



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação
Departamento de Sistemas e Controle de Energia
Laboratório Condicionamento de Energia Elétrica



Contribuições para a Teoria de Potências Instantâneas e Aplicações em Qualidade de Energia

Fernando Pinhabel Marafão

Engenheiro Eletricista

Prof. Dr. Sigmar Maurer Deckmann

Orientador

*Dissertação apresentada à
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
da Universidade Estadual de Campinas, como parte
dos requisitos exigidos para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica*

UNICAMP

BIBLIOTECA CENTRAL

SEÇÃO CIRCULANTE

Banca Examinadora

Prof. Dr. Sigmar Maurer Deckmann

Prof. Dr. José Antenor Pomílio - UNICAMP/FEEC

Prof. Dr. Maurício Aredes - UFRJ/DEE

Este exemplar corresponde à edição final da tese defendida por <u>Fernando Pinhabel Marafão</u> e aprovada pela Comissão
Julgada em <u>03 / 03 / 2000</u>
<u>Sigmar M. Deckmann</u> Orientador

4 de Abril de 2000

N.º CHAMADA:
I/UNICAMP
M323c
41594
278/00
0 [K]
R\$ 11,00
14-07-00
OPD

CM-00142236-5

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

M323c

Marafão, Fernando Pinhabel

Contribuições para a teoria de potências instantâneas e aplicações em qualidade de energia / Fernando Pinhabel Marafão. — Campinas, SP: [s.n.], 2000.

Orientador: Sigmar Maurer Deckmann.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Energia elétrica. 2. Sinais elétricos - Processamento. 3. Corrente elétrica. 4. Lagrange, Funções de. 5. Potência reativa (Engenharia elétrica). 6. Harmônicos. I. Deckman, Sigmar Maurer. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Aos meus pais Antonio e Derci que sempre me incentivaram e estiveram ao meu lado nos momentos decisivos e à minha noiva Joanna por todo seu apoio e compreensão nestes dois últimos anos. Estas pessoas são co-autoras de meus trabalhos, dada a influência positiva que exercem em minha vida.

Resumo

Os recentes trabalhos envolvendo Teorias de Potências Instantâneas têm sido amplamente utilizados na elaboração de técnicas de análise de distúrbios elétricos e controle de dispositivos de condicionamento de energia. Tais teorias têm se mostrado bastante eficazes, particularmente no caso trifásico, no entanto restam algumas dúvidas ou discussões que ainda necessitam de estudos para que soluções definitivas sejam encontradas para casos gerais.

O principal objetivo deste trabalho é apresentar duas decomposições de sinais temporais, as quais levam a uma alternativa interessante para o estudo das grandezas elétricas, de forma que permitem a identificação de várias parcelas distintas de tensão, corrente e potência, associando cada uma ao fenômeno físico responsável por sua origem. Espera-se portanto, que as decomposições e a metodologia de cálculo das componentes de potência instantânea apresentadas neste trabalho contribuam para que se encontre uma Teoria de Potências o mais geral e didática possível.

Sobre as decomposições, uma permite encontrar a mínima corrente necessária para suprir a potência útil requerida pelas cargas do sistema elétrico, e pode ser aplicada a qualquer tipo de sinal temporal, independentemente de periodicidade, forma de onda, simetria ou número de variáveis. A outra por sua vez, permite separar as parcelas de tensão, corrente e potência de frequências fundamentais, dos sinais responsáveis por distorção na forma de onda destas grandezas, o qual denominou-se resíduo dos sinais.

No âmbito de qualidade de energia, assunto de extrema importância na recente reformulação do setor elétrico mundial, acredita-se que as definições e discussões tratadas ao longo deste trabalho, possam auxiliar em diversas aplicações para manutenção e monitoração da qualidade da energia elétrica.

Abstract

Instantaneous Power Theories have been widely exploited for electrical disturbance analysis and control applied to power conditioning equipment. These theories have shown to be very promising, particularly in the three-phase case, however several questions still require more researches to find definitive solutions in general cases.

The main objective of this work is to present two time signal decomposition techniques, which constitute an interesting alternative to study electrical signals, allowing to identify voltage, current, and power components, associating each one with the corresponding physical phenomenon responsible for it. The signal decompositions and calculation methodologies presented in this work are intended to contribute for a more comprehensive Power Theory.

About the two decompositions, the first one allows to find the minimum current needed to supply the active power required from electrical system loads, and it can be applied to any time function, independently of period, waveform, symmetry, or variables number. The second one allows splitting voltages, currents and power signals into fundamental waves and signals with harmonic and inter-harmonic frequencies. This last part is responsible for waveform distortions of the signals and it was named residual signal.

Concerning power quality, a subject of extreme interest in the recent reformulation of worldwide electrical utilities, the definitions and discussion presented in this work are expected to be useful for several applications in order to maintain and monitor the electric power quality.

Agradecimentos

Aos amigos do Laboratório de Condicionamento de Energia Elétrica e do Departamento de Sistemas e Controle da Energia, em especial aos companheiros Edson, Ricardo, Enes e Roberto pelas valiosas discussões sobre os mais variados assuntos envolvendo este trabalho. Ao companheiro Reinaldo pelo auxílio com o editor \LaTeX , utilizado na edição deste trabalho e finalmente, aos amigos Élcio, Luciana, Izabel, Márcio, Marcelo, Tereza, Marcos e a todos que tornaram minha vida mais feliz e agradável nestes anos.

Aos professores da UNICAMP com quem tive oportunidade de trabalhar e aprender muito. Aos professores da UNESP/Bauru que me impulsionaram a mais este degrau de minha vida pessoal e profissional.

Um agradecimento especial ao professor Sigmar Maurer Deckmann, pela orientação e auxílio constante durante o desenvolvimento deste trabalho.

Finalmente, à CAPES pelo apoio financeiro.

Sumário

Resumo	i
Abstract	iii
Agradecimentos	v
Lista de Siglas	ix
Lista de Símbolos	xi
Lista de Figuras	xvii
Lista de Tabelas	xix
1 Introdução Geral	1
1.1 Motivação do trabalho	1
1.1.1 Qualidade de energia - tendências	2
1.1.2 Teorias de potência	3
1.1.3 Condições ideais de transferência de energia	3
1.2 Objetivos do trabalho	4
1.3 Sumário	4
2 Decomposições de Sinais Temporais	7
2.1 Introdução	7
2.2 Decomposição ortogonal de funções ou Multiplicador de Lagrange	7
2.2.1 Norma Euclidiana Instantânea	9
2.3 Decomposição de sinais em componentes fundamental e residual	15
2.3.1 Separação em onda fundamental e sinal residual	15
2.4 Conclusão	20
3 Aplicação das Decomposições em Grandezas Elétricas	21
3.1 Introdução	21
3.2 Decomposição dos sinais de corrente e tensão em parcelas fundamental e residual	22
3.3 Decomposição da corrente em parcelas escalar e ortogonal à tensão	24
3.3.1 Correntes ativa e não-ativa instantâneas	32

SUMÁRIO

3.4	Aplicação conjunta das duas decomposições aos sinais de tensão e corrente	38
3.5	Conclusão	44
4	Definições de Potência Instantânea sob Condições Não-Ideais	45
4.1	Introdução	45
4.2	Componentes de potência instantânea	45
4.2.1	Potências ativa, não-ativa e imaginária	47
4.2.2	Potências fundamental e residual	56
4.2.3	Potências unidirecional e bidirecional	61
4.3	Indicadores de qualidade de potência	62
4.4	Conclusão	64
5	Resultados e Aplicações	65
5.1	Resultados	65
5.1.1	Caso 01 - Sistema com condutância equivalente constante ($g_e = cte$)	65
5.1.2	Caso 02 - Sistema com condutância equivalente variável ($g_e \neq cte$)	74
5.1.3	Caso 03 - Sistemas com tensão não-senoidal	83
5.2	Aplicações	105
5.2.1	Atribuição de responsabilidades	105
5.2.2	Condicionamento e compensação de energia	105
5.2.3	Monitoração de energia	106
5.2.4	Instrumentação	106
6	Conclusão Geral	107
	Referências Bibliográficas	109
	Apêndice - Desequilíbrios nas tensões de fornecimento	113

