmônica total da corrente de neutro, é utilizada em função

de que o valor da corrente de neutro fundamental é igual a zero. Essa indicação, quando aplicável, também é utilizada para as demais correntes e tensões.

Os valores das potências e dos diversos fatores associados são fornecidos na Tabela 9.

Tabela 9 - Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado		Fundamental		Não Fundamental			
<b>Aparente</b> [VA]	$S_a$	12.700,0	$S_{a1}$	12.700,0	$S_{aH}$	0,0	$S_{aN}$	0,0
	$S_b$	12.700,0	$S_{b1}$	12.700,0	$S_{bH}$	0,0	$S_{bN}$	0,0
	$S_c$	12.700,0	$S_{c1}$	12.700,0	$S_{cH}$	0,0	$S_{cN}$	0,0
	$S_e$	38.100,0	$S_{e1}$	38.100,0	$S_{eH}$	0,0	$S_{eN}$	0,0
	$S_A$	38.100,0	$S_{e1+}$	38.100,0				
			$S_{e1-}$	0,0				
			$S_{e10}$	0,0				
		$SU_1$	0,0					
<b>Ativo</b> [W]	$P_a$	12.700,0	$P_{a1}$	12.700,0	$P_{aH}$	0,0		
	$P_b$	12.700,0	$P_{b1}$	12.700,0	$P_{bH}$	0,0		
	$P_c$	12.700,0	$P_{c1}$	12.700,0	$P_{cH}$	0,0		
	$P$	38.100,0	$P_1$	38.100,0	$P_H$	0,0		
			$P_{1+}$	38.100,0				
			$P_{1-}$	0,0				
			$P_{10}$	0,0				
<b>Não Ativo</b> [var]	$N_a$	0,0	$Q_{a1}$	0,0	$D_{aH}$	0,0	$D_{aV}$	0,0
	$N_b$	0,0	$Q_{b1}$	0,0	$D_{bH}$	0,0	$D_{bV}$	0,0
	$N_c$	0,0	$Q_{c1}$	0,0	$D_{cH}$	0,0	$D_{cV}$	0,0
	$N$	0,0			$D_{eH}$	0,0	$D_{eV}$	0,0
			$Q_{1+}$	0,0				
			$Q_{1-}$	0,0				
		$Q_{10}$	0,0					
<b>Utilização</b>	$P_{Fa}$	1,0000	$P_{Fa1}$	1,0000				
	$P_{Fb}$	1,0000	$P_{Fb1}$	1,0000				
	$P_{Fc}$	1,0000	$P_{Fc1}$	1,0000				
	$P_{Fe}$	1,0000	$P_{F1}$	1,0000				
	$P_{FA}$	1,0000	$P_{F1+}$	1,0000				
			$P_{F1-}$	1,0000				
		$P_{F10}$	1,0000					
<b>Poluição</b>					$S_{aN}/S_{a1}$	0,0000		
					$S_{bN}/S_{b1}$	0,0000		
					$S_{cN}/S_{c1}$	0,0000		
					$S_{eN}/S_{e1}$	0,0000		
<b>Desequilíbrio</b>			$SU_1/S_{1+}$	0,0000				

Valores referentes a uma janela de 12 ciclos com 64 amostras por ciclo da fundamental de 60,00 Hz.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Os valores referentes à parte não fundamental são nulos. Isto ocorre devido ao fato de não haverem componentes harmônicas de ordem  $h \neq 1$ . Pelo mesmo motivo, os valores fundamentais são idênticos aos valores combinados para esta simulação. Neste caso, considerando o equilíbrio de tensões e correntes, não há diferenças entre os valores obtidos pela abordagem proposta em comparação com a abordagem utilizada tradicionalmente.

### 6.2.1.2 Simulação de carga indutiva

A simulação a seguir mostra os resultados para os mesmos valores de tensão e corrente do exemplo anterior, porém, com fasores de corrente atrasados  $45^\circ$  em relação aos respectivos fasores de tensão, simulando, desta forma, uma carga equilibrada e com característica indutiva. Os valores de composição harmônica são indicados na Tabela 10.

Tabela 10 - Composição Harmônica das Tensões e Correntes

Ref.:  $V_{a1} = 127,00$  V

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{ah}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\alpha_{ah}$ [graus]		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $I_{a1} = 100,00$  A

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{ah}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\beta_{ah}$ [graus]		-45,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $V_{b1} = 127,00$  V

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{bh}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\alpha_{bh}$ [graus]		240,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $I_{b1} = 100,00$  A

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{bh}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\beta_{bh}$ [graus]		195,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $V_{c1} = 127,00$  V

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{ch}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\alpha_{ch}$ [graus]		120,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $I_{c1} = 100,00$  A

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{ch}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\beta_{ch}$ [graus]		75,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Nas Figuras a seguir são mostradas as formas de onda das tensões e correntes, Figura 10, potências instantâneas e transferência de energia, Figuras 11 e 12. Como a corrente de neutro, de forma similar ao exemplo anterior, é nula, a mesma não será mostrada.

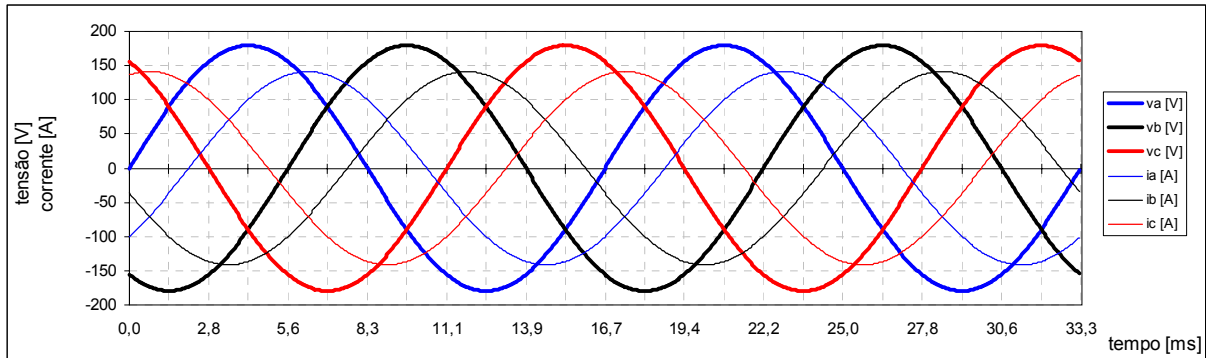


Figura 10 - Formas de onda das tensões e correntes referentes aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 10. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados.  
Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

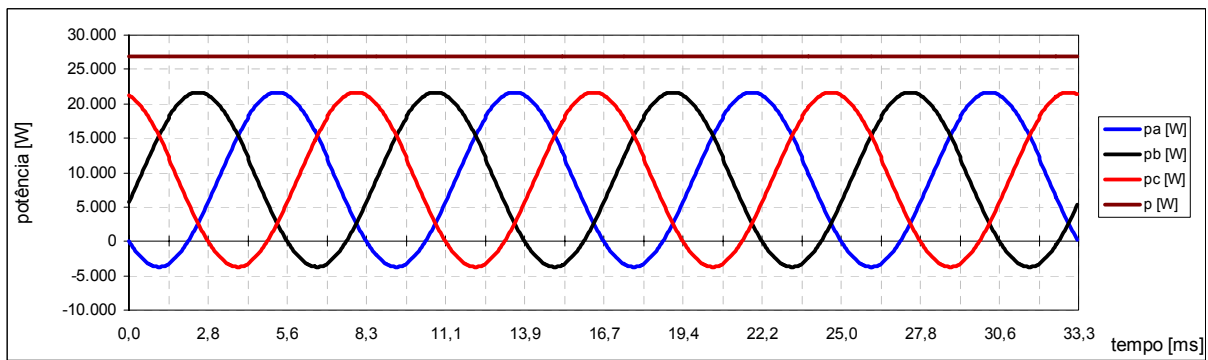


Figura 11 - Formas de onda das potências instantâneas por fase e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicadas na Tabela 10. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado  
Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

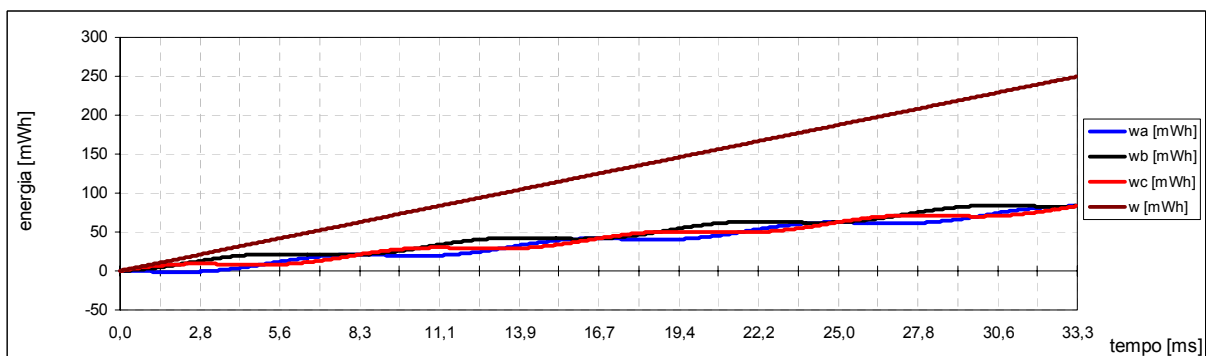


Figura 12 - Formas de onda de transferência de energia em cada uma das fases e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicada na Tabela 10. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.  
Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Numa comparação entre os valores de entrada de ângulo das correntes fundamentais, Tabela 10, e os valores obtidos para os respectivos ângulos das fundamentais, Tabela 11, verifica-se que o formato de resultado para ângulos difere. Enquanto na Tabela 10 o ângulo

indicado para a componente fundamental de corrente da fase  $a$  corresponde a  $-45^\circ$ , a sistemática de detecção do ângulo usada no algoritmo desenvolvido implica na indicação do valor de  $315^\circ$  na Tabela 11 de resultados para as tensões e correntes. Obviamente, isso é somente um padrão de apresentação, não tendo conseqüências sob o ponto de vista matemático.

Tabela 11 - Tensões, correntes, ângulos e  $DHT$  - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado		Fundamental			Não-Fundamental				
<b>Tensões</b>	$V_a$	127,00	$V_{a1}$	127,00	$\alpha_{a1}$	0,00	$V_{aH}$	0,00	$DHT_{Va}$	0,0000
$V$ [V]	$V_b$	127,00	$V_{b1}$	127,00	$\alpha_{b1}$	240,00	$V_{bH}$	0,00	$DHT_{Vb}$	0,0000
$\alpha$ [graus]	$V_c$	127,00	$V_{c1}$	127,00	$\alpha_{c1}$	120,00	$V_{cH}$	0,00	$DHT_{Vc}$	0,0000
	$V_{ab}$	219,97	$V_{ab1}$	219,97	$\alpha_{ab1}$	30,00	$V_{abH}$	0,00	$DHT_{Vab}$	0,0000
	$V_{bc}$	219,97	$V_{bc1}$	219,97	$\alpha_{bc1}$	270,00	$V_{bcH}$	0,00	$DHT_{Vbc}$	0,0000
	$V_{ca}$	219,97	$V_{ca1}$	219,97	$\alpha_{ca1}$	150,00	$V_{caH}$	0,00	$DHT_{Vca}$	0,0000
	$V_e$	127,00	$V_{e1}$	127,00			$V_{eH}$	0,00	$DHT_{Ve}$	0,0000
			$V_{1+}$	127,00	$\alpha_{1+}$	0,00				
			$V_{1-}$	0,00	$\alpha_{1-}$	0,00				
			$V_{1o}$	0,00	$\alpha_{1o}$	0,00				
			$V_{e1cs}$	127,00						
<b>Correntes</b>	$I_a$	100,00	$I_{a1}$	100,00	$\beta_{a1}$	315,00	$I_{aH}$	0,00	$DHT_{Ia}$	0,0000
$I$ [A]	$I_b$	100,00	$I_{b1}$	100,00	$\beta_{b1}$	195,00	$I_{bH}$	0,00	$DHT_{Ib}$	0,0000
$\beta$ [graus]	$I_c$	100,00	$I_{c1}$	100,00	$\beta_{c1}$	75,00	$I_{cH}$	0,00	$DHT_{Ic}$	0,0000
	$I_n$	0,00	$I_{n1}$	0,00	$\beta_{n1}$	0,00	$I_{nH}$	0,00	$DHT_{In}$	fund=0
	$I_e$	100,00	$I_{e1}$	100,00			$I_{eH}$	0,00	$DHT_{Ie}$	0,0000
			$I_{1+}$	100,00	$\beta_{1+}$	315,00				
			$I_{1-}$	0,00	$\beta_{1-}$	0,00				
			$I_{1o}$	0,00	$\beta_{1o}$	0,00				
			$I_{e1cs}$	100,00						
Valores referentes a uma janela de 12 ciclos, com 64 amostras por ciclo da fundamental de 60 Hz.										

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

A Tabela 12, a seguir, mostra os valores relacionados às potências e demais fatores. Por convenção, os valores das potências reativas são positivos quando a carga tem características indutivas. Outra convenção utilizada consiste em indicar fatores de utilização unitários quando a potência ativa e a potência reativa são nulas.

Tabela 12 - Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado	Fundamental	Não Fundamental		
<b>Aparente</b> [VA]	$S_a$ 12.700,0	$S_{a1}$ 12.700,0	$S_{aH}$ 0,0	$S_{aN}$ 0,0	
	$S_b$ 12.700,0	$S_{b1}$ 12.700,0	$S_{bH}$ 0,0	$S_{bN}$ 0,0	
	$S_c$ 12.700,0	$S_{c1}$ 12.700,0	$S_{cH}$ 0,0	$S_{cN}$ 0,0	
	$S_e$ 38.100,0	$S_{e1}$ 38.100,0	$S_{eH}$ 0,0	$S_{eN}$ 0,0	
	$S_A$ 38.100,0	$S_{e1+}$ 38.100,0			
		$S_{e1-}$ 0,0			
		$S_{e10}$ 0,0			
		$SU_1$ 0,0			
<b>Ativo</b> [W]	$P_a$ 8.980,3	$P_{a1}$ 8.980,3	$P_{aH}$ 0,0		
	$P_b$ 8.980,3	$P_{b1}$ 8.980,3	$P_{bH}$ 0,0		
	$P_c$ 8.980,3	$P_{c1}$ 8.980,3	$P_{cH}$ 0,0		
	$P$ 26.940,8	$P_1$ 26.940,8	$P_H$ 0,0		
		$P_{1+}$ 26.940,8			
		$P_{1-}$ 0,0			
		$P_{10}$ 0,0			
<b>Não Ativo</b> [var]	$N_a$ 8.980,3	$Q_{a1}$ 8.980,3	$D_{aH}$ 0,0	$D_{aV}$ 0,0	$D_{aI}$ 0,0
	$N_b$ 8.980,3	$Q_{b1}$ 8.980,3	$D_{bH}$ 0,0	$D_{bV}$ 0,0	$D_{bI}$ 0,0
	$N_c$ 8.980,3	$Q_{c1}$ 8.980,3	$D_{cH}$ 0,0	$D_{cV}$ 0,0	$D_{cI}$ 0,0
	$N$ 26.940,8	$Q_1$ 26.940,8	$D_{eH}$ 0,0	$D_{eV}$ 0,0	$D_{eI}$ 0,0
		$Q_{1+}$ 26.940,8			
		$Q_{1-}$ 0,0			
		$Q_{10}$ 0,0			
<b>Utilização</b>	$P_{Fa}$ 0,7071	$P_{Fa1}$ 0,7071			
	$P_{Fb}$ 0,7071	$P_{Fb1}$ 0,7071			
	$P_{Fc}$ 0,7071	$P_{Fc1}$ 0,7071			
	$P_{Fe}$ 0,7071	$P_{F1}$ 0,7071			
	$P_{FA}$ 0,7071	$P_{F1+}$ 0,7071			
		$P_{F1-}$ 1,0000			
		$P_{F10}$ 1,0000			
<b>Poluição</b>			$S_{aN}/S_{a1}$ 0,0000		
			$S_{bN}/S_{b1}$ 0,0000		
			$S_{cN}/S_{c1}$ 0,0000		
			$S_{eN}/S_{e1}$ 0,0000		
<b>Desequilíbrio</b>		$SU_1/S_{1+}$ 0,0000			

Valores referentes a uma janela de 12 ciclos com 64 amostras por ciclo da fundamental de 60,00 Hz.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

### 6.2.1.3 Simulação de carga capacitiva

Neste exemplo é feita uma simulação para um sistema equilibrado com carga de característica capacitiva. É uma situação análoga a anterior visto que os fasores de corrente estão adiantados em relação aos fasores de corrente em  $45^\circ$ . No entanto, para esta simulação um ângulo de  $25^\circ$  foi adicionado a cada um dos fasores de tensão e corrente. As formas de onda das tensões e correntes são similares às apresentadas no exemplo anterior somente sendo considerado que neste caso as correntes estão adiantadas em relação às respectivas tensões.



Este procedimento foi feito para demonstrar que, independente do instante no qual a janela tenha início, o algoritmo funciona adequadamente.

Como o sistema simulado apresenta equilíbrio tanto nas tensões como nas correntes, a corrente de neutro é nula e a potência total instantânea é representada por uma reta, conforma pode ser observado na situação indutiva simulada anteriormente.

Na Tabela 13 são fornecidos os valores referentes às tensões e correntes assim como os ângulos. Como os fasores de tensão e corrente foram adiantados em  $25^\circ$ , os valores de ângulo obtidos mostram esta situação.

Tabela 13 - Tensões, correntes, ângulos e *DHT* - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado		Fundamental			Não-Fundamental				
<b>Tensões</b>	$V_a$	127,00	$V_{a1}$	127,00	$\alpha_{a1}$	25,00	$V_{aH}$	0,00	$DHT_{Va}$	0,0000
$V$ [V]	$V_b$	127,00	$V_{b1}$	127,00	$\alpha_{b1}$	265,00	$V_{bH}$	0,00	$DHT_{Vb}$	0,0000
$\alpha$ [graus]	$V_c$	127,00	$V_{c1}$	127,00	$\alpha_{c1}$	145,00	$V_{cH}$	0,00	$DHT_{Vc}$	0,0000
	$V_{ab}$	219,97	$V_{ab1}$	219,97	$\alpha_{ab1}$	55,00	$V_{abH}$	0,00	$DHT_{Vab}$	0,0000
	$V_{bc}$	219,97	$V_{bc1}$	219,97	$\alpha_{bc1}$	295,00	$V_{bcH}$	0,00	$DHT_{Vbc}$	0,0000
	$V_{ca}$	219,97	$V_{ca1}$	219,97	$\alpha_{ca1}$	175,00	$V_{caH}$	0,00	$DHT_{Vca}$	0,0000
	$V_e$	127,00	$V_{e1}$	127,00			$V_{eH}$	0,00	$DHT_{Ve}$	0,0000
			$V_{1+}$	127,00	$\alpha_{1+}$	25,00				
			$V_{1-}$	0,00	$\alpha_{1-}$	0,00				
			$V_{1o}$	0,00	$\alpha_{1o}$	0,00				
			$V_{e1cs}$	127,00						
<b>Correntes</b>	$I_a$	100,00	$I_{a1}$	100,00	$\beta_{a1}$	70,00	$I_{aH}$	0,00	$DHT_{Ia}$	0,0000
$I$ [A]	$I_b$	100,00	$I_{b1}$	100,00	$\beta_{b1}$	310,00	$I_{bH}$	0,00	$DHT_{Ib}$	0,0000
$\beta$ [graus]	$I_c$	100,00	$I_{c1}$	100,00	$\beta_{c1}$	190,00	$I_{cH}$	0,00	$DHT_{Ic}$	0,0000
	$I_n$	0,00	$I_{n1}$	0,00	$\beta_{n1}$	0,00	$I_{nH}$	0,00	$DHT_{In}$	fund=0
	$I_e$	100,00	$I_{e1}$	100,00			$I_{eH}$	0,00	$DHT_{Ie}$	0,0000
			$I_{1+}$	100,00	$\beta_{1+}$	70,00				
			$I_{1-}$	0,00	$\beta_{1-}$	0,00				
			$I_{1o}$	0,00	$\beta_{1o}$	0,00				
			$I_{e1cs}$	100,00						

Valores referentes a uma janela de 12 ciclos com 64 amostras por ciclo da fundamental de 60,00 Hz.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Os valores na Tabela 14 podem ser comparados com os valores fornecidos no exemplo anterior para que sejam verificadas as convenções adotadas e também a independência dos valores das potências em relação ao novo ângulo de referência adotado ( $25^\circ$ ).

Tabela 14 - Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado	Fundamental	Não Fundamental		
<b>Aparente</b> [VA]	$S_a$ 12.700,0	$S_{a1}$ 12.700,0	$S_{aH}$ 0,0	$S_{aN}$ 0,0	
	$S_b$ 12.700,0	$S_{b1}$ 12.700,0	$S_{bH}$ 0,0	$S_{bN}$ 0,0	
	$S_c$ 12.700,0	$S_{c1}$ 12.700,0	$S_{cH}$ 0,0	$S_{cN}$ 0,0	
	$S_e$ 38.100,0	$S_{e1}$ 38.100,0	$S_{eH}$ 0,0	$S_{eN}$ 0,0	
	$S_A$ 38.100,0	$S_{e1+}$ 38.100,0			
		$S_{e1-}$ 0,0			
		$S_{e10}$ 0,0			
		$SU_1$ 0,0			
<b>Ativo</b> [W]	$P_a$ 8.980,3	$P_{a1}$ 8.980,3	$P_{aH}$ 0,0		
	$P_b$ 8.980,3	$P_{b1}$ 8.980,3	$P_{bH}$ 0,0		
	$P_c$ 8.980,3	$P_{c1}$ 8.980,3	$P_{cH}$ 0,0		
	$P$ 26.940,8	$P_1$ 26.940,8	$P_H$ 0,0		
		$P_{1+}$ 26.940,8			
		$P_{1-}$ 0,0			
		$P_{10}$ 0,0			
<b>Não Ativo</b> [var]	$N_a$ 8.980,3	$Q_{a1}$ -8.980,3	$D_{aH}$ 0,0	$D_{aV}$ 0,0	$D_{aI}$ 0,0
	$N_b$ 8.980,3	$Q_{b1}$ -8.980,3	$D_{bH}$ 0,0	$D_{bV}$ 0,0	$D_{bI}$ 0,0
	$N_c$ 8.980,3	$Q_{c1}$ -8.980,3	$D_{cH}$ 0,0	$D_{cV}$ 0,0	$D_{cI}$ 0,0
	$N$ 26.940,8	$Q_1$ -26.940,8	$D_{eH}$ 0,0	$D_{eV}$ 0,0	$D_{eI}$ 0,0
		$Q_{1+}$ -26.940,8			
		$Q_{1-}$ 0,0			
		$Q_{10}$ 0,0			
<b>Utilização</b>	$P_{Fa}$ 0,7071	$P_{Fa1}$ 0,7071			
	$P_{Fb}$ 0,7071	$P_{Fb1}$ 0,7071			
	$P_{Fc}$ 0,7071	$P_{Fc1}$ 0,7071			
	$P_{Fe}$ 0,7071	$P_{F1}$ 0,7071			
	$P_{FA}$ 0,7071	$P_{F1+}$ 0,7071			
		$P_{F1-}$ 1,0000			
		$P_{F10}$ 1,0000			
<b>Poluição</b>			$S_{aN}/S_{a1}$ 0,0000		
			$S_{bN}/S_{b1}$ 0,0000		
			$S_{cN}/S_{c1}$ 0,0000		
			$S_{eN}/S_{e1}$ 0,0000		
<b>Desequilíbrio</b>		$SU_1/S_{1+}$ 0,0000			

Valores referentes a uma janela de 12 ciclos com 64 amostras por ciclo da fundamental de 60,00 Hz.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

A apresentação do valor do fator de potência da fundamental desprovido da indicação da característica indutiva ou capacitiva faz parte da convenção adotada. O sinal negativo da potência reativa fundamental de seqüência zero, assim como das potências reativas fundamentais, indica que a característica da carga é capacitiva.

Um importante aspecto a ser verificado é que os valores de potência não ativa,  $N$ , serão sempre positivos ou zero independente da característica capacitiva ou indutiva da carga. Isso pode ser facilmente verificado através da Equação (4.59), que define a relação da potência aparente efetiva com a potência ativa.

## 6.2.2 Sistema trifásico desequilibrado sem conteúdo harmônico

### 6.2.2.1 Desequilíbrio angular nas correntes

Nesta simulação uma importante condição é mostrada. Refere-se a uma situação hipotética na qual a fase *a* apresenta fasores de tensão e corrente em fase, a fase *b* apresenta o fasor de corrente atrasado  $45^\circ$  em relação ao fasor de tensão e a fase *c* apresenta o fasor de corrente adiantado  $45^\circ$  em relação ao fasor de tensão.

A composição harmônica é indicada na Tabela 15, as formas de onda das tensões e correntes na Figura 13, corrente de neutro na Figura 14 e o resultado da aplicação do algoritmo no cálculo das tensões e correntes é mostrado na Tabela 16.

Tabela 15 - Composição Harmônica das Tensões e Correntes

Ref.:  $V_{a1} = 127,00$  V

<i>h</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{ah}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\alpha_{ah}$ [graus]		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $I_{a1} = 100,00$  A

<i>h</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{ah}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\beta_{ah}$ [graus]		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $V_{b1} = 127,00$  V

<i>h</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{bh}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\alpha_{bh}$ [graus]		240,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $I_{b1} = 100,00$  A

<i>h</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{bh}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\beta_{bh}$ [graus]		195,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $V_{c1} = 127,00$  V

<i>h</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{ch}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\alpha_{ch}$ [graus]		120,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $I_{c1} = 100,00$  A

<i>h</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{ch}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\beta_{ch}$ [graus]		165,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

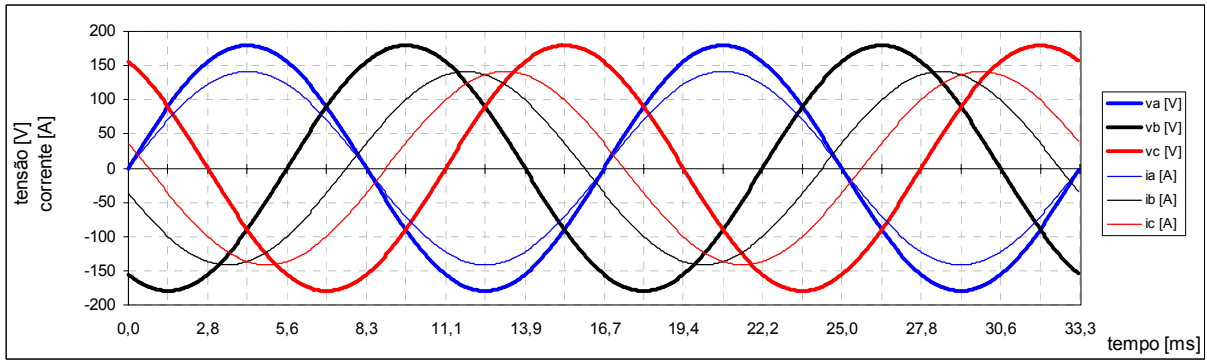


Figura 13 - Formas de onda das tensões e correntes referentes aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 15. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados.  
Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

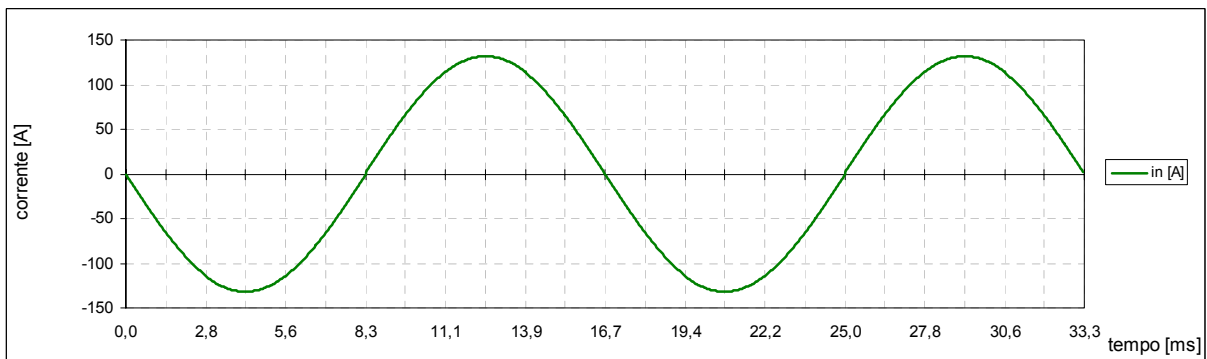


Figura 14 - Forma de onda da corrente de neutro, calculada a partir da soma das correntes das fases, referente à composição harmônica de correntes da Tabela 15. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.  
Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor

Tabela 16 - Tensões, correntes, ângulos e *DHT* - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado		Fundamental			Não-Fundamental				
<b>Tensões</b>	$V_a$	127,00	$V_{a1}$	127,00	$\alpha_{a1}$	0,00	$V_{aH}$	0,00	$DHT_{Va}$	0,0000
$V$ [V]	$V_b$	127,00	$V_{b1}$	127,00	$\alpha_{b1}$	240,00	$V_{bH}$	0,00	$DHT_{Vb}$	0,0000
$\alpha$ [graus]	$V_c$	127,00	$V_{c1}$	127,00	$\alpha_{c1}$	120,00	$V_{cH}$	0,00	$DHT_{Vc}$	0,0000
	$V_{ab}$	219,97	$V_{ab1}$	219,97	$\alpha_{ab1}$	30,00	$V_{abH}$	0,00	$DHT_{Vab}$	0,0000
	$V_{bc}$	219,97	$V_{bc1}$	219,97	$\alpha_{bc1}$	270,00	$V_{bcH}$	0,00	$DHT_{Vbc}$	0,0000
	$V_{ca}$	219,97	$V_{ca1}$	219,97	$\alpha_{ca1}$	150,00	$V_{caH}$	0,00	$DHT_{Vca}$	0,0000
	$V_e$	127,00	$V_{e1}$	127,00			$V_{eH}$	0,00	$DHT_{Ve}$	0,0000
			$V_{1+}$	127,00	$\alpha_{1+}$	0,00				
			$V_{1-}$	0,00	$\alpha_{1-}$	0,00				
			$V_{10}$	0,00	$\alpha_{10}$	0,00				
			$V_{e1cs}$	127,00						
<b>Correntes</b>	$I_a$	100,00	$I_{a1}$	100,00	$\beta_{a1}$	0,00	$I_{aH}$	0,00	$DHT_{Ia}$	0,0000
$I$ [A]	$I_b$	100,00	$I_{b1}$	100,00	$\beta_{b1}$	195,00	$I_{bH}$	0,00	$DHT_{Ib}$	0,0000
$\beta$ [graus]	$I_c$	100,00	$I_{c1}$	100,00	$\beta_{c1}$	165,00	$I_{cH}$	0,00	$DHT_{Ic}$	0,0000
	$I_n$	93,19	$I_{n1}$	93,19	$\beta_{n1}$	180,00	$I_{nH}$	0,00	$DHT_{In}$	0,0000
	$I_e$	113,55	$I_{e1}$	113,55			$I_{eH}$	0,00	$DHT_{Ie}$	0,0000
			$I_{1+}$	80,47	$\beta_{1+}$	0,00				
			$I_{1-}$	50,59	$\beta_{1-}$	0,00				
			$I_{10}$	31,06	$\beta_{10}$	180,00				
			$I_{e1cs}$	113,55						

Valores referentes a uma janela de 12 ciclos com 64 amostras por ciclo da fundamental de 60,00 Hz.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Como pode ser observado, as componentes de seqüência negativa e de seqüência zero da corrente fundamental apresentam valores diferentes de zero. Além disso, no presente caso, a corrente de neutro não é nula.

Na Tabela 17 são mostrados os valores das potências e dos demais fatores obtidos para este caso específico.

Tabela 17 - Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado		Fundamental		Não Fundamental					
<b>Aparente</b> [VA]	$S_a$	12.700,0	$S_{a1}$	12.700,0	$S_{aH}$	0,0	$S_{aN}$	0,0		
	$S_b$	12.700,0	$S_{b1}$	12.700,0	$S_{bH}$	0,0	$S_{bN}$	0,0		
	$S_c$	12.700,0	$S_{c1}$	12.700,0	$S_{cH}$	0,0	$S_{cN}$	0,0		
	$S_e$	43.264,0	$S_{e1}$	43.264,0	$S_{eH}$	0,0	$S_{eN}$	0,0		
	$S_A$	38.100,0	$S_{e1+}$	30.660,5						
			$S_{e1-}$	0,0						
			$S_{e10}$	0,0						
		$SU_1$	30.523,9							
<b>Ativo</b> [W]	$P_a$	12.700,0	$P_{a1}$	12.700,0	$P_{aH}$	0,0				
	$P_b$	8.980,3	$P_{b1}$	8.980,3	$P_{bH}$	0,0				
	$P_c$	8.980,3	$P_{c1}$	8.980,3	$P_{cH}$	0,0				
	$P$	30.660,5	$P_1$	30.660,5	$P_H$	0,0				
			$P_{1+}$	30.660,5						
			$P_{1-}$	0,0						
			$P_{10}$	0,0						
<b>Não Ativo</b> [var]	$N_a$	0,0	$Q_{a1}$	0,0	$D_{aH}$	0,0	$D_{aV}$	0,0	$D_{aI}$	0,0
	$N_b$	8.980,3	$Q_{b1}$	8.980,3	$D_{bH}$	0,0	$D_{bV}$	0,0	$D_{bI}$	0,0
	$N_c$	8.980,3	$Q_{c1}$	-8.980,3	$D_{cH}$	0,0	$D_{cV}$	0,0	$D_{cI}$	0,0
	$N$	30.523,9	$Q_{1+}$	0,0	$D_{eH}$	0,0	$D_{eV}$	0,0	$D_{eI}$	0,0
			$Q_{1-}$	0,0						
			$Q_{10}$	0,0						
<b>Utilização</b>	$P_{Fa}$	1,0000	$P_{Fa1}$	1,0000						
	$P_{Fb}$	0,7071	$P_{Fb1}$	0,7071						
	$P_{Fc}$	0,7071	$P_{Fc1}$	0,7071						
	$P_{Fe}$	0,7087	$P_{F1}$	0,7087						
	$P_{FA}$	0,8047	$P_{F1+}$	1,0000						
			$P_{F1-}$	1,0000						
			$P_{F10}$	1,0000						
<b>Poluição</b>					$S_{aN}/S_{a1}$	0,0000				
					$S_{bN}/S_{b1}$	0,0000				
					$S_{cN}/S_{c1}$	0,0000				
					$S_{eN}/S_{e1}$	0,0000				
<b>Desequilíbrio</b>			$SU_1/S_{1+}$	0,9955						

Valores referentes a uma janela de 12 ciclos com 64 amostras por ciclo da fundamental de 60,00 Hz.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

A comparação entre os diversos fatores de potência obtidos através do método tradicionalmente utilizado, Tabela 18, e os valores dos fatores de potência indicados na Tabela 17, mostra uma importante consequência conceitual da abordagem proposta na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000).

Tabela 18 - Potências e demais fatores - Resultados obtidos a partir da metodologia de abordagem para sistemas com tensão e corrente senoidais

	Convencional	
<b>Aparente</b> [VA]	$S_a$	12.700,0
	$S_b$	12.700,0
	$S_c$	12.700,0
	$S$	30.660,5
<b>Ativo</b> [W]	$P_a$	12.700,0
	$P_b$	8.980,3
	$P_c$	8.980,3
	$P$	30.660,5
<b>Reativo</b> [var]	$Q_a$	0,0
	$Q_b$	8.980,3
	$Q_c$	-8.980,3
	$Q$	0,0
<b>Fatores</b>	$P_{Fa}$	1,00000
	$P_{Fb}$	0,70711
	$P_{Fc}$	0,70711
	$P_F$	1,00000
Ref.: 12 ciclos - 64 amostras/ciclo - 60Hz		

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor

Na abordagem convencional para sistemas com tensões e correntes senoidais, a soma algébrica dos reativos capacitivo (fase  $c$ ) e indutivo (fase  $b$ ) resulta em valor igual a zero e, considerando que o reativo é nulo na fase  $a$ , o valor do fator de potência total é unitário. Este valor unitário é proveniente da relação entre a potência aparente total e a potência ativa total.

Na abordagem proposta na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) o fator de potência referente à parte combinada,  $P_{Fe}$ , é denominado fator de potência efetivo e, para a parte fundamental, fator de potência fundamental,  $P_{F1}$ . Pode ser observado que nenhum desses valores coincide com o valor do fator de potência total,  $P_F$ , calculado pelo método convencional.

Essa diferença reside no fato de que na abordagem proposta na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) para o cálculo da potência aparente efetiva, proveniente da multiplicação da tensão efetiva pela corrente efetiva, são levados em conta não somente os valores das correntes das fases, assim como, também, o valor da corrente de neutro proveniente do desequilíbrio de ângulo ou de módulo dos fasores de corrente. Se considerarmos que, para a carga simulada neste exemplo haveria realmente uma utilização menos otimizada do sistema visto que as fases  $b$  e  $c$  apresentam valores elevados de potência reativa e considerarmos, ainda, que na abordagem convencional o valor do reativo total seria nulo, pode-se concluir que a abordagem indicada pela Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) parece, sob este

aspecto, mais coerente principalmente se for levada em conta a questão da tarifação de reativos. Em suma, para a abordagem proposta, desequilíbrios de carga num sistema de potência implicam em sobre utilização desnecessária do sistema e assim, conseqüentemente, em fatores de utilização menos próximos do valor unitário.

Na Figura 15 podem ser visualizadas as formas de onda das potências instantâneas de cada fase e da potência instantânea total. Para este exemplo, além das oscilações das potências de cada fase, podem ser observadas oscilações nos valores da potência total instantânea. Na Figura 16 é apresentado o respectivo gráfico de transferência de energia para cada fase.