Lista de Siglas

CA	Corrente Alternada
FACTS	Flexible Alternate Current Transmission Systems
MDQE	Monitor Digital de Qualidade de Energia
NEI	Norma Euclidiana Instantânea
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
RMS	Valor Eficaz
UPLC	Universal Active Power Line Conditioner

Lista de Símbolos

Funções

$f_1(t), f_2(t)$	- funções temporais
$f_1'(t)$	- função temporal escalar
$f_e(t)$	- função temporal de erro
$[f_1(t)]$ ou $[f_1]$	- função instantânea multidimensional ou vetorial
$[f_2(t)]$ ou $[f_2]$	- função multidimensional ou vetorial
$[f]$	- vetor multidimensional instantâneo
$[f_1']$	- vetor escalar instantâneo
$[f_e]$	- vetor de funções de erro
$\ [a] \ $	- Norma Euclidiana Instantânea do vetor $[a]$
$\ [f(t_k)] \ $	- Norma Euclidiana Instantânea do vetor $[f(t_k)]$
ε	- erro quadrático
λ_{12}, λ	- Multiplicador de Lagrange ou Função de Decomposição Ortogonal
$x(t)$	- sinal temporal qualquer
$x_1(t)$	- onda de frequência fundamental
$x_{res}(t)$	- sinal residual (combinação de frequências sem a fundamental)

Correntes

$[i]$	- vetor instantâneo de corrente
$[i_1]$	- vetor de correntes de frequência fundamental
$[i_{res}]$	- vetor de sinais residuais de corrente
$[i_{sc}]$	- vetor das parcelas escalares de corrente
$[\Delta i_{sc}]$	- vetor das correntes escalares oscilatórias
$[i_p]$	- vetor das correntes proporcionais
$[i_{ort}]$	- vetor das parcelas ortogonais ou não-proporcionais de corrente
$[i_a]$	- vetor das correntes ativas instantâneas
$[i_{na}]$	- vetor das correntes não-ativas instantâneas
$[\Delta i_a]$	- vetor das correntes ativas oscilatórias
$[i_{ort}]$	- vetor das correntes não-ativas ortogonais
$[\Delta i_{na}]$	- vetor das correntes não-ativas oscilatórias

Lista de Símbolos

$[i_{np}]$	- vetor das correntes não-proporcionais instantâneas
$[i_{a1}]$	- vetor das correntes ativas fundamentais
$[i_{ares}]$	- vetor das correntes ativas residuais
$[i_{na1}]$	- vetor das correntes não-ativas fundamentais
$[i_{nares}]$	- vetor das correntes não-ativas residuais
$[i_{p1}]$	- vetor das correntes ativas proporcionais fundamentais
$[i_{pres}]$	- vetor das correntes ativas proporcionais residuais
$[\Delta i_{a1}]$	- vetor das correntes ativas oscilatórias fundamentais
$[\Delta i_{ares}]$	- vetor das correntes ativas oscilatórias residuais
$[i_{ort1}]$	- vetor das correntes ortogonais fundamentais
$[i_{ortres}]$	- vetor das correntes ortogonais residuais
$[\Delta i_{na1}]$	- vetor das correntes não-ativas oscilatórias fundamentais
$[\Delta i_{nares}]$	- vetor das correntes não-ativas oscilatórias residuais
$[i_h]$	- vetor das correntes harmônicas
$[i_d]$	- vetor das correntes de desbalanço
I_p	- corrente de pico
i_+	- corrente instantânea de seqüência positiva
i_-	- corrente instantânea de seqüência negativa
i_0	- corrente instantânea de seqüência zero
i_d	- componente da corrente instantânea de desequilíbrio
$[i_{p1+}]$	- vetor de corrente proporcional fundamental instantânea de seqüência positiva

Tensões

$[v]$	- vetor instantâneo de tensão
$[v_1]$	- vetor das tensões de freqüência fundamental
$[v_{res}]$	- vetor de sinais residuais de tensão
$\ [v] \parallel$	- norma instantânea das tensões
V	- valor eficaz da tensão (RMS)
V_p	- tensão de pico
v_+	- tensão instantânea de seqüência positiva
v_-	- tensão instantânea de seqüência negativa
v_0	- tensão instantânea de seqüência zero
v_d	- componente da tensão instantânea de desequilíbrio
$[v_{1+}]$	- vetor de tensão fundamental instantânea de seqüência positiva

Potências

p	- potência polifásica instantânea
p_a	- potência ativa instantânea

p_{na}	- potência não-ativa instantânea
p_p	- potência ativa proporcional instantânea
\tilde{p}_a	- potência ativa oscilatória instantânea
p_{ort}	- potência não-ativa ortogonal instantânea
\tilde{p}_{na}	- potência não-ativa oscilatória instantânea
\bar{p}	- potência ativa média
\tilde{p}	- potência ativa oscilatória
$p_{p1} = \bar{p}_{a1}$	- potência ativa fundamental média
\tilde{p}_{a1}	- potência ativa fundamental oscilatória
$p_{a_{res}}$	- potência ativa residual
$\tilde{p}_{a_{cross}}$	- potência ativa de frequências cruzadas
$p_{ort1} = \bar{p}_{na1}$	- potência não-ativa ortogonal fundamental
\tilde{p}_{na1}	- potência não-ativa oscilatória fundamental
$p_{na_{res}}$	- potência não-ativa residual
$\tilde{p}_{na_{cross}}$	- potência não-ativa de frequências cruzadas
p_{p1+}	- potência proporcional fundamental de seqüência positiva
$[q]$	- vetor de potência imaginária instantânea
$\ [q] \ $	- magnitude da potência imaginária instantânea
$[q_{ort}]$	- potência imaginária ortogonal instantânea
$[\tilde{q}]$	- potência imaginária oscilatória instantânea
$\ [q] \ $	- parcela média da magnitude da potência imaginária
$\ [q] \ $	- parcela oscilatória da magnitude da potência imaginária
$[\bar{q}_1]$	- potência imaginária fundamental média
$[\tilde{q}_1]$	- potência imaginária fundamental oscilatória
$[q_{res}]$	- potência imaginária residual
$[\tilde{q}_{cross}]$	- potência imaginária de frequências cruzadas
$\ [q] \ _1$	- parcela média da magnitude da potência imaginária fundamental
$\ [q] \ _1$	- parcela oscilatória da magnitude da potência imaginária fundamental
$\ [q] \ _{res}$	- parcela média da magnitude da potência imaginária residual
$\ [q] \ _{res}$	- parcela oscilatória da magnitude da potência imaginária residual
$\ [q] \ _{cross}$	- parcela oscilatória da magnitude da potência imaginária de frequências cruzadas
s	- potência aparente instantânea
\bar{s}	- parcela média da potência aparente
\tilde{s}	- parcela oscilatória da potência aparente
s_1	- potência aparente fundamental
s_{res}	- potência aparente residual
s_{cross}	- potência aparente de frequências cruzadas
\bar{s}_1	- parcela média da potência aparente fundamental
\tilde{s}_1	- parcela oscilatória da potência aparente fundamental
\bar{s}_{res}	- parcela média da potência aparente residual
\tilde{s}_{res}	- parcela oscilatória da potência aparente residual
\tilde{s}_{cross}	- parcela oscilatória da potência aparente de frequências cruzadas
P_u	- potência unidirecional

Lista de Símbolos

p_b	- potência bidirecional
P	- potência ativa média por período

Indicadores de qualidade de potência

f_d	- fator de deslocamento da fundamental
f_p	- fator de potência instantâneo
η_p	- eficiência na transferência da potência ativa
f_{p1}	- fator de potência fundamental

Subscritos

$1, 2, 3, \dots, n$	- dimensões de uma função ou vetor
a, b, c	- fases de um sistema trifásico
$\alpha, \beta, 0$	- Eixos estacionários de Clarke (Akagi)
$d, q, 0$	- Eixos estacionários de Park

Geral

C	- Capacitor
R	- Resistor
L	- Indutor
f	- frequência elétrica em Hz
T	- período
g_e	- condutância equivalente
$\overline{g_e}$	- condutância equivalente média - parte simétrica
$\tilde{g}_e = \Delta g_e$	- condutância equivalente oscilatória

Unidades

W	- unidade de Potência Ativa - Watts
VA	- unidade de Potência Aparente - Volt-Ampere
VAI	- unidade de Potência Imaginária - Volt-Ampere-Imaginário
Ω	- unidade de resistência - Ohm
F	- unidade de capacitância - Faraday

Operações Matemáticas

$\frac{dx}{dy}$ - derivada de x em relação à y

$\int_{t_1}^{t_2}$ - integral no intervalo $t_2 - t_1$

$\lim_{\Delta t \rightarrow 0}$ - limite com intervalo Δt tendendo a zero

\sum - somatório

$[a] \cdot [b]$ - produto escalar de dois vetores

$[a] \times [b]$ - produto vetorial de dois vetores

Lista de Figuras

2.1	Norma Euclidiana Instantânea	11
2.2	Decomposição em escalar e ortogonal para duas funções senoidais em fase	12
2.3	Decomposição para funções senoidais defasadas entre si	13
2.4	Decomposição em escalar e ortogonal para funções não senoidais	14
2.5	Resposta do filtro passa-faixa	16
2.6	Resposta do filtro <i>notch</i>	17
2.7	Processo de decomposição em sinal residual e onda fundamental	17
2.8	Decomposição em fundamental e resíduo para função uni-dimensional	18
2.9	Decomposição em fundamental e resíduo para função multi-dimensional	19
3.1	Condições para sistema equilibrado	22
3.2	Decomposição da tensão em fundamental e resíduo	23
3.3	Decomposição para circuito resistivo equilibrado com tensões distorcidas desequilibradas	29
3.4	Decomposição das correntes em parcelas escalares e ortogonais	30
3.5	Esquema de decomposição das correntes	37
3.6	Esquema de decomposição das correntes para sinais não-senoidais	43
4.1	Fluxo de potência ativa e não-ativa no sistema	48
4.2	Orientação dos vetores do produto vetorial	49
4.3	Triângulo de potências instantâneas	51
5.1	Circuito utilizado como carga no experimento	66
5.2	Tensões e parcelas de corrente - circuito resistivo equilibrado	68
5.3	Potências instantâneas, condutância e fatores - circuito resistivo	69
5.4	Tensões e parcelas de corrente - circuito reativo equilibrado	72
5.5	Potências instantâneas, condutância e fatores - circuito reativo	73
5.6	Tensões, parcelas de corrente e condutância - circuito resistivo assimétrico	76
5.7	Decomposição da corrente ativa em proporcional e ativa oscilatória - circuito resistivo assimétrico	77
5.8	Potências instantâneas - circuito resistivo assimétrico	78
5.9	Tensões e parcelas de corrente e condutância - circuito reativo assimétrico	80
5.10	Decomposição da corrente ativa em proporcional e ativa oscilatória - circuito reativo assimétrico	81
5.11	Potências instantâneas e fatores - circuito reativo assimétrico	82

LISTA DE FIGURAS

5.12	Tensões e correntes de entrada, fundamental e residual - circuito resistivo simétrico e tensão distorcida equilibrada	84
5.13	Correntes decompostas - circuito resistivo simétrico e tensão distorcida equilibrada	85
5.14	Condutância e potências instantâneas - circuito resistivo simétrico e tensão distorcida equilibrada	87
5.15	Componentes da potência ativa originais e fundamentais - circuito resistivo simétrico e tensão distorcida equilibrada	88
5.16	Componentes de potência residual - circuito resistivo simétrico e tensão distorcida equilibrada	89
5.17	Tensão e corrente de entrada, fundamental e residual - circuito reativo simétrico e tensões distorcidas equilibradas	91
5.18	Parcelas de corrente ativa e não-ativa - circuito reativo simétrico e tensões distorcidas equilibradas	92
5.19	Correntes decompostas - circuito reativo simétrico e tensões distorcidas equilibradas . . .	93
5.20	Potências instantâneas - circuito reativo simétrico e tensões distorcidas equilibradas . . .	95
5.21	Potências instantâneas - circuito reativo simétrico e tensões distorcidas equilibradas . . .	96
5.22	Potências instantâneas - circuito resistivo simétrico e tensões distorcidas equilibradas . . .	97
5.23	Tensão e corrente de entrada, fundamental e residual - circuito reativo assimétrico e tensões distorcidas desequilibradas	99
5.24	Parcelas de corrente ativa, não-ativa, proporcional e oscilatória - circuito reativo assimétrico e tensões distorcidas desequilibradas	100
5.25	Potências instantâneas - circuito reativo assimétrico e tensões distorcidas desequilibradas .	102
5.26	Componentes de potências instantâneas - circuito reativo assimétrico e tensões distorcidas desequilibradas	103
5.27	Potências instantâneas - circuito resistivo simétrico e tensões distorcidas desequilibradas .	104
1	Tensões e correntes decompostas - circuito resistivo simétrico	115
2	Potências ativa, proporcional e ativa oscilatória fundamentais	116

Lista de Tabelas

5.1	Caso 1a - Circuito resistivo equilibrado	66
5.2	Tensões senoidais equilibrados	66
5.3	Caso 1b - Circuito reativo equilibrado	70
5.4	Caso 2a - Circuito resistivo desequilibrado (R_{b_1})	74
5.5	Caso 2b - Circuito reativo desequilibrado (C_c)	79
5.6	Tensões distorcidas equilibradas (<i>fundamental + 5^o harmônica</i>)	83
5.7	Tensões distorcidas desequilibradas (<i>Fase B</i>)	98
1	Tensões fundamentais desequilibradas e 5 ^o harmônica equilibrada	114

LISTA DE TABELAS

Capítulo 1

Introdução Geral

A preocupação com a qualidade da energia elétrica e o interesse em técnicas capazes de mantê-la dentro de níveis e padrões pré-definidos, tem aumentado consideravelmente no decorrer destas duas últimas décadas. Isto se deve principalmente a fatores como as recentes privatizações no setor elétrico mundial, a crescente globalização de produtos, mercados e bens gerais de consumo, os quais devem seguir rígidos padrões de qualidade internacional, inclusive no que diz respeito à energia elétrica.

Em todo o mundo, concessionárias de energia e consumidores de grande porte tem buscado investir em sistemas eletrônicos capazes de resolver antigos problemas, como por exemplo: deformação da forma de onda da tensão, desequilíbrios, consumo e circulação de reativos, harmônicos de corrente, oscilações de potência, desvios de frequência ou mesmo ampliação da capacidade das linhas de transmissão e distribuição. Por se tratar de soluções economicamente viáveis e fisicamente compatíveis com os sistemas já existentes, tais dispositivos podem ser instalados sem a necessidade de grandes alterações de infra-estrutura.

Do ponto de vista técnico e acadêmico, este interesse tem incentivado o surgimento de novos métodos de análise e controle dos sinais elétricos, os quais possibilitam o desenvolvimento de instrumentos de monitoração e dispositivos de condicionamento da energia elétrica.

Neste sentido, pesquisas tem se concentrado no desenvolvimento de uma metodologia adequada para o estudo da potência elétrica, tanto no domínio do tempo como no da frequência. Com o mesmo intuito, este trabalho apresenta um método de decomposição de sinais elétricos no domínio do tempo, que contribui para identificar e definir várias componentes de potência elétrica com significados distintos e associá-las aos fenômenos físicos que as originam.