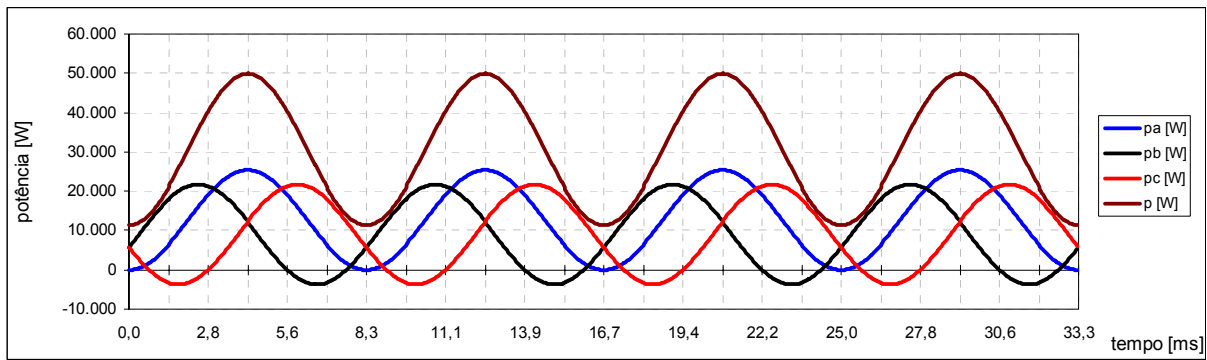


Figura 15 - Formas de onda das potências instantâneas por fase e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicadas na Tabela 15. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

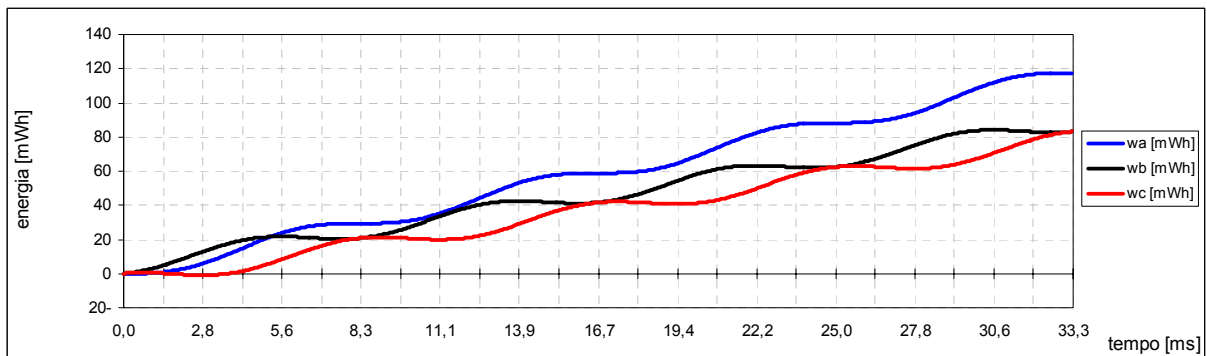


Figura 16 - Formas de onda de transferência de energia em cada uma das fases referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicada na Tabela 15. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Atenção especial deve ser dada ao gráfico da Figura 17 no que se refere ao valor da energia transferida nas fases *b* e *c* em comparação com a energia transferida na fase *a* em  $t=200\text{ms}$ . Uma comparação entre tais valores mostra que a quantidade de energia que flui pelo



sistema é maior na fase *a* do que nas fases *b* e *c* devido à característica puramente ativa da corrente na fase *a*.

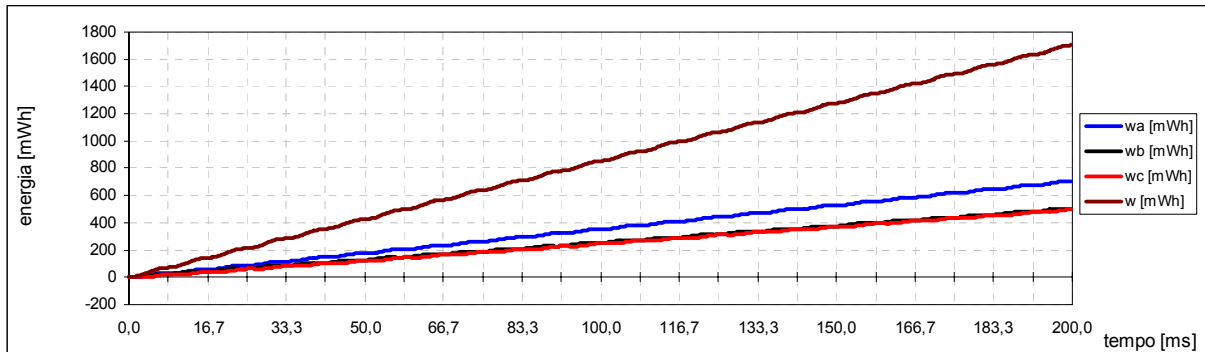


Figura 17 - Formas de onda de transferência de energia em cada uma das fases e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicada na Tabela 15. O período considerado corresponde a 12 ciclos da frequência fundamental

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

#### 6.2.2.2 Desequilíbrio nas correntes, carga ativa

Em função das questões relativas à definição de potência aparente efetiva, um interessante e simples exemplo foi adicionado. Consiste em uma simulação na qual cargas puramente resistivas, porém de diferentes valores por fase, são alimentadas por tensões equilibradas e simétricas. A Tabela 19 mostra os valores dos fasores de tensão e corrente para o caso hipotético citado acima. As formas de ondas das tensões de fase, correntes, corrente de neutro, potências e energia transferida também são fornecidas, respectivamente, nas Figuras 18, 19, 20 e 21.

Tabela 19 - Composição Harmônica das Tensões e Correntes

Ref.:  $V_{a1} = 127,00$  V

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{ah}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\alpha_{ah}$ [graus]		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $I_{a1} = 100,00$  A

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{ah}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\beta_{ah}$ [graus]		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $V_{b1} = 127,00$  V

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{bh}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\alpha_{bh}$ [graus]		240,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $I_{b1} = 60,00$  A

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{bh}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\beta_{bh}$ [graus]		240,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $V_{c1} = 127,00$  V

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{ch}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\alpha_{ch}$ [graus]		120,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $I_{c1} = 140,00$  A

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{ch}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\beta_{ch}$ [graus]		120,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

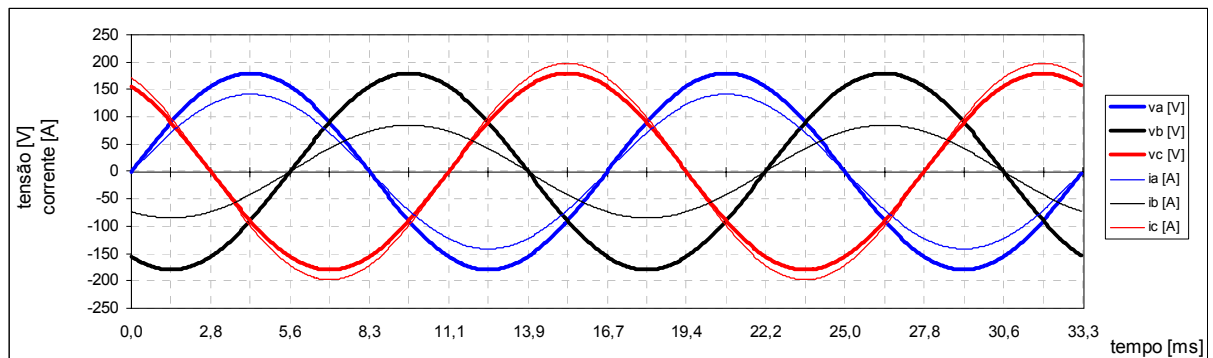


Figura 18 - Formas de onda das tensões e correntes referentes aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 19. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

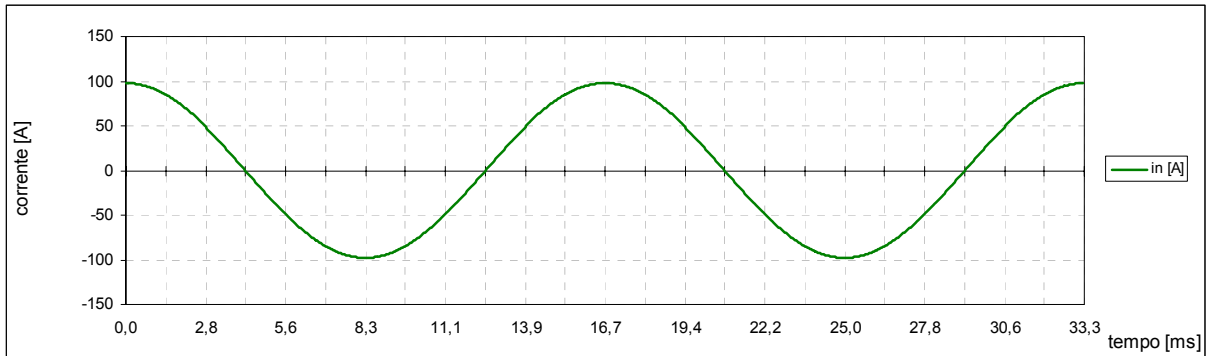


Figura 19 - Forma de onda da corrente de neutro, calculada a partir da soma das correntes das fases, referente à composição harmônica de correntes da Tabela 19. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

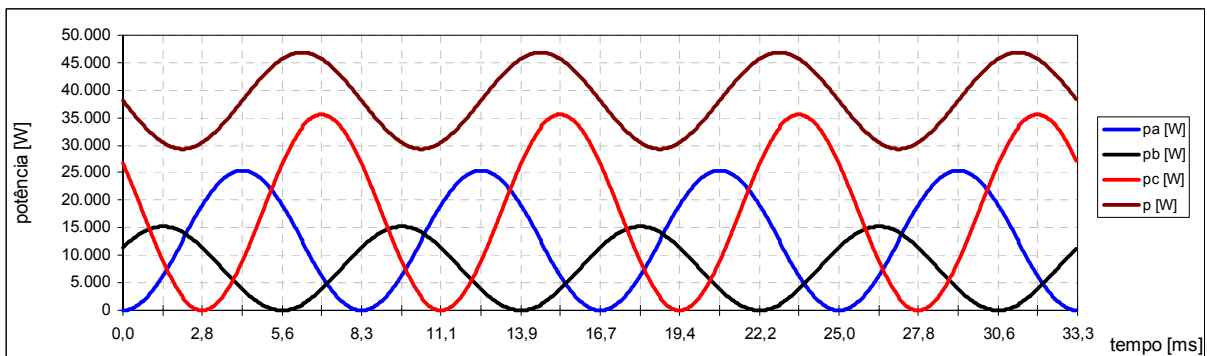


Figura 20 - Formas de onda das potências instantâneas por fase e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicadas na Tabela 19. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

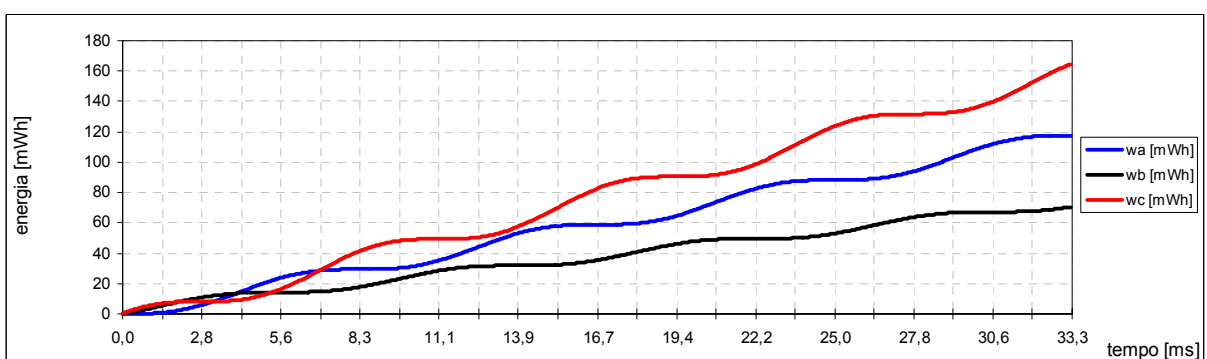


Figura 21 - Formas de onda de transferência de energia em cada uma das fases referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicada na Tabela 19. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Na Tabela 20 os valores obtidos para as tensões e correntes, referentes ao período de janela considerado, são indicados.

Tabela 20 - Tensões, correntes, ângulos e *DHT* - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado		Fundamental			Não-Fundamental				
<b>Tensões</b>	$V_a$	127,00	$V_{a1}$	127,00	$\alpha_{a1}$	0,00	$V_{aH}$	0,00	$DHT_{Va}$	0,0000
$V$ [V]	$V_b$	127,00	$V_{b1}$	127,00	$\alpha_{b1}$	240,00	$V_{bH}$	0,00	$DHT_{Vb}$	0,0000
$\alpha$ [graus]	$V_c$	127,00	$V_{c1}$	127,00	$\alpha_{c1}$	120,00	$V_{cH}$	0,00	$DHT_{Vc}$	0,0000
	$V_{ab}$	219,97	$V_{ab1}$	219,97	$\alpha_{ab1}$	30,00	$V_{abH}$	0,00	$DHT_{Vab}$	0,0000
	$V_{bc}$	219,97	$V_{bc1}$	219,97	$\alpha_{bc1}$	270,00	$V_{bcH}$	0,00	$DHT_{Vbc}$	0,0000
	$V_{ca}$	219,97	$V_{ca1}$	219,97	$\alpha_{ca1}$	150,00	$V_{caH}$	0,00	$DHT_{Vca}$	0,0000
	$V_e$	127,00	$V_{e1}$	127,00			$V_{eH}$	0,00	$DHT_{Ve}$	0,0000
			$V_{1+}$	127,00	$\alpha_{1+}$	0,00				
			$V_{1-}$	0,00	$\alpha_{1-}$	0,00				
			$V_{1o}$	0,00	$\alpha_{1o}$	0,00				
			$V_{e1cs}$	127,00						
<b>Correntes</b>	$I_a$	100,00	$I_{a1}$	100,00	$\beta_{a1}$	0,00	$I_{aH}$	0,00	$DHT_{Ia}$	0,0000
$I$ [A]	$I_b$	60,00	$I_{b1}$	60,00	$\beta_{b1}$	240,00	$I_{bH}$	0,00	$DHT_{Ib}$	0,0000
$\beta$ [graus]	$I_c$	140,00	$I_{c1}$	140,00	$\beta_{c1}$	120,00	$I_{cH}$	0,00	$DHT_{Ic}$	0,0000
	$I_n$	69,28	$I_{n1}$	69,28	$\beta_{n1}$	90,00	$I_{nH}$	0,00	$DHT_{In}$	0,0000
	$I_e$	112,55	$I_{e1}$	112,55			$I_{eH}$	0,00	$DHT_{Ie}$	0,0000
			$I_{1+}$	100,00	$\beta_{1+}$	0,00				
			$I_{1-}$	23,09	$\beta_{1-}$	270,00				
			$I_{1o}$	23,09	$\beta_{1o}$	90,00				
			$I_{e1cs}$	112,55						
Valores referentes a uma janela de 12 ciclos com 64 amostras por ciclo da fundamental de 60,00 Hz.										

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Na comparação entre os valores da Tabela 21, obtidos pelo método tradicionalmente usado, e os valores da Tabela 22 pode ser observado que, mesmo numa situação hipotética na qual as cargas sejam puramente resistivas, o fator de potência fundamental e o fator de potência efetivo calculados segundo a definição da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) apresentam diferenças significativas.

Tabela 21 - Potências e demais fatores - Resultados obtidos a partir da metodologia de abordagem tratada no capítulo 2

	<b>Convencional</b>	
<b>Aparente</b> [VA]	$S_a$	12.700,0
	$S_b$	7.620,0
	$S_c$	17.780,0
	$S$	38.100,0
<b>Ativo</b> [W]	$P_a$	12.700,0
	$P_b$	7.620,0
	$P_c$	17.780,0
	$P$	38.100,0
<b>Reativo</b> [var]	$Q_a$	0,0
	$Q_b$	0,0
	$Q_c$	0,0
	$Q$	0,0
<b>Fatores</b>	$P_{Fa}$	1,00000
	$P_{Fb}$	1,00000
	$P_{Fc}$	1,00000
	$P_F$	1,00000
Ref.: 12 ciclos - 64 amostras/ciclo - 60,00Hz		

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor

Tabela 22 - Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado		Fundamental		Não Fundamental			
<b>Aparente</b> [VA]	$S_a$	12.700,0	$S_{a1}$	12.700,0	$S_{aH}$	0,0	$S_{aN}$	0,0
	$S_b$	7.620,0	$S_{b1}$	7.620,0	$S_{bH}$	0,0	$S_{bN}$	0,0
	$S_c$	17.780,0	$S_{c1}$	17.780,0	$S_{cH}$	0,0	$S_{cN}$	0,0
	$S_e$	42.880,1	$S_{e1}$	42.880,1	$S_{eH}$	0,0	$S_{eN}$	0,0
	$S_A$	38.100,0	$S_{e1+}$	38.100,0				
			$S_{e1-}$	0,0				
			$S_{e10}$	0,0				
		$SU_1$	19.674,8					
<b>Ativo</b> [W]	$P_a$	12.700,0	$P_{a1}$	12.700,0	$P_{aH}$	0,0		
	$P_b$	7.620,0	$P_{b1}$	7.620,0	$P_{bH}$	0,0		
	$P_c$	17.780,0	$P_{c1}$	17.780,0	$P_{cH}$	0,0		
	$P$	38.100,0	$P_1$	38.100,0	$P_H$	0,0		
			$P_{1+}$	38.100,0				
			$P_{1-}$	0,0				
			$P_{10}$	0,0				
<b>Não Ativo</b> [var]	$N_a$	0,0	$Q_{a1}$	0,0	$D_{aH}$	0,0	$D_{aV}$	0,0
	$N_b$	0,0	$Q_{b1}$	0,0	$D_{bH}$	0,0	$D_{bV}$	0,0
	$N_c$	0,0	$Q_{c1}$	0,0	$D_{cH}$	0,0	$D_{cV}$	0,0
	$N$	19.674,8	$Q_{1+}$	0,0	$D_{eH}$	0,0	$D_{eV}$	0,0
			$Q_{1-}$	0,0				
			$Q_{10}$	0,0				
<b>Utilização</b>	$P_{Fa}$	1,0000	$P_{Fa1}$	1,0000				
	$P_{Fb}$	1,0000	$P_{Fb1}$	1,0000				
	$P_{Fc}$	1,0000	$P_{Fc1}$	1,0000				
	$P_{Fe}$	0,8885	$P_{F1}$	0,8885				
	$P_{FA}$	1,0000	$P_{F1+}$	1,0000				
			$P_{F1-}$	1,0000				
			$P_{F10}$	1,0000				
<b>Poluição</b>					$S_{aN}/S_{a1}$	0,0000		
					$S_{bN}/S_{b1}$	0,0000		
					$S_{cN}/S_{c1}$	0,0000		
					$S_{eN}/S_{e1}$	0,0000		
<b>Desequilíbrio</b>			$SU_1/S_{1+}$	0,5164				

Valores referentes a uma janela de 12 ciclos com 64 amostras por ciclo da fundamental de 60,00 Hz.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

A consideração de que um sistema trifásico de tensões equilibradas e cargas puramente resistivas possa apresentar um valor de potência aparente total diferente do valor da potência ativa total e, conseqüentemente, um fator de potência não unitário mostra, de forma clara, a diferença conceitual de potência aparente efetiva quando comparada com a definição de potência aparente total convencional.

Na abordagem proposta na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), o fator de potência fundamental total reflete a diferença de perdas existente entre a situação de desequilíbrio e a situação hipotética na qual a mesma quantidade de energia estivesse sendo transmitida considerando o sistema de cargas plenamente equilibrado. Isso resultaria numa corrente de

neutro nula e, conseqüentemente, inexistência de perdas relacionadas ao fluxo de corrente de neutro. De acordo com a Norma (IEEE, 2000), então, o fator de potência fundamental total equivaleria a um fator de utilização de linha que reflete também o desequilíbrio de carga. No caso em análise somente componentes fundamentais estão presentes, o que implica em que o fator de potência fundamental total seja igual ao fator de potência efetivo. No caso em que componentes harmônicas de ordem  $h \neq 1$  estejam presentes, ainda que somente nas correntes, essa igualdade não mais será verificada. Nos exemplos relativos a sistemas com harmônicas essa situação será exemplificada.

Para o caso de desequilíbrio nas tensões e correntes os resultados serão similares considerando que, dependendo dos valores relativos entre tensão e corrente de cada fase, as oscilações de potência instantânea poderão ser maiores ou menores, levando a uma potência instantânea total com maior ou menor oscilação.

### **6.2.3 Sistema trifásico com conteúdo harmônico**

#### **6.2.3.1 Exemplo geral 1**

O exemplo de simulação a seguir é baseado no exemplo apresentado na seção 6.2.1.1, devido à possibilidade de comparação dos valores obtidos para a parte fundamental. A configuração dos sinais de tensão e corrente fundamentais foi mantida, sendo adicionadas componentes harmônicas de terceira ordem somente nas correntes de forma a produzir sinais idênticos de corrente nas três fases, porém defasados em  $120^\circ$ . A Tabela 23, a seguir, mostra a composição harmônica e a Figura 22 as respectivas formas de onda dos sinais de tensão e corrente.

Tabela 23 - Composição Harmônica das Tensões e Correntes

Ref.:  $V_{a1} = 127,00$  V

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{ah}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\alpha_{ah}$ [graus]		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $I_{a1} = 100,00$  A

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{ah}$ [%]	0,00	100,00	0,00	30,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\beta_{ah}$ [graus]		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $V_{b1} = 127,00$  V

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{bh}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\alpha_{bh}$ [graus]		240,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $I_{b1} = 100,00$  A

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{bh}$ [%]	0,00	100,00	0,00	30,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\beta_{bh}$ [graus]		240,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $V_{c1} = 127,00$  V

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{ch}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\alpha_{ch}$ [graus]		120,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $I_{c1} = 100,00$  A

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{ch}$ [%]	0,00	100,00	0,00	30,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\beta_{ch}$ [graus]		120,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

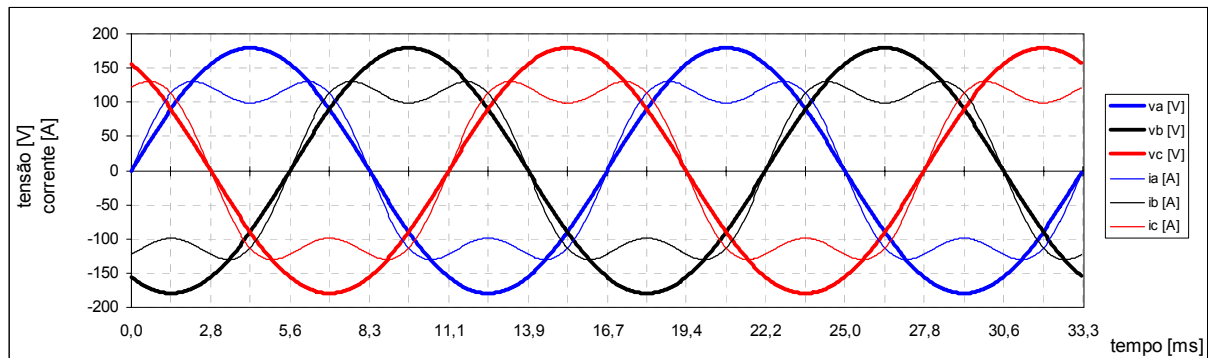


Figura 22 - Formas de onda das tensões e correntes referentes aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 23. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

A corrente de neutro, Figura 23, equivale à soma das correntes das fases. Como o sistema está equilibrado em termos de valores das correntes, a corrente de neutro é formada apenas pelas componentes de ordem  $h=3$  das correntes nas fases.



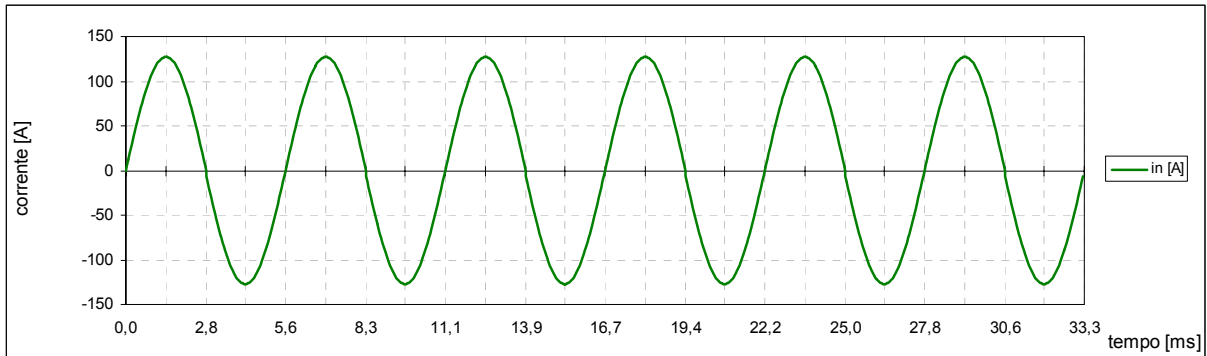


Figura 23 - Forma de onda da corrente de neutro, calculada a partir da soma das correntes das fases, referente à composição harmônica de correntes da Tabela 23. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Independente da adição de harmônicas de corrente, neste caso específico, a potência total instantânea, Figura 24, permanece constante.

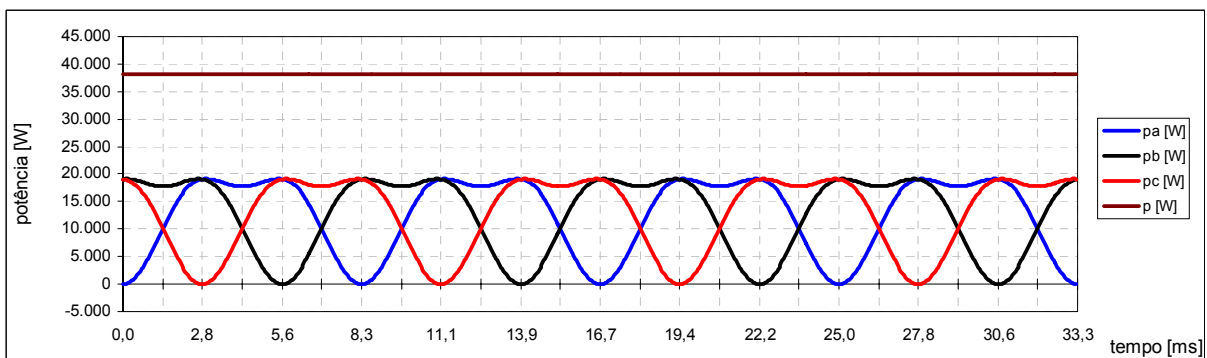


Figura 24 - Formas de onda das potências instantâneas por fase e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicadas na Tabela 23. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Na Figura 25 são mostradas as formas de onda de transferência de energia para cada uma das fases. A transferência de energia total, em função da forma de onda da potência total instantânea, obviamente será também uma reta iniciando no zero e com o valor igual à soma das energias transferidas em cada fase para  $t = 33,3$  ms.

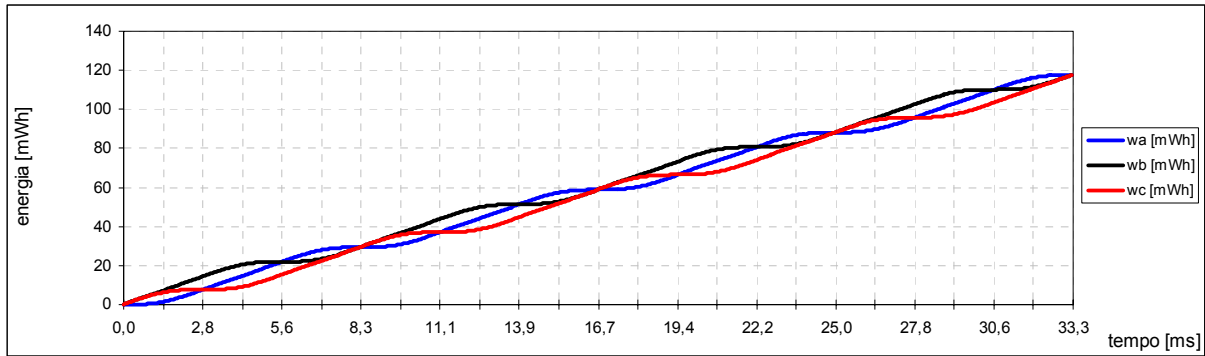


Figura 25 - Formas de onda de transferência de energia em cada uma das fases e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicada na Tabela 23. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

A Tabela 24 deve ser comparada com a Tabela 8, principalmente no que se refere aos valores das correntes, sendo que atenção especial deve ser dada ao valor da corrente efetiva,  $I_e$ . Na avaliação da corrente efetiva, conforme comentado na parte referente à apresentação dos conceitos propostos na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), é levado em conta o valor eficaz da corrente de neutro, independente da frequência que a mesma apresente. Isto não ocorre, no entanto, na avaliação da corrente efetiva fundamental visto que, na avaliação desta, somente componentes com frequência fundamental são consideradas.

A indicação “>500” existente para a distorção harmônica total da corrente de neutro,  $DHT_{In}$ , é uma convenção adotada no desenvolvimento do algoritmo para sinalizar que a componente fundamental da corrente de neutro é muito inferior a componente não fundamental. Nestas situações o índice de distorção harmônica, por apresentar valores muito elevados, perde o significado prático e então a indicação é feita. Em geral medidores e registradores utilizam procedimento similar a este nestas situações. A mesma convenção é adotada para as demais correntes e tensões.

Tabela 24 - Tensões, correntes, ângulos e *DHT* - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado		Fundamental			Não-Fundamental				
<b>Tensões</b>	$V_a$	127,00	$V_{a1}$	127,00	$\alpha_{a1}$	0,00	$V_{aH}$	0,00	$DHT_{Va}$	0,0000
$V$ [V]	$V_b$	127,00	$V_{b1}$	127,00	$\alpha_{b1}$	240,00	$V_{bH}$	0,00	$DHT_{Vb}$	0,0000
$\alpha$ [graus]	$V_c$	127,00	$V_{c1}$	127,00	$\alpha_{c1}$	120,00	$V_{cH}$	0,00	$DHT_{Vc}$	0,0000
	$V_{ab}$	219,97	$V_{ab1}$	219,97	$\alpha_{ab1}$	30,00	$V_{abH}$	0,00	$DHT_{Vab}$	0,0000
	$V_{bc}$	219,97	$V_{bc1}$	219,97	$\alpha_{bc1}$	270,00	$V_{bcH}$	0,00	$DHT_{Vbc}$	0,0000
	$V_{ca}$	219,97	$V_{ca1}$	219,97	$\alpha_{ca1}$	150,00	$V_{caH}$	0,00	$DHT_{Vca}$	0,0000
	$V_e$	127,00	$V_{e1}$	127,00			$V_{eH}$	0,00	$DHT_{Ve}$	0,0000
			$V_{1+}$	127,00	$\alpha_{1+}$	0,00				
			$V_{1-}$	0,00	$\alpha_{1-}$	0,00				
			$V_{10}$	0,00	$\alpha_{10}$	0,00				
			$V_{e1cs}$	127,00						
<b>Correntes</b>	$I_a$	104,40	$I_{a1}$	100,00	$\beta_{a1}$	0,00	$I_{aH}$	30,00	$DHT_{Ia}$	0,3000
$I$ [A]	$I_b$	104,40	$I_{b1}$	100,00	$\beta_{b1}$	240,00	$I_{bH}$	30,00	$DHT_{Ib}$	0,3000
$\beta$ [graus]	$I_c$	104,40	$I_{c1}$	100,00	$\beta_{c1}$	120,00	$I_{cH}$	30,00	$DHT_{Ic}$	0,3000
	$I_n$	90,00	$I_{n1}$	0,00	$\beta_{n1}$	170,17	$I_{nH}$	90,00	$DHT_{In}$	>500
	$I_e$	116,62	$I_{e1}$	100,00			$I_{eH}$	60,00	$DHT_{Ie}$	0,6000
			$I_{1+}$	100,00	$\beta_{1+}$	0,00				
			$I_{1-}$	0,00	$\beta_{1-}$	0,00				
			$I_{10}$	0,00	$\beta_{10}$	0,00				
			$I_{e1cs}$	100,00						

Valores referentes a uma janela de 12 ciclos com 64 amostras por ciclo da fundamental de 60,00 Hz.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

A comparação dos valores para as potências obtidas neste caso, Tabela 25, com os valores da Tabela 9 pode ser feita no sentido de verificar que, como esperado, os valores da coluna Fundamental não se alteram em função da inclusão das correntes harmônicas de terceira ordem. No entanto, diferenças podem ser observadas na coluna Combinado e na coluna Não Fundamental.

O valor da potência aparente efetiva, coluna Combinado, não mantém a igualdade com o valor da potência aparente efetiva fundamental em função do fato de que a potência aparente efetiva corresponde à multiplicação da tensão efetiva pela corrente efetiva e esta última teve seu valor afetado pela inclusão da corrente harmônica de ordem  $h=3$ . A relação estabelecida entre a potência aparente efetiva ( $S_e$ ), a potência aparente efetiva fundamental ( $S_{e1}$ ) e a potência aparente efetiva não fundamental ( $S_{eN}$ ) é dada por um triângulo retângulo cuja hipotenusa é a potência aparente efetiva. Isso pode ser verificado na relação mostrada no quadro 3. O mesmo é válido para as potências aparentes de cada uma das fases.

Tabela 25 - Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado		Fundamental		Não Fundamental					
<b>Aparente</b> [VA]	$S_a$	13.259,2	$S_{a1}$	12.700,0	$S_{aH}$	0,0	$S_{aN}$	3.810,0		
	$S_b$	13.259,2	$S_{b1}$	12.700,0	$S_{bH}$	0,0	$S_{bN}$	3.810,0		
	$S_c$	13.259,2	$S_{c1}$	12.700,0	$S_{cH}$	0,0	$S_{cN}$	3.810,0		
	$S_e$	44.431,9	$S_{e1}$	38.100,0	$S_{eH}$	0,0	$S_{eN}$	22.860,0		
	$S_A$	39.777,6	$S_{e1+}$	38.100,0						
			$S_{e1-}$	0,0						
			$S_{e10}$	0,0						
		$SU_1$	0,0							
<b>Ativo</b> [W]	$P_a$	12.700,0	$P_{a1}$	12.700,0	$P_{aH}$	0,0				
	$P_b$	12.700,0	$P_{b1}$	12.700,0	$P_{bH}$	0,0				
	$P_c$	12.700,0	$P_{c1}$	12.700,0	$P_{cH}$	0,0				
	$P$	38.100,0	$P_1$	38.100,0	$P_H$	0,0				
			$P_{1+}$	38.100,0						
			$P_{1-}$	0,0						
			$P_{10}$	0,0						
<b>Não Ativo</b> [var]	$N_a$	3.810,0	$Q_{a1}$	0,0	$D_{aH}$	0,0	$D_{aV}$	0,0	$D_{aI}$	3.810,0
	$N_b$	3.810,0	$Q_{b1}$	0,0	$D_{bH}$	0,0	$D_{bV}$	0,0	$D_{bI}$	3.810,0
	$N_c$	3.810,0	$Q_{c1}$	0,0	$D_{cH}$	0,0	$D_{cV}$	0,0	$D_{cI}$	3.810,0
	$N$	22.860,0	$Q_1$	0,0	$D_{eH}$	0,0	$D_{eV}$	0,0	$D_{eI}$	22.860,0
			$Q_{1+}$	0,0						
			$Q_{1-}$	0,0						
			$Q_{10}$	0,0						
<b>Utilização</b>	$P_{Fa}$	0,9578	$P_{Fa1}$	1,0000						
	$P_{Fb}$	0,9578	$P_{Fb1}$	1,0000						
	$P_{Fc}$	0,9578	$P_{Fc1}$	1,0000						
	$P_{Fe}$	0,8575	$P_{F1}$	1,0000						
	$P_{FA}$	0,9578	$P_{F1+}$	1,0000						
			$P_{F1-}$	1,0000						
			$P_{F10}$	1,0000						
<b>Poluição</b>					$S_{aN}/S_{a1}$	0,3000				
					$S_{bN}/S_{b1}$	0,3000				
					$S_{cN}/S_{c1}$	0,3000				
					$S_{eN}/S_{e1}$	0,6000				
<b>Desequilíbrio</b>			$SU_1/S_{1+}$	0,0000						

Valores referentes a uma janela de 12 ciclos com 64 amostras por ciclo da fundamental de 60,00 Hz.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Pode ser observado que o valor de  $D_{eI}$ , definido como potência efetiva de distorção de corrente, reflete a inserção da componente harmônica nas correntes das fases, visto que esta potência equivale a três vezes o valor da corrente efetiva fundamental multiplicada pelo valor da tensão efetiva fundamental. Os respectivos valores por fase têm composição análoga, porém não são multiplicados por três. Como não temos, neste exemplo, distorção harmônica nas tensões, os valores de potência de distorção harmônica de tensão são nulos ( $D_{eV} = D_{aV} = D_{bV} = D_{cV} = 0$ ).

A possibilidade de considerar questões relativas ao faturamento de excedentes harmônicos tendo como base esses valores, em princípio, não parece plausível. No caso

hipotético de uma fonte de tensão que apresente distorção harmônica estar alimentando uma carga puramente resistiva os valores de potência efetiva de distorção de tensão e de potência efetiva de distorção de corrente não serão nulos, porém ambos serão causados pelo fato de existir distorção na tensão. De forma análoga, dependendo do valor da impedância associada aos condutores da linha de alimentação, a distorção harmônica de corrente poderia afetar a forma de onda da tensão causando nela uma distorção. Neste caso, também os valores de potência de distorção de corrente e de tensão não seriam nulos devido a uma relação de causa e efeito existente. Considerando então situações práticas não seria possível concluir, a priori, que o valor de potência de distorção de corrente tenha como única causa a distorção harmônica da corrente independentemente da tensão ou vice-versa.

Na Tabela 26, a seguir, são mostrados os valores obtidos através do método convencional. Neste caso, em função do fato de que não há desequilíbrio de correntes ou tensões no sistema, sejam angulares ou de módulo, o valor da potência aparente total calculado pelo método convencional corresponde ao valor da potência aparente efetiva fundamental.