O trabalho parte das condições ideais de transferência de energia elétrica, para apresentar duas decomposições temporais de sinais, as quais possibilitam o cálculo das potências instantâneas e a sugestão de alguns indicadores de qualidade de potência, que podem vir a ser utilizados para fins de tarifação ou atribuição de responsabilidades aos causadores de distúrbios elétricos.

1.1 Motivação do trabalho

A idéia inicial deste trabalho surgiu com o desenvolvimento de um sistema de monitoração da qualidade de energia elétrica, onde desejava-se utilizar os recentes conceitos de potências instantâneas (Akagi *et al.* 1983, Akagi *et al.* 1984, Akagi e Nabae 1993) para avaliar a qualidade da energia através de indicadores baseados em componentes de potência. Com esta finalidade e após muitos estudos e simulações, pôde-se

identificar algumas deficiências nos métodos analisados como, por exemplo, restrições quanto ao número de fases dos sistemas aplicados.

Com isto surgiu o interesse em contribuir para a teoria de potências instantâneas, principalmente no âmbito de qualidade de energia elétrica. Portanto, os principais motivos que levaram a este estudo foram:

- o crescente interesse pela monitoração e manutenção da qualidade de energia em todos os níveis de potência dos sistemas elétricos;
- a necessidade de adequar os instrumentos de monitoração e controle à realidade de sistemas polifásicos com cargas não-lineares, tensões e correntes não-senoidais, e diversos outros distúrbios indesejados aos sistemas;
- a não-convergência de opiniões sobre as teorias de potência desenvolvidas ao longo dos anos;
- o interesse em desenvolver um método de decomposição dos sinais elétricos (tensão e corrente), o qual possibilitasse identificar as diferentes componentes de potência diretamente do sistema polifásico original, sem a necessidade de uma transformação de eixos, tornando sua apresentação mais didática e sua associação aos fenômenos físicos mais direta;
- o interesse de que tal método de decomposição fosse baseado em condições ideais de transferência de energia, identificando as parcelas ditas ideais, das parcelas com as informações dos distúrbios dos sinais elétricos.

Um comentário sobre os tópicos acima está exposto nas seções a seguir, de forma que se possa melhor entender alguns conceitos e questões envolvidos no contexto deste trabalho.

1.1.1 Qualidade de energia - tendências

O termo “*qualidade de energia*” tem sido extensivamente utilizado nos últimos anos pois, como outros produtos e serviços, a energia elétrica que circula nos sistemas elétricos começa a ser exigida como um “bem de consumo”. Também é importante ressaltar que em tempos de privatizações do setor elétrico mundial e de expansão contínua na globalização de mercados, o fator custo torna-se cada vez mais determinante em relação à energia.

Isto significa que estudos no sentido de maximizar a geração, transmissão e distribuição de energia, sem elevar demasiadamente os custos do produto final, são bastante importantes.

Na verdade, ainda não existem normas específicas sobre a “qualidade de energia”, mas sim um conjunto de normas e recomendações internacionais sobre limites pré-definidos para deterioração da tensão e corrente elétrica. É de se imaginar que, assim como as conhecidas normas da série *ISO*, para produtos e serviços, no futuro se consiga reunir um conjunto de definições e normativas, as quais regulamentem de maneira uniforme em todo o mundo, as questões envolvidas na atribuição de “qualidade” à energia elétrica.

Enquanto não existem tais normas específicas, há a necessidade de um estudo geral e o mais didático possível sobre as grandezas elétricas, incluindo a potência e os fenômenos que causam deterioração das mesmas.

1.1.2 Teorias de potência

Diversos trabalhos tem sido apresentados na intenção de adequar o cálculo da potência elétrica a condições de não-linearidades e formas de onda não-senoidais. No entanto, ainda restam muitas perguntas sem resposta ou sem uma total convergência nas opiniões dos muitos pesquisadores. Algumas delas são:

- Qual o domínio mais adequado à análise da potência elétrica, tempo ou frequência?
- As diferentes componentes de potência causadas pelos diversos tipos de distúrbios devem ou não ser incluídos nos cálculos de potência reativa?
- Qual a real necessidade de se separar a componente fundamental das componentes harmônicas de um sistema?
- Até que ponto é possível relacionar os conceitos necessários às novas definições aos conceitos convencionais?
- Qual a necessidade de transformações nos eixos de referência, do tipo $a, b, c \Rightarrow \alpha, \beta, 0$ ou $a, b, c \Rightarrow d, q, 0$, as quais trazem restrições em relação ao número de fases do sistema, no cálculo de potências instantâneas?
- Como utilizar as componentes de potência para tarifação ou atribuição de responsabilidades, ou seja, quais parcelas são responsabilidade das agências distribuidoras de energia e quais são dos consumidores?
- O que pode ser feito para manter a potência elétrica o mais próximo possível das condições ideais de conservação de energia?

Estas e outras questões serão discutidas no decorrer deste trabalho, acreditando ser possível contribuir de alguma forma para que tais respostas sejam encontradas.

1.1.3 Condições ideais de transferência de energia

É sabido que um sistema CA polifásico ideal, operando em diferentes níveis de tensão, deve satisfazer às seguintes condições de operação em regime:

- tensões e correntes alternadas devem ser senoidais;
- amplitudes das ondas devem ter valores nominais constantes;
- tensões de alimentação devem ser equilibradas;
- fator de potência nas cargas deve ser unitário;
- frequência síncrona deve ser constante.

Essas cinco condições garantem que o sistema atenda adequadamente a qualquer carga, prevista para operar com corrente alternada na frequência nominal e que ainda opere em condições de máxima conservação de energia.

Entretanto, na prática é impossível satisfazer totalmente essas condições ideais, pois a rede e os equipamentos elétricos estão sempre sujeitos a falhas ou perturbações que deterioram de alguma maneira as condições que seriam desejáveis para a operação. É muito importante observar que mesmo as condições de fornecimento de energia tem se distanciado das ideais.

A determinação do grau de confiabilidade com que essas condições podem ser atendidas, depende dos sistemas de monitoração e de controle que estiverem disponíveis, ou seja, equipamentos baseados em conceitos ultrapassados ou equivocados podem encobrir problemas ou mesmo solicitar a atuação de dispositivos de controle de forma inadequada. Disto destaca-se o fato de que a maioria dos instrumentos de medição e monitoração de energia disponíveis até recentemente, eram baseados em conceitos hoje tidos como equivocados, como os apresentados por Budeanu (1927), e que sem dúvida não representam a realidade das instalações em análise, conforme discutido por Czarnecki (1987).

1.2 Objetivos do trabalho

Usando as condições de operação do sistema ideal como referência, este trabalho tem como objetivo desenvolver uma metodologia de decomposições das grandezas elétricas, a qual adota como princípio o afastamento das condições ideais que o sistema real experimenta. Essa abordagem permite identificar parcelas distintas nas tensões, correntes e potências, as quais possuem significados físicos diferentes e podem ser associados à transferência efetiva de energia ou à deterioração desta. As decomposições que serão apresentadas não possuem restrições nem quanto à forma de onda, nem quanto ao número de fases do sistema.

Os principais tópicos a serem tratados são:

- desenvolver no domínio do tempo duas decomposições matemáticas, as quais serão aplicadas aos sinais elétricos resultando em várias parcelas com significados distintos;
- formular através destas decomposições uma teoria de potências instantâneas o mais geral e didática possível;
- analisar o significado físico de cada componente de potência encontrado, identificando a contribuição de harmônicos e inter-harmônicos, assimetrias nos circuitos, tensões de alimentação distorcidas, interação entre as fases dos sistemas e cargas reativas;
- formular indicadores da qualidade da potência elétrica, que possam ser utilizados para avaliar a qualidade da energia elétrica;
- obter resultados de simulações digitais ou equivalentes, que possam ser utilizados para validação e discussão das decomposições, conceitos e definições apresentadas.

1.3 Sumário

O *Capítulo 2* traz as duas decomposições básicas utilizadas neste trabalho com o enfoque totalmente voltado para as funções matemáticas que permitem tais decomposições.