Tabela 26 - Potências e demais fatores - Resultados obtidos a partir da metodologia de abordagem tradicionalmente utilizada

	Convencional	
<b>Aparente</b> [VA]	$S_a$	12.700,0
	$S_b$	12.700,0
	$S_c$	12.700,0
	$S$	38.100,0
<b>Ativo</b> [W]	$P_a$	12.700,0
	$P_b$	12.700,0
	$P_c$	12.700,0
	$P$	38.100,0
<b>Reativo</b> [var]	$Q_a$	0,0
	$Q_b$	0,0
	$Q_c$	0,0
	$Q$	0,0
<b>Fatores</b>	$P_{Fa}$	1,00000
	$P_{Fb}$	1,00000
	$P_{Fc}$	1,00000
	$P_F$	1,00000
Ref.: 12 ciclos - 64 amostras/ciclo - 60,00Hz		

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Uma comparação dos valores fornecidos na Tabela 25 com os valores fornecidos na Tabela 26 permite também algumas considerações. Os valores das potências reativas são

nulos. Neste caso, ao tomarmos como base a relação convencional entre potência aparente, potência reativa e ativa, considerando a abordagem convencional teremos os valores de potência aparente iguais aos valores de potência ativa, tanto para cada uma das fases como para os valores totais. No entanto, se considerarmos também que pela abordagem convencional o valor da potência aparente em cada fase é dado pela multiplicação entre o valor eficaz de corrente e o valor eficaz de tensão, uma incoerência será encontrada. Essa incoerência, neste caso, apareceria em função da distorção harmônica da corrente, conforme exemplificado no Capítulo 2. Por esse motivo, para sistemas com conteúdo harmônico ainda que somente na corrente, as relações convencionais envolvendo as diversas potências não são mais totalmente aplicáveis. Se considerarmos que as mesmas continuam válidas somente no que se refere às componentes fundamentais teremos, então, que separar essas componentes fundamentais das componentes harmônicas, sendo isto justamente a proposição da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000). Para sistemas trifásicos, no entanto, em função da definição de potência aparente efetiva, conforme já discutido nos exemplos anteriores, algumas diferenças em relação à abordagem convencional podem ser verificadas ainda que considerada somente a parte fundamental dos sinais.

A relação entre a potência aparente ( $S$ ), potência ativa ( $P$ ) e potência não ativa ( $N$ ) para cada uma das fases corresponde às relações verificadas para um triângulo retângulo cuja hipotenusa é a potência aparente. Isto também é válido para os valores efetivos. Ao considerar o valor da potência aparente como o resultado da multiplicação do valor da corrente eficaz pelo valor da tensão eficaz, levando em conta o valor da potência ativa, pode ser calculado o valor de potência não ativa ( $N$ ), assim como os respectivos fatores de potência. No entanto, os valores de potência não ativa calculados desta forma não correspondem aos valores tradicionalmente conhecidos como reativos e passíveis de compensação, por exemplo, através da inserção de capacitores. O valor de  $N$  não significa então, obrigatoriamente, uma possível característica indutiva ou capacitiva da carga na frequência característica do sistema.

#### 6.2.3.2 Exemplo geral 2

Para este exemplo será considerado como base o exemplo anterior, porém com a adição de conteúdo harmônico de ordem  $h=3$  nas tensões de fase. A distribuição harmônica é feita de

tal forma a manter simetria nas três fases do sistema. O valor percentual de 5% para a tensão harmônica de terceira ordem foi escolhido de forma aleatória.

A composição harmônica, a forma de onda das tensões e correntes, forma de onda da corrente de neutro e as formas de onda das potências instantâneas são mostradas a seguir na Tabela 27, Figura 26, Figura 27 e Figura 28 respectivamente.

Tabela 27 - Composição Harmônica das Tensões e Correntes

Ref.:  $V_{a1} = 127,00$  V

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{ah}$ [%]	0,00	100,00	0,00	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\alpha_{ah}$ [graus]		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $I_{a1} = 100,00$  A

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{ah}$ [%]	0,00	100,00	0,00	30,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\beta_{ah}$ [graus]		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $V_{b1} = 127,00$  V

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{bh}$ [%]	0,00	100,00	0,00	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\alpha_{bh}$ [graus]		240,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $I_{b1} = 100,00$  A

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{bh}$ [%]	0,00	100,00	0,00	30,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\beta_{bh}$ [graus]		240,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $V_{c1} = 127,00$  V

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{ch}$ [%]	0,00	100,00	0,00	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\alpha_{ch}$ [graus]		120,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $I_{c1} = 100,00$  A

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{ch}$ [%]	0,00	100,00	0,00	30,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\beta_{ch}$ [graus]		120,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor

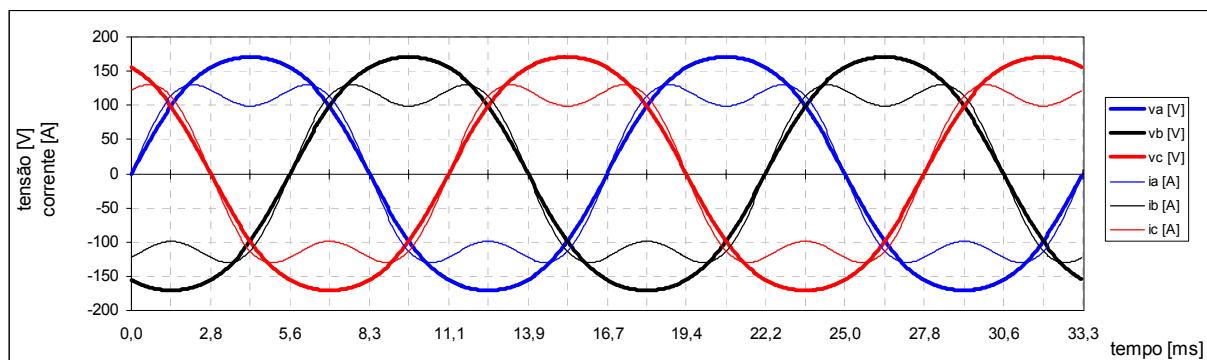


Figura 26 - Formas de onda das tensões e correntes referentes aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 27. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

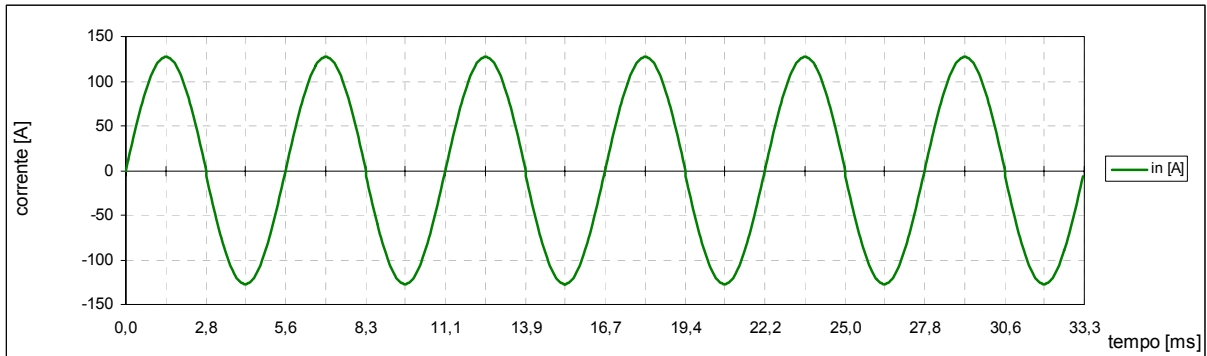


Figura 27 - Forma de onda da corrente de neutro, calculada a partir da soma das correntes das fases, referente à composição harmônica de correntes da Tabela 27. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

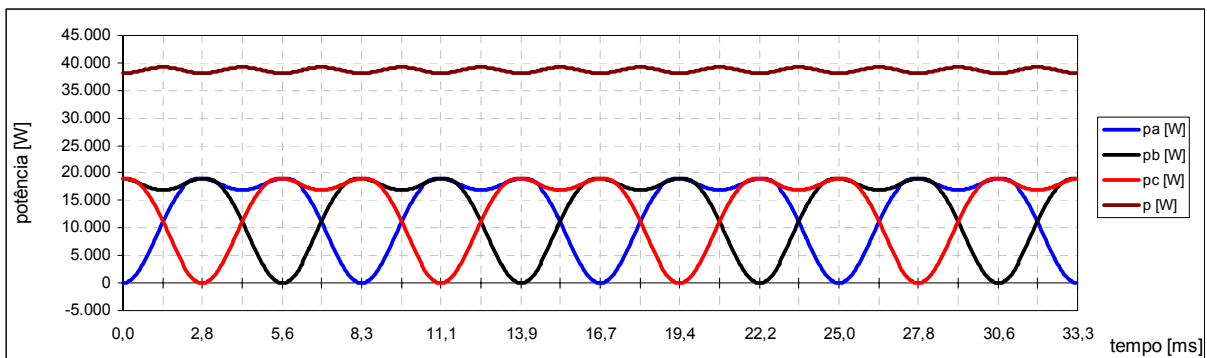


Figura 28 - Formas de onda das potências instantâneas por fase e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicadas na Tabela 27. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Os valores obtidos para as tensões e correntes eficazes assim como para as distorções harmônicas totais são mostrados na Tabela 28.



Tabela 28 - Tensões, correntes, ângulos e *DHT* - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado		Fundamental			Não-Fundamental				
<b>Tensões</b> <i>V</i> [V] $\alpha$ [graus]	$V_a$	127,16	$V_{a1}$	127,00	$\alpha_{a1}$	0,00	$V_{aH}$	6,35	$DHT_{Va}$	0,0500
	$V_b$	127,16	$V_{b1}$	127,00	$\alpha_{b1}$	240,00	$V_{bH}$	6,35	$DHT_{Vb}$	0,0500
	$V_c$	127,16	$V_{c1}$	127,00	$\alpha_{c1}$	120,00	$V_{cH}$	6,35	$DHT_{Vc}$	0,0500
	$V_{ab}$	219,97	$V_{ab1}$	219,97	$\alpha_{ab1}$	30,00	$V_{abH}$	0,00	$DHT_{Vab}$	0,0000
	$V_{bc}$	219,97	$V_{bc1}$	219,97	$\alpha_{bc1}$	270,00	$V_{bcH}$	0,00	$DHT_{Vbc}$	0,0000
	$V_{ca}$	219,97	$V_{ca1}$	219,97	$\alpha_{ca1}$	150,00	$V_{caH}$	0,00	$DHT_{Vca}$	0,0000
	$V_e$	127,08	$V_{e1}$	127,00			$V_{eH}$	4,49	$DHT_{Ve}$	0,0354
			$V_{1+}$	127,00	$\alpha_{1+}$	0,00				
			$V_{1-}$	0,00	$\alpha_{1-}$	0,00				
			$V_{10}$	0,00	$\alpha_{10}$	0,00				
		$V_{e1cs}$	127,00							
<b>Correntes</b> <i>I</i> [A] $\beta$ [graus]	$I_a$	104,40	$I_{a1}$	100,00	$\beta_{a1}$	0,00	$I_{aH}$	30,00	$DHT_{Ia}$	0,3000
	$I_b$	104,40	$I_{b1}$	100,00	$\beta_{b1}$	240,00	$I_{bH}$	30,00	$DHT_{Ib}$	0,3000
	$I_c$	104,40	$I_{c1}$	100,00	$\beta_{c1}$	120,00	$I_{cH}$	30,00	$DHT_{Ic}$	0,3000
	$I_n$	90,00	$I_{n1}$	0,00	$\beta_{n1}$	170,17	$I_{nH}$	90,00	$DHT_{In}$	>500
	$I_e$	116,62	$I_{e1}$	100,00			$I_{eH}$	60,00	$DHT_{Ie}$	0,6000
			$I_{1+}$	100,00	$\beta_{1+}$	0,00				
			$I_{1-}$	0,00	$\beta_{1-}$	0,00				
			$I_{10}$	0,00	$\beta_{10}$	0,00				
		$I_{e1cs}$	100,00							

Valores referentes a uma janela de 12 ciclos com 64 amostras por ciclo da fundamental de 60,00 Hz.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Na Tabela 29 são mostradas as potências e demais fatores. Neste caso, em função da existência de componentes harmônicas nas tensões e nas correntes, podem ser observados valores não nulos para as potências ativas harmônicas nas fases ( $P_{aH}$ ,  $P_{bH}$ ,  $P_{cH}$ ), total ( $P_H$ ), potência aparente harmônica nas fases ( $S_{aH}$ ,  $S_{bH}$ ,  $S_{cH}$ ) e efetiva ( $S_{eH}$ ).

Tabela 29 - Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado	Fundamental	Não Fundamental		
<b>Aparente</b> [VA]	$S_a$ 13.275,8	$S_{a1}$ 12.700,0	$S_{aH}$ 190,5	$S_{aN}$ 3.867,2	
	$S_b$ 13.275,8	$S_{b1}$ 12.700,0	$S_{bH}$ 190,5	$S_{bN}$ 3.867,2	
	$S_c$ 13.275,8	$S_{c1}$ 12.700,0	$S_{cH}$ 190,5	$S_{cN}$ 3.867,2	
	$S_e$ 44.459,6	$S_{e1}$ 38.100,0	$S_{eH}$ 808,2	$S_{eN}$ 22.913,9	
	$S_A$ 39.827,3	$S_{e1+}$ 38.100,0			
		$S_{e1-}$ 0,0			
		$S_{e10}$ 0,0			
		$SU_1$ 0,0			
<b>Ativo</b> [W]	$P_a$ 12.890,5	$P_{a1}$ 12.700,0	$P_{aH}$ 190,5		
	$P_b$ 12.890,5	$P_{b1}$ 12.700,0	$P_{bH}$ 190,5		
	$P_c$ 12.890,5	$P_{c1}$ 12.700,0	$P_{cH}$ 190,5		
	$P$ 38.671,5	$P_1$ 38.100,0	$P_H$ 571,5		
		$P_{1+}$ 38.100,0			
		$P_{1-}$ 0,0			
	$P_{10}$ 0,0				
<b>Não Ativo</b> [var]	$N_a$ 3.175,0	$Q_{a1}$ 0,0	$D_{aH}$ 0,0	$D_{aV}$ 635,0	$D_{aI}$ 3.810,0
	$N_b$ 3.175,0	$Q_{b1}$ 0,0	$D_{bH}$ 0,0	$D_{bV}$ 635,0	$D_{bI}$ 3.810,0
	$N_c$ 3.175,0	$Q_{c1}$ 0,0	$D_{cH}$ 0,0	$D_{cV}$ 635,0	$D_{cI}$ 3.810,0
	$N$ 21.935,6		$D_{eH}$ 571,5	$D_{eV}$ 1.347,0	$D_{eI}$ 22.860,0
		$Q_{1+}$ 0,0			
		$Q_{1-}$ 0,0			
		$Q_{10}$ 0,0			
<b>Utilização</b>	$P_{Fa}$ 0,9710	$P_{Fa1}$ 1,0000			
	$P_{Fb}$ 0,9710	$P_{Fb1}$ 1,0000			
	$P_{Fc}$ 0,9710	$P_{Fc1}$ 1,0000			
	$P_{Fe}$ 0,8698	$P_{F1}$ 1,0000			
	$P_{FA}$ 0,9710	$P_{F1+}$ 1,0000			
		$P_{F1-}$ 1,0000			
		$P_{F10}$ 1,0000			
<b>Poluição</b>			$S_{aN}/S_{a1}$ 0,3045		
			$S_{bN}/S_{b1}$ 0,3045		
			$S_{cN}/S_{c1}$ 0,3045		
			$S_{eN}/S_{e1}$ 0,6014		
<b>Desequilíbrio</b>		$SU_1/S_{1+}$ 0,0000			

Valores referentes a uma janela de 12 ciclos com 64 amostras por ciclo da fundamental de 60,00 Hz.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

A potência de distorção harmônica efetiva ( $D_{eH}$ ) também não é nula mas os respectivos valores das fases são nulos. Esta é uma característica interessante da abordagem utilizada. Como na composição harmônica somente são verificadas componentes harmônicas de ordem  $h=3$ , neste caso temos  $S_{eH} \neq P_H$  justamente porque no condutor de neutro as componentes harmônicas de corrente de terceira ordem estão em fase e se somam, levando a um maior valor de potência aparente efetiva harmônica. Isto acontece para componentes harmônicos de ordem múltipla de três. Obviamente estas considerações são válidas para situações em que a composição harmônica da corrente é igual para as três fases, produzindo ondas de corrente de mesma forma mas defasadas em  $120^\circ$ , não sendo válidas para situações em que, para cada

fase, haja defasagem entre a componente harmônica de tensão e a respectiva componente harmônica de corrente.

Se, por exemplo, no lugar de harmônicas de terceira ordem nas tensões e correntes tivéssemos harmônicas de quinta ordem, esta nova situação análoga a anterior apresentaria valor de potência harmônica igual ao valor de potência aparente efetiva harmônica e conseqüentemente  $D_{eH} = 0$ . Esta nova situação é mostrada a seguir através da nova composição harmônica e através das formas de onda e dos resultados obtidos. Essas tabelas e gráficos devem ser comparados com os gráficos e tabelas do exemplo tratado anteriormente.

Tabela 30 - Composição Harmônica das Tensões e Correntes

Ref.:  $V_{a1} = 127,00$  V

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{ah}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\alpha_{ah}$ [graus]		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $I_{a1} = 100,00$  A

$h$	0	1	2	4	4	5	6	7	8	9
$I_{ah}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	30,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\beta_{ah}$ [graus]		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $V_{b1} = 127,00$  V

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{bh}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\alpha_{bh}$ [graus]		240,00	0,00	0,00	0,00	120,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $I_{b1} = 100,00$  A

$h$	0	1	2	4	4	5	6	7	8	9
$I_{bh}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	30,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\beta_{bh}$ [graus]		240,00	0,00	0,00	0,00	120,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $V_{c1} = 127,00$  V

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{ch}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\alpha_{ch}$ [graus]		120,00	0,00	0,00	0,00	240,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ref.:  $I_{c1} = 100,00$  A

$h$	0	1	2	4	4	5	6	7	8	9
$I_{ch}$ [%]	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	30,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\beta_{ch}$ [graus]		120,00	0,00	0,00	0,00	240,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

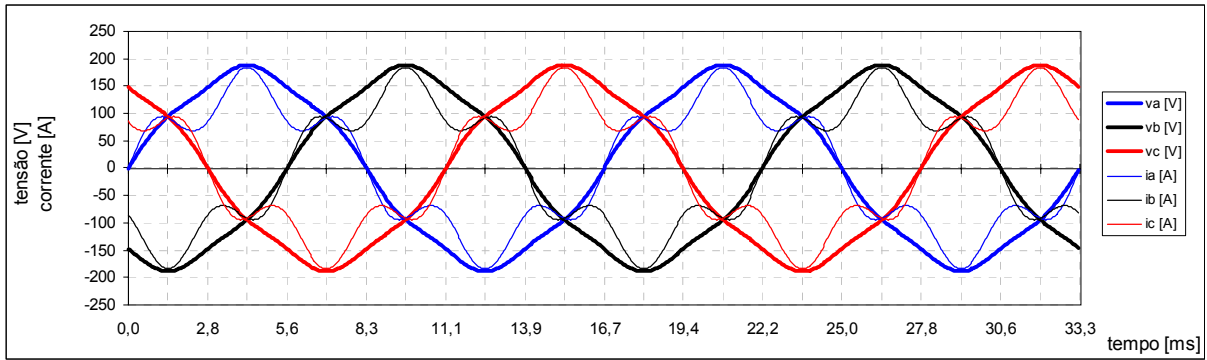


Figura 29 - Formas de onda das tensões e correntes referentes aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 30. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados.  
Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

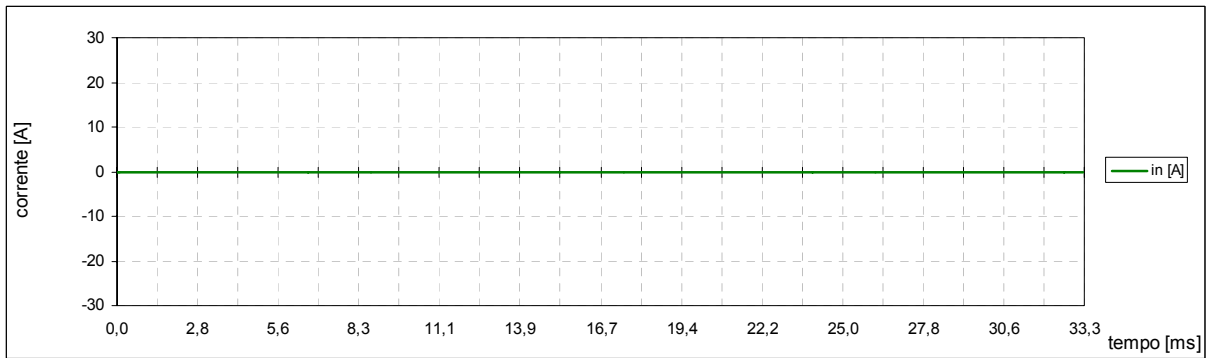


Figura 30 - Forma de onda da corrente de neutro, calculada a partir da soma das correntes das fases, referente à composição harmônica de correntes da Tabela 30. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.  
Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Tabela 31 - Tensões, correntes, ângulos e *DHT* - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado		Fundamental			Não-Fundamental				
<b>Tensões</b> <i>V</i> [V] $\alpha$ [graus]	$V_a$	127,16	$V_{a1}$	127,00	$\alpha_{a1}$	0,00	$V_{aH}$	6,35	$DHT_{Va}$	0,0500
	$V_b$	127,16	$V_{b1}$	127,00	$\alpha_{b1}$	240,00	$V_{bH}$	6,35	$DHT_{Vb}$	0,0500
	$V_c$	127,16	$V_{c1}$	127,00	$\alpha_{c1}$	120,00	$V_{cH}$	6,35	$DHT_{Vc}$	0,0500
	$V_{ab}$	220,25	$V_{ab1}$	219,97	$\alpha_{ab1}$	30,00	$V_{abH}$	11,00	$DHT_{Vab}$	0,0500
	$V_{bc}$	220,25	$V_{bc1}$	219,97	$\alpha_{bc1}$	270,00	$V_{bcH}$	11,00	$DHT_{Vbc}$	0,0500
	$V_{ca}$	220,25	$V_{ca1}$	219,97	$\alpha_{ca1}$	150,00	$V_{caH}$	11,00	$DHT_{Vca}$	0,0500
	$V_e$	127,16	$V_{e1}$	127,00			$V_{eH}$	6,35	$DHT_{Ve}$	0,0500
			$V_{1+}$	127,00	$\alpha_{1+}$	0,00				
			$V_{1-}$	0,00	$\alpha_{1-}$	0,00				
			$V_{1o}$	0,00	$\alpha_{1o}$	0,00				
		$V_{e1cs}$	127,00							
<b>Correntes</b> <i>I</i> [A] $\beta$ [graus]	$I_a$	104,40	$I_{a1}$	100,00	$\beta_{a1}$	0,00	$I_{aH}$	30,00	$DHT_{Ia}$	0,3000
	$I_b$	104,40	$I_{b1}$	100,00	$\beta_{b1}$	240,00	$I_{bH}$	30,00	$DHT_{Ib}$	0,3000
	$I_c$	104,40	$I_{c1}$	100,00	$\beta_{c1}$	120,00	$I_{cH}$	30,00	$DHT_{Ic}$	0,3000
	$I_n$	0,00	$I_{n1}$	0,00	$\beta_{n1}$	0,00	$I_{nH}$	0,00	$DHT_{In}$	fund=0
	$I_e$	104,40	$I_{e1}$	100,00			$I_{eH}$	30,00	$DHT_{Ie}$	0,3000
			$I_{1+}$	100,00	$\beta_{1+}$	0,00				
			$I_{1-}$	0,00	$\beta_{1-}$	0,00				
			$I_{1o}$	0,00	$\beta_{1o}$	0,00				
		$I_{e1cs}$	100,00							

Valores referentes a uma janela de 12 ciclos com 64 amostras por ciclo da fundamental de 60,00 Hz.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Neste caso, o valor da corrente efetiva corresponde ao valor de corrente nas fases. A soma das componentes harmônicas de corrente no neutro resulta em um valor nulo conforme pode ser verificado na Figura 30.

Tabela 32 - Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado		Fundamental		Não Fundamental					
<b>Aparente</b> [VA]	$S_a$	13.275,8	$S_{a1}$	12.700,0	$S_{aH}$	190,5	$S_{aN}$	3.867,2		
	$S_b$	13.275,8	$S_{b1}$	12.700,0	$S_{bH}$	190,5	$S_{bN}$	3.867,2		
	$S_c$	13.275,8	$S_{c1}$	12.700,0	$S_{cH}$	190,5	$S_{cN}$	3.867,2		
	$S_e$	39.827,3	$S_{e1}$	38.100,0	$S_{eH}$	571,5	$S_{eN}$	11.601,7		
	$S_A$	39.827,3	$S_{e1+}$	38.100,0						
			$S_{e1-}$	0,0						
			$S_{e10}$	0,0						
		$S_{U1}$	0,0							
<b>Ativo</b> [W]	$P_a$	12.890,5	$P_{a1}$	12.700,0	$P_{aH}$	190,5				
	$P_b$	12.890,5	$P_{b1}$	12.700,0	$P_{bH}$	190,5				
	$P_c$	12.890,5	$P_{c1}$	12.700,0	$P_{cH}$	190,5				
	$P$	38.671,5	$P_1$	38.100,0	$P_H$	571,5				
			$P_{1+}$	38.100,0						
			$P_{1-}$	0,0						
			$P_{10}$	0,0						
<b>Não Ativo</b> [var]	$N_a$	3.175,0	$Q_{a1}$	0,0	$D_{aH}$	0,0	$D_{aV}$	635,0	$D_{aI}$	3.810,0
	$N_b$	3.175,0	$Q_{b1}$	0,0	$D_{bH}$	0,0	$D_{bV}$	635,0	$D_{bI}$	3.810,0
	$N_c$	3.175,0	$Q_{c1}$	0,0	$D_{cH}$	0,0	$D_{cV}$	635,0	$D_{cI}$	3.810,0
	$N$	9.525,0	$Q_1$	0,0	$D_{eH}$	0,0	$D_{eV}$	1.905,0	$D_{eI}$	11.430,0
			$Q_{1+}$	0,0						
			$Q_{1-}$	0,0						
			$Q_{10}$	0,0						
<b>Utilização</b>	$P_{Fa}$	0,9710	$P_{Fa1}$	1,0000						
	$P_{Fb}$	0,9710	$P_{Fb1}$	1,0000						
	$P_{Fc}$	0,9710	$P_{Fc1}$	1,0000						
	$P_{Fe}$	0,9710	$P_{F1}$	1,0000						
	$P_{FA}$	0,9710	$P_{F1+}$	1,0000						
			$P_{F1-}$	1,0000						
			$P_{F10}$	1,0000						
<b>Poluição</b>					$S_{aN}/S_{a1}$	0,3045				
					$S_{bN}/S_{b1}$	0,3045				
					$S_{cN}/S_{c1}$	0,3045				
					$S_{eN}/S_{e1}$	0,3045				
<b>Desequilíbrio</b>			$S_{U1}/S_{1+}$	0,0000						

Valores referentes a uma janela de 12 ciclos com 64 amostras por ciclo da fundamental de 60,00 Hz.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

#### 6.2.4 Comentários gerais sobre os testes e simulações iniciais

Estas simulações iniciais visavam apenas apresentar as tabelas de resultados de forma a mostrar algumas características das mesmas. Alguns comentários foram feitos no sentido de também mostrar aspectos interessantes da abordagem proposta. A apresentação dos gráficos de forma de onda teve como objetivo principal a visualização dos sinais para os quais estão sendo aplicados os novos conceitos. Obviamente que se forem consideradas as inúmeras

diferentes composições harmônicas e os diferentes tipos de desequilíbrio aplicáveis teremos um grande número de simulações possíveis. Nos exemplos mostrados nos testes comparativos e práticos a seguir, obtidos a partir de situações reais, os efeitos oriundos de desequilíbrios e distorções harmônicas aparecem de forma conjunta.

### 6.3 TESTES COMPARATIVOS

Os testes comparativos têm por base os exemplos teórico-práticos de aplicação dos conceitos fornecidos no Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000). Cada um desses exemplos práticos é composto, basicamente, de uma tabela de composição harmônica dos sinais de tensão e corrente, alguns cálculos intermediários e de uma tabela com os resultados encontrados para as diversas potências e fatores referentes à composição harmônica fornecida. Em geral os valores das potências são fornecidos na resolução proposta como percentuais da potência aparente fundamental para os casos monofásicos e como percentuais da potência aparente efetiva fundamental para os casos trifásicos.

Para testar o algoritmo foram utilizadas, como base de entrada de dados, as mesmas tabelas de composição harmônica fornecidas em cada exemplo tratado no Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000). As formas de onda das tensões e correntes foram geradas a partir das tabelas fornecidas e posteriormente amostradas. Os cálculos das potências e fatores foram feitos a partir dos valores amostrados das tensões e correntes. Este procedimento é idêntico ao utilizado nos testes e simulações iniciais, seguindo o esquema geral apresentado na Figura 4.

Para realizar a comparação entre o valor de cada variável, obtido pelo algoritmo desenvolvido, com o valor da respectiva variável proveniente da resolução do exemplo proposto no Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) é feita uma divisão do valor obtido pelo proposto e o resultado da comparação fornecido em pu, conforme indicado em (6.1).

$$\text{Valor de Comparação [pu]} = (\text{Valor Obtido})/(\text{Valor Proposto no Exemplo}) \quad (6.1)$$

### 6.3.1 Exemplo 1

A Tabela 33 mostra a composição harmônica dos sinais de tensão e corrente referente ao exemplo teórico A.1 apresentado no Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000). Neste caso, o estudo de uma carga monofásica não linear é feito. Como se trata um sistema monofásico, a entrada de dados no algoritmo desenvolvido foi feita somente para a fase  $a$ .

Tabela 33 - Composição Harmônica das Tensões e Correntes

Ref.:  $V_{a1} = 110,09$  V

$h$	0	1	3	5	7	9	11	13	15
$V_{ah}$ [%]	0,00	100,00	5,98	1,74	2,00	1,15	1,14	0,85	0,89
$\alpha_{ah}$ [graus]		23,80	-39,12	173,30	21,39	-120,10	87,24	-60,68	156,40

Ref.:  $I_{a1} = 11,17$  A

$h$	0	1	3	5	7	9	11	13	15
$I_{ah}$ [%]	0,00	100,00	51,20	12,78	12,47	5,38	5,51	3,10	3,04
$\beta_{ah}$ [graus]		-23,31	115,70	-43,38	161,30	16,11	-141,80	82,66	-79,19

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

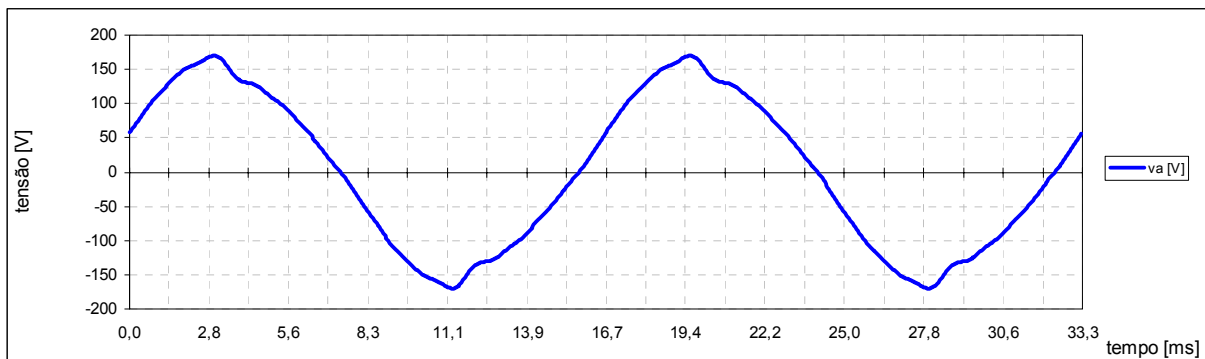


Figura 31 - Forma de onda da tensão referente aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 33. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.



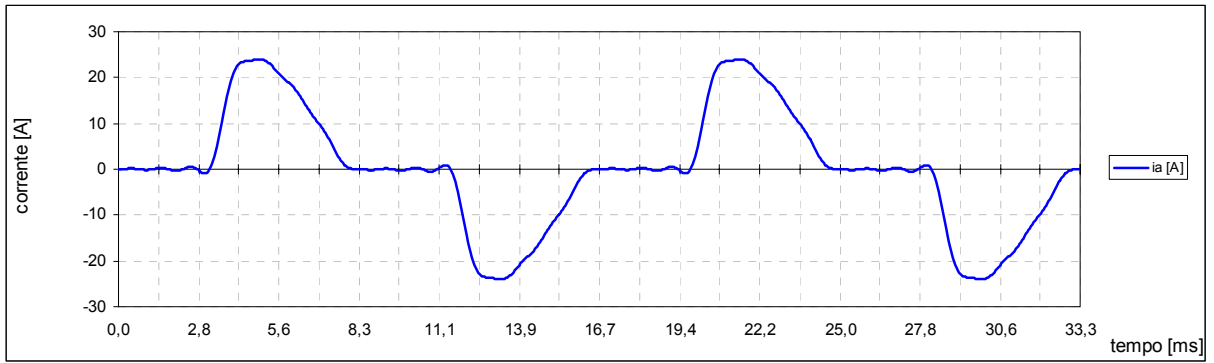


Figura 32 - Forma de onda da corrente referente aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 33. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados.  
Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

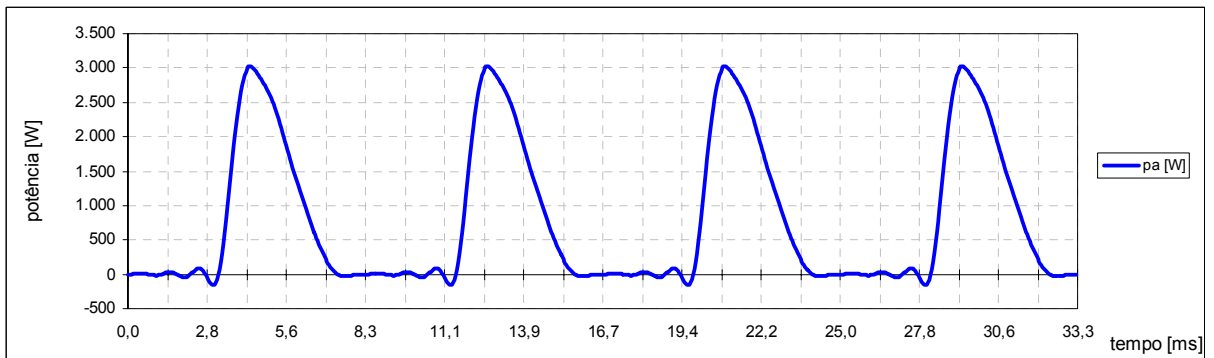


Figura 33 - Forma de onda da potência instantânea referente à composição harmônica de tensão e corrente indicada na Tabela 33. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.  
Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

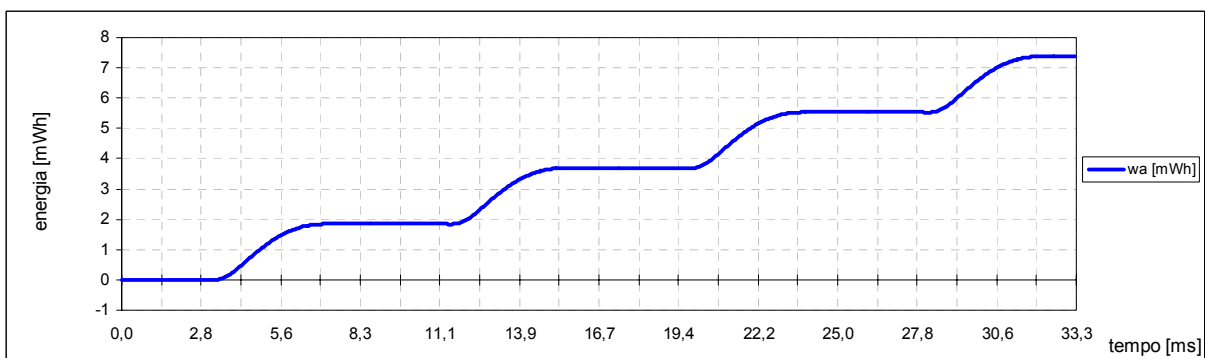


Figura 34 - Forma de onda da transferência de energia referente à composição harmônica de tensão e corrente indicada na Tabela 33. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.  
Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

A Tabela 34 mostra os resultados obtidos para as tensões e correntes para uma janela de 12 ciclos da frequência fundamental de 60 Hz e a Tabela 35 os valores das potências e demais fatores.

Tabela 34 - Tensões, correntes, ângulos e *DHT* - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado		Fundamental			Não-Fundamental				
<b>Tensões</b>	$V_a$	110,35	$V_{a1}$	110,09	$\alpha_{a1}$	23,80	$V_{aH}$	7,54	$DHT_{Va}$	0,0685
$V$ [V]										
$\alpha$ [graus]										
<b>Correntes</b>	$I_a$	12,74	$I_{a1}$	11,17	$\beta_{a1}$	336,69	$I_{aH}$	6,14	$DHT_{Ia}$	0,5494
$I$ [A]										
$\beta$ [graus]										
Valores referentes a uma janela de 12 ciclos com 64 amostras por ciclo da fundamental de 60 Hz.										

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Tabela 35 - Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado		Fundamental		Não Fundamental					
<b>Aparente</b>	$S_a$	1.406,4	$S_{a1}$	1.229,7	$S_{aH}$	46,3	$S_{aN}$	682,4		
[VA]										
<b>Ativo</b>	$P_a$	796,8	$P_{a1}$	836,9	$P_{aH}$	-40,1				
[W]										
<b>Não Ativo</b>	$N_a$	1.158,9	$Q_{a1}$	901,0	$D_{aH}$	23,1	$D_{aV}$	84,2	$D_{aI}$	675,6
[var]										
<b>Utilização</b>	$P_{Fa}$	0,5666	$P_{Fa1}$	0,6806						
<b>Poluição</b>					$S_{aN}/S_{a1}$	0,5549				
Valores referentes a uma janela de 12 ciclos com 64 amostras por ciclo da fundamental de 60 Hz.										

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

A comparação entre os valores da solução proposta no Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) e os valores obtidos através da aplicação do algoritmo proposto é fornecida na Tabela 36. Todos os valores nas tabelas comparativas são fornecidos em pu, inclusive os valores dos fatores de utilização de linha e de poluição harmônica.

Tabela 36 - Potências e demais fatores – Valores comparativos

[pu]	Combinado		Fundamental		Não Fundamental					
<b>Aparente</b>	$S_a$	0,99961	$S_{a1}$	1,00000	$S_{aH}$	0,99039	$S_{aN}$	0,99826		
<b>Ativo</b>	$P_a$	0,97659	$P_{a1}$	0,97772	$P_{aH}$	1,00068				
<b>Não Ativo</b>	$N_a$	1,01114	$Q_{a1}$	1,00268	$D_{aH}$	0,95747	$D_{aV}$	0,99134	$D_{aI}$	0,99782
<b>Utilização</b>	$P_{Fa}$	0,97686	$P_{Fa1}$	0,97786						
<b>Poluição</b>					$S_{aN}/S_{a1}$	0,99808				

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Na tabela comparativa podem ser observadas diferenças significativas nos valores da maioria das grandezas, sendo o caso de maior diferença encontrada em torno de 4 %. Em relação a estas diferenças algumas considerações devem ser feitas.