O *Capítulo 3* apresenta a aplicação e associação das funções expostas no capítulo anterior para as grandezas elétricas (tensão e corrente), permitindo identificar as várias parcelas distintas que compõem

tais sinais. Neste capítulo também são discutidas as definições de correntes ativas e não-ativas instantâneas e as parcelas fundamentais e residuais da tensão e corrente.

Associando as parcelas de tensão e corrente encontradas, o *Capítulo 4* traz um conjunto de definições de componentes de potência instantâneas, as quais podem ser associadas diretamente aos fenômenos físicos que as originam, além de permitirem o desenvolvimento de alguns indicadores de qualidade de potência. Neste capítulo são contrastados novos conceitos com definições já conhecidas, de forma a uniformizar da melhor forma possível nomenclaturas e ferramentas utilizadas por diferentes autores nas últimas duas décadas.

No *Capítulo 5* foram feitas análises de resultados experimentais, dos três casos exemplo utilizados para o desenvolvimento dos capítulos 3 e 4, visando a compreensão e validação das componentes e dos indicadores apresentados. Neste capítulo também estão descritas algumas aplicações nas quais pode-se utilizar a metodologia apresentada nos Capítulos 3 e 4.

Finalmente no *Capítulo 6* são apresentadas as conclusões obtidas ao final deste trabalho de mestrado, além de algumas propostas para trabalhos futuros que dariam continuidade a este estudo.

Capítulo 2

Decomposições de Sinais Temporais

2.1 Introdução

Para a decomposição dos sinais elétricos no domínio do tempo, visando identificar as diferentes parcelas de potência que circulam pela rede tanto em condições normais de operação como em condições de perturbações impostas por cargas variáveis e não-lineares, serão utilizadas técnicas matemáticas aplicáveis a funções temporais genéricas, cujo tratamento teórico pode ser encontrado em livros texto (Kaplan 1969, Lathi 1987, Kreyszig 1993).

Neste capítulo são resumidos os principais conceitos, aplicáveis aos objetivos deste trabalho, e que visam dar suporte aos desenvolvimentos que serão feitos nos capítulos seguintes.

A opção pelo tratamento preferencial no domínio do tempo decorre da convicção de que essa é a maneira mais adequada para se tratar das perturbações decorrentes de eventos isolados ou devidas a não-linearidades impostas aos sinais, cujas formas de onda deveriam seguir padrões conhecidos.

2.2 Decomposição ortogonal de funções ou Multiplicador de Lagrange

Sendo dadas as funções temporais reais $f_1(t)$ e $f_2(t)$, deseja-se aproximar $f_1(t)$ em termos de $f_2(t)$ no intervalo genérico $t_1 \leq t \leq t_2$. Isto significa que se procura um fator de proporcionalidade λ_{12} tal que:

$$f_1'(t) = \lambda_{12} \cdot f_2(t) \quad (2.1)$$

represente a melhor aproximação entre $f_1(t)$ e $f_2(t)$ no intervalo $t_1 \leq t \leq t_2$.

Para encontrar o valor de λ_{12} que melhor aproxime as duas funções, define-se uma equação de erro como sendo:

$$f_e(t) = f_1(t) - f_1'(t) = f_1(t) - \lambda_{12} \cdot f_2(t) \quad (2.2)$$

2 Decomposições de Sinais Temporais

Um dos critérios mais usados para se minimizar tal diferença é baseado na minimização do erro quadrático médio. Ou seja:

$$\varepsilon = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} f_e^2(t) dt = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} [f_1(t) - \lambda_{12} \cdot f_2(t)]^2 dt \quad (2.3)$$

O valor de λ_{12} que minimiza esse erro é obtido impondo-se a condição de extremo:

$$\frac{d\varepsilon}{d\lambda_{12}} = 0, \quad (2.4)$$

que resulta na relação:

$$\lambda_{12} = \frac{\frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} f_1(t) \cdot f_2(t) dt}{\frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} f_2^2(t) dt} \quad (2.5)$$

No caso geral $f_1(t)$ e $f_2(t)$ podem ser funções multidimensionais ou vetoriais $[f_1(t)]$ e $[f_2(t)]$ e neste caso a integral

$$\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} [f_1(t)] \cdot [f_2(t)] dt, \quad (2.6)$$

é definida como o produto escalar de $[f_1(t)]$ por $[f_2(t)]$ no intervalo $t_1 \leq t \leq t_2$. E

$$\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} [f_2(t)]^2 dt, \quad (2.7)$$

é definida como a norma quadrática de $[f_2(t)]$ no intervalo $t_1 \leq t \leq t_2$.

Observa-se que a norma só será nula se $[f_2(t)]$ se anular sobre todo o intervalo. O produto escalar só será nulo se $[f_1(t)]$ e $[f_2(t)]$ forem ortogonais no intervalo sugerido. Neste caso λ_{12} vale zero e, de acordo com (2.1), conclui-se que a única aproximação possível é:

$$[f_1'(t)] = 0, \quad (2.8)$$

no intervalo $t_1 \leq t \leq t_2$.

A partir de (2.2) constata-se também que $f_e(t)$, na condição de erro mínimo, corresponde à parcela de $f_1(t)$ que é ortogonal a $f_2(t)$.

Notar que o intervalo $t_2 - t_1$ é arbitrário e que as funções $f_1(t)$ e $f_2(t)$ não têm restrições quanto à forma de onda e podem possuir qualquer número de variáveis.

O fator de proporcionalidade λ_{12} também é conhecido por *Função de Decomposição Ortogonal* (Lathi 1987) ou *Multiplicador de Lagrange* (Kaplan 1969), e possui a propriedade de definir números escalares (multiplicadores), os quais associam as funções (vetores) entre si identificando as parcelas escalar (proporcional) e ortogonal.

Neste ponto é importante que se façam alguns comentários sobre a nomenclatura que está sendo introduzida e será utilizada em todo o trabalho:

- O termo “*escalar*” está sendo introduzido nesta conceituação, uma vez que a parcela da função decomposta que leva este nome (f_1') é baseada na normalização em função de uma referência, do produto escalar das funções originais. Este conceito está indicado nas equações 2.5-2.7 e será melhor compreendido no decorrer do trabalho;
- O termo “*proporcional*” entre parênteses significa que, em certas condições específicas de forma de onda e simetria, a parcela escalar pode ter forma de onda exatamente proporcional à função de referência, levando apenas um “fator de escala” constante definido por λ ;
- O termo “*ortogonal*”, definido pela função de erro (f_e), significa que, no espaço vetorial formado pelas funções originais, esta parcela é ortogonal à parcela escalar.

2.2.1 Norma Euclidiana Instantânea

Para um dado instante $t = t_k$ podemos analisar as funções n-dimensionais $[f_1(t)]$ e $[f_2(t)]$ como grandezas vetoriais no espaço n-dimensional. Define-se a *Norma Euclidiana Instantânea - NEI* para os valores $[f(t_k)] = [a]$, como sendo:

$$\| [a] \| \triangleq \sqrt{[a] \cdot [a]} = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2} \quad (2.9)$$

Pode-se fazer uma associação entre a *NEI* e norma média da função contínua no intervalo $[t_k, t_k + \Delta t]$: Da equação 2.7, a norma quadrática:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \int_{t_k}^{t_k + \Delta t} [f_2(t)]^2 dt = \| [f(t_k)] \|^2 = \| [a] \|^2, \quad (2.10)$$

e portanto, a norma instantânea é dada por:

$$\| [a] \| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_{t_k}^{t_k + \Delta t} [f(t)]^2 dt} = \| [f(t_k)] \| \quad (2.11)$$

Para sinais periódicos, a norma por período ($\Delta t = T$) corresponde ao valor eficaz (RMS), ou seja, à média quadrática da função no intervalo considerado.

$$RMS = \| [a] \| = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_k}^{t_k+T} [f(t)]^2 dt} \quad (2.12)$$

Quanto menor o intervalo de discretização Δt tanto mais a função irá se aproximar do valor instantâneo da função contínua $f(t)$ para $t = t_k$. Isto sugere que no caso de sinais amostrados com intervalos de tempo pequenos (relativamente à taxa de variação do sinal), podemos substituir o valor da função no intervalo pelo valor amostrado e realizar a decomposição ortogonal usando a Norma Euclidiana Instantânea. As aplicações descritas nos capítulos seguintes utilizam esse procedimento.