Em primeiro lugar, se for feita uma comparação entre as formas de onda fornecidas no exemplo e as obtidas na simulação, é possível concluir que, a princípio, considerando a composição harmônica até ordem  $h=15$  não seria possível reproduzir de forma fiel a forma de onda da Figura 36 indicada no exemplo.

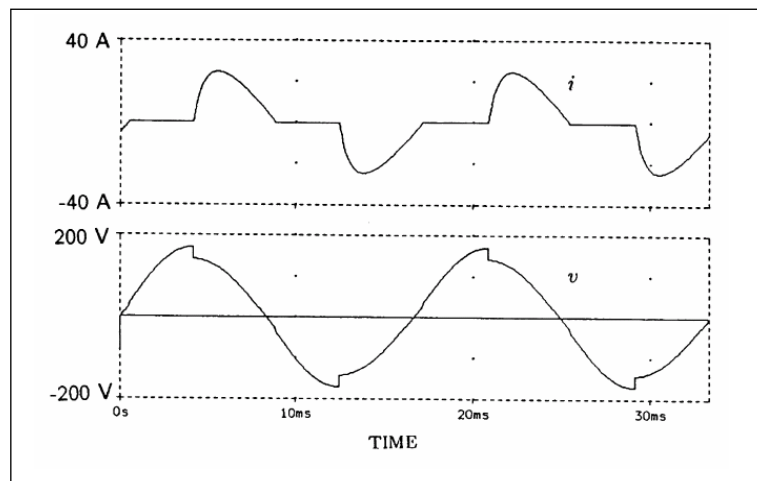


Figura 35 - Forma de onda da tensão e da corrente.

Fonte: Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000, p. 28).

Logo, é possível que os cálculos apresentados no exemplo tenham sido feitos levando em conta uma faixa mais ampla de frequências. Neste caso, a comparação perde o sentido devido à falta de dados (componentes harmônicas de tensão e corrente de ordens mais elevadas).

Em segundo lugar, se for considerado que os cálculos apresentados no exemplo foram efetivamente baseados somente na composição harmônica apresentada, uma análise mais criteriosa dos resultados propostos no Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) para este exemplo deve ser feita.

Conforme a Equação (2.5), o valor da tensão eficaz total é dado pela raiz quadrada do somatório dos quadrados das componentes harmônicas de tensão, sendo isto, de forma análoga, válido para as correntes. Os valores da tensão harmônica e da corrente harmônica obtidos sem arredondamentos nos valores intermediários, utilizando a Equação (4.7) para o cálculo do valor eficaz da tensão harmônica e a Equação (4.8) para o cálculo do valor eficaz da corrente harmônica, serão os seguintes:

$$V_{a1} = 110,09 \text{ V}$$

$$V_a = 110,09 \times \frac{\sqrt{100^2 + 5,98^2 + 1,74^2 + 2,00^2 + 1,15^2 + 1,14^2 + 0,85^2 + 0,89^2}}{100} = 110,35 \text{ V}$$

$$V_{aH} = 7,54 \text{ V}$$

$$I_{a1} = 11,17 \text{ A}$$

$$I_a = 11,17 \times \frac{\sqrt{100^2 + 51,20^2 + 12,78^2 + 12,47^2 + 5,38^2 + 5,51^2 + 3,10^2 + 3,04^2}}{100} = 12,74 \text{ A}$$

$$I_{aH} = 6,14 \text{ A}$$

Os valores de distorção harmônica total da tensão e da corrente obtidos com o uso de 12 casas decimais (sem arredondamentos nos valores intermediários) serão os seguintes:

$$DHT_{V_a} = 0,0685$$

$$DHT_{I_a} = 0,5494$$

Comparando estes valores calculados, obtidos a partir dos valores da tabela de composição harmônica da Figura 36, com os fornecidos na solução proposta no Anexo da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), podem ser verificadas pequenas diferenças para os valores da tensão não fundamental  $V_H$  e da corrente não fundamental  $I_H$ . O valor fornecido

para a tensão não fundamental na resolução proposta no Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) equivale a 7,55 V e para a corrente não fundamental 6,15 A.

$h$	1	3	5	7	9	11	13	15
$V_h$ (%)	100.00	5.98	1.74	2.00	1.15	1.14	0.85	0.89
$\alpha_h$ (deg)	23.80	-39.12	173.3	21.39	-120.10	87.24	-60.68	156.40
$I_h$ (%)	100.00	51.20	12.78	12.47	5.38	5.51	3.10	3.04
$\beta_h$ (deg)	-23.31	115.70	-43.38	161.30	16.11	-141.80	82.66	-79.19

Figura 36 - Distribuição harmônica da tensão e da corrente.  
Fonte: Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000, p. 29).

Um ponto importante a ser ressaltado é que, devido às relações quadráticas entre a maioria das variáveis, tanto no que se refere ao valor eficaz da tensão e da corrente não fundamentais, como no que se refere ao cálculo das diversas potências e fatores do grupo não fundamental, as propagações de erro são significativas ao serem feitos arredondamentos nos valores intermediários.

Outro ponto importante é que uma análise mais criteriosa do cálculo da potência ativa fundamental, apresentado na página 30 do Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) como  $P_1 = 110,09 \times 11,17 \times 0,6961 = 856,04 \text{ W}$ , sugere que o mesmo deveria ser compatível com os valores indicados na tabela de composição harmônica proposta. Considerando os valores da corrente fundamental, da tensão fundamental e do ângulo de  $47,11^\circ$  entre os respectivos fasores, a potência ativa fundamental seria dada por  $P_1 = 110,35 \times 11,17 \times 0,6806 = 836,93 \text{ W}$ .

A propagação de erros proveniente de arredondamentos no cálculo de valores intermediários associada ao valor da potência ativa fundamental e das variáveis correlacionadas propostas para o exemplo levam as diferenças encontradas quando feita comparação, na Tabela 36, entre os resultados obtidos pela aplicação do algoritmo desenvolvido e os resultados propostos para este caso no Anexo da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000).

Se todos os cálculos forem feitos somente considerando diretamente a composição harmônica fornecida e sem arredondamentos intermediários, os resultados aos quais os

obtidos pelo algoritmo devem ser comparados serão os seguintes, considerando o valor da potência aparente fundamental,  $S_1=1229,70$  VA, como base de referência 100 %:

Tabela 37 - Valores percentuais de potências e demais fatores

	Combinado		Fundamental		Não Fundamental			
<b>Aparente</b>	$S$	114,37	$S_1$	100,00	$S_H$	3,76	$S_N$	55,49
<b>Ativo</b>	$P$	64,80	$P_1$	68,06	$P_H$	-3,26		
<b>Não Ativo</b>	$N$	94,24	$Q_1$	73,27	$D_H$	1,88	$D_V$	6,85
<b>Utilização</b>	$P_F$	0,567	$P_{F1}$	0,681				
<b>Poluição</b>					$S_N/S_1$	0,55		

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Considerando os valores da Tabela 37 como referência (sem arredondamentos intermediários) e também considerando que após a recomposição das formas de onda das tensões e correntes os valores amostrados das mesmas (sinais de entrada para a aplicação do algoritmo) sejam truncados com três casas decimais no sentido de simular limitações de conversão analógico-digital, os valores comparativos com os valores obtidos pelo algoritmo desenvolvido serão os apresentados na Tabela 38.

Tabela 38 - Potências e demais fatores. Valores comparativos

[pu]	Combinado		Fundamental		Não Fundamental			
<b>Aparente</b>	$S_a$	0,999967	$S_{a1}$	0,999960	$S_{aH}$	0,999994	$S_{aN}$	0,999989
<b>Ativo</b>	$P_a$	0,999960	$P_{a1}$	0,999962	$P_{aH}$	1,000001		
<b>Não Ativo</b>	$N_a$	0,999970	$Q_{a1}$	0,999959	$D_{aH}$	0,999970	$D_{aV}$	0,999965
<b>Utilização</b>	$P_{Fa}$	0,999993	$P_{Fa1}$	1,000002				
<b>Poluição</b>					$S_{aN}/S_{a1}$	1,000028		

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Como pode ser verificado, as diferenças observadas na comparação inicial, Tabela 36, são provavelmente provenientes dos arredondamentos efetuados nos valores intermediários e da avaliação da potência ativa fundamental na resolução do exemplo apresentada no Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000).

### 6.3.2 Exemplo 2

Este exemplo resolvido, apresentado no Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), consiste em um sistema trifásico equilibrado em que as formas de onda das tensões são idênticas nas três fases, sendo o mesmo válido para as correntes. A tabela de composição harmônica fornecida no Anexo A para este exemplo apresenta somente as composições harmônicas de tensão e corrente da fase *a* e a composição harmônica da corrente de neutro. Para que os valores fornecidos das composições harmônicas pudessem ser aplicados na tabela de entrada de dados da simulação, Tabela 39, foram gerados valores de entrada para as fases *b* e *c*, considerando ângulo de  $240^\circ$  de defasagem para a tensão da fase *b* em relação à tensão da fase *a* e  $120^\circ$  de defasagem entre a tensão da fase *c* e a tensão da fase *a*. Procedimento análogo foi aplicado para as correntes de forma a produzir sinais simétricos nos três canais de entrada. A corrente de neutro foi então calculada pelo próprio algoritmo e apresentou forma de onda e valor eficaz similares aos propostos no exemplo.

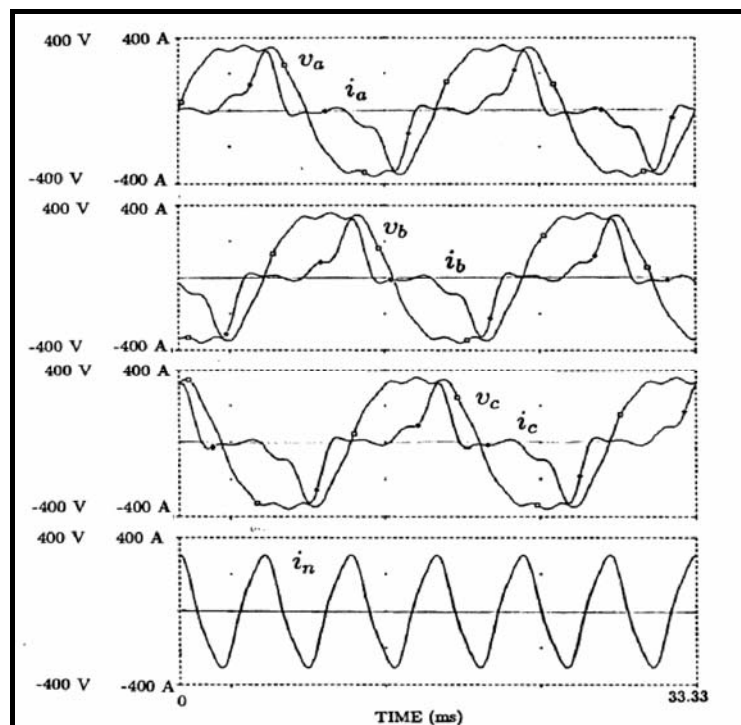


Figura 37 - Formas de onda das tensões e correntes  
 Fonte: Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000, p. 31).

Tabela 39 - Composição Harmônica das Tensões e Correntes

Ref:  $V_{a1} = 277,25$  V

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{ah}$ [%]	0,00	100,00	0,00	13,26	0,00	1,34	0,00	1,48	0,00	3,48
$\alpha_{ah}$ [graus]		-2,35	0,00	7,76	0,00	83,54	0,00	-163,20	0,00	-42,74

Ref:  $I_{a1} = 99,98$  A

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{ah}$ [%]	0,00	100,00	0,00	68,84	0,00	34,90	0,00	27,84	0,00	5,94
$\beta_{ah}$ [graus]		-22,00	0,00	100,00	0,00	-175,00	0,00	-65,01	0,00	47,99

Ref:  $V_{b1} = 277,25$  V

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{bh}$ [%]	0,00	100,00	0,00	13,26	0,00	1,34	0,00	1,48	0,00	3,48
$\alpha_{bh}$ [graus]		237,65	0,00	7,76	0,00	203,54	0,00	76,80	0,00	317,26

Ref:  $I_{b1} = 99,98$  A

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{bh}$ [%]	0,00	100,00	0,00	68,84	0,00	34,90	0,00	27,84	0,00	5,94
$\beta_{bh}$ [graus]		218,00	0,00	100,00	0,00	305,00	0,00	174,99	0,00	47,99

Ref:  $V_{c1} = 277,25$  V

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{ch}$ [%]	0,00	100,00	0,00	13,26	0,00	1,34	0,00	1,48	0,00	3,48
$\alpha_{ch}$ [graus]		117,65	0,00	7,76	0,00	323,54	0,00	316,80	0,00	317,26

Ref:  $I_{c1} = 99,98$  A

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{ch}$ [%]	0,00	100,00	0,00	68,84	0,00	34,90	0,00	27,84	0,00	5,94
$\beta_{ch}$ [graus]		98,00	0,00	100,00	0,00	65,00	0,00	54,99	0,00	47,99

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

As formas de onda das tensões e corrente nas três fases são mostradas na Figura 38. Os pares tensão-corrente de cada fase são iguais, porém defasados de  $120^\circ$  entre si, caracterizando uma situação de equilíbrio.

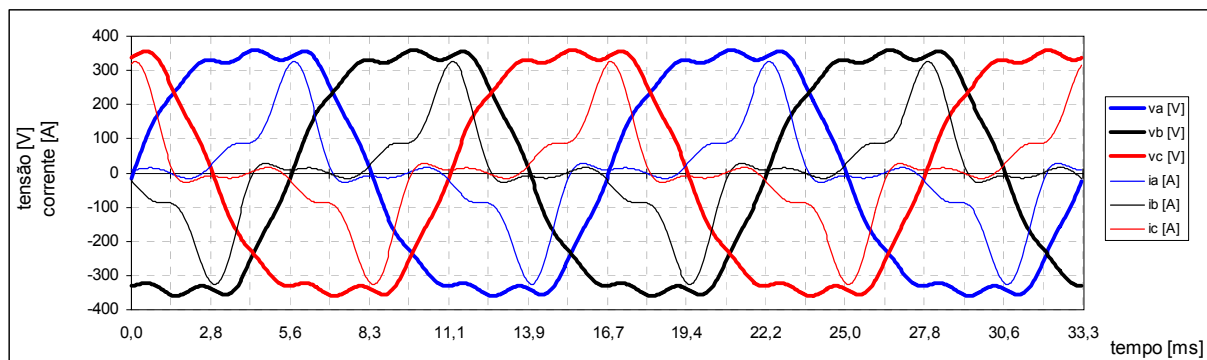


Figura 38 - Formas de onda das tensões e correntes referentes aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 39. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.



A Figura 39 apresenta a forma de onda da corrente de neutro para uma comparação com a corrente de neutro apresentada no gráfico da Figura 37.

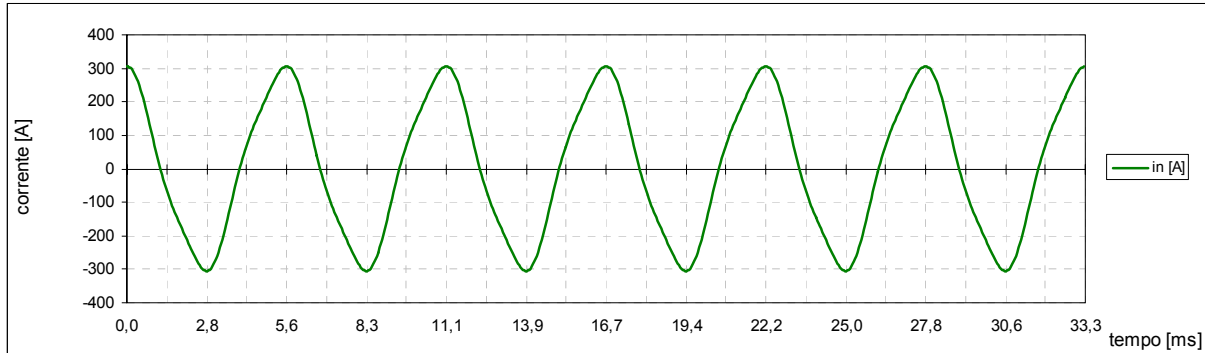


Figura 39 - Forma de onda da corrente de neutro, calculada a partir da soma das correntes das fases, referente à composição harmônica de correntes da Tabela 39. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

A seguir, para fins comparativos e ilustrativos, as formas de onda das potências instantâneas e da energia transferida são indicadas, respectivamente, na Figura 40 e na Figura 41.

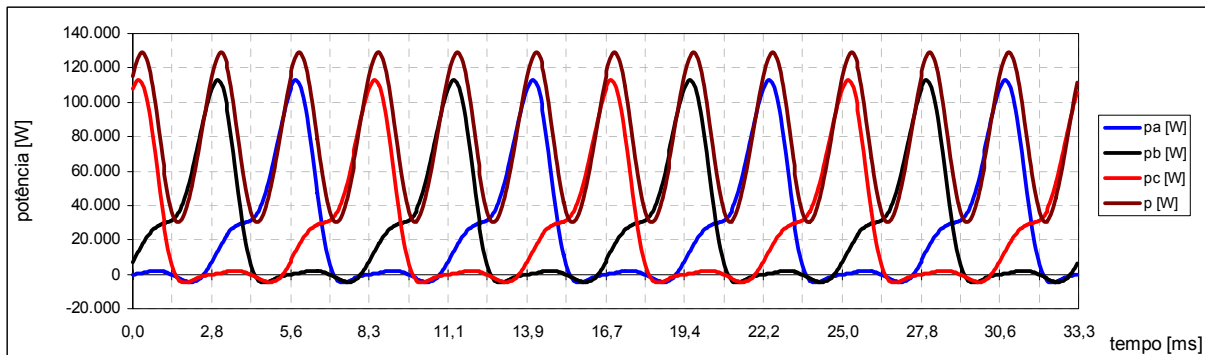


Figura 40 - Formas de onda das potências instantâneas por fase e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicadas na Tabela 39. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

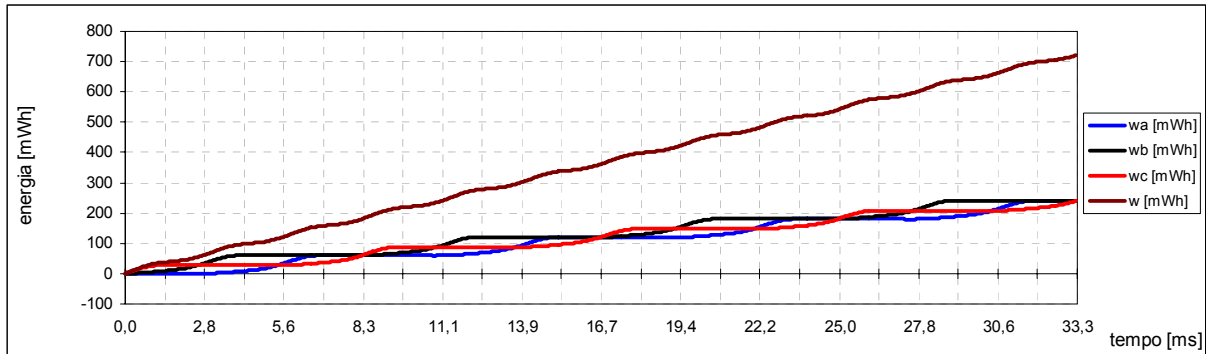


Figura 41 - Formas de onda de transferência de energia em cada uma das fases e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicada na Tabela 39. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Na Tabela 40 são mostrados os valores das tensões e correntes calculados pelo algoritmo a partir da amostragem das ondas recompostas segundo a tabela de composição harmônica proposta no exemplo.

Tabela 40 - Tensões, correntes, ângulos e *DHT* - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado		Fundamental			Não-Fundamental				
<b>Tensões</b>	$V_a$	279,90	$V_{a1}$	277,25	$\alpha_{a1}$	357,65	$V_{aH}$	38,41	$DHT_{Va}$	0,1385
$V$ [V]	$V_b$	279,90	$V_{b1}$	277,25	$\alpha_{b1}$	237,65	$V_{bH}$	38,41	$DHT_{Vb}$	0,1385
$\alpha$ [graus]	$V_c$	279,90	$V_{c1}$	277,25	$\alpha_{c1}$	117,65	$V_{cH}$	38,41	$DHT_{Vc}$	0,1385
	$V_{ab}$	480,31	$V_{ab1}$	480,21	$\alpha_{ab1}$	27,65	$V_{abH}$	9,59	$DHT_{Vab}$	0,0200
	$V_{bc}$	480,31	$V_{bc1}$	480,21	$\alpha_{bc1}$	267,65	$V_{bcH}$	9,59	$DHT_{Vbc}$	0,0200
	$V_{ca}$	480,31	$V_{ca1}$	480,21	$\alpha_{ca1}$	147,65	$V_{caH}$	9,59	$DHT_{Vca}$	0,0200
	$V_e$	278,60	$V_{e1}$	277,25			$V_{eH}$	27,44	$DHT_{Ve}$	0,0990
			$V_{1+}$	277,25	$\alpha_{1+}$	357,65				
			$V_{1-}$	0,00	$\alpha_{1-}$	0,00				
			$V_{10}$	0,00	$\alpha_{10}$	0,00				
			$V_{e1cs}$	277,25						
<b>Correntes</b>	$I_a$	129,46	$I_{a1}$	99,98	$\beta_{a1}$	338,00	$I_{aH}$	82,25	$DHT_{Ia}$	0,8226
$I$ [A]	$I_b$	129,46	$I_{b1}$	99,98	$\beta_{b1}$	218,00	$I_{bH}$	82,25	$DHT_{Ib}$	0,8226
$\beta$ [graus]	$I_c$	129,46	$I_{c1}$	99,98	$\beta_{c1}$	98,00	$I_{cH}$	82,25	$DHT_{Ic}$	0,8226
	$I_n$	207,25	$I_{n1}$	0,00	$\beta_{n1}$	138,59	$I_{nH}$	207,25	$DHT_{In}$	>500
	$I_e$	176,29	$I_{e1}$	99,98			$I_{eH}$	145,19	$DHT_{Ie}$	1,4522
			$I_{1+}$	99,98	$\beta_{1+}$	338,00				
			$I_{1-}$	0,00	$\beta_{1-}$	0,00				
			$I_{10}$	0,00	$\beta_{10}$	0,00				
			$I_{e1cs}$	99,98						
Valores referentes a uma janela de 12 ciclos com 64 amostras por ciclo da fundamental de 60 Hz.										

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Tabela 41 - Tensões, correntes, ângulos e *DHT* - Valores comparativos

[pu]	Combinado	Fundamental			Não-Fundamental		
<b>Tensões</b>	$V_a$ 0,99985	$V_{a1}$ 1,00000	$\alpha_{a1}$ 1,00000	$V_{aH}$ 0,99249	$DHT_{Va}$ 0,99667		
	$V_b$ 0,99985	$V_{b1}$ 1,00000	$\alpha_{b1}$ 1,00000	$V_{bH}$ 0,99249	$DHT_{Vb}$ 0,99667		
	$V_c$ 0,99985	$V_{c1}$ 1,00000	$\alpha_{c1}$ 1,00000	$V_{cH}$ 0,99249	$DHT_{Vc}$ 0,99667		
	$V_{ab}$ 1,00003	$V_{ab1}$ 1,00002	$\alpha_{ab1}$	$V_{abH}$ 1,00392	$DHT_{Vab}$ 0,99825		
	$V_{bc}$ 1,00003	$V_{bc1}$ 1,00002	$\alpha_{bc1}$	$V_{bcH}$ 1,00392	$DHT_{Vbc}$ 0,99825		
	$V_{ca}$ 1,00003	$V_{ca1}$ 1,00002	$\alpha_{ca1}$	$V_{caH}$ 1,00392	$DHT_{Vca}$ 0,99825		
	$V_e$ 0,99989	$V_{e1}$ 1,00000		$V_{eH}$ 0,99972	$DHT_{Ve}$ 0,99972		
		$V_{1+}$ 1,00000	$\alpha_{1+}$ 1,00000				
		$V_{e1cs}$ 1,00000					
	<b>Correntes</b>	$I_a$ 1,00048	$I_{a1}$ 1,00000	$\beta_{a1}$ 1,00000	$I_{aH}$ 0,99997	$DHT_{Ia}$ 0,99956	
$I_b$ 1,00048		$I_{b1}$ 1,00000	$\beta_{b1}$ 1,00000	$I_{bH}$ 0,99997	$DHT_{Ib}$ 0,99956		
$I_n$ 1,00022				$I_{nH}$ 1,00022			
$I_e$ 1,00070		$I_{e1}$ 1,00000		$I_{eH}$ 1,00085	$DHT_{Ie}$ 1,00085		
		$I_{1+}$ 1,00000	$\beta_{1+}$ 1,00000				
		$I_{e1cs}$ 1,00000					

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Os valores da coluna Não Fundamental da Tabela 41 (comparativa) indicam pequenas discrepâncias entre os valores propostos no exemplo e os calculados através do algoritmo desenvolvido. Aqui novamente devem ser considerados os erros devido a arredondamentos dos valores intermediários na resolução proposta para este exemplo no Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000).

Para exemplificar essas diferenças de arredondamento e sua conseqüente propagação de erros, visto ser este um aspecto importante relacionado à implementação da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) em medidores e registradores, será demonstrada a obtenção dos valores relativos a corrente da fase *a* considerando que os valores base para o cálculo sejam diretamente provenientes da Tabela 39 de composição harmônica proposta.

$$V_{a1} = 277,25 \text{ A}$$

$$V_a = 277,25 \times \frac{\sqrt{100^2 + 13,26^2 + 1,34^2 + 1,48^2 + 3,48^2}}{100} = 279,90 \text{ A}$$

$$V_{aH} = 38,41 \text{ V}$$

Uma comparação entre os valores obtidos nos cálculos anteriores, os valores da Tabela 40 e os valores propostos na resolução do respectivo exemplo no Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), Figura 42, permite então explicar as discrepâncias indicadas pela Tabela 41 considerando ainda que situação similar é verificada nas demais fases.

$V_a = 279.94 \text{ V};$	$V_{a1} = 277.25 \text{ V};$	$V_{aH} = 38.70 \text{ V};$	$THD_{V_a} = 0.139$
$V_{ab} = 480.29 \text{ V};$	$V_{ab1} = 480.20 \text{ V};$	$V_{abH} = 9.55 \text{ V};$	$THD_{V_{ab}} = 0.020$
$I_a = 129.40 \text{ A};$	$I_{a1} = 99.58 \text{ A};$	$I_{aH} = 82.25 \text{ A};$	$THD_{I_a} = 0.823$
$I_n = 207.20 \text{ A};$	$I_{n1} = 0 \text{ A};$	$I_{nH} = 207.20 \text{ A}$	

Figura 42 - Valores propostos na resolução do exemplo  
 Fonte: Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000, p. 30).

Obviamente essas diferenças não são significativas visto que existe a possibilidade de que os cálculos desenvolvidos no exemplo tenham sido feitos tendo por base valores com maior número de casas decimais que os declarados na tabela de composição harmônica fornecida.

Um ponto importante está relacionado ao fato de que, na prática, diferenças percentuais significativas podem ser encontradas nos valores não fundamentais, independente do método utilizado para obtenção dos valores das tensões e correntes fundamentais, principalmente quando os valores da parte combinada forem muito próximos aos valores da parte fundamental em função destes arredondamentos. Obviamente que, do mesmo ponto de vista prático, sistemas que apresentem valores combinados muito próximos aos valores fundamentais acarretam em valores de importância pouco significativa, do ponto de vista físico, para as grandezas não fundamentais. No entanto, a princípio, a determinação das faixas de erros permitidas para medidores que atendam a Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) deverá levar em conta esse aspecto.

Na Tabela 42 são fornecidos os valores das potências obtidos com a aplicação do algoritmo desenvolvido na resolução deste exemplo e na Tabela 43 a comparação entre estes valores e os indicados como solução no Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000). O valor de  $N$  apresentado na solução foi devidamente corrigido e as diferenças relacionadas à parte não fundamental não serão comentadas em função do exposto anteriormente.

Tabela 42 - Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado	Fundamental	Não Fundamental		
<b>Aparente</b> [VA]	$S_a$ 36.236	$S_{a1}$ 27.719	$S_{aH}$ 3.159	$S_{aN}$ 23.339	
	$S_b$ 36.236	$S_{b1}$ 27.719	$S_{bH}$ 3.159	$S_{bN}$ 23.339	
	$S_c$ 36.236	$S_{c1}$ 27.719	$S_{cH}$ 3.159	$S_{cN}$ 23.339	
	$S_e$ 147.344	$S_{e1}$ 83.158	$S_{eH}$ 11.952	$S_{eN}$ 121.635	
	$S_A$ 108.709	$S_{e1+}$ 83.158			
		$S_{e1-}$ 0,0			
		$S_{e10}$ 0,0			
		$SU_1$ 0,0			
<b>Ativo</b> [W]	$P_a$ 25.964	$P_{a1}$ 26.105	$P_{aH}$ -142		
	$P_b$ 25.964	$P_{b1}$ 26.105	$P_{bH}$ -142		
	$P_c$ 25.964	$P_{c1}$ 26.105	$P_{cH}$ -142		
	$P$ 77.891	$P_1$ 78.316	$P_H$ -425		
		$P_{1+}$ 78.316			
		$P_{1-}$ 0,0			
	$P_{10}$ 0,0				
<b>Não Ativo</b> [var]	$N_a$ 25.278	$Q_{a1}$ 9.321	$D_{aH}$ 3.156	$D_{aV}$ 3.840	$D_{aI}$ 22.803
	$N_b$ 25.278	$Q_{b1}$ 9.321	$D_{bH}$ 3.156	$D_{bV}$ 3.840	$D_{bI}$ 22.803
	$N_c$ 25.278	$Q_{c1}$ 9.321	$D_{cH}$ 3.156	$D_{cV}$ 3.840	$D_{cI}$ 22.803
	$N$ 125.073		$D_{eH}$ 11.945	$D_{eV}$ 8.230	$D_{eI}$ 120.766
		$Q_{1+}$ 27.964			
		$Q_{1-}$ 0,0			
	$Q_{10}$ 0,0				
<b>Utilização</b>	$P_{Fa}$ 0,7165	$P_{Fa1}$ 0,9418			
	$P_{Fb}$ 0,7165	$P_{Fb1}$ 0,9418			
	$P_{Fc}$ 0,7165	$P_{Fc1}$ 0,9418			
	$P_{Fe}$ 0,5286	$P_{F1}$ 0,9418			
	$P_{FA}$ 0,7165	$P_{F1+}$ 0,9418			
		$P_{F1-}$ 1,0000			
		$P_{F10}$ 1,0000			
<b>Poluição</b>			$S_{aN}/S_{a1}$ 0,8420		
			$S_{bN}/S_{b1}$ 0,8420		
			$S_{cN}/S_{c1}$ 0,8420		
			$S_{eN}/S_{e1}$ 1,4627		
<b>Desequilíbrio</b>		$SU_1/S_{1+}$ 0,0000			

Valores referentes a uma janela de 12 ciclos com 64 amostras por ciclo da fundamental de 60,00 Hz.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Tabela 43 - Potências e demais fatores – Valores comparativos

[pu]	Combinado	Fundamental	Não Fundamental		
<b>Aparente</b>	$S_e$ 1,00032	$S_{e1}$ 1,00000	$S_{eH}$ 0,99469	$S_{eN}$ 1,00054	
	$S_A$ 1,00035	$S_{e1+}$ 1,00000			
<b>Ativo</b>	$P$ 0,99996	$P_1$ 0,99997	$P_H$ 0,99616		
		$P_{1+}$ 0,99997			
<b>Não Ativo</b>	$N$ 1,00043		$D_{eH}$ 0,99406	$D_{eV}$ 0,99470	$D_{eI}$ 1,00058
		$Q_{1+}$ 1,00022			
<b>Utilização</b>	$P_{Fe}$ 0,99930	$P_{F1}$ 0,99975			
	$P_{FA}$ 0,99931	$P_{F1+}$ 0,99975			
<b>Poluição</b>			$S_{eN}/S_{e1}$ 1,00054		

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

### 6.3.3 Exemplo 3

O Exemplo A.3, do Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000, p. 33), mostra o resultado da aplicação dos conceitos propostos a um sistema formado por uma fonte trifásica equilibrada, alimentando uma carga desequilibrada e não linear através de uma linha com impedâncias idênticas para os condutores das fases e com condutor de neutro apresentando impedância diferente dos condutores das fases. Na fase  $c$  não existe sinal de corrente.

A Tabela 44 mostra a composição harmônica das tensões e correntes, valores iguais aos apresentados na Tabela A.5 do Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000, p. 35).

Tabela 44 - Composição Harmônica das Tensões e Correntes

Ref.:  $V_{a1} = 271,03$  V

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{ah}$ [%]	0,00	100,00	0,00	10,28	0,00	4,92	0,00	7,44	0,00	8,64
$\alpha_{ah}$ [graus]		-0,74	0,00	6,76	0,00	142,30	0,00	146,70	0,00	-47,40

Ref.:  $I_{a1} = 99,98$  A

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{ah}$ [%]	0,00	100,00	0,00	68,84	0,00	34,90	0,00	27,85	0,00	5,93
$\beta_{ah}$ [graus]		-22,00	0,00	100,00	0,00	-175,00	0,00	-65,00	0,00	48,00

Ref.:  $V_{b1} = 271,03$  V

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{bh}$ [%]	0,00	104,49	0,00	10,53	0,00	5,79	0,00	8,58	0,00	11,05
$\alpha_{bh}$ [graus]		-121,20	0,00	6,28	0,00	167,40	0,00	125,20	0,00	-49,19

Ref.:  $I_{b1} = 99,98$  A

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{bh}$ [%]	0,00	93,49	0,00	79,77	0,00	42,30	0,00	45,81	0,00	40,59
$\beta_{bh}$ [graus]		-120,80	0,00	99,49	0,00	65,09	0,00	-167,90	0,00	41,89

Ref.:  $V_{c1} = 271,03$  V

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{ch}$ [%]	0,00	103,73	0,00	8,69	0,00	4,30	0,00	6,58	0,00	8,22
$\alpha_{ch}$ [graus]		121,30	0,00	9,70	0,00	157,70	0,00	136,50	0,00	-47,35

Ref.:  $I_{c1} = 99,98$  A

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{ch}$ [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\beta_{ch}$ [graus]		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

As formas de onda das tensões de fase e das correntes obtidas a partir dos valores indicados na Tabela 44 são mostradas na Figura 43. A forma de onda da corrente de neutro, obtida através da soma das correntes das fases, é mostrada na Figura 44.

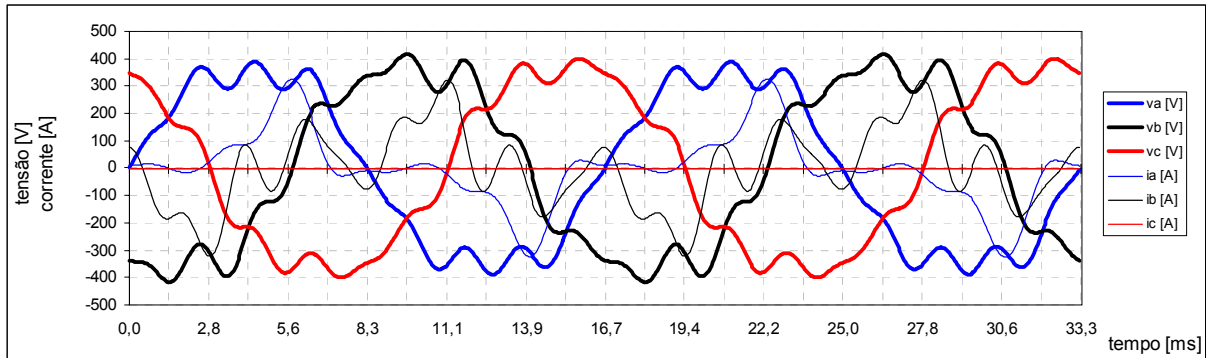


Figura 43 - Formas de onda das tensões e correntes referentes aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 44. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados.  
Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

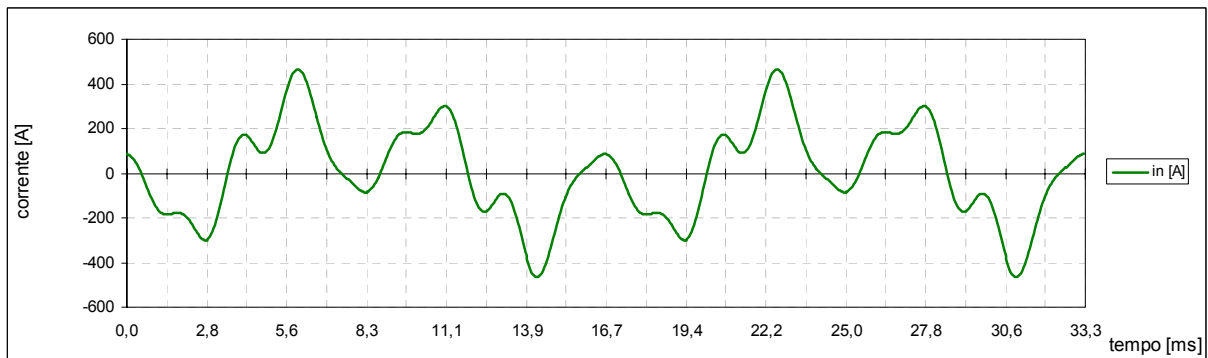


Figura 44 - Forma de onda da corrente de neutro, calculada a partir da soma das correntes das fases, referente à composição harmônica de correntes da Tabela 44. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Os valores eficazes das tensões e correntes obtidos através da aplicação do algoritmo para uma janela de doze ciclos da fundamental de 60 Hz são mostrados na Tabela 45. Os valores das potências obtidas são mostrados na Tabela 46.