Para ilustrar como a Norma Euclidiana Instantânea (*NEI*) varia em três casos diferentes, na figura 2.1 foi utilizada uma função temporal do tipo

$$[f] = (a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4).$$

No primeiro caso (2.1(a)), trata-se de um conjunto multi-dimensional equilibrado, a norma é constante ao longo do tempo. No segundo caso (2.1(b)), existe um desequilíbrio de fase dentre as funções do sistema multi-dimensional, o que resulta em variações para a *NEI*. Finalmente no caso (2.1(c)), existe um desequilíbrio na amplitude de uma das funções, que também provoca oscilações na *NEI*.

Para exemplificar a aplicação dos princípios de decomposição baseado na norma instantânea, as figuras 2.2, 2.3 e 2.4 mostram como duas funções inter-relacionadas

$$[f_2] = (a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4) \quad (2.13)$$

$$[f_1] = (b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4), \quad (2.14)$$

podem ser decompostas em parcelas escalar e ortogonal (função de erro), em situações distintas.

Nas figuras apresentadas, as parcelas escalares ($[f'_1]$) são representadas pelas letras "c", enquanto as parcelas ortogonais ($[f_e]$) são indicadas com a letra "d".

Na figura 2.2(a) estão indicadas as duas funções temporais com quatro variáveis, as quais possuem formas de onda senoidais, estão exatamente em fase e são equilibradas entre si durante o intervalo analisado. Nesta situação, tanto o produto escalar das duas funções, quanto a norma quadrática são constantes no intervalo, o que resulta em razão (multiplicador de Lagrange) também constante entre eles 2.2(b). Uma vez que as duas funções tem exatamente a mesma forma de onda e estão em fase, a parcela dita escalar de $[f'_1]$ coincide com a mesma $[f_1]$, conforme a figura 2.2(c). Por outro lado a parcela dita ortogonal ou função de erro é nula neste caso 2.2(d).

Da mesma forma que na figura anterior, em 2.3(a) as funções são senoidais e equilibradas, no entanto existe um dado ângulo de defasagem entre $[f_1]$ e $[f_2]$. A figura 2.3(b) mostra que a norma e o produto escalar são novamente constantes, mas agora a função $[f_1]$ é decomposta em parcelas escalares e ortogonais, como indicado em 2.3(c) e 2.3(d). Notar que em se tratando de funções senoidais equilibradas, as partes escalares são exatamente proporcionais e em fase com $[f_2]$ e as partes ortogonais são exatamente a 90° de $[f_2]$.

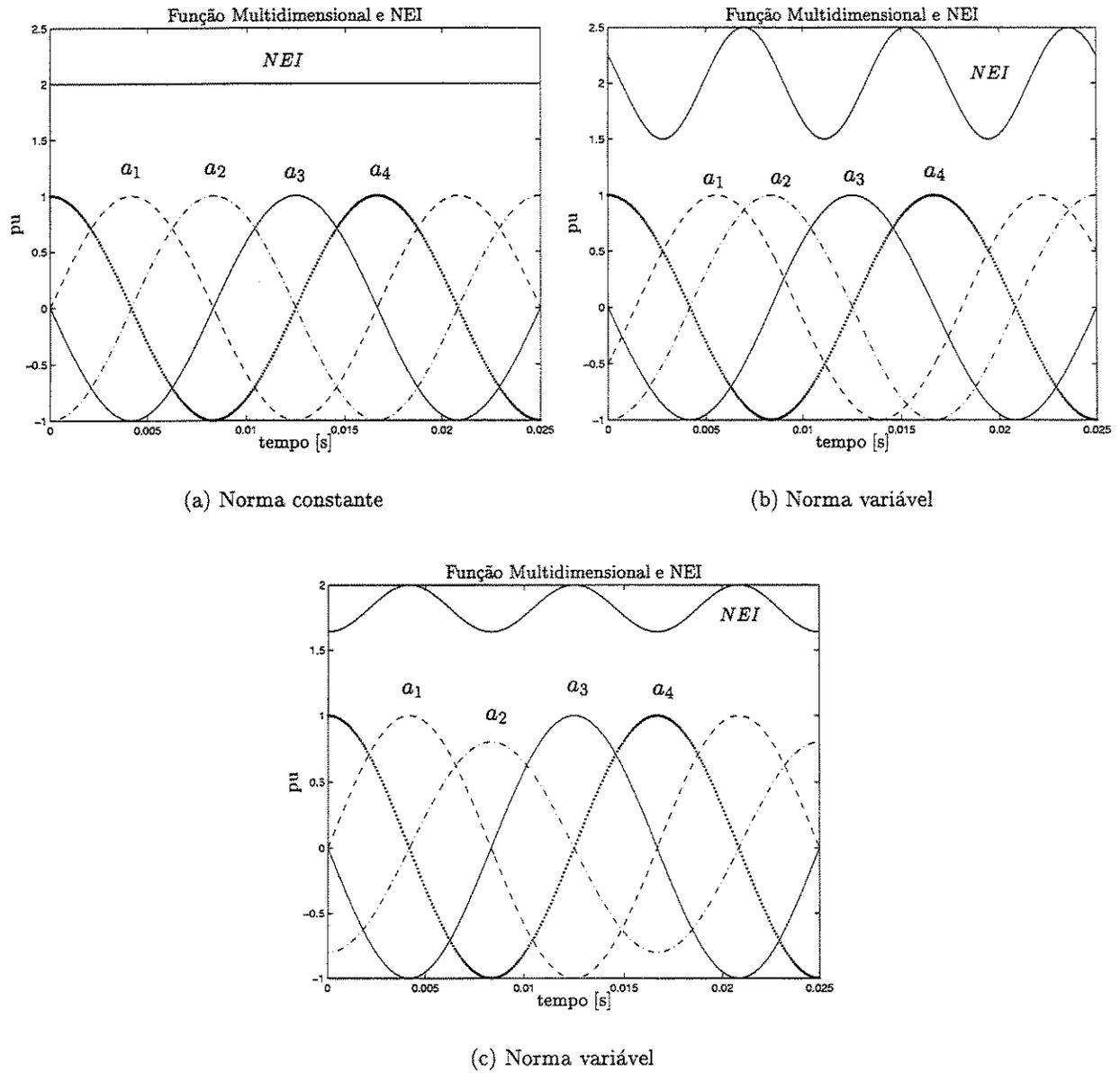
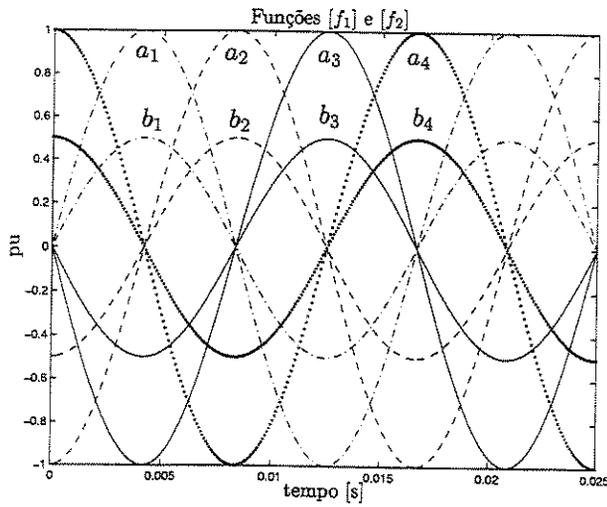
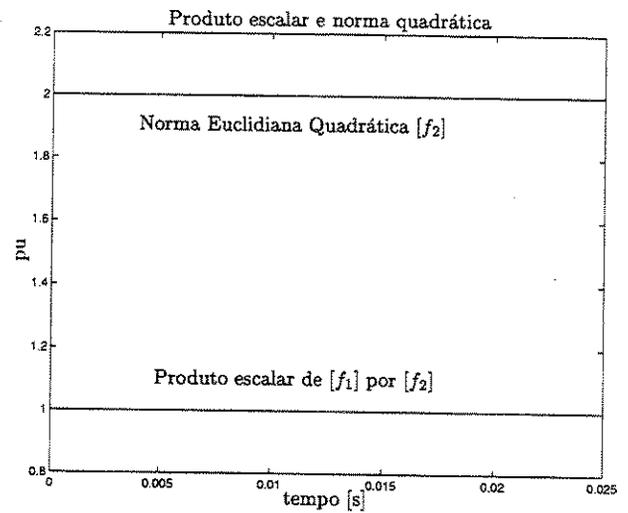