Tabela 45 - Tensões, correntes, ângulos e *DHT* - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado		Fundamental			Não-Fundamental				
<b>Tensões</b> <i>V</i> [V] $\alpha$ [graus]	<i>V<sub>a</sub></i>	274,53	<i>V<sub>a1</sub></i>	271,03	$\alpha_{a1}$	359,26	<i>V<sub>aH</sub></i>	43,69	<i>DHT<sub>Va</sub></i>	0,1612
	<i>V<sub>b</sub></i>	287,58	<i>V<sub>b1</sub></i>	283,20	$\alpha_{b1}$	238,80	<i>V<sub>bH</sub></i>	49,98	<i>DHT<sub>Vb</sub></i>	0,1765
	<i>V<sub>c</sub></i>	283,80	<i>V<sub>c1</sub></i>	281,14	$\alpha_{c1}$	121,30	<i>V<sub>cH</sub></i>	38,79	<i>DHT<sub>Vc</sub></i>	0,1380
	<i>V<sub>ab</sub></i>	481,29	<i>V<sub>ab1</sub></i>	481,12	$\alpha_{ab1}$	29,75	<i>V<sub>abH</sub></i>	12,80	<i>DHT<sub>Vab</sub></i>	0,0266
	<i>V<sub>bc</sub></i>	482,62	<i>V<sub>bc1</sub></i>	482,46	$\alpha_{bc1}$	269,92	<i>V<sub>bcH</sub></i>	12,40	<i>DHT<sub>Vbc</sub></i>	0,0257
	<i>V<sub>ca</sub></i>	483,11	<i>V<sub>ca1</sub></i>	483,06	$\alpha_{ca1}$	149,70	<i>V<sub>caH</sub></i>	7,24	<i>DHT<sub>Vca</sub></i>	0,0150
	<i>V<sub>e</sub></i>	280,26	<i>V<sub>e1</sub></i>	278,46			<i>V<sub>eH</sub></i>	31,72	<i>DHT<sub>Ve</sub></i>	0,1139
			<i>V<sub>1+</sub></i>	278,41	$\alpha_{1+}$	359,79				
			<i>V<sub>1-</sub></i>	0,66	$\alpha_{1-}$	257,32				
			<i>V<sub>1o</sub></i>	7,48	$\alpha_{1o}$	194,23				
		<i>V<sub>e1cs</sub></i>	278,46							
<b>Correntes</b> <i>I</i> [A] $\beta$ [graus]	<i>I<sub>a</sub></i>	129,46	<i>I<sub>a1</sub></i>	99,98	$\beta_{a1}$	338,00	<i>I<sub>aH</sub></i>	82,25	<i>DHT<sub>Ia</sub></i>	0,8227
	<i>I<sub>b</sub></i>	143,63	<i>I<sub>b1</sub></i>	93,47	$\beta_{b1}$	239,20	<i>I<sub>bH</sub></i>	109,06	<i>DHT<sub>Ib</sub></i>	1,1668
	<i>I<sub>c</sub></i>	0,00	<i>I<sub>c1</sub></i>	0,00	$\beta_{c1}$	0,00	<i>I<sub>cH</sub></i>	0,00	<i>DHT<sub>Ic</sub></i>	fund=0
	<i>I<sub>n</sub></i>	209,64	<i>I<sub>n1</sub></i>	125,99	$\beta_{n1}$	290,85	<i>I<sub>nH</sub></i>	167,55	<i>DHT<sub>In</sub></i>	1,3299
	<i>I<sub>e</sub></i>	164,66	<i>I<sub>e1</sub></i>	107,40			<i>I<sub>eH</sub></i>	124,81	<i>DHT<sub>Ie</sub></i>	1,1621
			<i>I<sub>1+</sub></i>	63,38	$\beta_{1+}$	348,24				
			<i>I<sub>1-</sub></i>	21,52	$\beta_{1-}$	43,14				
			<i>I<sub>1o</sub></i>	42,00	$\beta_{1o}$	290,85				
			<i>I<sub>e1cs</sub></i>	107,40						
Valores referentes a uma janela de 12 ciclos com 64 amostras por ciclo da fundamental de 60 Hz.										

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.



Tabela 46 - Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado		Fundamental		Não Fundamental					
<b>Aparente</b> [VA]	$S_a$	35.541,8	$S_{a1}$	27.097,6	$S_{aH}$	3.593,7	$S_{aN}$	22.998,7		
	$S_b$	41.305,8	$S_{b1}$	26.471,0	$S_{bH}$	5.451,3	$S_{bN}$	31.708,9		
	$S_c$	0,0	$S_{c1}$	0,0	$S_{cH}$	0,0	$S_{cN}$	0,0		
	$S_e$	138.442,1	$S_{e1}$	89.721,5	$S_{eH}$	11.875,8	$S_{eN}$	105.433,8		
	$S_A$	76.847,6	$S_{e1+}$	52.939,9						
			$S_{e1-}$	42,6						
			$S_{e10}$	942,5						
			$SU_1$	72.438,3						
<b>Ativo</b> [W]	$P_a$	24.996,2	$P_{a1}$	25.253,4	$P_{aH}$	-257,2				
	$P_b$	26.596,4	$P_{b1}$	26.470,4	$P_{bH}$	126,0				
	$P_c$	0,0	$P_{c1}$	0,0	$P_{cH}$	0,0				
	$P$	51.592,6	$P_1$	51.723,8	$P_H$	-131,2				
			$P_{1+}$	51.867,7						
			$P_{1-}$	-35,2						
			$P_{10}$	-108,6						
<b>Não Ativo</b> [var]	$N_a$	25.266,7	$Q_{a1}$	9.825,6	$D_{aH}$	3.584,5	$D_{aV}$	4.368,4	$D_{aI}$	22.292,2
	$N_b$	31.603,9	$Q_{b1}$	-184,8	$D_{bH}$	5.449,8	$D_{bV}$	4.672,1	$D_{bI}$	30.885,5
	$N_c$	0,0	$Q_{c1}$	0,0	$D_{cH}$	0,0	$D_{cV}$	0,0	$D_{cI}$	0,0
	$N$	128.469,6	$Q_{1+}$	10.601,0	$D_{eH}$	11.875,1	$D_{eV}$	10.219,5	$D_{eI}$	104.263,2
			$Q_{1-}$	-23,9						
			$Q_{10}$	-936,3						
<b>Utilização</b>	$P_{Fa}$	0,7033	$P_{Fa1}$	0,9319						
	$P_{Fb}$	0,6439	$P_{Fb1}$	1,0000						
	$P_{Fc}$	1,0000	$P_{Fc1}$	1,0000						
	$P_{Fe}$	0,3727	$P_{F1}$	0,5765						
	$P_{FA}$	0,6714	$P_{F1+}$	0,9797						
			$P_{F1-}$	-0,8273						
			$P_{F10}$	-0,1153						
<b>Poluição</b>					$S_{aN}/S_{a1}$	0,8487				
					$S_{bN}/S_{b1}$	1,1979				
					$S_{cN}/S_{c1}$	Sc1=0				
					$S_{eN}/S_{e1}$	1,1751				
<b>Desequilíbrio</b>			$SU_1/S_{1+}$	1,3683						

Valores referentes a uma janela de 12 ciclos com 64 amostras por ciclo da fundamental de 60,00 Hz.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

A comparação entre os valores obtidos e os fornecidos como resultado para o exemplo é feita através da divisão do valor obtido para a variável pelo respectivo valor indicado como resultado no exemplo da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000). Os valores comparativos para as potências em cada uma das fases foram suprimidos porque não são indicados nos resultados propostos.

Tabela 47 - Potências e demais fatores – Valores comparativos

[pu]	Combinado		Fundamental		Não Fundamental					
<b>Aparente</b>	$S_e$	0,99747	$S_{e1}$	1,00024	$S_{eH}$	0,99620	$S_{eN}$	0,99543		
	$S_A$	1,00026	$S_{e1+}$	0,99964						
			$S_{U1}$	1,02379						
<b>Ativo</b>	$P$	1,00501	$P_1$	0,99988	$P_H$	0,33242				
			$P_{1+}$	0,99972						
			$P_{1-}$	1,30956						
			$P_{10}$	0,86504						
<b>Não Ativo</b>	$N$	0,99625			$D_{eH}$	0,99689	$D_{eV}$	1,00114		
			$Q_{1+}$	0,99901					$D_{eI}$	0,99542
			$Q_{1-}$	0,88913						
			$Q_{10}$	2,60944						
<b>Utilização</b>	$P_{Fe}$	1,00720	$P_{F1}$	0,99964						
	$P_{FA}$	1,00503	$P_{F1+}$	0,99974						
<b>Poluição</b>					$S_{eN}/S_{e1}$	0,99519				
<b>Desequilíbrio</b>			$S_{U1}/S_{1+}$	1,02415						

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Neste caso, existem diferenças significativas entre os valores obtidos e os indicados como resultado para algumas das variáveis. As diferenças mais significativas ocorrem no valor da potência ativa harmônica,  $P_H$ , nos valores das potências ativas e não ativas fundamentais de seqüência zero e de seqüência negativa, assim como na potência de desequilíbrio,  $S_{U1}$ , e no valor de sua relação com a potência aparente fundamental de seqüência positiva ( $S_{U1} / S_1^+$ ).

Inicialmente, para elucidar a origem destas diferenças, uma comparação entre as formas de onda das tensões e correntes fornecidas para esse exemplo do Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), Figura 45, com as respectivas formas de onda obtidas e mostradas na Figura 43, foi feita. Pode ser verificado que as formas de onda de corrente da fase  $b$  diferem. Para uma melhor visualização desta diferença, indicada pelo quadrado vermelho, foi incluída a Figura 46 que apresenta somente as formas de onda da tensão e da corrente da fase  $b$ . Importante salientar que a escala usada para a corrente é idêntica a que foi usada para a tensão tanto para o gráfico da Figura 45 como para o gráfico da Figura 46.

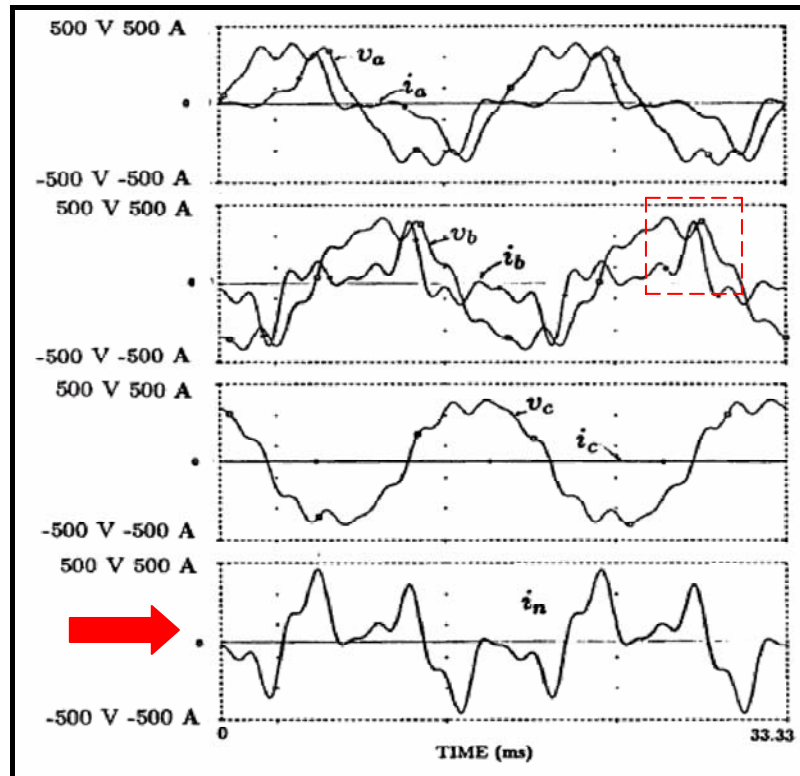


Figura 45 - Formas de onda das tensões e correntes  
 Fonte: Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000, p. 34).

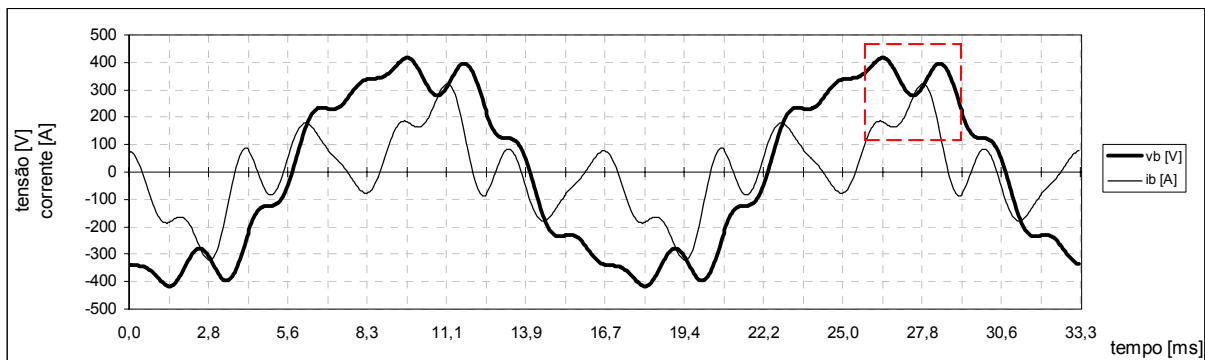


Figura 46 - Formas de onda de tensão e de corrente referentes aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 44. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados.  
 Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Existem também diferenças na forma de onda da corrente de neutro, o que pode ser verificado através da comparação da forma de onda indicada com a seta vermelha na Figura 45 com a forma de onda mostrada na Figura 44.

Após alguns testes e verificações foi possível constatar que a mudança do sinal do ângulo da harmônica de corrente de ordem  $h=5$  resulta em formas de onda de corrente da fase  $b$  e de corrente de neutro idênticas as da Figura 45. Estes testes e verificações consistiram, inicialmente, na aplicação sucessiva de diferentes valores para o percentual de cada

componente harmônica de forma a tentar reproduzir a forma de onda indicada no Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000). Como variações nos valores de módulo não resultaram na forma de onda indicada foram aplicadas variações no valor de ângulo de cada componente, de forma sucessiva, iniciando pelo ângulo da componente de ordem  $h=9$ . O algoritmo utilizado para tal consistiu na geração de ângulos aleatórios e acompanhamento visual da forma de onda obtida. Para cada valor de ângulo gerado, a nova forma de onda da corrente da fase  $b$  era comparada visualmente com a forma de onda fornecida no Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000). Desta forma foi possível verificar que, ao ser aplicado o novo valor de ângulo para a componente de ordem  $h=5$ , houve a reprodução da forma de onda desejada. Uma comparação das formas de onda das correntes de neutro confirmou o resultado obtido visto que a mesma, em princípio, é dada pela soma, ponto a ponto, das formas de onda da corrente da fase  $a$  e fase  $b$ .

A substituição do valor deste ângulo pelo novo valor, conforme Tabela 48, resulta na forma de onda de corrente mostrada na Figura 47 e na forma de onda da corrente de neutro, Figura 48, similares às fornecidas na Figura 45.

Tabela 48 - Composição Harmônica das Tensões e Correntes

Ref.:  $V_{a1} = 271,03$  V

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{ah}$ [%]	0,00	100,00	0,00	10,28	0,00	4,92	0,00	7,44	0,00	8,64
$\alpha_{ah}$ [graus]		-0,74	0,00	6,76	0,00	142,30	0,00	146,70	0,00	-47,40

Ref.:  $I_{a1} = 99,98$  A

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{ah}$ [%]	0,00	100,00	0,00	68,84	0,00	34,90	0,00	27,85	0,00	5,93
$\beta_{ah}$ [graus]		-22,00	0,00	100,00	0,00	-175,00	0,00	-65,00	0,00	48,00

Ref.:  $V_{b1} = 271,03$  V

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{bh}$ [%]	0,00	104,49	0,00	10,53	0,00	5,79	0,00	8,58	0,00	11,05
$\alpha_{bh}$ [graus]		-121,20	0,00	6,28	0,00	167,40	0,00	125,20	0,00	-49,19

Ref.:  $I_{b1} = 99,98$  A

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{bh}$ [%]	0,00	93,49	0,00	79,77	0,00	42,30	0,00	45,81	0,00	40,59
$\beta_{bh}$ [graus]		-120,80	0,00	99,49	0,00	-65,09	0,00	-167,90	0,00	41,89

Ref.:  $V_{c1} = 271,03$  V

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{ch}$ [%]	0,00	103,73	0,00	8,69	0,00	4,30	0,00	6,58	0,00	8,22
$\alpha_{ch}$ [graus]		121,30	0,00	9,70	0,00	157,70	0,00	136,50	0,00	-47,35

Ref.:  $I_{c1} = 99,98$  A

$h$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{ch}$ [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\beta_{ch}$ [graus]		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

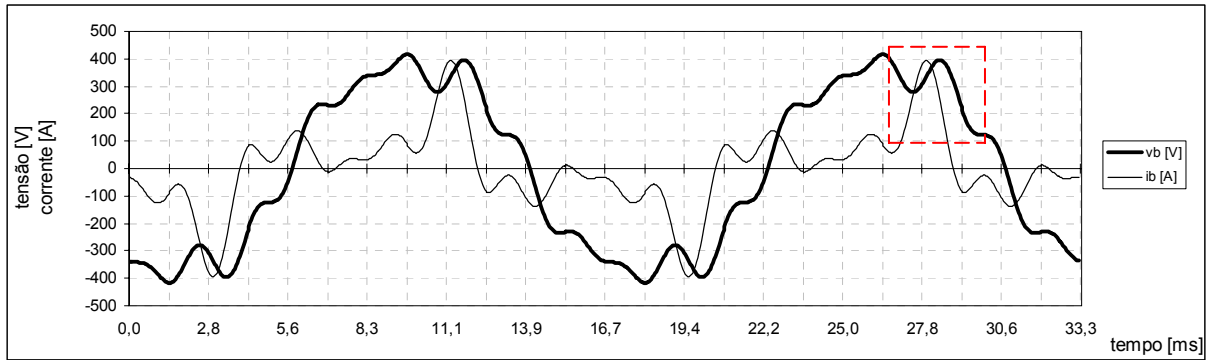


Figura 47 - Forma de onda da tensão e da corrente referente aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 48. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados.  
Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

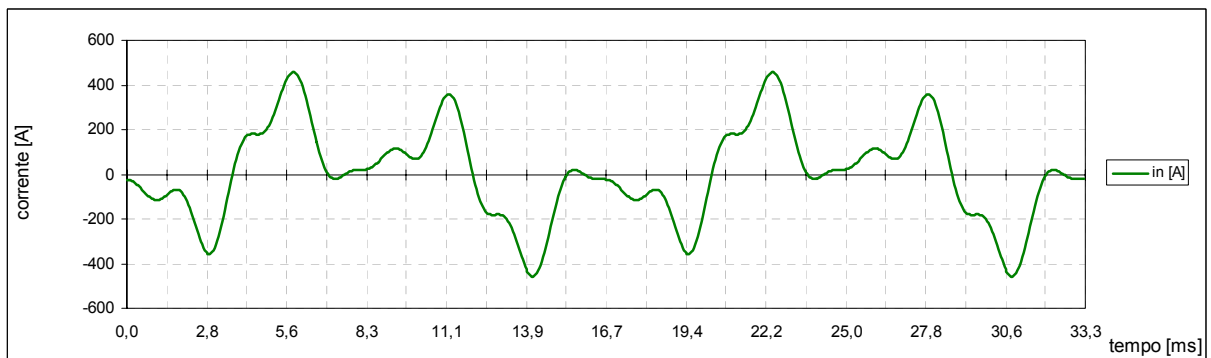


Figura 48 Forma de onda da corrente de neutro, calculada a partir da soma das correntes das fases, referente à composição harmônica de correntes da Tabela 48. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.  
Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Embora tal mudança não resulte em diferença no valor eficaz da corrente da fase  $b$ , produz uma pequena diferença no valor eficaz da corrente de neutro, conforme pode ser verificado na comparação entre a Tabela 49 e a Tabela 45.

Tabela 49 - Tensões, correntes, ângulos e *DHT*. Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado	Fundamental			Não-Fundamental					
<b>Tensões</b> $V$ [V] $\alpha$ [graus]	$V_a$	274,53	$V_{a1}$	271,03	$\alpha_{a1}$	359,26	$V_{aH}$	43,69	$DHT_{Va}$	0,1612
	$V_b$	287,58	$V_{b1}$	283,20	$\alpha_{b1}$	238,80	$V_{bH}$	49,98	$DHT_{Vb}$	0,1765
	$V_c$	283,80	$V_{c1}$	281,14	$\alpha_{c1}$	121,30	$V_{cH}$	38,79	$DHT_{Vc}$	0,1380
	$V_{ab}$	481,29	$V_{ab1}$	481,12	$\alpha_{ab1}$	29,75	$V_{abH}$	12,80	$DHT_{Vab}$	0,0266
	$V_{bc}$	482,62	$V_{bc1}$	482,46	$\alpha_{bc1}$	269,92	$V_{bcH}$	12,40	$DHT_{Vbc}$	0,0257
	$V_{ca}$	483,11	$V_{ca1}$	483,06	$\alpha_{ca1}$	149,70	$V_{caH}$	7,24	$DHT_{Vca}$	0,0150
	$V_e$	280,26	$V_{e1}$	278,46			$V_{eH}$	31,72	$DHT_{Ve}$	0,1139
			$V_{1+}$	278,41	$\alpha_{1+}$	359,79				
			$V_{1-}$	0,66	$\alpha_{1-}$	257,32				
			$V_{10}$	7,48	$\alpha_{10}$	194,23				
		$V_{e1cs}$	278,46							
<b>Correntes</b> $I$ [A] $\beta$ [graus]	$I_a$	129,46	$I_{a1}$	99,98	$\beta_{a1}$	338,00	$I_{aH}$	82,25	$DHT_{Ia}$	0,8227
	$I_b$	143,63	$I_{b1}$	93,47	$\beta_{b1}$	239,20	$I_{bH}$	109,06	$DHT_{Ib}$	1,1668
	$I_c$	0,00	$I_{c1}$	0,00	$\beta_{c1}$	0,00	$I_{cH}$	0,00	$DHT_{Ic}$	fund=0
	$I_n$	210,75	$I_{n1}$	125,99	$\beta_{n1}$	290,85	$I_{nH}$	168,94	$DHT_{In}$	1,3409
	$I_e$	165,13	$I_{e1}$	107,40			$I_{eH}$	125,43	$DHT_{Ie}$	1,1679
			$I_{1+}$	63,38	$\beta_{1+}$	348,24				
			$I_{1-}$	21,52	$\beta_{1-}$	43,14				
			$I_{10}$	42,00	$\beta_{10}$	290,85				
			$I_{e1cs}$	107,40						

Valores referentes a uma janela de 12 ciclos com 64 amostras por ciclo da fundamental de 60 Hz.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

A nova comparação com os resultados provenientes do exemplo da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) é fornecida na Tabela 50 para tensões e correntes. Os novos valores obtidos para as potências são mostrados na Tabela 51.

Tabela 50 - Tensões, Correntes e *DHT*. Valores comparativos

[pu]	Combinado	Fundamental			Não-Fundamental					
<b>Tensões</b>	$V_a$	1,00000	$V_{a1}$	1,00000	$\alpha_{a1}$	1,00000	$V_{aH}$	0,99984	$DHT_{Va}$	1,00131
	$V_b$	1,00002	$V_{b1}$	1,00000	$\alpha_{b1}$	1,00000	$V_{bH}$	1,00089	$DHT_{Vb}$	1,00284
	$V_c$	0,99998	$V_{c1}$	1,00003	$\alpha_{c1}$	1,00000	$V_{cH}$	0,99854	$DHT_{Vc}$	0,99990
	$V_{ab}$	0,99972	$V_{ab1}$	0,99972	$\alpha_{ab1}$		$V_{abH}$	1,00050	$DHT_{Vab}$	0,98507
	$V_{bc}$	1,00044	$V_{bc1}$	1,00044	$\alpha_{bc1}$		$V_{bcH}$	1,00494	$DHT_{Vbc}$	0,98859
	$V_{ca}$	0,99977	$V_{ca1}$	0,99977	$\alpha_{ca1}$		$V_{caH}$	1,00239	$DHT_{Vca}$	0,99881
	$V_e$	1,00003	$V_{e1}$	1,00002			$V_{eH}$	1,00116	$DHT_{Ve}$	0,99914
			$V_{1+}$	0,96504	$\alpha_{1+}$	0,99997				
			$V_{1-}$	1,04743	$\alpha_{1-}$	0,93015				
			$V_{10}$	2,51044	$\alpha_{10}$	0,89523				
		$V_{e1cs}$	0,96519							
<b>Correntes</b>	$I_a$	1,00050	$I_{a1}$	1,00000	$\beta_{a1}$	1,00000	$I_{aH}$	1,00000	$DHT_{Ia}$	0,99959
	$I_b$	0,99996	$I_{b1}$	0,99991	$\beta_{b1}$	1,00000	$I_{bH}$	0,99990	$DHT_{Ib}$	0,99980
	$I_n$	1,00041	$I_{n1}$	1,00048	$\beta_{n1}$		$I_{nH}$	1,00024	$DHT_{In}$	0,99993
	$I_e$	1,00032	$I_{e1}$	1,00022			$I_{eH}$	1,00018	$DHT_{Ie}$	0,99988
			$I_{1+}$	0,99992	$\beta_{1+}$	1,00000				
			$I_{1-}$	0,99984	$\beta_{1-}$	0,13616				
			$I_{10}$	0,99992	$\beta_{10}$	0,99999				
			$I_{e1cs}$	0,99992						

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Tabela 51 - Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado		Fundamental		Não Fundamental					
<b>Aparente</b> [VA]	$S_a$	35.541,8	$S_{a1}$	27.097,6	$S_{aH}$	3.593,7	$S_{aN}$	22.998,7		
	$S_b$	41.305,8	$S_{b1}$	26.471,0	$S_{bH}$	5.451,3	$S_{bN}$	31.708,9		
	$S_c$	0,0	$S_{c1}$	0,0	$S_{cH}$	0,0	$S_{cN}$	0,0		
	$S_e$	138.838,6	$S_{e1}$	89.721,5	$S_{eH}$	11.934,9	$S_{eN}$	105.953,9		
	$S_A$	76.847,6	$S_{e1+}$	52.939,9						
			$S_{e1-}$	42,6						
			$S_{e10}$	942,5						
			$SU_1$	72.438,3						
<b>Ativo</b> [W]	$P_a$	24.996,2	$P_{a1}$	25.253,4	$P_{aH}$	-257,2				
	$P_b$	26.333,8	$P_{b1}$	26.470,4	$P_{bH}$	-136,6				
	$P_c$	0,0	$P_{c1}$	0,0	$P_{cH}$	0,0				
	$P$	51.330,0	$P_1$	51.723,8	$P_H$	-393,8				
			$P_{1+}$	51.867,7						
			$P_{1-}$	-35,2						
			$P_{10}$	-108,6						
<b>Não Ativo</b> [var]	$N_a$	25.266,7	$Q_{a1}$	9.825,6	$D_{aH}$	3.584,5	$D_{aV}$	4.368,4	$D_{aI}$	22.292,2
	$N_b$	31.823,0	$Q_{b1}$	-184,8	$D_{bH}$	5.449,6	$D_{bV}$	4.672,1	$D_{bI}$	30.885,5
	$N_c$	0,0	$Q_{c1}$	0,0	$D_{cH}$	0,0	$D_{cV}$	0,0	$D_{cI}$	0,0
	$N$	129.001,6	$Q_{1+}$	10.601,0	$D_{eH}$	11.928,4	$D_{eV}$	10.219,5	$D_{eI}$	104.782,4
			$Q_{1-}$	-23,9						
			$Q_{10}$	-936,3						
<b>Utilização</b>	$P_{Fa}$	0,7033	$P_{Fa1}$	0,9319						
	$P_{Fb}$	0,6375	$P_{Fb1}$	1,0000						
	$P_{Fc}$	1,0000	$P_{Fc1}$	1,0000						
	$P_{Fe}$	0,3697	$P_{F1}$	0,5765						
	$P_{FA}$	0,6679	$P_{F1+}$	0,9797						
			$P_{F1-}$	-0,8273						
			$P_{F10}$	-0,1153						
<b>Poluição</b>					$S_{aN}/S_{a1}$	0,8487				
					$S_{bN}/S_{b1}$	1,1979				
					$S_{cN}/S_{c1}$	Sc1=0				
					$S_{eN}/S_{e1}$	1,1809				
<b>Desequilíbrio</b>			$SU_1/S_{1+}$	1,3683						

Valores referentes a uma janela de 12 ciclos com 64 amostras por ciclo da fundamental de 60,00 Hz.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Tabela 52 - Potências e demais fatores – Valores comparativos

[pu]	Combinado		Fundamental		Não Fundamental			
<b>Aparente</b>	$S_e$	1,00033	$S_{e1}$	1,00024	$S_{eH}$	1,00116	$S_{eN}$	1,00034
	$S_A$	1,00026	$S_{e1+}$	0,99964				
			$SU_1$	1,02379				
<b>Ativo</b>	$P$	0,99990	$P_1$	0,99988	$P_H$	0,99780		
			$P_{1+}$	0,99972				
			$P_{1-}$	1,30956				
			$P_{10}$	0,86504				
<b>Não Ativo</b>	$N$	1,00038			$D_{eH}$	1,00137	$D_{eV}$	1,00114
			$Q_{1+}$	0,99901				$D_{eI}$
			$Q_{1-}$	0,88913				1,00038
			$Q_{10}$	2,60944				
<b>Utilização</b>	$P_{Fe}$	0,99922	$P_{F1}$	0,99964				
	$P_{FA}$	0,99992	$P_{F1+}$	0,99974				
<b>Poluição</b>					$S_{eN}/S_{e1}$	1,00010		
<b>Desequilíbrio</b>			$SU_1/S_{1+}$	1,02415				

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

A Tabela 52 fornece a nova comparação de resultados para as potências. Tanto no que se refere às variáveis da coluna Combinado quanto da coluna Não Fundamental, a mudança efetuada no ângulo da componente harmônica de corrente tornou os valores mais próximos aos indicados na resolução proposta no Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000). Além disso, tal correção tornou as formas de onda da corrente da fase  $b$  e da corrente de neutro equivalentes às fornecidas no referido exemplo. Isto indica uma provável incoerência entre a tabela de composição harmônica e as formas de onda propostas no exemplo.

Com relação aos resultados obtidos para a parte fundamental, algumas considerações devem ser feitas em função das diferenças encontradas nos valores da potência de desequilíbrio, nas potências ativa e reativa de seqüência zero e de seqüência negativa em relação aos fornecidos no exemplo da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), conforme citado anteriormente.

No Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) os resultados para os exemplos são fornecidos em tabelas nas quais os valores das potências têm como referência o valor da potência aparente fundamental sendo esta considerada a base percentual (100%). Na Figura 49 é mostrada a tabela extraída do Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) com os resultados relativos ao exemplo em estudo. O valor base de referência para os valores percentuais é o valor da potência aparente fundamental dado por  $S_{e1} = 3 \times 278,45 \times 107,38 = 89,70$  kVA.



$S_e = 154.73$	$S_{ei} = 100.00$ $S_1^+ = 59.04$ $S_{U1} = 78.88$	$S_{eN} = 118.08$ $S_{eH} = 13.29$
$P = 57.23$	$P_1 = 57.67$ $P_1^+ = 57.84$ $P_1^- = -0.03$ $P_1^0 = -0.14$	$P_H = -0.44$
$N = 143.76$	$Q_1^+ = 11.83$ $Q_1^- = -0.03$ $Q_1^0 = -0.40$	$D_{eI} = 116.77$ $D_{eV} = 11.38$ $D_{eH} = 13.28$
$S_V = 84.62$	$Q_B = 2.62$	$D_B = 62.28$
$S_A = 85.65$		

Figura 49 - Resultados da avaliação dos valores de potência e demais índices. Os valores indicados correspondem a percentuais da potência aparente efetiva fundamental,  $S_{e1}=89,70 \text{ kVA} = 100 \%$   
 Fonte: Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000, p. 37).

Considerando o uso da Equação (4.54), fornecida na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), para o cálculo da potência aparente de desequilíbrio resulta:

$$S_{U1} = \sqrt{100^2 - 59,04^2}$$

$$S_{U1} = 80,71$$

Substituindo o valor 78,88 %, referente à potência aparente de desequilíbrio, na tabela da Figura 49 pelo novo valor, 80,71%, e novamente comparando os resultados pode-se verificar que as diferenças anteriormente encontradas, no que se refere à própria potência aparente de desequilíbrio e também ao fator de desequilíbrio (recalculado em função da alteração proposta), diminuem de forma bastante significativa. Isto é mostrado na Tabela 53.

Tabela 53 - Potências e demais fatores – Valores comparativos

[pu]	Combinado	Fundamental	Não Fundamental		
<b>Aparente</b>	$S_e$ 1,00033	$S_{e1}$ 1,00024	$S_{eH}$ 1,00116	$S_{eN}$ 1,00034	
	$S_A$ 1,00026	$S_{e1+}$ 0,99964			
		$S_{U1}$ 1,00056			
<b>Ativo</b>	$P$ 0,99990	$P_1$ 0,99988	$P_H$ 0,99780		
		$P_{1+}$ 0,99972			
		$P_{1-}$ 1,30956			
		$P_{10}$ 0,86504			
<b>Não Ativo</b>	$N$ 1,00038		$D_{eH}$ 1,00137	$D_{eV}$ 1,00114	$D_{eI}$ 1,00038
		$Q_{1+}$ 0,99901			
		$Q_{1-}$ 0,88913			
		$Q_{10}$ 2,60944			
<b>Utilização</b>	$P_{Fe}$ 0,99922	$P_{F1}$ 0,99964			
	$P_{FA}$ 0,99992	$P_{F1+}$ 0,99974			
<b>Poluição</b>			$S_{eN}/S_{e1}$ 1,00010		
<b>Desequilíbrio</b>		$S_{U1}/S_{1+}$ 1,00092			

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Algumas evidências indicam, ainda, que os valores das componentes simétricas de tensão e corrente fundamentais utilizados para o cálculo da potência fundamental ativa e reativa de seqüência zero, negativa e positiva, apresentam valores incoerentes no exemplo fornecido. Os valores propostos na resolução do exemplo, no Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), são mostrados na Figura 50.

$$\begin{aligned}
 V_{a1} &= 271.03 \angle -0.74^\circ \text{ V}; & V_{b1} &= 283.2 \angle -121.2^\circ \text{ V}; & V_{c1} &= 281.13 \angle -121.3^\circ \text{ V} \\
 V_1^+ &= 288.49 \angle -0.20^\circ \text{ V}; & V_1^- &= 0.63 \angle -83.36^\circ \text{ V}; & V_1^0 &= 2.98 \angle -143.04^\circ \text{ V} \\
 I_{a1} &= 99.98 \angle -22^\circ \text{ A}; & I_{b1} &= 93.48 \angle -120.8^\circ \text{ A}; & I_{c1} &= 0 \text{ A} \\
 I_1^+ &= 63.39 \angle -11.76^\circ \text{ A}; & I_1^- &= 21.52 \angle -43.15^\circ \text{ A}; & I_1^0 &= 42.00 \angle -69.15^\circ \text{ A}
 \end{aligned}$$

Figura 50 - Resultados da avaliação dos valores de tensão e corrente. Representação eficaz fasorial.

Fonte: Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000, p. 36).

A primeira evidência está relacionada ao fato de que, conforme a própria Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), o valor da tensão fundamental efetiva pode ser calculado a partir de dois métodos distintos, a partir dos valores das componentes simétricas de tensão fundamentais ou a partir os valores eficazes das tensões de linha e de fase. Esta igualdade pode ser observada na Tabela 49, que apresenta valores idênticos para  $V_{e1}$  e  $V_{e1cs}$ . O mesmo é válido para  $I_{e1}$  e  $I_{e1cs}$ . Esta igualdade não é verificada se forem usados os valores das

componentes simétricas de tensão e corrente indicados na Figura 50 e que fazem parte da solução proposta no Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) para este exemplo.

A segunda evidência está relacionada ao valor do desequilíbrio de tensão fundamental. De acordo com a Norma IEC 61000-4-30 (IEC, 2003), o desequilíbrio de tensão fundamental pode ser calculado a partir da divisão do valor da tensão fundamental de seqüência negativa pelo valor da tensão fundamental de seqüência positiva (aqui denominado Método das Componentes Simétricas), podendo, também, ser calculado a partir de uma relação entre os valores eficazes das tensões de linha fundamentais (aqui denominado Método das Tensões de Linha). Desta forma, desde que respeitada a correta seqüência de fases na aplicação do Método das Componentes Simétricas, é válida a igualdade

$$\frac{V_1^-}{V_1^+} \times 100 = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\eta}}{1 + \sqrt{3 - 6\eta}}} \times 100 \quad (6.2),$$

sendo

$$\eta = \frac{V_{ab1}^4 + V_{bc1}^4 + V_{ca1}^4}{(V_{ab1}^2 + V_{bc1}^2 + V_{ca1}^2)^2} \quad (6.3).$$

A Tabela 54 mostra a coerência entre os valores de desequilíbrio de tensão calculados através dos dois diferentes métodos a partir dos valores da Tabela 48 que contém os resultados provenientes do algoritmo desenvolvido. Os valores das tensões fundamentais de linha, assim como das componentes simétricas de tensão fundamental, foram considerados aqui com 12 casas decimais.

Tabela 54 - Desequilíbrio de Tensão - Resultados obtidos a partir do Método das Componentes Simétricas e a partir do Método das Tensões de Linha

Desequilíbrio de tensão (fundamental) [%]	
Método das Componentes Simétricas	0,23702
Método das Tensões de Linha	0,23702

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

A Tabela 55 mostra os resultados obtidos a partir dos valores das componentes simétricas e dos valores das tensões de linha propostos no exemplo resolvido da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000). Para este caso foram considerados valores das tensões de linha e componentes simétricas de tensão fundamental com 2 casas decimais.

Tabela 55 - Desequilíbrio de Tensão - Resultados obtidos a partir do Método das Componentes Simétricas e a partir do Método das Tensões de Linha

<b>Desequilíbrio de tensão (fundamental) [%]</b>	
Método das Componentes Simétricas	0,21838
Método das Tensões de Linha	0,22872

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Como o fato de usar uma quantidade maior de casas decimais poderia levar a diferença encontrada, foi feita simulação considerando os valores das tensões de linha e das componentes simétricas de tensão fundamental, obtidos através do algoritmo proposto, também com duas casas decimais. Os resultados encontrados são os fornecidos na Tabela 56.

Tabela 56 - Desequilíbrio de Tensão - Resultados obtidos a partir do Método das Componentes Simétricas e a partir do Método das Tensões de Linha

<b>Desequilíbrio de tensão (fundamental) [%]</b>	
Método das Componentes Simétricas	0,23706
Método das Tensões de Linha	0,23776

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor

Quando os valores utilizados para o cálculo de desequilíbrio de tensão são os valores obtidos pelo algoritmo proposto, arredondados com duas casas decimais, a diferença percentual encontrada na comparação entre os resultados provenientes dos dois métodos de cálculo de desequilíbrio fica em torno de 0,29 %. Quando os valores utilizados para o cálculo de desequilíbrio de tensão são os valores propostos na solução do exemplo no Anexo A, da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), também arredondados com duas casas decimais, a diferença percentual encontrada entre os dois métodos de cálculo de desequilíbrio fica em torno de 4,5 %.

A diferença encontrada para o valor de desequilíbrio de tensão fundamental, quando considerados valores de componentes simétricas e tensões de linha fornecidas na resolução do exemplo, indica uma provável incoerência visto que os valores de desequilíbrio deveriam ser semelhantes independentemente do método utilizado. Isto obviamente resulta em diferenças nos valores das potências ativas e reativas fundamentais de seqüência zero e de seqüência negativa, quando comparadas com os valores obtidos através do algoritmo desenvolvido.

A Figura 51, a seguir, mostra o comportamento das ondas de potência instantânea e na Figura 52 a energia transferida no período de dois ciclos da frequência fundamental de 60 Hz, podendo ser verificado que a transferência de energia pela fase *b* neste caso é um pouco superior a que ocorre na fase *a*. Uma comparação entre os valores da potência ativa da fase *a* e da potência ativa da fase *b*, Tabela 51, também permite chegar na mesma conclusão.

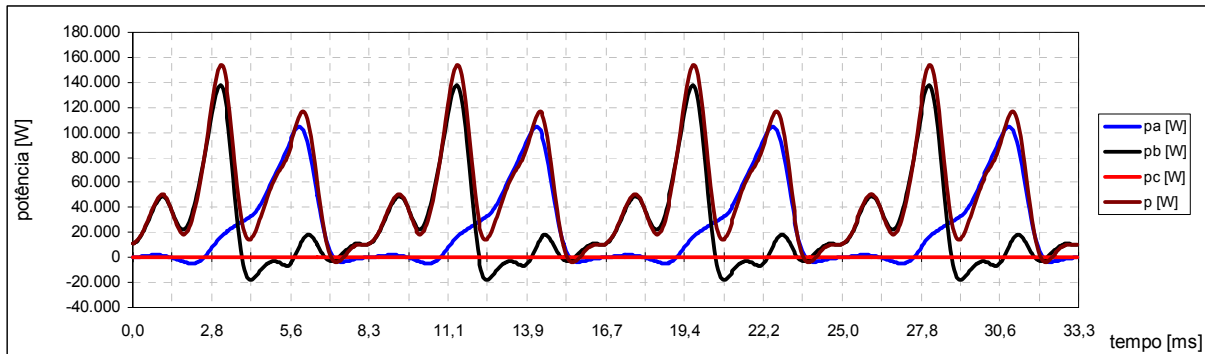


Figura 51 - Formas de onda das potências instantâneas por fase e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicadas na Tabela 48. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

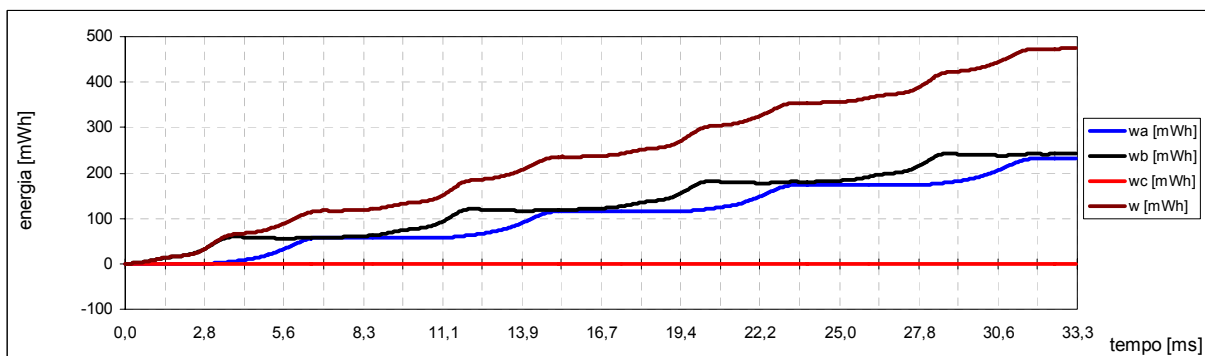


Figura 52 - Formas de onda de transferência de energia em cada uma das fases e total referentes a composição harmônica de tensões e correntes indicada na Tabela 48. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Dois importantes testes referentes ao comportamento do algoritmo desenvolvido em situações práticas serão mostrados a seguir tendo o último exemplo tratado como base.

O primeiro refere-se à operação do algoritmo no 2° e 3° quadrantes, na situação de avaliação da energia fornecida, que pode ocorrer se houver uma inversão no sentido do fluxo de energia no sistema. Tal situação também ocorre na prática, por exemplo, quando os

terminais do secundário dos transformadores de corrente utilizados para medição das correntes das fases são invertidos em termos de polaridade. Tal situação pode ser simulada através da multiplicação de cada uma das amostras de corrente, após a reconstituição da onda tendo por base a tabela de composição harmônica, por um valor unitário negativo.

As formas de onda obtidas após aplicação do procedimento descrito acima são mostradas no gráfico da Figura 53.

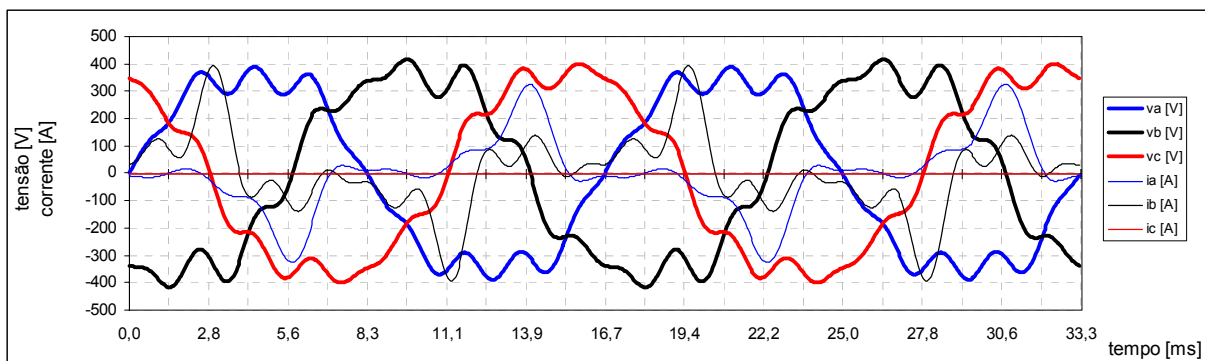


Figura 53 - Formas de onda das tensões e correntes referentes aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 48 considerando a inversão de sinal das correntes. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Os valores obtidos para as tensões e correntes são mostrados na Tabela 57, na qual pode ser observado que a única diferença com relação à Tabela 49 refere-se aos valores dos ângulos das correntes. Os mesmos apresentam uma variação de  $180^\circ$  devido à inversão do sinal das correntes nas fases.

Tabela 57 - Tensões, correntes, ângulos e *DHT* - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado		Fundamental			Não-Fundamental				
<b>Tensões</b> <i>V</i> [V] $\alpha$ [graus]	<i>V<sub>a</sub></i>	274,53	<i>V<sub>a1</sub></i>	271,03	$\alpha_{a1}$	359,26	<i>V<sub>aH</sub></i>	43,69	<i>DHT<sub>Va</sub></i>	0,1612
	<i>V<sub>b</sub></i>	287,58	<i>V<sub>b1</sub></i>	283,20	$\alpha_{b1}$	238,80	<i>V<sub>bH</sub></i>	49,98	<i>DHT<sub>Vb</sub></i>	0,1765
	<i>V<sub>c</sub></i>	283,80	<i>V<sub>c1</sub></i>	281,14	$\alpha_{c1}$	121,30	<i>V<sub>cH</sub></i>	38,79	<i>DHT<sub>Vc</sub></i>	0,1380
	<i>V<sub>ab</sub></i>	481,29	<i>V<sub>ab1</sub></i>	481,12	$\alpha_{ab1}$	29,75	<i>V<sub>abH</sub></i>	12,80	<i>DHT<sub>Vab</sub></i>	0,0266
	<i>V<sub>bc</sub></i>	482,62	<i>V<sub>bc1</sub></i>	482,46	$\alpha_{bc1}$	269,92	<i>V<sub>bcH</sub></i>	12,40	<i>DHT<sub>Vbc</sub></i>	0,0257
	<i>V<sub>ca</sub></i>	483,11	<i>V<sub>ca1</sub></i>	483,06	$\alpha_{ca1}$	149,70	<i>V<sub>caH</sub></i>	7,24	<i>DHT<sub>Vca</sub></i>	0,0150
	<i>V<sub>e</sub></i>	280,26	<i>V<sub>e1</sub></i>	278,46			<i>V<sub>eH</sub></i>	31,72	<i>DHT<sub>Ve</sub></i>	0,1139
			<i>V<sub>1+</sub></i>	278,41	$\alpha_{1+}$	359,79				
			<i>V<sub>1-</sub></i>	0,66	$\alpha_{1-}$	257,32				
			<i>V<sub>1o</sub></i>	7,48	$\alpha_{1o}$	194,23				
		<i>V<sub>e1cs</sub></i>	278,46							
<b>Correntes</b> <i>I</i> [A] $\beta$ [graus]	<i>I<sub>a</sub></i>	129,46	<i>I<sub>a1</sub></i>	99,98	$\beta_{a1}$	158,00	<i>I<sub>aH</sub></i>	82,25	<i>DHT<sub>Ia</sub></i>	0,8227
	<i>I<sub>b</sub></i>	143,63	<i>I<sub>b1</sub></i>	93,47	$\beta_{b1}$	59,20	<i>I<sub>bH</sub></i>	109,06	<i>DHT<sub>Ib</sub></i>	1,1668
	<i>I<sub>c</sub></i>	0,00	<i>I<sub>c1</sub></i>	0,00	$\beta_{c1}$	0,00	<i>I<sub>cH</sub></i>	0,00	<i>DHT<sub>Ic</sub></i>	fund=0
	<i>I<sub>n</sub></i>	210,75	<i>I<sub>n1</sub></i>	125,99	$\beta_{n1}$	110,85	<i>I<sub>nH</sub></i>	168,94	<i>DHT<sub>In</sub></i>	1,3409
	<i>I<sub>e</sub></i>	165,13	<i>I<sub>e1</sub></i>	107,40			<i>I<sub>eH</sub></i>	125,43	<i>DHT<sub>Ie</sub></i>	1,1679
			<i>I<sub>1+</sub></i>	63,38	$\beta_{1+}$	168,24				
			<i>I<sub>1-</sub></i>	21,52	$\beta_{1-}$	223,14				
			<i>I<sub>1o</sub></i>	42,00	$\beta_{1o}$	110,85				
			<i>I<sub>e1cs</sub></i>	107,40						
	Valores referentes a uma janela de 12 ciclos com 64 amostras por ciclo da fundamental de 60 Hz.									

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Os valores das potências e demais fatores são mostrados na Tabela 58, cujas diferenças em relação aos valores da Tabela 51 estão relacionadas somente ao sinal das potências ativas e ao sinal dos fatores de potência e de deslocamento denominados, de acordo com a nomenclatura proposta na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), fatores de utilização de linha.

Tabela 58 - Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado		Fundamental		Não Fundamental					
<b>Aparente</b> [VA]	$S_a$	35.541,8	$S_{a1}$	27.097,6	$S_{aH}$	3.593,7	$S_{aN}$	22.998,7		
	$S_b$	41.305,8	$S_{b1}$	26.471,0	$S_{bH}$	5.451,3	$S_{bN}$	31.708,9		
	$S_c$	0,0	$S_{c1}$	0,0	$S_{cH}$	0,0	$S_{cN}$	0,0		
	$S_e$	138.838,6	$S_{e1}$	89.721,5	$S_{eH}$	11.934,9	$S_{eN}$	105.953,9		
	$S_A$	76.847,6	$S_{e1+}$	52.939,9						
			$S_{e1-}$	42,6						
			$S_{e10}$	942,5						
			$SU_1$	72.438,3						
<b>Ativo</b> [W]	$P_a$	-24.996,2	$P_{a1}$	-25.253,4	$P_{aH}$	257,2				
	$P_b$	-26.333,8	$P_{b1}$	-26.470,4	$P_{bH}$	136,6				
	$P_c$	0,0	$P_{c1}$	0,0	$P_{cH}$	0,0				
	$P$	-51.330,0	$P_1$	-51.723,8	$P_H$	393,8				
			$P_{1+}$	-51.867,7						
			$P_{1-}$	35,2						
			$P_{10}$	108,6						
<b>Não Ativo</b> [var]	$N_a$	25.266,7	$Q_{a1}$	9.825,6	$D_{aH}$	3.584,5	$D_{aV}$	4.368,4	$D_{aI}$	22.292,2
	$N_b$	31.823,0	$Q_{b1}$	-184,8	$D_{bH}$	5.449,6	$D_{bV}$	4.672,1	$D_{bI}$	30.885,5
	$N_c$	0,0	$Q_{c1}$	0,0	$D_{cH}$	0,0	$D_{cV}$	0,0	$D_{cI}$	0,0
	$N$	129.001,6	$Q_{1+}$	10.601,0	$D_{eH}$	11.928,4	$D_{eV}$	10.219,5	$D_{eI}$	104.782,4
			$Q_{1-}$	-23,9						
			$Q_{10}$	-936,3						
<b>Utilização</b>	$P_{Fa}$	-0,7033	$P_{Fa1}$	-0,9319						
	$P_{Fb}$	-0,6375	$P_{Fb1}$	-1,0000						
	$P_{Fc}$	1,0000	$P_{Fc1}$	1,0000						
	$P_{Fe}$	-0,3697	$P_{F1}$	-0,5765						
	$P_{FA}$	-0,6679	$P_{F1+}$	-0,9797						
			$P_{F1-}$	0,8273						
			$P_{F10}$	0,1153						
<b>Poluição</b>					$S_{aN}/S_{a1}$	0,8487				
					$S_{bN}/S_{b1}$	1,1979				
					$S_{cN}/S_{c1}$	Sc1=0				
					$S_{eN}/S_{e1}$	1,1809				
<b>Desequilíbrio</b>			$SU_1/S_{1+}$	1,3683						

Valores referentes a uma janela de 12 ciclos com 64 amostras por ciclo da fundamental de 60,00 Hz.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

O sinal negativo para as potências indica, desta forma, a medição de energia fornecida enquanto o valor positivo, na Tabela 51, indica energia recebida. Os sinais negativos nos fatores de utilização foram mantidos por convenção para também indicar a operação ou medição no 2° ou 3° quadrantes. É importante ressaltar que os valores absolutos das potências não são alterados, mostrando a devida coerência com o pressuposto de que, independente da medição ser feita considerando energia recebida ou fornecida, os valores devem ser os mesmos, respeitada a devida convenção de sinais para as potências ativas.

A seguir, são fornecidos os gráficos da corrente de neutro, Figura 54, das potências instantâneas, Figura 55 e da energia transferida, Figura 56. Os mesmos devem ser comparados



com os respectivos gráficos referentes ao sistema em situação de medição de energia fornecida.

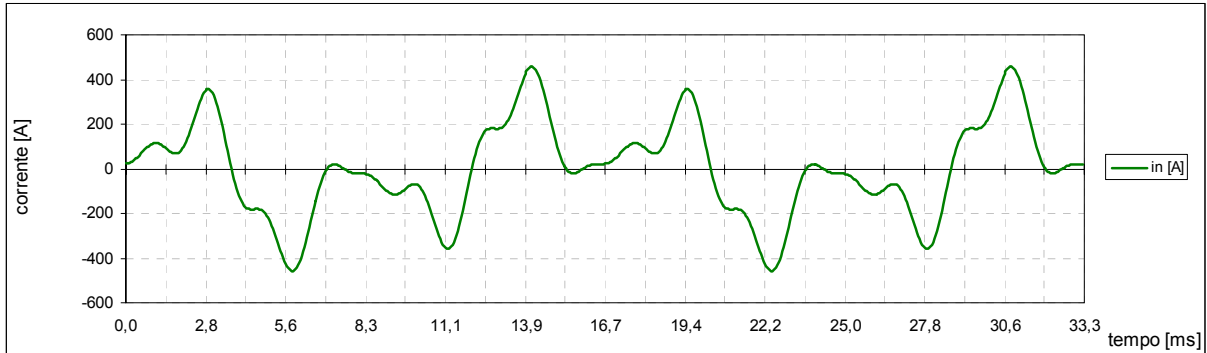


Figura 54 - Forma de onda da corrente de neutro, calculada a partir da soma das correntes das fases, referente à composição harmônica de correntes da Tabela 48 e considerando a inversão do sinal das correntes das fases. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

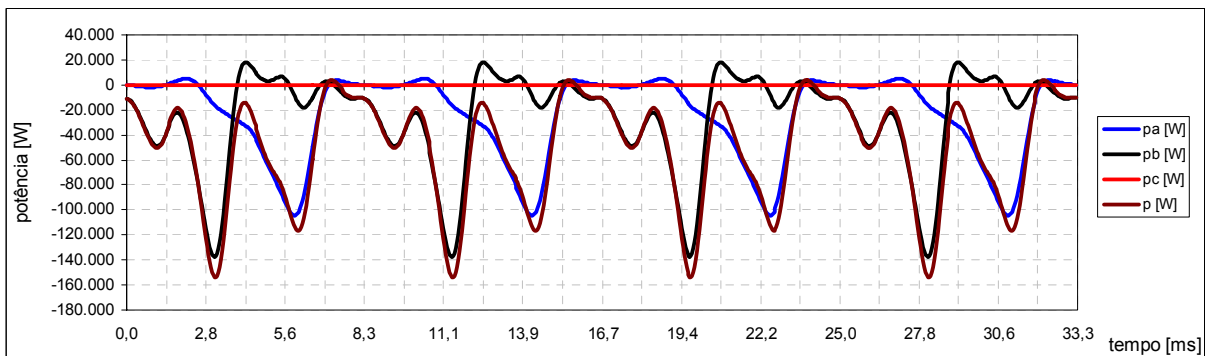


Figura 55 - Formas de onda das potências instantâneas por fase e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicadas na Tabela 48 e considerando a inversão do sinal das correntes. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

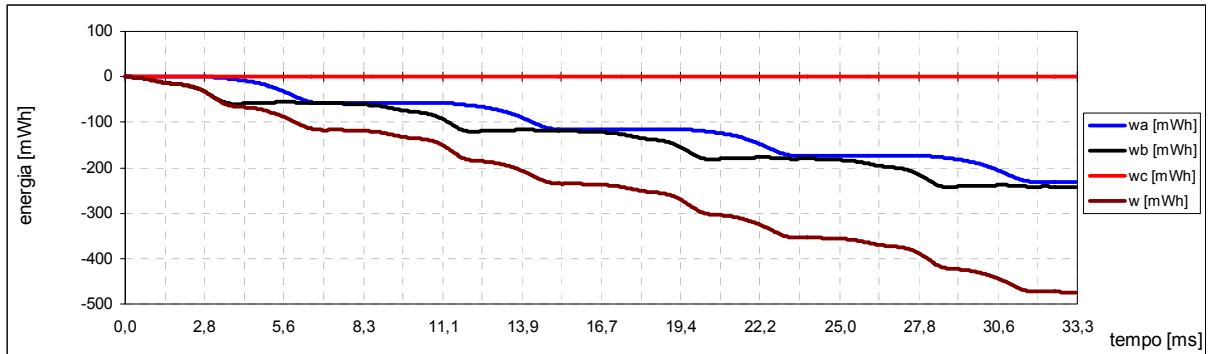


Figura 56 - Formas de onda de transferência de energia em cada uma das fases e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicada na Tabela 48 considerando a inversão do sinal das correntes. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

O segundo teste refere-se ao fato de que, na prática, não obrigatoriamente a avaliação de um determinado conjunto de ciclos esteja referenciada em relação à fase  $a$  (ângulo da componente fundamental de tensão igual a zero) ou, de forma análoga, que devido ao instante em que determinada janela iniciou, a primeira amostra ( $k=1$ ) das tensões e correntes possa ser obtida em qualquer ponto das ondas de tensão e corrente. Em termos de simulação, isso é obtido através da defasagem conjunta de todos os sinais de tensão e corrente. De forma similar ao ocorrido no teste anterior, espera-se, considerando que a composição harmônica é a mesma e que não aconteceram alterações nos módulos das componentes harmônicas ou na sua relação com as respectivas fundamentais, que o algoritmo detecte apenas variações nos ângulos das componentes fundamentais de tensão e corrente em relação à referência. Da mesma forma espera-se, ainda, que os valores efetivos das tensões e correntes, assim como das potências e demais fatores, não sejam alterados.

A Figura 57 a seguir mostra as tensões e correntes para uma defasagem de  $50^\circ$ , escolhida aleatoriamente, em relação à referência usada anteriormente. Isto equivaleria, para sinais estacionários, a uma janela de 12 ciclos cujo início de captação se deu cerca de 2,315 ms após a janela de captação dos 12 ciclos considerada no exemplo inicial tratado anteriormente. O valor de referência de tempo do instante inicial foi mantido como  $t=0$ .

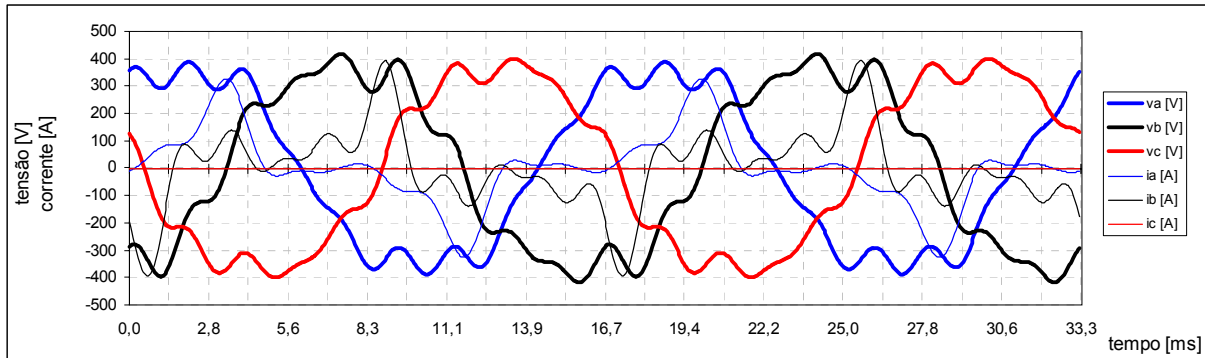


Figura 57 - Formas de onda das tensões e correntes referentes aos valores de composição harmônica indicados na Tabela 48, considerando defasagem de  $50^\circ$  para todos os sinais. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Na Tabela 59 são mostrados valores obtidos para as tensões e correntes que podem ser comparados com os valores mostrados na Tabela 49. Na Tabela 60 são indicados valores de potências e demais fatores que podem ser comparados com os indicados na Tabela 58.

Tabela 59 - Tensões, correntes, ângulos e *DHT* - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado		Fundamental			Não-Fundamental				
<b>Tensões</b>	$V_a$	274,53	$V_{a1}$	271,03	$\alpha_{a1}$	49,26	$V_{aH}$	43,69	$DHT_{Va}$	0,1612
$V$ [V]	$V_b$	287,58	$V_{b1}$	283,20	$\alpha_{b1}$	288,80	$V_{bH}$	49,98	$DHT_{Vb}$	0,1765
$\alpha$ [graus]	$V_c$	283,80	$V_{c1}$	281,14	$\alpha_{c1}$	171,30	$V_{cH}$	38,79	$DHT_{Vc}$	0,1380
	$V_{ab}$	481,29	$V_{ab1}$	481,12	$\alpha_{ab1}$	29,75	$V_{abH}$	12,80	$DHT_{Vab}$	0,0266
	$V_{bc}$	482,62	$V_{bc1}$	482,46	$\alpha_{bc1}$	269,92	$V_{bcH}$	12,40	$DHT_{Vbc}$	0,0257
	$V_{ca}$	483,11	$V_{ca1}$	483,06	$\alpha_{ca1}$	149,70	$V_{caH}$	7,24	$DHT_{Vca}$	0,0150
	$V_e$	280,26	$V_{e1}$	278,46			$V_{eH}$	31,72	$DHT_{Ve}$	0,1139
			$V_{1+}$	278,41	$\alpha_{1+}$	49,79				
			$V_{1-}$	0,66	$\alpha_{1-}$	307,32				
			$V_{1o}$	7,48	$\alpha_{1o}$	244,23				
			$V_{e1cs}$	278,46						
<b>Correntes</b>	$I_a$	129,46	$I_{a1}$	99,98	$\beta_{a1}$	28,00	$I_{aH}$	82,25	$DHT_{Ia}$	0,8227
$I$ [A]	$I_b$	143,63	$I_{b1}$	93,47	$\beta_{b1}$	289,20	$I_{bH}$	109,06	$DHT_{Ib}$	1,1668
$\beta$ [graus]	$I_c$	0,00	$I_{c1}$	0,00	$\beta_{c1}$	0,00	$I_{cH}$	0,00	$DHT_{Ic}$	fund=0
	$I_n$	210,75	$I_{n1}$	125,99	$\beta_{n1}$	290,85	$I_{nH}$	168,94	$DHT_{In}$	1,3409
	$I_e$	165,13	$I_{e1}$	107,40			$I_{eH}$	125,43	$DHT_{Ie}$	1,1679
			$I_{1+}$	63,38	$\beta_{1+}$	38,24				
			$I_{1-}$	21,52	$\beta_{1-}$	93,14				
			$I_{1o}$	42,00	$\beta_{1o}$	340,85				
			$I_{e1cs}$	107,40						

Valores referentes a uma janela de 12 ciclos com 64 amostras por ciclo da fundamental de 60 Hz.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Em relação aos valores dos ângulos das componentes fundamentais, pode ser visto que os mesmos sofreram uma mudança de  $50^\circ$  imposta pelo fato de iniciar a janela com uma defasagem de tempo em torno de 2,3 ms de diferença em relação à situação original.

Com exceção dos ângulos das correntes e tensões fundamentais em relação à referência adotada, os valores das tensões e correntes, assim como das potências e demais fatores, permanecem inalterados em comparação aos valores originais.

Tabela 60 - Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado		Fundamental		Não Fundamental			
<b>Aparente</b> [VA]	$S_a$	35.541,8	$S_{a1}$	27.097,6	$S_{aH}$	3.593,7	$S_{aN}$	22.998,7
	$S_b$	41.305,8	$S_{b1}$	26.471,0	$S_{bH}$	5.451,3	$S_{bN}$	31.708,9
	$S_c$	0,0	$S_{c1}$	0,0	$S_{cH}$	0,0	$S_{cN}$	0,0
	$S_e$	138.838,6	$S_{e1}$	89.721,5	$S_{eH}$	11.934,9	$S_{eN}$	105.953,9
	$S_A$	76.847,6	$S_{e1+}$	52.939,9				
			$S_{e1-}$	42,6				
			$S_{e10}$	942,5				
		$SU_1$	72.438,3					
<b>Ativo</b> [W]	$P_a$	24.996,2	$P_{a1}$	25.253,4	$P_{aH}$	-257,2		
	$P_b$	26.333,8	$P_{b1}$	26.470,4	$P_{bH}$	-136,6		
	$P_c$	0,0	$P_{c1}$	0,0	$P_{cH}$	0,0		
	$P$	51.330,0	$P_1$	51.723,8	$P_H$	-393,8		
			$P_{1+}$	51.867,7				
			$P_{1-}$	-35,2				
			$P_{10}$	-108,6				
<b>Não Ativo</b> [var]	$N_a$	25.266,7	$Q_{a1}$	9.825,6	$D_{aH}$	3.584,5	$D_{aV}$	4.368,4
	$N_b$	31.823,0	$Q_{b1}$	-184,8	$D_{bH}$	5.449,6	$D_{bV}$	4.672,1
	$N_c$	0,0	$Q_{c1}$	0,0	$D_{cH}$	0,0	$D_{cV}$	0,0
	$N$	129.001,6	$Q_{1+}$	10.601,0	$D_{eH}$	11.928,4	$D_{eV}$	10.219,5
			$Q_{1-}$	-23,9				
			$Q_{10}$	-936,3				
<b>Utilização</b>	$P_{Fa}$	0,7033	$P_{Fa1}$	0,9319				
	$P_{Fb}$	0,6375	$P_{Fb1}$	1,0000				
	$P_{Fc}$	1,0000	$P_{Fc1}$	1,0000				
	$P_{Fe}$	0,3697	$P_{F1}$	0,5765				
	$P_{FA}$	0,6679	$P_{F1+}$	0,9797				
			$P_{F1-}$	-0,8273				
		$P_{F10}$	-0,1153					
<b>Poluição</b>					$S_{aN}/S_{a1}$	0,8487		
					$S_{bN}/S_{b1}$	1,1979		
					$S_{cN}/S_{c1}$	Sc1=0		
					$S_{eN}/S_{e1}$	1,1809		
<b>Desequilíbrio</b>			$SU_1/S_{1+}$	1,3683				

Valores referentes a uma janela de 12 ciclos com 64 amostras por ciclo da fundamental de 60,00 Hz.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Uma interessante diferença pode ser verificada na comparação entre o gráfico na Figura 58, que mostra a transferência de energia para a situação do exemplo original, e o gráfico na Figura 59, que mostra a simulação para a situação em que a janela teve início 2,315 ms após a do exemplo original base de comparação. Embora o gráfico da Figura 58 seja idêntico ao da

Figura 52, o mesmo foi repetido no intuito de facilitar a comparação visual com o gráfico da Figura 59.

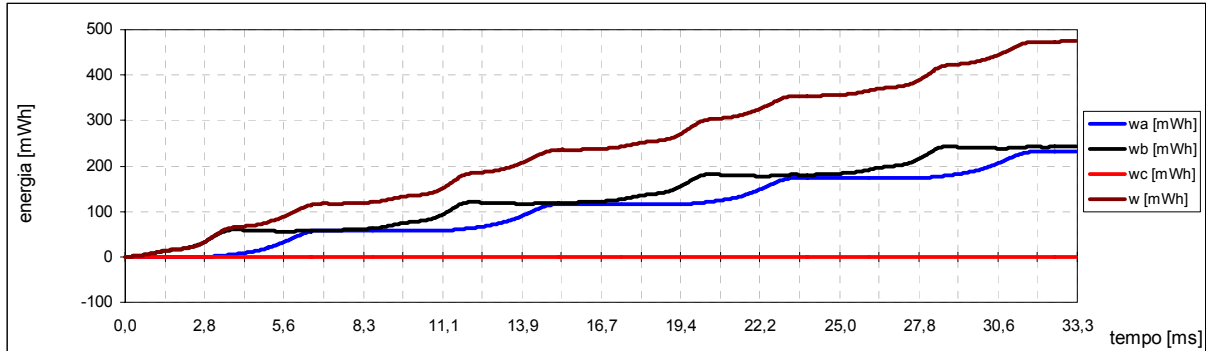


Figura 58 - Formas de onda de transferência de energia em cada uma das fases e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicada na Tabela 48. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

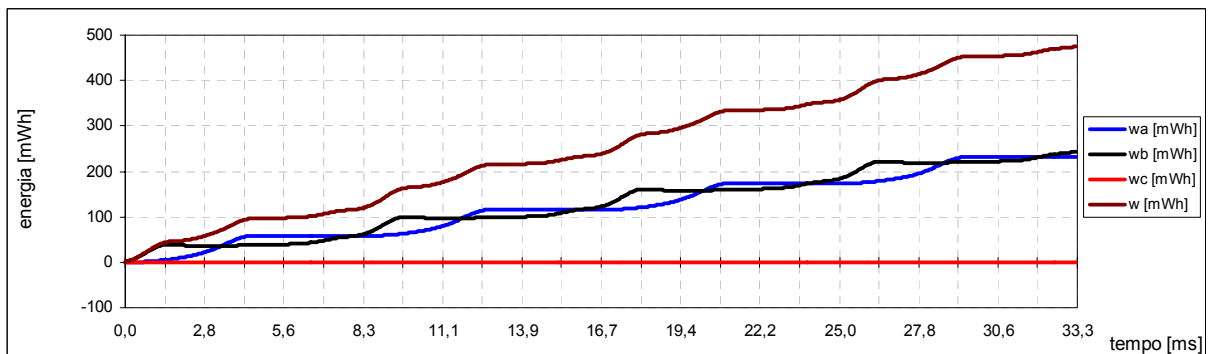


Figura 59 - Formas de onda de transferência de energia em cada uma das fases e total referentes à composição harmônica de tensões e correntes indicada na Tabela 48 considerando início da janela 2,315 ms após exemplo da figura anterior. O instante inicial foi mantido como  $t=0$ .

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Embora o valor final total de energia transferida seja idêntico nos dois casos (para  $t=33,3$  ms), pode ser observado que as formas de onda de transferência de energia diferem. Isso é explicado pelo fato de que, ao iniciar a contagem de energia transferida considerando o valor inicial da mesma como zero nos dois casos, deve ser levado em conta que a energia acumulada nos supostos elementos de característica capacitiva (ou indutiva) não é a mesma para cada caso.

## 6.4 TESTES PRÁTICOS

A aplicação do algoritmo foi feita para algumas situações práticas através do registro de sinais de corrente e tensão feito por registrador digital. Duas destas situações serão mostradas, uma proveniente de registro em laboratório e outra proveniente de registro numa indústria de automóveis. Nas duas situações, em função das características do registrador utilizado, a taxa de amostragem é de 64 amostras por ciclo do sinal fundamental. Os dados de entrada para o algoritmo nesses casos práticos são as amostras dos sinais de tensão de fase e correntes. A corrente de neutro foi calculada a partir da soma das correntes nas fases, segundo a Lei de Kirchhoff, aplicada a cada conjunto de amostras  $k$  das correntes nas fases. Para os testes práticos o esquema geral utilizado é indicado na Figura 60.

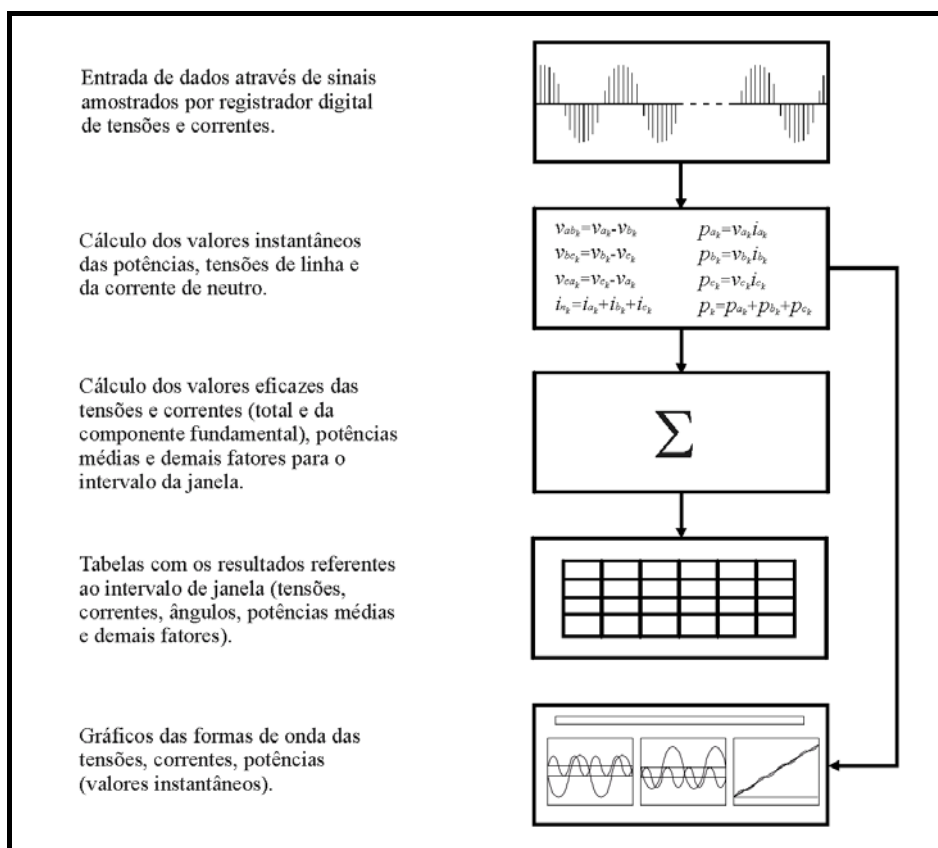


Figura 60 - Esquema geral adotado para os testes práticos. Os sinais de entrada correspondem a valores amostrados de tensões e correntes provenientes de medição feita com registrador digital. Os valores instantâneos das tensões, correntes e potências são calculados e fornecidos através de gráficos.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

### 6.4.1 Carga trifásica não linear

A carga estudada em laboratório é composta de resistores e de indutores operando em região não linear devido à saturação do núcleo. Esta carga foi ligada na configuração estrela com neutro, alimentada por um transformador com ligação delta-estrela e neutro conectado a carga. O fornecimento de energia é proveniente da concessionária local. Desta forma, temos uma situação em que as tensões apresentam desequilíbrio tanto em função do desequilíbrio nas tensões de fornecimento assim como devido à influência de outras cargas conectadas ao sistema. Além disto, as tensões apresentam distorção harmônica. Na Figura 61 é indicado o esquema geral utilizado para esta medição.

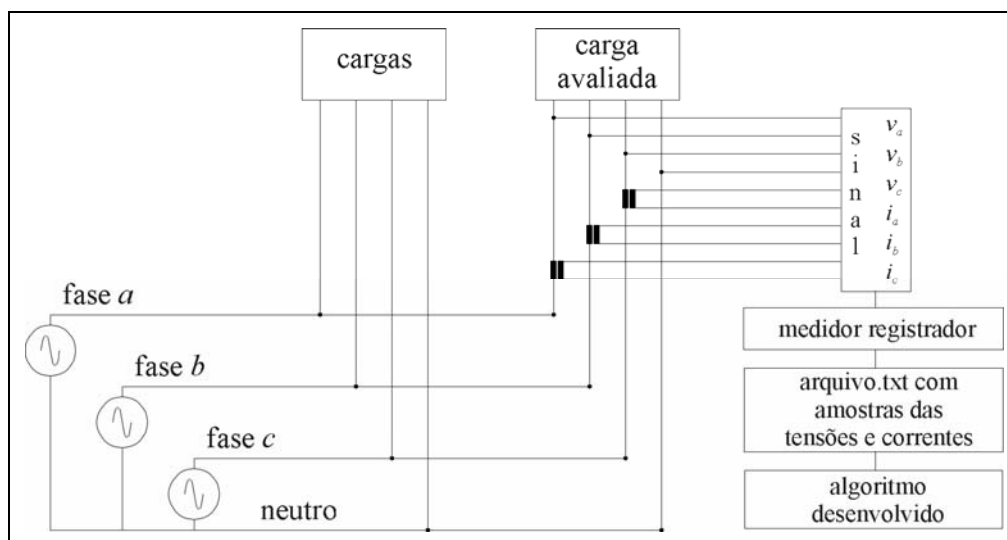


Figura 61 - Esquema de medição utilizado na avaliação de carga em laboratório através de registrador digital de tensões e correntes

Fonte: Elaborada pelo autor.