Figura 2.1: Norma Euclidiana Instantânea

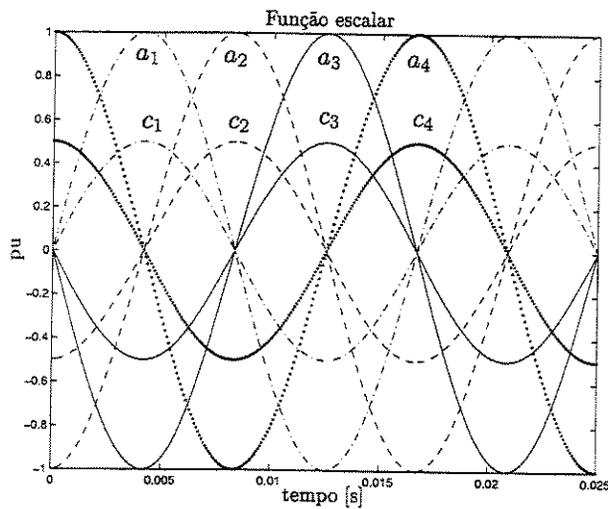
2 Decomposições de Sinais Temporais



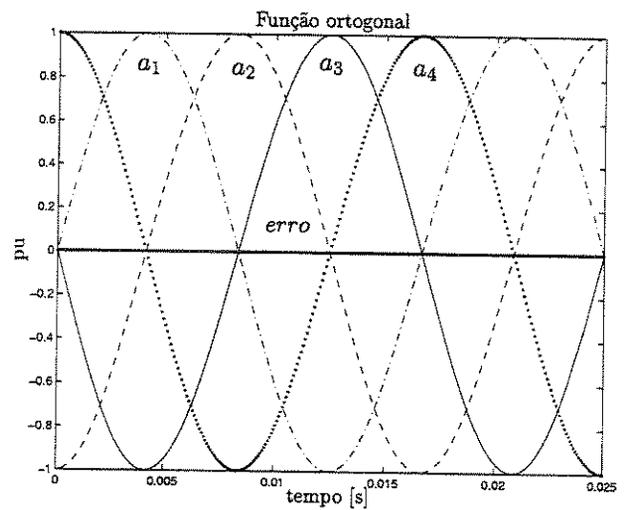
(a) Funções multidimensionais inter-relacionadas



(b) Produto escalar e norma quadrática

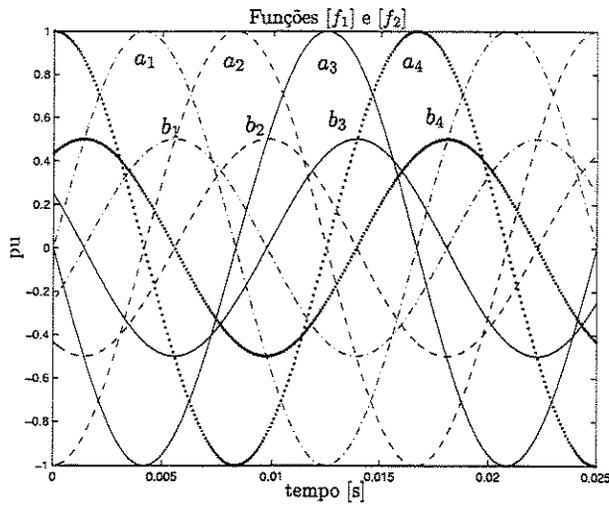


(c) Parcelas escalares

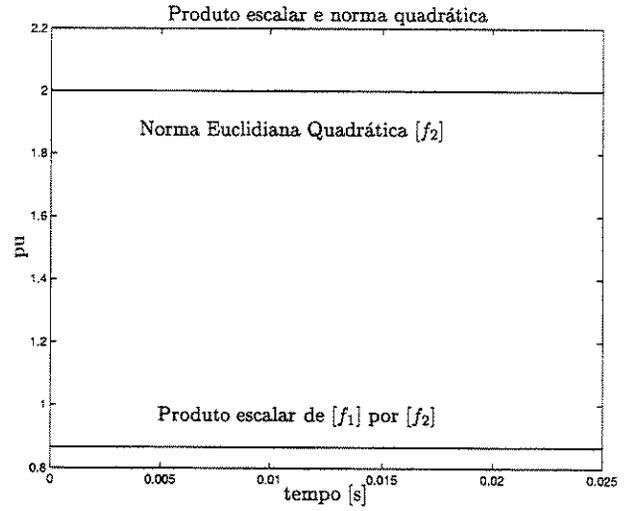


(d) Parcelas ortogonais

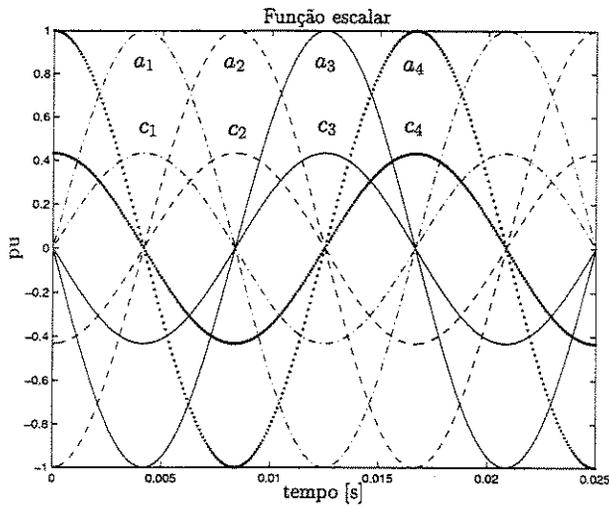
Figura 2.2: Decomposição em escalar e ortogonal para duas funções senoidais em fase



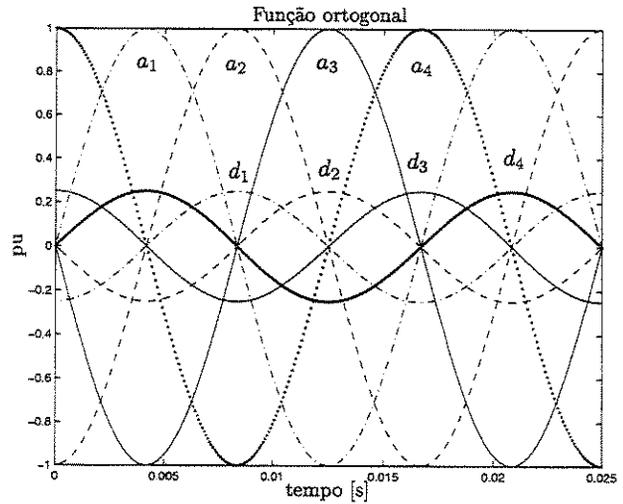
(a) Funções multidimensionais inter-relacionadas