As formas de onda das tensões são mostradas na Figura 62, onde pode ser verificado que as mesmas apresentam uma pequena distorção, não sendo senoidais.

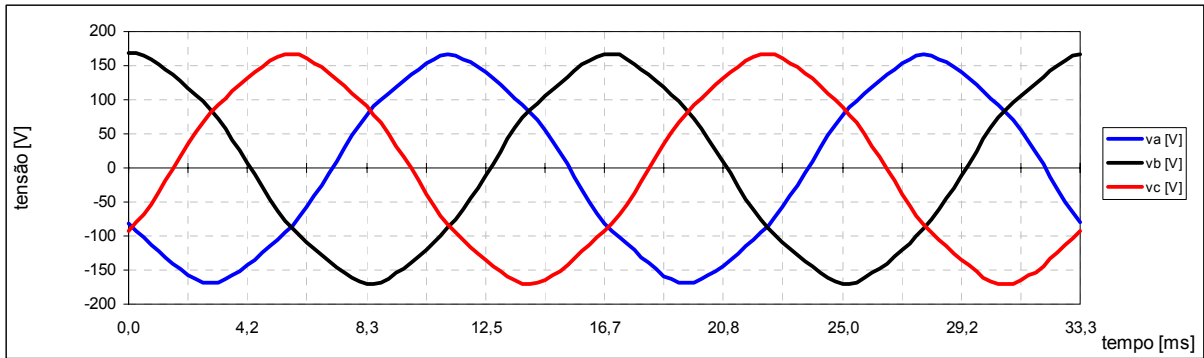


Figura 62 - Formas de onda das tensões. Valores amostrados referentes à medição feita através de registrador. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados.  
Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Na Figura 63 são apresentadas as formas de onda das correntes. A característica não linear da carga pode ser notada em função destas formas de onda. Embora a carga seja relativamente equilibrada, a existência de componentes harmônicos nas correntes implica na forma de onda de corrente de neutro da Figura 64.

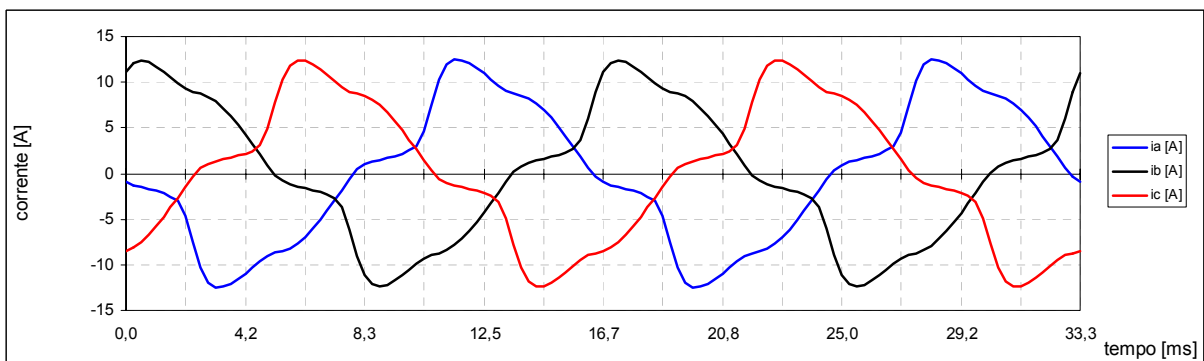


Figura 63 - Formas de onda das correntes. Valores amostrados referentes à medição feita através de registrador. Somente os dois primeiros períodos de frequência fundamental são mostrados.  
Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.



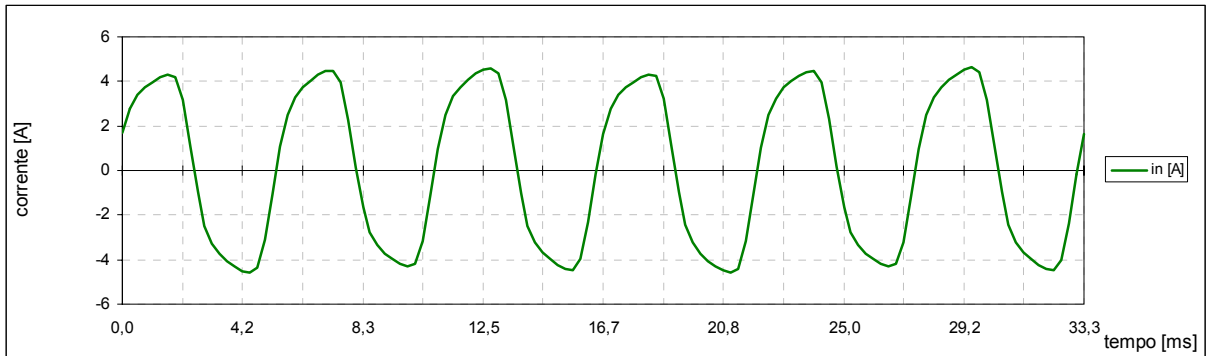


Figura 64 - Forma de onda da corrente de neutro, calculada a partir da soma das correntes das fases, referente à medição. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.  
Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

A forma de onda da potência instantânea total é mostrada juntamente com as formas de onda das potências em cada fase na Figura 65, sendo na Figura 66 apresentadas as respectivas curvas de transferência de energia. Podem ser observadas oscilações em torno de 1000 W na potência instantânea total.

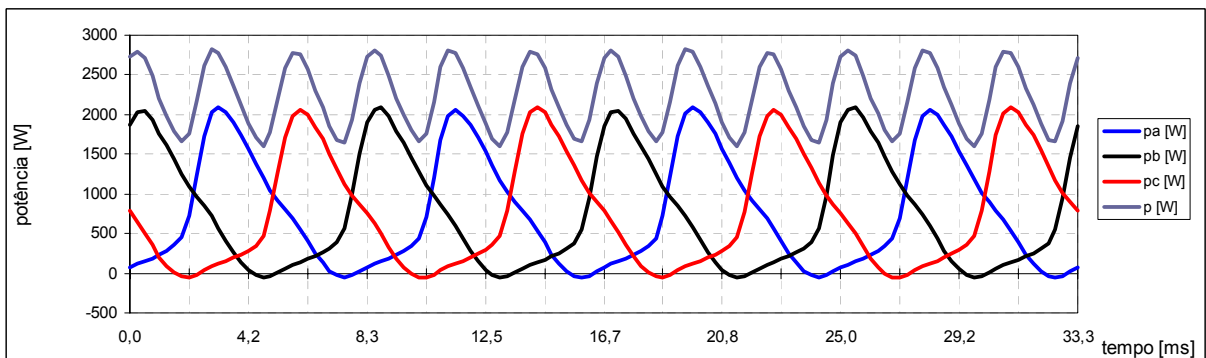


Figura 65 - Formas de onda das potências instantâneas por fase e total referentes à medição. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.  
Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

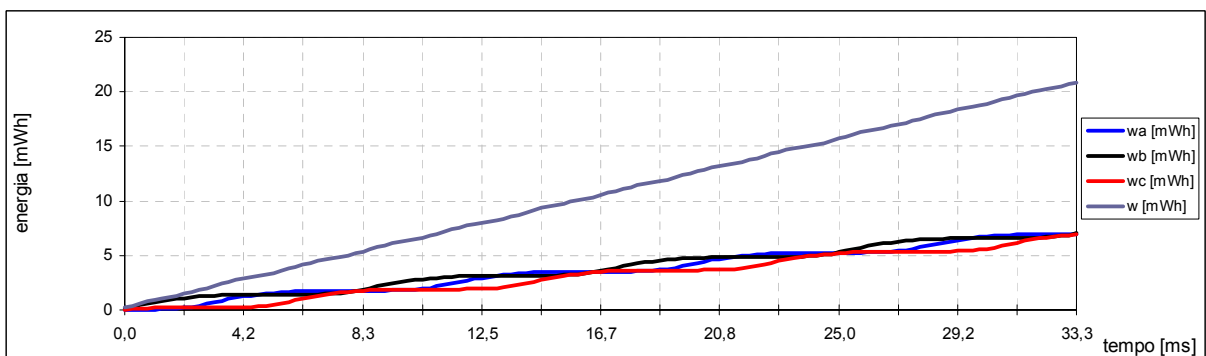


Figura 66 - Formas de onda de transferência de energia em cada uma das fases e total referentes à medição. Somente o período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.  
Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

A aplicação de um conjunto de amostras das tensões e correntes, equivalente a um período de 12 ciclos da tensão fundamental, como entrada de dados do algoritmo proposto resulta na avaliação das tensões e correntes indicadas na Tabela 61. A frequência característica neste caso foi medida e fornecida pelo registrador, sendo seu valor em torno de 59,98 Hz.

Tabela 61 - Tensões, correntes, ângulos e *DHT* - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado		Fundamental			Não-Fundamental				
<b>Tensões</b>	$V_a$	115,43	$V_{a1}$	115,36	$\alpha_{a1}$	206,10	$V_{aH}$	4,02	$DHT_{Va}$	0,0349
$V$ [V]	$V_b$	116,14	$V_{b1}$	116,07	$\alpha_{b1}$	86,34	$V_{bH}$	3,94	$DHT_{Vb}$	0,0339
$\alpha$ [graus]	$V_c$	116,25	$V_{c1}$	116,19	$\alpha_{c1}$	325,95	$V_{cH}$	3,88	$DHT_{Vc}$	0,0334
	$V_{ab}$	200,28	$V_{ab1}$	200,18	$\alpha_{ab1}$	236,33	$V_{abH}$	6,42	$DHT_{Vab}$	0,0321
	$V_{bc}$	201,63	$V_{bc1}$	201,54	$\alpha_{bc1}$	116,16	$V_{bcH}$	6,16	$DHT_{Vbc}$	0,0305
	$V_{ca}$	200,47	$V_{ca1}$	200,37	$\alpha_{ca1}$	355,91	$V_{caH}$	6,22	$DHT_{Vca}$	0,0311
	$V_e$	115,93	$V_{e1}$	115,87			$V_{eH}$	3,79	$DHT_{Ve}$	0,0327
			$V_{1+}$	115,87	$\alpha_{1+}$	206,13				
			$V_{1-}$	0,49	$\alpha_{1-}$	33,71				
			$V_{10}$	0,03	$\alpha_{10}$	26,53				
			$V_{e1cs}$	115,87						
<b>Correntes</b>	$I_a$	7,42	$I_{a1}$	7,24	$\beta_{a1}$	179,38	$I_{aH}$	1,64	$DHT_{Ia}$	0,2270
$I$ [A]	$I_b$	7,34	$I_{b1}$	7,16	$\beta_{b1}$	59,09	$I_{bH}$	1,63	$DHT_{Ib}$	0,2282
$\beta$ [graus]	$I_c$	7,34	$I_{c1}$	7,16	$\beta_{c1}$	298,52	$I_{cH}$	1,64	$DHT_{Ic}$	0,2290
	$I_n$	3,45	$I_{n1}$	0,16	$\beta_{n1}$	205,69	$I_{nH}$	3,45	$DHT_{In}$	21,7394
	$I_e$	7,63	$I_{e1}$	7,19			$I_{eH}$	2,58	$DHT_{Ie}$	0,3590
			$I_{1+}$	7,18	$\beta_{1+}$	179,00				
			$I_{1-}$	0,03	$\beta_{1-}$	253,65				
			$I_{10}$	0,05	$\beta_{10}$	205,69				
			$I_{e1cs}$	7,19						

Valores referentes a uma janela de 12 ciclo(s) com 64 amostras por ciclo da fundamental de 59,98 Hz.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

O valor de desequilíbrio de tensão fundamental, calculado através de dois diferentes métodos, é mostrado na Tabela 62 onde pode ser observado que os valores obtidos são os mesmos, independente do método utilizado.

Tabela 62 - Desequilíbrio de Tensão - Resultados obtidos a partir do Método das Componentes Simétricas e a partir do Método das Tensões de Linha

Desequilíbrio de tensão (fundamental) [%]	
Método das Componentes Simétricas	0,42414
Método das Tensões de Linha	0,42414

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Os valores das diversas potências, obtidos pelo algoritmo desenvolvido, são mostrados na Tabela 63. Embora a avaliação corresponda a uma carga trifásica os valores calculados para cada uma das fases foram mantidos para fins comparativos.

Tabela 63 - Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado		Fundamental		Não Fundamental			
<b>Aparente</b> [VA]	$S_a$	856,8	$S_{a1}$	835,1	$S_{aH}$	6,6	$S_{aN}$	191,9
	$S_b$	852,8	$S_{b1}$	830,9	$S_{bH}$	6,4	$S_{bN}$	191,8
	$S_c$	853,6	$S_{c1}$	831,6	$S_{cH}$	6,4	$S_{cN}$	192,6
	$S_e$	2.655,4	$S_{e1}$	2.497,9	$S_{eH}$	29,3	$S_{eN}$	900,9
	$S_A$	2.563,3	$S_{e1+}$	2.497,6				
			$S_{e1-}$	0,0				
			$S_{e10}$	0,0				
			$SU_1$	39,3				
<b>Ativo</b> [W]	$P_a$	748,6	$P_{a1}$	745,9	$P_{aH}$	2,7		
	$P_b$	742,6	$P_{b1}$	738,6	$P_{bH}$	3,9		
	$P_c$	741,0	$P_{c1}$	738,1	$P_{cH}$	2,9		
	$P$	2.232,2	$P_1$	2.222,7	$P_H$	9,5		
			$P_{1+}$	2.222,7				
			$P_{1-}$	0,0				
			$P_{10}$	0,0				
<b>Não Ativo</b> [var]	$N_a$	416,9	$Q_{a1}$	375,5	$D_{aH}$	6,0	$D_{aV}$	29,1
	$N_b$	419,3	$Q_{b1}$	380,6	$D_{bH}$	5,1	$D_{bV}$	28,2
	$N_c$	423,7	$Q_{c1}$	383,1	$D_{cH}$	5,7	$D_{cV}$	27,8
	$N$	1.438,3			$D_{eH}$	27,7	$D_{eV}$	81,6
			$Q_{1+}$	1.139,2				
			$Q_{1-}$	0,0				
			$Q_{10}$	0,0				
<b>Utilização</b>	$P_{Fa}$	0,8737	$P_{Fa1}$	0,8932				
	$P_{Fb}$	0,8708	$P_{Fb1}$	0,8889				
	$P_{Fc}$	0,8681	$P_{Fc1}$	0,8876				
	$P_{Fe}$	0,8406	$P_{F1}$	0,8898				
	$P_{FA}$	0,8708	$P_{F1+}$	0,8899				
			$P_{F1-}$	-0,7668				
			$P_{F10}$	-0,9999				
<b>Poluição</b>					$S_{aN}/S_{a1}$	0,2298		
					$S_{bN}/S_{b1}$	0,2309		
					$S_{cN}/S_{c1}$	0,2315		
					$S_{eN}/S_{e1}$	0,3607		
<b>Desequilíbrio</b>			$SU_1/S_{1+}$	0,0157				

Valores referentes a uma janela de 12 ciclos com 64 amostras por ciclo da fundamental de 59,98 Hz.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Neste caso, a carga avaliada apresenta valores de distorção harmônica nas tensões em torno de 3,5 % e valores de distorção harmônica das correntes em torno de 23 %, sendo o valor de potência ativa não fundamental inferior 1% da potência aparente efetiva fundamental, conforme a Tabela 64, na qual todos os valores de potência estão representados como percentuais de  $S_{e1}$ .

Tabela 64 - Potências e demais fatores – Valores Percentuais em relação à potência aparente fundamental

$S_{e1} = 100\%$	Combinado		Fundamental		Não Fundamental					
<b>Aparente</b> [%]	$S_e$	106,31	$S_{e1}$	100,00	$S_{eH}$	1,17	$S_{eN}$	36,07		
	$S_A$	102,62	$S_{e1+}$	99,99						
			$S_{U1}$	1,57						
<b>Ativo</b> [%]	$P$	89,36	$P_1$	88,98	$P_H$	0,38				
			$P_{1+}$	88,98						
			$P_{1-}$	0,00						
			$P_{10}$	0,00						
<b>Não Ativo</b> [%]	$N$	57,58			$D_{eH}$	1,11	$D_{eV}$	3,27		
			$Q_{1+}$	45,60					$D_{eI}$	35,90
			$Q_{1-}$	0,00						
			$Q_{10}$	0,00						
<b>Utilização</b>	$P_{Fe}$	0,8406	$P_{F1}$	0,8898						
			$P_{F1+}$	0,8899						
			$P_{F1-}$	-0,7668						
			$P_{F10}$	-0,9999						
<b>Poluição</b>					$S_{eN}/S_{e1}$	0,3607				
<b>Desequilíbrio</b>			$S_{U1}/S_{1+}$	0,0157						

Valores referentes a uma janela de 12 ciclo(s) com 64 amostras por ciclo da fundamental de 59,98 Hz.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Em função dos baixos valores de  $DHT$  das tensões, neste caso, os valores das potências não fundamentais não são superiores a 37 % da potência aparente efetiva fundamental. De acordo com os valores obtidos esta carga apresenta um fator de potência fundamental indutivo em torno de 0,89 sendo este valor próximo ao valor do fator de potência fundamental de seqüência positiva. O desequilíbrio de cargas na freqüência fundamental é baixo, em torno de 1,6 % , sendo este valor fornecido pela relação entre a potência aparente de desequilíbrio fundamental e a potência aparente fundamental de seqüência positiva. Em termos de índice de poluição harmônica o valor 0,3607 (36,07 %) indicaria a soma de influências das harmônicas de tensão e de corrente.

#### 6.4.2 Carga trifásica industrial

Este exemplo prático de aplicação do algoritmo desenvolvido consiste na avaliação de uma carga industrial. A medição foi feita com uso de registrador de forma de onda em um dos circuitos de potência de uma indústria de automóveis. O circuito 5 medido é o que alimenta a

ala de estamparia, caracterizada por carga composta de iluminação e prensas de grande porte acionadas por motores de corrente contínua alimentados por retificadores de seis pulsos. Na Figura 67 é fornecido o diagrama unifilar desta parte do circuito. A medição foi feita na entrada do circuito 5 que alimenta a ala de estamparia.

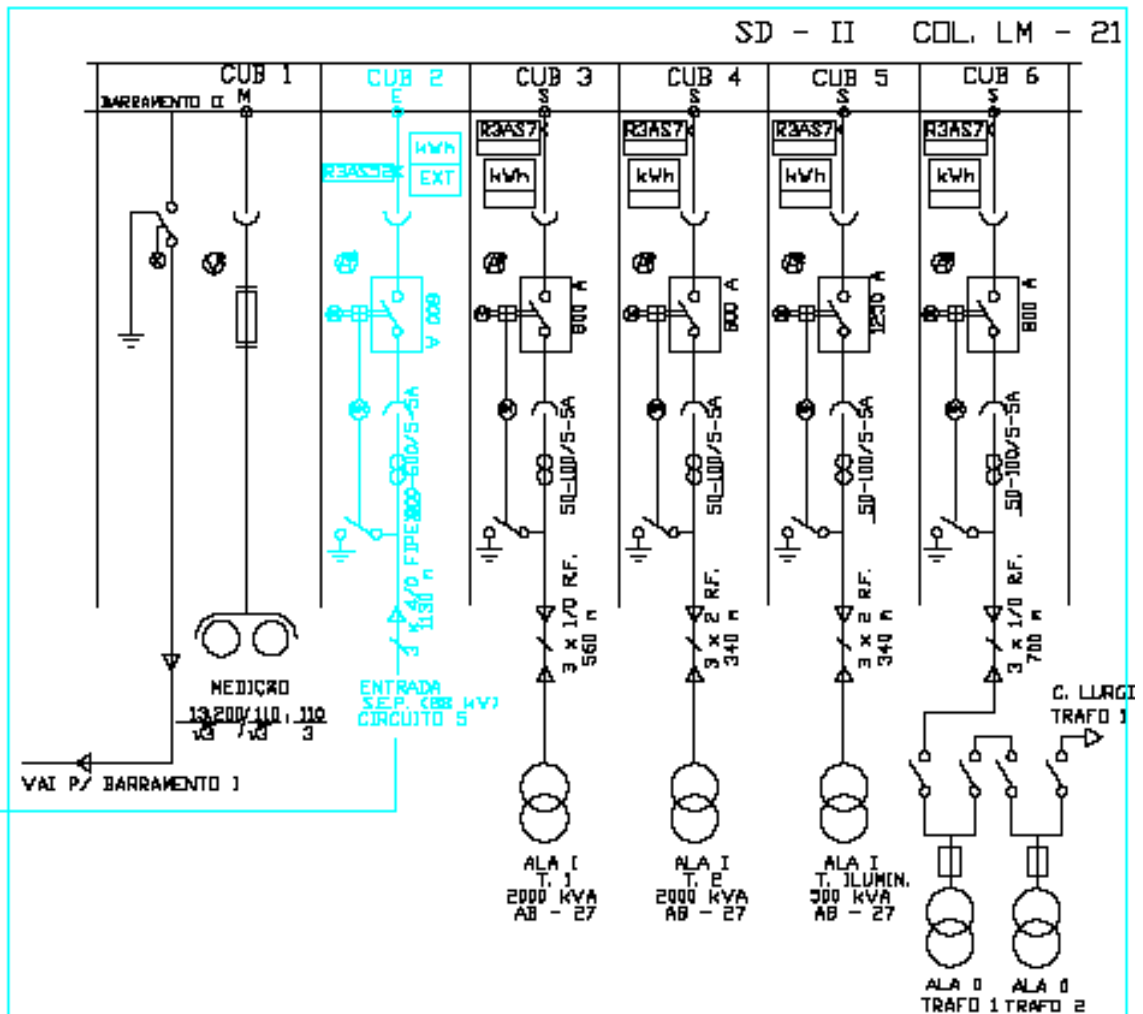


Figura 67 - Parte do diagrama unifilar de uma fábrica de automóveis, mostrando o ponto de medição das tensões e correntes, transformadores, chaves e dispositivos de proteção.

Fonte: Figura recebida via e-mail, de uma fábrica de automóveis.

Na Figura 68 é fornecida a composição harmônica e a forma de onda da tensão de fase *a* provenientes do programa de análise (ANAWIN) do registrador utilizado. O valor de distorção harmônica total é também indicado. De forma similar, na Figura 69 é mostrada a forma de onda e a composição harmônica da corrente da fase *a*. As demais fases não foram adicionadas em função da similaridade com a fase *a*. As formas de onda das tensões e

correntes, assim como as respectivas composições harmônicas para as três fases, estão disponíveis no Anexo A.

Neste caso específico, em função da programação feita no registrador que foi instalado no local, somente um ciclo das tensões e correntes foi captado a cada minuto. O algoritmo de simulação desenvolvido forneceu, neste caso, resultados para janela de um único ciclo.

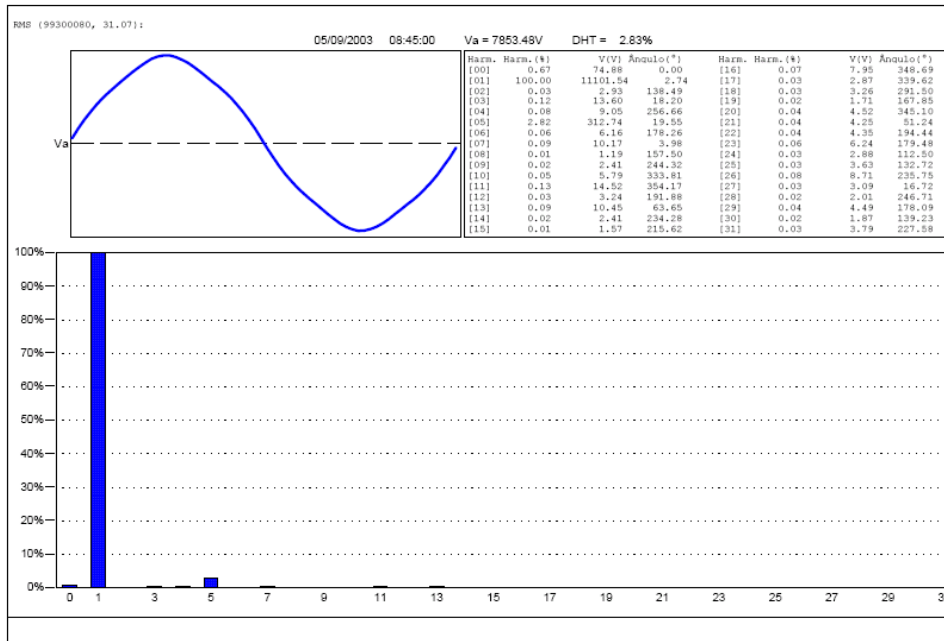


Figura 68 - Distribuição harmônica de tensão da fase *a* fornecido pelo programa de análise ANAWIN referente à medição feita no ponto indicado na Figura 67

Fonte: Elaborada pelo autor.

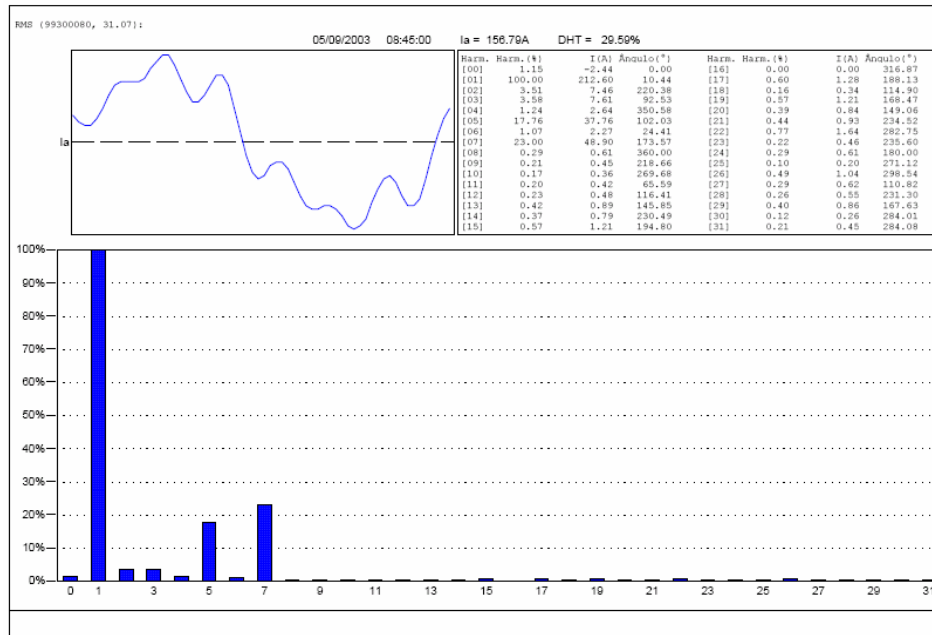


Figura 69 - Distribuição harmônica de corrente da fase *a* fornecido pelo programa de análise ANAWIN referente à medição feita no ponto indicado na Figura 67.

Fonte: Elaborada pelo autor.

De forma similar aos exemplos anteriores, formas de onda das tensões, formas de onda das correntes, e forma de onda da corrente de neutro obtidas pelo algoritmo desenvolvido a partir dos sinais amostrados são indicadas, respectivamente, na Figura 70, Figura 71 e Figura 72 a seguir. Embora as amostras de tensões e correntes utilizadas na simulação correspondam somente a um ciclo da frequência fundamental, dois ciclos idênticos das tensões, correntes e demais grandezas são mostrados apenas para facilitar a visualização das formas de onda.

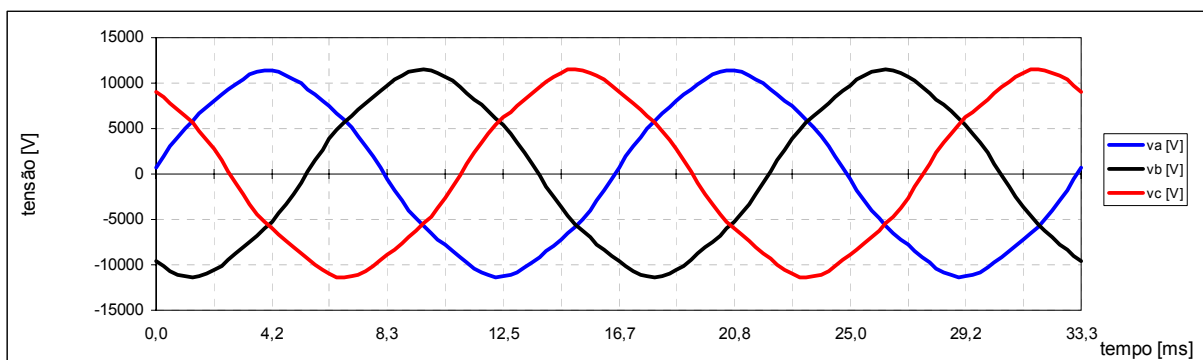


Figura 70 - Formas de onda das tensões referente à medição feita no circuito 5. Dois ciclos idênticos são mostrados para facilitar a visualização.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

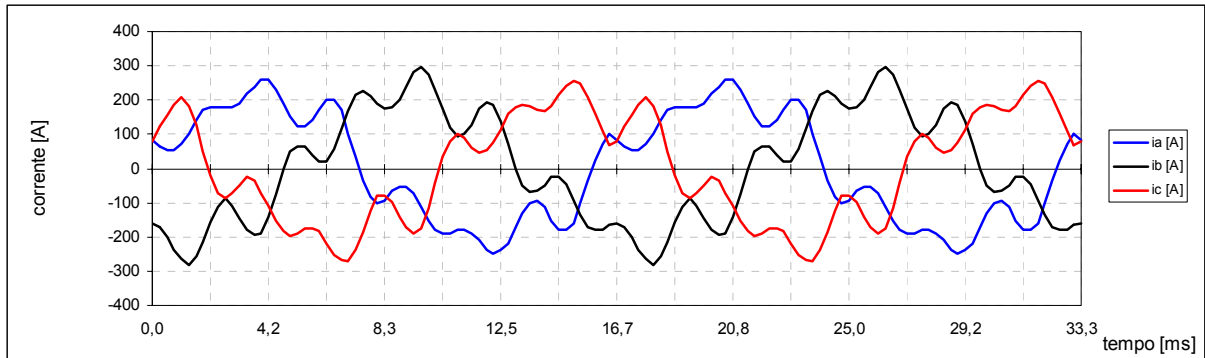


Figura 71 - Formas de onda das correntes referente à medição feita no circuito 5. Dois ciclos idênticos são mostrados para facilitar a visualização.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

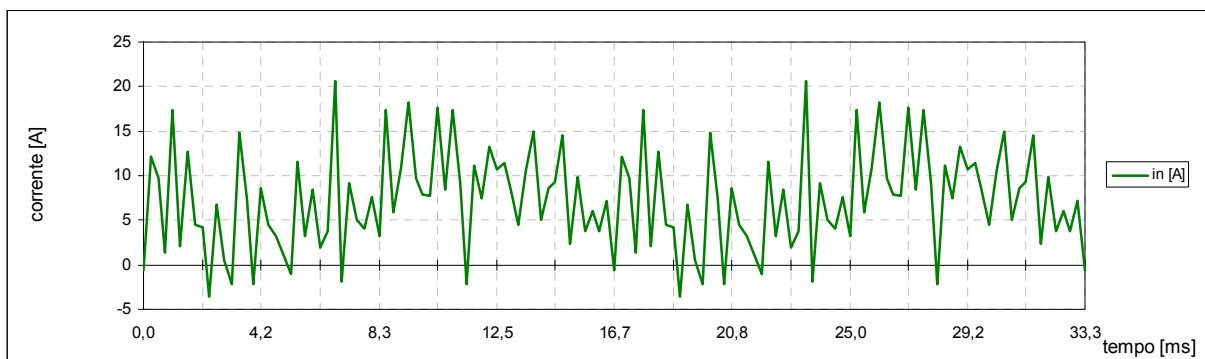


Figura 72 - Forma de onda da corrente de neutro, calculada a partir da soma das correntes das fases, referente à medição feita no circuito 5. O período correspondente a dois ciclos da frequência fundamental é mostrado.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Podem ser observadas assimetrias nas formas de onda das potências das fases assim como oscilações na forma de onda da potência instantânea total no gráfico da Figura 73. Na Figura 74 a forma de onda de transferência de energia é mostrada para esta situação.

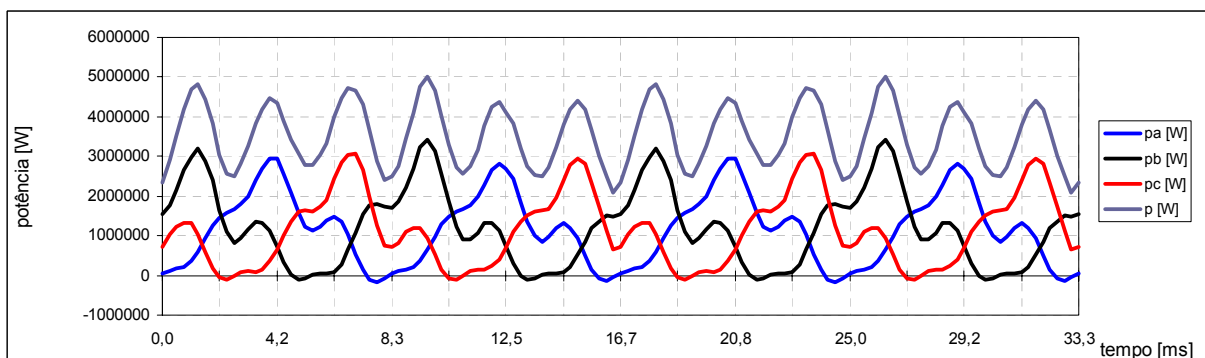


Figura 73 - Formas de onda das potências instantâneas por fase e total referentes à medição feita no circuito 5. Dois ciclos idênticos são mostrados para facilitar a visualização.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.



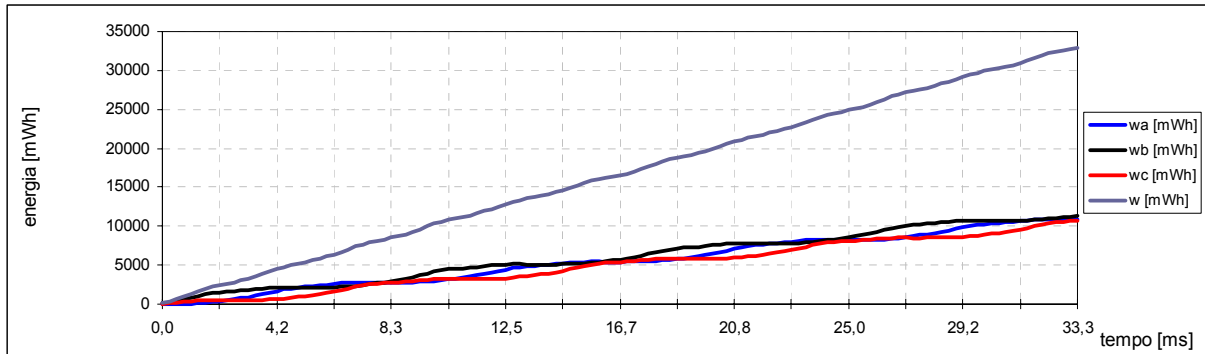


Figura 74 - Formas de onda de transferência de energia em cada uma das fases e total referentes à medição feita no circuito 5. Dois ciclos da frequência fundamental são mostrados para facilitar a visualização.  
Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Os valores de *DHT* da tensão e da corrente da fase *a*, provenientes do programa de análise de dados do registrador, diferem dos valores calculados pelo algoritmo desenvolvido em função da definição de *DHT* utilizada. Conforme comentado no capítulo referente ao desenvolvimento do algoritmo, de acordo com a Norma (IEEE, 2000), deve ser levado em conta na avaliação de *DHT* componentes contínuas do sinal, o que não é feito no caso do programa ANAWIN cuja definição de *DHT* utilizada não leva em conta as componentes contínuas. Os valores para as tensões e correntes dos grupos combinado, fundamental e não fundamental são fornecidos na Tabela 65, a seguir. Na Tabela 66 são apresentados os valores de desequilíbrio de tensão fundamental a partir dos dois métodos de cálculo, mostrando a coerência de funcionamento das rotinas desenvolvidas na avaliação deste exemplo prático.

Tabela 65 - Tensões, correntes, ângulos e *DHT* - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado		Fundamental			Não-Fundamental				
<b>Tensões</b>	$V_a$	7.853	$V_{a1}$	7.850	$\alpha_{a1}$	2,74	$V_{aH}$	234,72	$DHT_{Va}$	0,0299
$V$ [V]	$V_b$	7.894	$V_{b1}$	7.890	$\alpha_{b1}$	242,75	$V_{bH}$	241,86	$DHT_{Vb}$	0,0307
$\alpha$ [graus]	$V_c$	7.852	$V_{c1}$	7.847	$\alpha_{c1}$	122,84	$V_{cH}$	269,52	$DHT_{Vc}$	0,0343
	$V_{ab}$	13.636	$V_{ab1}$	13.631	$\alpha_{ab1}$	32,83	$V_{abH}$	372,68	$DHT_{Vab}$	0,0273
	$V_{bc}$	13.630	$V_{bc1}$	13.623	$\alpha_{bc1}$	272,70	$V_{bcH}$	436,49	$DHT_{Vbc}$	0,0320
	$V_{ca}$	13.607	$V_{ca1}$	13.601	$\alpha_{ca1}$	152,80	$V_{caH}$	424,15	$DHT_{Vca}$	0,0312
	$V_e$	7.866	$V_{e1}$	7.862			$V_{eH}$	243,59	$DHT_{Ve}$	0,0310
			$V_{1+}$	7.862	$\alpha_{1+}$	2,78				
			$V_{1-}$	10,33	$\alpha_{1-}$	107,69				
			$V_{10}$	17,91	$\alpha_{10}$	239,65				
			$V_{e1cs}$	7.862						
<b>Correntes</b>	$I_a$	156,79	$I_{a1}$	150,33	$\beta_{a1}$	10,44	$I_{aH}$	44,55	$DHT_{Ia}$	0,2963
$I$ [A]	$I_b$	162,19	$I_{b1}$	154,52	$\beta_{b1}$	247,69	$I_{bH}$	49,30	$DHT_{Ib}$	0,3191
$\beta$ [graus]	$I_c$	155,55	$I_{c1}$	146,74	$\beta_{c1}$	128,43	$I_{cH}$	51,60	$DHT_{Ic}$	0,3517
	$I_n$	9,24	$I_{n1}$	2,16	$\beta_{n1}$	200,58	$I_{nH}$	8,98	$DHT_{In}$	4,1599
	$I_e$	158,29	$I_{e1}$	150,57			$I_{eH}$	48,85	$DHT_{Ie}$	0,3244
			$I_{1+}$	150,50	$\beta_{1+}$	8,85				
			$I_{1-}$	4,35	$\beta_{1-}$	92,52				
			$I_{10}$	0,72	$\beta_{10}$	200,58				
			$I_{e1cs}$	150,57						

Valores referentes a uma janela de 1 ciclo(s) com 64 amostras por ciclo da fundamental de 60,00 Hz.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Tabela 66 - Desequilíbrio de Tensão - Resultados obtidos a partir do Método das Componentes Simétricas e a partir do Método das Tensões de Linha

Desequilíbrio de tensão (fundamental) [%]	
Método das Componentes Simétricas	0,13137
Método das Tensões de Linha	0,13137

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Os valores de potência dos três grupos assim como os demais fatores obtidos para este exemplo prático, a partir do algoritmo desenvolvido, são mostrados na Tabela 67. Os valores por fase estão inclusos para fins comparativos. Como pode ser verificado, para esta janela de um ciclo, a característica total da carga apresenta-se capacitiva no que se refere as componentes fundamentais. O conteúdo harmônico das tensões e correntes faz com que o fator de potência efetivo apresente diferença significativa em relação ao fator de potência fundamental.

Tabela 67 - Potências e demais fatores - Resultados obtidos para os grupos Combinado, Fundamental e Não Fundamental

	Combinado	Fundamental	Não Fundamental			
<b>Aparente</b> [VA]	$S_a$ 1.231.370	$S_{a1}$ 1.180.094	$S_{aH}$ 10.457	$S_{aN}$ 351.640		
	$S_b$ 1.280.333	$S_{b1}$ 1.219.181	$S_{bH}$ 11.924	$S_{bN}$ 390.961		
	$S_c$ 1.221.301	$S_{c1}$ 1.151.461	$S_{cH}$ 13.907	$S_{cN}$ 407.079		
	$S_e$ 3.735.502	$S_{e1}$ 3.551.484	$S_{eH}$ 35.696	$S_{eN}$ 1.157.990		
	$S_A$ 3.733.004	$S_{e1+}$ 3.549.828				
		$S_{e1-}$ 134,9				
		$S_{e10}$ 38,7				
		$SU_1$ 108.441,0				
<b>Ativo</b> [W]	$P_a$ 1.170.181	$P_{a1}$ 1.169.453	$P_{aH}$ 728			
	$P_b$ 1.215.201	$P_{b1}$ 1.214.652	$P_{bH}$ 548			
	$P_c$ 1.148.395	$P_{c1}$ 1.145.985	$P_{cH}$ 2.410			
	$P$ 3.533.776	$P_1$ 3.530.090	$P_H$ 3.686			
		$P_{1+}$ 3.529.930				
		$P_{1-}$ 130,2				
		$P_{10}$ 30,0				
<b>Não Ativo</b> [var]	$N_a$ 383.339	$Q_{a1}$ -158.116	$D_{aH}$ 10.431	$D_{aV}$ 35.286	$D_{aI}$ 349.709	
	$N_b$ 403.162	$Q_{b1}$ -104.987	$D_{bH}$ 11.911	$D_{bV}$ 37.371	$D_{bI}$ 388.988	
	$N_c$ 415.650	$Q_{c1}$ -112.163	$D_{cH}$ 13.697	$D_{cV}$ 39.549	$D_{cI}$ 404.914	
	$N$ 1.210.951		$D_{eH}$ 35.505	$D_{eV}$ 110.028	$D_{eI}$ 1.152.198	
		$Q_{1+}$ -375.326				
		$Q_{1-}$ 35				
		$Q_{10}$ 24				
<b>Utilização</b>	$P_{Fa}$ 0,9503	$P_{Fa1}$ 0,9910				
	$P_{Fb}$ 0,9491	$P_{Fb1}$ 0,9963				
	$P_{Fc}$ 0,9403	$P_{Fc1}$ 0,9952				
	$P_{Fe}$ 0,9460	$P_{F1}$ 0,9940				
	$P_{FA}$ 0,9466	$P_{F1+}$ 0,9944				
		$P_{F1-}$ 0,9652				
		$P_{F10}$ 0,7763				
<b>Poluição</b>			$S_{aN}/S_{a1}$ 0,2980			
			$S_{bN}/S_{b1}$ 0,3207			
			$S_{cN}/S_{c1}$ 0,3535			
			$S_{eN}/S_{e1}$ 0,3261			
<b>Desequilíbrio</b>		$SU_1/S_{1+}$ 0,0305				

Valores referentes a uma janela de 1 ciclo(s) com 64 amostras por ciclo da fundamental de 60,00 Hz.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

Na Tabela 68 são apresentados os valores percentuais das potências totais tendo como referência a potência aparente efetiva fundamental. Como a carga apresenta característica levemente capacitiva para a janela avaliada, o valor da potência reativa fundamental de seqüência positiva é negativo e o valor da potência ativa fundamental está bastante próximo do valor de potência aparente efetiva fundamental. Os valores obtidos para este exemplo prático podem ser comparados com os obtidos para o exemplo prático anterior através da comparação das tabelas que contém os valores percentuais. De uma forma geral, os exemplos fornecidos visam mostrar o funcionamento do algoritmo para diferentes situações práticas de uso, diferentes tipos carga, níveis de potência e tensão distintos.

Tabela 68 - Potências e demais fatores – Valores Percentuais em relação à potência aparente fundamental

$S_{e1} = 100\%$	Combinado		Fundamental		Não Fundamental					
<b>Aparente</b> [%]	$S_e$	105,18	$S_{e1}$	100,00	$S_{eH}$	1,01	$S_{eN}$	32,61		
	$S_A$	105,11	$S_{e1+}$	99,95						
			$S_{U1}$	3,05						
<b>Ativo</b> [%]	$P$	99,50	$P_1$	99,40	$P_H$	0,10				
			$P_{1+}$	99,39						
			$P_{1-}$	0,00						
			$P_{10}$	0,00						
<b>Não Ativo</b> [%]	$N$	34,10			$D_{eH}$	1,00	$D_{eV}$	3,10	$D_{eI}$	32,44
			$Q_{1+}$	-10,57						
			$Q_{1-}$	0,00						
			$Q_{10}$	0,00						
<b>Utilização</b>	$P_{Fe}$	0,9460	$P_{F1}$	0,9940						
	$P_{FA}$	0,9466	$P_{F1+}$	0,9944						
			$P_{F1-}$	0,9652						
			$P_{F10}$	0,7763						
<b>Poluição</b>					$S_{eN}/S_{e1}$	0,3261				
<b>Desequilíbrio</b>			$S_{U1}/S_{1+}$	0,0305						

Valores referentes a uma janela de 1 ciclo(s) com 64 amostras por ciclo da fundamental de 60,00 Hz.

Fonte: Programa de simulação desenvolvido pelo autor.

## 6.5 AVALIAÇÃO DE ERROS E SENSIBILIDADE

Existem alguns fatos importantes relacionados com o processo de obtenção dos valores das componentes fundamentais de tensão e corrente. Em algumas situações, pequenos erros na determinação dos valores eficazes das tensões e correntes fundamentais podem ocasionar diferenças significativas nos valores das potências, principalmente nas do conjunto denominado não fundamental.

Com o objetivo de testar a abordagem proposta na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) em termos de sensibilidade das diversas variáveis a erros na avaliação das componentes fundamentais de tensão e corrente, foram induzidos erros na determinação das componentes fundamentais de tensão e de corrente de tal forma que estes erros fossem refletidos nos valores de tensão fundamental efetiva e corrente fundamental efetiva. Para introduzir os erros e gerar os gráficos, os resultados obtidos para tensão e corrente fundamental efetiva, originalmente provenientes da aplicação da DFT, foram multiplicados sucessivamente por

diferentes valores entre 1 e 0,9975 sendo todos os resultados provenientes desta mudança recalculados para cada nova situação.

Os seguintes exemplos mostram os resultados obtidos para dois diferentes casos. Para ambos os casos erros na faixa de 0 a 0,25 % foram impostos inicialmente somente no valor da tensão efetiva fundamental e posteriormente somente no valor da corrente efetiva fundamental. No primeiro caso, a distorção harmônica total das tensões de fase apresentava valores em torno de 0,15 (15%) e a distorção harmônica total das correntes valores em torno de 0,95 (95%). No segundo caso, distorção harmônica total das tensões de fase em torno de 0,03 (3%) e distorção harmônica total de corrente em torno de 23%. Os resultados obtidos são mostrados nos gráficos das figuras a seguir.

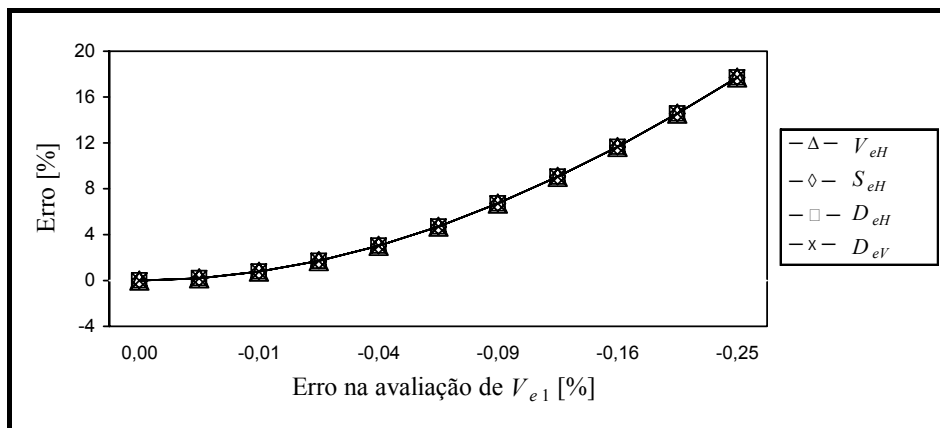


Figura 75 - Primeiro caso:  $DHT$  das tensões em torno de 15 %.  $DHT$  das correntes em torno de 95 %. Erro imposto somente no valor eficaz da tensão efetiva fundamental (0 a -0,25 %).

Fonte: Simulação desenvolvida pelo autor.

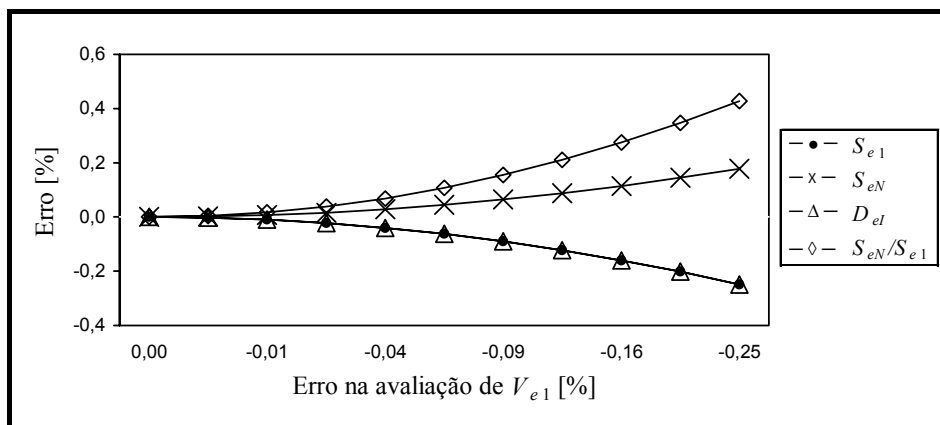


Figura 76 - Primeiro caso:  $DHT$  das tensões em torno de 15 %.  $DHT$  das correntes em torno de 95 %. Erro imposto somente no valor eficaz da tensão efetiva fundamental (0 a -0,25 %).

Fonte: Simulação desenvolvida pelo autor.

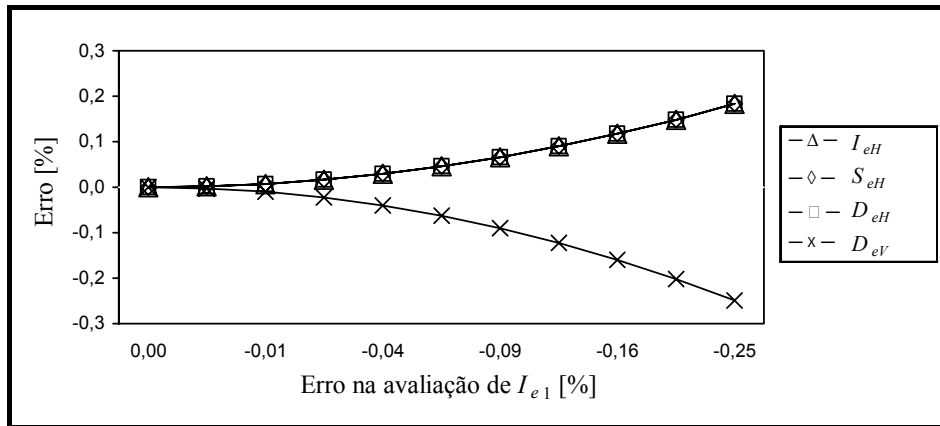


Figura 77 - Primeiro caso: *DHT* das tensões em torno de 15 %. *DHT* das correntes em torno de 95 %. Erro imposto somente no valor eficaz da corrente efetiva fundamental (0 a -0,25 %).  
Fonte: Simulação desenvolvida pelo autor.

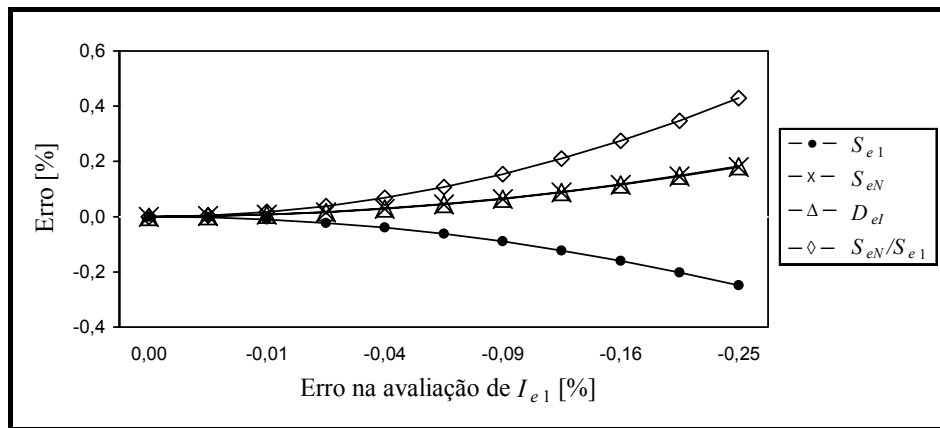


Figura 78 - Primeiro caso: *DHT* das tensões em torno de 15 %. *DHT* das correntes em torno de 95 %. Erro imposto somente no valor eficaz da corrente efetiva fundamental (0 a -0,25 %).  
Fonte: Simulação desenvolvida pelo autor.

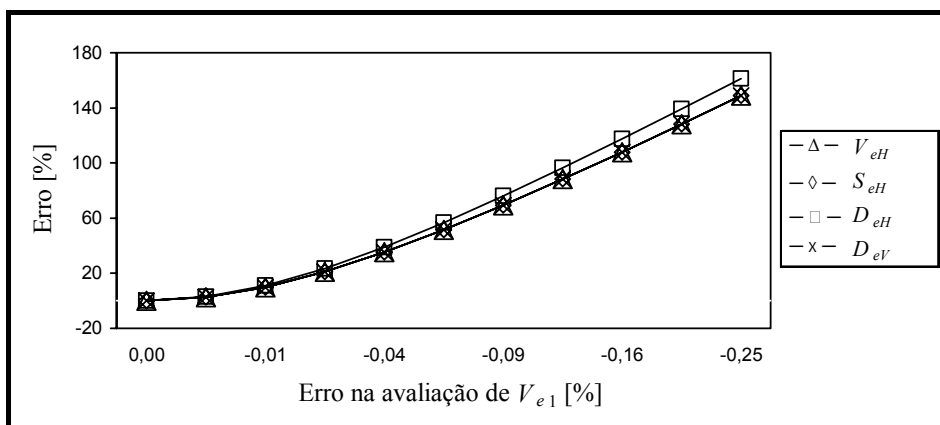


Figura 79 - Segundo caso: *DHT* das tensões em torno de 3 %. *DHT* das correntes em torno de 23 %. Erro imposto somente no valor eficaz da tensão efetiva fundamental (0 a -0,25 %).  
Fonte: Simulação desenvolvida pelo autor.

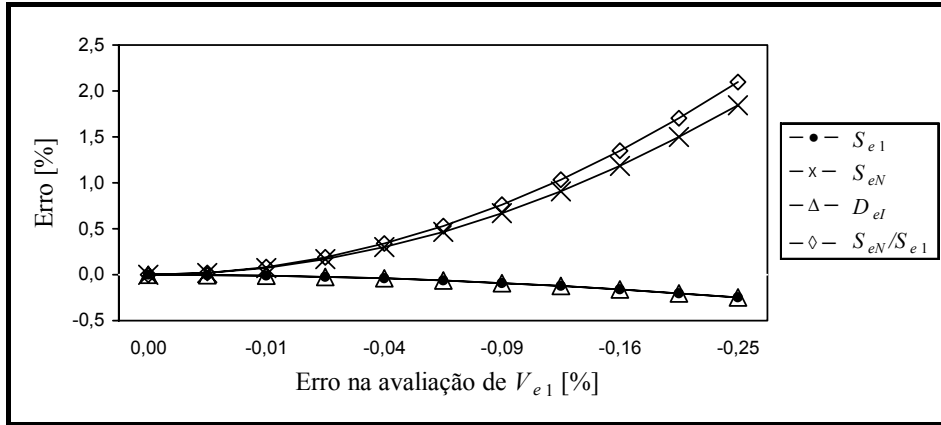


Figura 80 - Segundo caso: *DHT* das tensões em torno de 3 %. *DHT* das correntes em torno de 23 %. Erro imposto somente no valor eficaz da tensão efetiva fundamental (0 a -0,25 %).  
 Fonte: Simulação desenvolvida pelo autor.

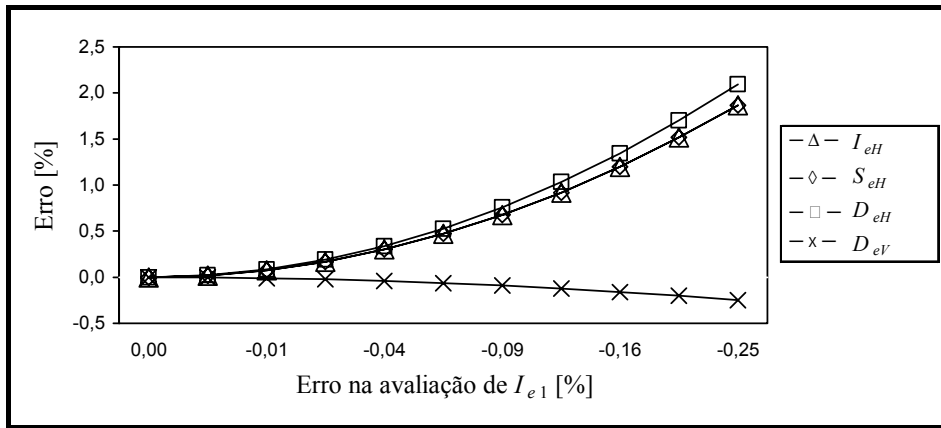


Figura 81 - Segundo caso: *DHT* das tensões em torno de 3 %. *DHT* das correntes em torno de 23 %. Erro imposto somente no valor eficaz da corrente efetiva fundamental (0 a -0,25 %).  
 Fonte: Simulação desenvolvida pelo autor.

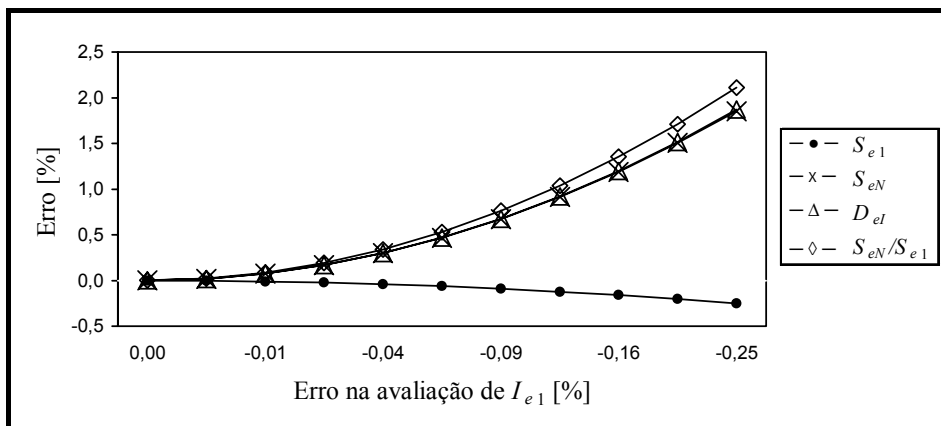


Figura 82 - Segundo caso: *DHT* das tensões em torno de 3 %. *DHT* das correntes em torno de 23 %. Erro imposto somente no valor eficaz da corrente efetiva fundamental (0 a -0,25 %).  
 Fonte: Simulação desenvolvida pelo autor.

A análise dos gráficos das figuras anteriores leva a alguns fatos importantes. Inicialmente, comparando os dois casos, pode ser verificado que as maiores variações percentuais das variáveis de interesse causadas pelos erros impostos ocorre nas situações em que os valores de  $DHT$  são menores. Nessas situações, os valores de tensão e corrente efetivas do grupo fundamental ( $V_{e1}$  e  $I_{e1}$ ) estão mais próximos dos valores das tensões e correntes efetivas do grupo combinado ( $V_e$  e  $I_e$ ). Pequenos erros na avaliação das tensões e correntes efetivas fundamentais, provenientes de arredondamentos nos valores intermediários de cálculo ou do processo utilizado para obtenção das componentes fundamentais, seja ele qual for, acarretarão em grandes erros na avaliação dos valores das variáveis do grupo não fundamental.

O exposto acima tem como consequência o fato de que, independente do processo utilizado para a determinação dos valores das componentes fundamentais de tensão e corrente, algum critério deve ser adotado com relação às faixas de erro toleráveis na avaliação das potências do grupo não fundamental em situações nas quais sejam verificados valores baixos de  $DHT$  tanto nas tensões como nas correntes. Obviamente estas observações são válidas tanto na aplicação da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) para a avaliação de sistemas trifásicos quanto para sistemas monofásicos.

Um aspecto importante, no que se refere ao exposto nos parágrafos anteriores, é que nas situações em que os valores de  $DHT$  são baixos as diversas potências não fundamentais possuem também valores pouco significativos em relação às potências do grupo Fundamental. No que se refere aos dois casos mostrados, a pior situação em termos de magnitude do erro cometido ao avaliar uma potência não fundamental (em torno de 170% na avaliação do valor de  $S_{eH}$ ,  $D_{eH}$  e  $D_{eV}$  para um erro de -0,25% imposto em  $V_e$ ) ocorre no segundo caso. Para este caso, os valores das potências não fundamentais são inferiores a 3% do valor da potência aparente efetiva fundamental, ou seja, pouco significativas do ponto de vista prático.

## 6.6 CONCLUSÃO

Os testes feitos mostram coerência dos valores obtidos para diversas situações, mostrando funcionamento regular do algoritmo tanto a partir das composições harmônicas como diretamente a partir de tensões e correntes amostradas.



O exemplo mostrando a questão conceitual envolvendo a avaliação da grandeza denominada potência não ativa,  $N$ , é importante no sentido de verificar possíveis incoerências no modelamento proposto na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) tanto no que diz respeito à unidade utilizada para a mesma (kvar) quanto no seu significado. Em princípio não existe um mecanismo físico que justifique uma existência de reativos num sistema puramente resistivo se reativo for definido como retorno de energia fornecida. A discussão a respeito desse aspecto, que está vinculado à definição de potência aparente efetiva, ainda permanece conforme pode ser observado em Willems e Ghijselen (2003) e Willems, Ghijselen e Emanuel (2005).

As diferenças encontradas nos testes comparativos geraram a necessidade de uma depuração bastante criteriosa, inicialmente no sentido de verificar a existência de possíveis falhas conceituais no algoritmo desenvolvido e posteriormente no sentido de verificar incoerências nos exemplos fornecidos no Anexo A da Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) no que diz respeito à resolução proposta para os mesmos. A origem das diferenças encontradas, para todos os exemplos disponíveis, foi apurada e devidamente comprovada. Esta depuração criteriosa teve como consequência o estudo a respeito da sensibilidade das variáveis dos grupos fundamental e não fundamental proveniente de erros na avaliação dos valores efetivos das tensões e correntes. A tendência ao aumento do erro associado à avaliação de potências não fundamentais em situações de baixo  $DHT$  deve ser considerada quando limites de erro aceitáveis para os medidores e registradores que forneçam valores de acordo com a abordagem proposta forem estabelecidos para estas situações.

No que se refere à operação do algoritmo em quatro quadrantes, na avaliação de ambas as situações de fluxo de energia, os testes mostraram coerência e funcionamento satisfatório do algoritmo desenvolvido em situações de alto desequilíbrio de correntes e de tensões independente do conteúdo harmônico existente dentro da faixa de frequências delimitada pela amostragem utilizada.

## 7 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 7.1 CONCLUSÕES

Uma das características mais evidentes da discussão a respeito de novos conceitos aplicáveis a sistemas que operem em situação de distorção harmônica refere-se à tendência a manter o paradigma estabelecido, ou seja, encontrar, de alguma forma, variáveis que tenham o mesmo significado das variáveis utilizadas para sistemas sem distorção harmônica. Desta forma, uma nova definição de variável que tenha algumas características da variável utilizada anteriormente recebe o mesmo nome ou nome similar a esta e, então, se torna difícil um consenso visto que a mesma dificilmente manterá todas as características da variável utilizada anteriormente. Isto talvez constitua uma limitação a ser eliminada considerando que, se o enfoque for dado de uma forma mais ampla para esta questão, talvez seja interessante concluir que o aumento da complexidade do sistema como um todo, proveniente do aumento da complexidade das características das cargas, deveria exigir como contrapartida um aumento do número de variáveis associadas a este sistema. A questão, porém, tem outras implicações entre as quais a suposta necessidade de coerência da nova abordagem no sentido de produzir resultados similares ou, visto de uma forma ideal, idênticos à abordagem tradicionalmente usada quando o sistema sob análise apresenta somente componentes fundamentais de tensão e corrente. Este requisito, no entanto, tem sua necessidade passível de questionamento visto que, por exemplo, sob situações de desequilíbrio, a abordagem tratada no Capítulo 2 também apresenta limitações.

No entanto, nos períodos intermediários desse desenvolvimento conceitual, torna-se evidente a necessidade de disponibilizar instrumentos que forneçam condições mínimas para caracterizar diferencialmente as situações existentes, o que já não é mais possível através da abordagem destinada ou utilizada para sistemas com tensões e correntes puramente senoidais. Medidores trifásicos mais simples, em geral de custo mais baixo e de uso mais frequente por concessionárias de energia, destinados na maioria das vezes ao estudo de carga em circuitos de distribuição, fornecem os valores das tensões, correntes, potências, e fatores de potência baseados na metodologia destinada a sistemas sem conteúdo harmônico. Em alguns casos especiais fornecem ainda valores de *DHT* assim como a distribuição harmônica dos sinais de

tensão e de corrente. Se utilizados em circuitos com índices de distorção harmônica elevados, ou mesmo em situações de desequilíbrios mais elevados de tensão e de carga, esses medidores estarão restritos a fornecer, na maioria dos casos, as mesmas grandezas da metodologia tradicionalmente utilizada independente da composição harmônica dos sinais. Em princípio, a implementação de rotinas como a desenvolvida poderia trazer, com custos talvez pouco significativos, uma variedade mais ampla de informações sobre o sistema de potência fornecida pelos medidores, permitindo a caracterização e diferenciação das diversas situações existentes a partir de um modelamento matemático mais adequado à presença de distorções e desequilíbrios.

Com relação ao procedimento desenvolvido, fica bastante evidente através das simulações e dos exemplos comparativos que o mesmo apresenta resultados coerentes com a metodologia de abordagem proposta na IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000) na avaliação dos diversos valores propostos. A adequação as Normas IEC 61000-4-7 (IEC, 2002) e IEC 61000-4-30 (IEC, 2003) no que diz respeito ao procedimento de avaliação da fundamental assim como no que diz respeito ao janelamento considerado, propicia que o mesmo esteja, a princípio, o mais próximo possível das exigências mais atuais nesse sentido. A necessidade do uso de DFT somente para determinar as componentes fundamentais das tensões de fase e das correntes, incluindo a corrente de neutro, representa uma carga computacional, em princípio, compatível com os processadores e conversores existente atualmente. As rotinas foram desenvolvidas de forma que não estejam limitadas à operação em uma determinada taxa de amostragem ou períodos de janela específicos. Uma das limitações existentes no algoritmo proposto está relacionada à determinação da componente fundamental no que diz respeito as diferentes dinâmicas de variação de composição harmônica existentes na prática. Sistemas com variações rápidas de composição harmônica, incluindo variações do tipo perturbação, poderão levar a erros na avaliação dos diversos parâmetros, principalmente se estas variações rápidas forem mais significativas na componente fundamental.

No caso específico da abordagem proposta na IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000), no entanto, parece haver alguns pontos que ainda mereceriam um estudo mais aprofundado antes que se inicie um processo de implementação prática da mesma em registradores e medidores. Um destes pontos está relacionado à sensibilidade das variáveis em situações de baixos valores de *DHT*, principalmente no que se refere à tensão visto serem estes, em geral, os mais baixos comparativamente aos de corrente. Embora tenha ficado demonstrado que esta sensibilidade aumenta em função da diminuição do valor de *DHT*, não sendo a princípio

crítica em situações em que os valores de *DHT* são mais elevados, torna-se importante correlacionar o uso prático da abordagem da Norma com as situações verificáveis na prática. Se na maioria das situações existentes na prática, por exemplo, a *DHT* de tensão é baixa, a abordagem proposta não será seletiva no que se refere às variáveis dependentes da tensão eficaz harmônica, levando a impossibilidade de qualificar as diferentes situações existentes na prática. Obviamente que isto tem relação com o erro cometido ao determinar a componente fundamental e por consequência com o processo utilizado para tal. Deve haver, então, um compromisso entre estes fatores, bem avaliado e estudado, sendo estabelecidos os devidos limites de erro admissíveis. O outro ponto reside justamente na metodologia utilizada para definir o valor da potência aparente efetiva, pelo fato de que a mesma assume dependência com relação às impedâncias de linha do sistema. Este ponto ainda encontra-se em estudo.

## 7.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Os desenvolvimentos a serem feitos incluem a avaliação da resposta e das faixas de erro em situações para as quais a composição harmônica dos sinais de tensão e corrente seja variável no tempo em diferentes taxas. Associado a este estudo, a avaliação do uso de diferentes tipos de formatação de janela poderá ser feito. Independente do tipo de formatação de janela, estudos relacionados aos métodos de agregação para obtenção de valores médios das variáveis para tempos maiores serão feitos visto que a futura implementação prática do algoritmo deverá levar em conta este aspecto. O uso do algoritmo desenvolvido para uma maior quantidade de situações reais e considerando diferentes tipos de carga serão importantes no sentido de confirmar a aplicabilidade e a utilidade prática da abordagem proposta na Norma IEEE 1459-2000 (IEEE, 2000).

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução n° 456, de 29 de novembro de 2000**. Brasília: ANEEL, 2000. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 6 out. 2006.

\_\_\_\_\_. **Resolução n° 505, de 26 de novembro de 2001**. Brasília: ANEEL, 2001. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 6 out. 2006.

\_\_\_\_\_. **Procedimentos de Distribuição de Energia no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – qualidade de energia**. Brasília: ANEEL, 30 jun. 2006. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo\\_8\\_r.PDF](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo_8_r.PDF)>. Acesso em: 6 out. 2006a.

AIELLO, M. et al. A self-synchronizing instrument for harmonic sources detection in power systems. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 20., 2003, Colorado. **Proceedings...** Piscataway, N.J.: IEEE, 2003. v. 2, p. 1364-1369, 2003.

AKAGI, H.; NABAE, A. The  $p-q$  theory in three-phase systems under non-sinusoidal conditions. **European Transactions on Electrical Power Engineering**, Berlim, v. 3, n.1, p. 27-32, Jan./Feb. 1993.

CZARNECKI, L. S. On some misinterpretations of the instantaneous reactive power  $p-q$  theory. **IEEE Transactions on Power Electronics**, New York, v. 19, n.3, p. 828 -836, May 2004.

CZARNECKI, L. S. Misinterpretations of some power properties of electric circuits. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 9, n. 4, p. 1760-1769, Oct.1994.

DAN, A.; RAISZ, D. What do and what should digital revenue meters measure on distorted networks? In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER, 11., 2004, New York. **Proceedings....** Piscataway, N.J: IEEE, 2004. p. 283-288.

DRIESEN, J. et al. Electrical energy measurements in environments characterized by a deteriorated power quality. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON METERING AND TARIFFS FOR ENERGY SUPPLY, 9., 1999, Birmingham, UK. **Proceedings...** London : The Institution, 1999. p. 115-118.

DRIESEN, J.; CRAENENBROECK, T. van; DOMMELEN, D. van. The registration of harmonic powers by analogue and digital power meters. In: IEEE INSTRUMENTATION

AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, 1997, Ottawa, Canada.  
**Proceedings...** New York: IEEE, 1997. V. 1, P. 291-296.

EDMINISTER, J. A. **Circuitos elétricos**. Tradução de Lauro Santos Blandy. Revisão técnica Rodrigo Araês Caldas Farias. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985. 421 p.

EMANUEL, A. E. On the definition of power factor and apparent power in unbalanced polyphase circuits with sinusoidal voltage and currents. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 8, n. 3, p. 841-852, Jul. 1993.

EMANUEL, A. E. Apparent power definitions for three-phase systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 14, n. 3, p. 767-772, Jul. 1999.

EMANUEL, A. E. The Buchholz-Goodhue apparent power definition: the practical approach for nonsinusoidal and unbalanced systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 13, n. 2, p. 344-350, Apr. 1998.

FETEA, R.; PETROIANU, A. Can the reactive power be used? In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY, 2000, Perth. **Proceedings PowerCon 2000**, Perth, WA, 2000. v. 3, p. 1251-1255.

FILIPSKI, P. S.; BAGHZOUZ, Y.; COX, M. D. Discussion of power definitions contained in the IEEE dictionary. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 9, n. 3, p. 1237-1244, Jul. 1994.

FILIPSKI, P. S.; LABAJ, P. W. Evaluation of reactive power meters in the presence of high harmonic distortion. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 7, n. 4, p. 1793-1799, Oct. 1992.

IEC. IEC 61000-4-7. **Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: testing and measurement techniques – general guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto**. Genebra, Suíça: EMC, 2002.

IEC. IEC 61000-4-30. **Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: testing and measurement techniques – power quality measurement methods**. Genebra, Suíça: EMC, 2003.

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers. **IEEE Std 1459-2000: Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions-IEEE Trial-Use Standard**. Power System Instrumentation and

Measurements Committee of the IEEE Power Engineering Society- Approved 30 January 2000. New York, IEEE, 21 jun. 2000.

MADRIGAL, M.; ACHA, E. A new harmonic power flow method based on the instantaneous power balance. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER, 10., 2002, Rio de Janeiro. **Proceedings....** Piscataway, N.J.: IEEE, 2002. v. 2. p. 655-662.

MARAFÃO, F. P.; DECKMANN, S. M. MARAFÃO, J. A. G. Power factor analysis under nonsinusoidal and unbalanced systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER, 10., 2002, Rio de Janeiro. **Proceedings....** Piscataway, N.J.: IEEE, 2002. v. 1, p. 266-271.

MEDEIROS FILHO, S. de. **Fundamentos de medidas elétricas**. Recife: Universitária, 1979. 307 p.

OPPENHEIM, A. V., SCHAFER, R. W. **Discrete-time signal processing**. New Jersey: Prentice-Hall, 1989. 879 p.

RIZZI, A. P. **Medidas elétricas: potência, energia, fator de potência, demanda**. Rio de Janeiro: LCT, 1980. 152 p.

SHIKOSKI, J. et al. Distortion and system apparent power in Macedonian power distribution system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER, 10., 2002, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Piscataway, N.J.: IEEE, 2002. v. 2. p. 455-488.

SIQUEIRA, L.; CARNEIRO, A. M.; OLIVEIRA, M. de. Assessment of harmonic distortions on power and energy measurements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER, 9., 2000, Orlando, Flórida. **Proceedings....** Piscataway, N.J.: IEEE, 2000. v. 1. p.105-109.

STAROSZCZYK, Z. T. Power system nonstationarity and accurate power system identification procedures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER, 10., 2002, Rio de Janeiro. **Proceedings....** Piscataway, N.J.: IEEE, 2002. v. 1. p. 235-242.

TORAL, S; QUERO, J. M.; FRANQUELO, L. G. Power energy metering based on random signal processing (EC-RPS). In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CIRCUITS AND SYSTEMS, ISCAS' 98, 1998, Monterey. **Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium**. Piscataway, N.J.: IEEE, 1998. v. 3. p. 435-438.

WILLEMS, J. L.; GHIJSELEN, J. A. Apparent power and power factor concepts in unbalanced and nonsinusoidal situations. In: IEEE BOLOGNA POWERTECH CONFERENCE, 2003, Bologna. **PowerTech Conference Proceedings**. Bologna: IEEE, 2003. v. 3. p. 3762-3768.

WILLEMS, J. L.; GHIJSELEN, J. A.; EMANUEL, A. E. The apparent power concept and the IEEE Standard 1459-2000. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 20, n. 2, pt. 1, p. 876 -884, Apr. 2005.

YOON, W.-K.; DEVANEY, M. J. Reactive power measurement using the wavelet transform. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, New York, v. 49, n. 2, p 246-252, Apr. 2000.



**ANEXO A – Formas de onda e composição harmônica das tensões e correntes referentes ao teste prático “carga trifásica industrial”, seção 6.4.2. Dados obtidos a partir do programa de análise ANAWIN, RMS SISTEMAS ELETRÔNICOS.**