(b) Produto escalar e norma quadrática

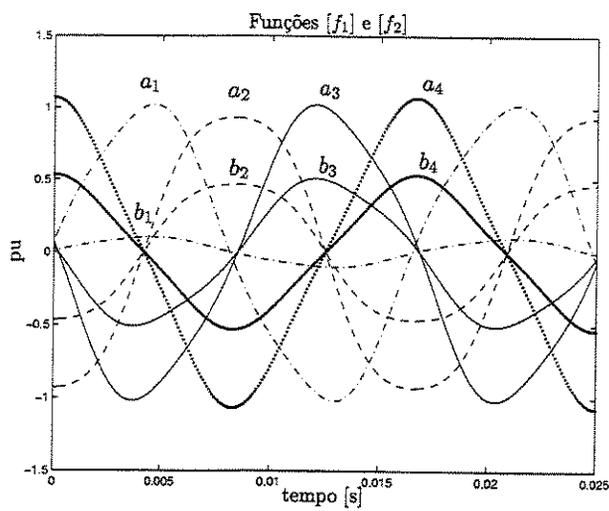


(c) Parcelas escalares

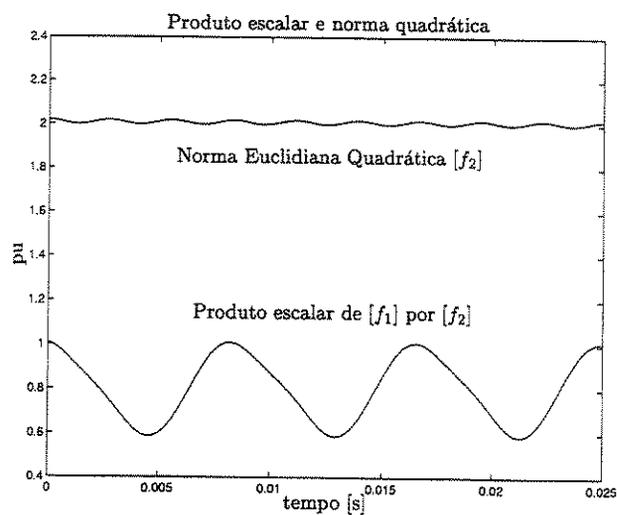


(d) Parcelas ortogonais

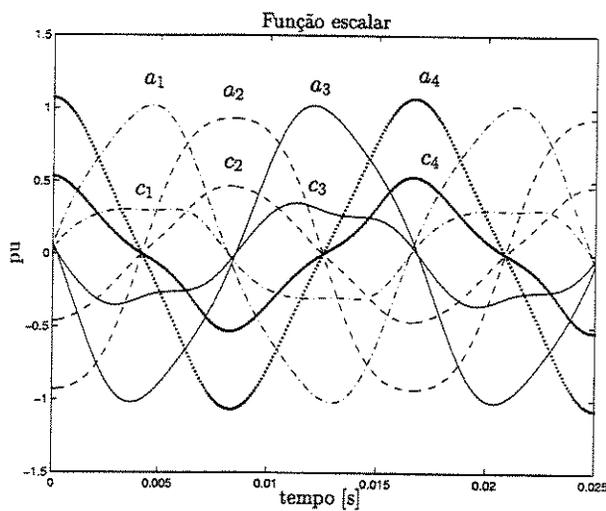
Figura 2.3: Decomposição para funções senoidais defasadas entre si



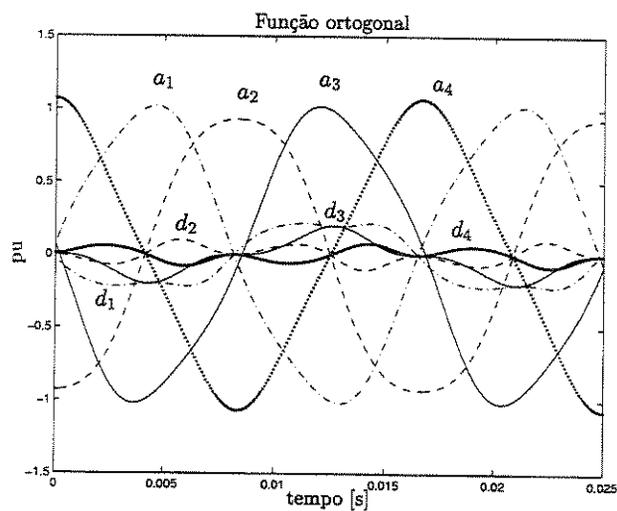
(a) Funções multidimensionais inter-relacionadas



(b) Produto escalar e norma quadrática



(c) Parcelas escalares



(d) Parcelas ortogonais

Figura 2.4: Decomposição em escalar e ortogonal para funções não senoidais

A figura 2.4(a) representa uma situação onde a função $[f_2]$ possui forma de onda distorcida e diferente em cada uma de suas variáveis, ao passo que $[f_1]$, além de ser distorcida, apresenta um desequilíbrio na amplitude de uma das variáveis (b_1). Em 2.4(b) pode-se notar que o produto escalar e a norma quadrática possuem variações distintas durante o intervalo analisado, o que representa uma razão variável entre eles. Pelas figuras 2.4(c) e 2.4(d), pode-se observar que as parcelas escalares e ortogonais (função de erro) não possuem mais a mesma forma de onda de $[f_2]$, no entanto, a decomposição tem sua validade baseada nas propriedades de produto escalar e será melhor compreendida quando aplicada aos sinais elétricos nos Capítulos 3 e 4.

2.3 Decomposição de sinais em componentes fundamental e residual

Uma segunda decomposição que será utilizada no decorrer deste trabalho, é a separação em componentes fundamental e residual. Utilizando as mesmas funções temporais expostas até aqui, e considerando a hipótese de que tais sinais possuam uma dada periodicidade em termos da onda fundamental, é possível desenvolver uma decomposição para separar essa fundamental do restante do sinal.

Ao contrário da análise de Fourier, que pressupõe periodicidade para todos os componentes da série harmônica, a abordagem proposta pressupõe que apenas a onda fundamental seja periódica. Dessa forma pode-se ter conteúdo harmônico e inter-harmônico variável no tempo. Esta situação é bastante comum em sistemas elétricos, sujeitos a perturbações transitórias das grandezas elétrica.

Ao se propor essa abordagem, evidentemente está-se considerando análise dos sinais no domínio do tempo e não no domínio da frequência.

2.3.1 Separação em onda fundamental e sinal residual

A idéia básica é efetuar, no domínio do tempo, a separação de um sinal periódico qualquer (x), em parcela fundamental (x_1) e resíduo (x_{res}), onde este último está diretamente relacionado a componentes de frequências distintas da fundamental.

Seja o sinal temporal representado por:

$$x(t) = x_1(t) + x_{res}(t) \quad (2.15)$$

onde:

- $x(t)$ - sinal temporal qualquer;
- $x_1(t)$ - onda de frequência fundamental;
- $x_{res}(t)$ - sinal residual (composição de outras frequências).

O sinal $x_{res}(t)$ representa tipicamente a composição temporal de múltiplos inteiros (harmônicos) e não-inteiros (inter-harmônicos) da fundamental, quando estes estão presentes em um determinado sinal. A figura 2.7 representa o algoritmo de separação, onde a decomposição pode ser efetuada por meio de técnicas de filtragem digital.

Uma primeira alternativa para identificar a onda fundamental consiste em eliminar o sinal residual contido no sinal de entrada, ou seja, implementar um filtro que realize a função:

$$x_1(t) = x(t) - x_{res}(t) \quad (2.16)$$

Esta operação é realizada por um filtro passa-faixas ajustado para atenuar todas as frequências a menos da fundamental. O filtro passa-faixa típico tem como característica a presença de um zero na origem e um par de pólos no semiplano-s esquerdo. Essa característica define que a resposta de fase do filtro comece em $(+90^\circ)$ para $\omega = 0$ e tenda a (-90°) para $\omega = \infty$. A passagem por zero ocorre na frequência de ressonância (f_0), que corresponde à frequência com mínima atenuação (ou máximo ganho).

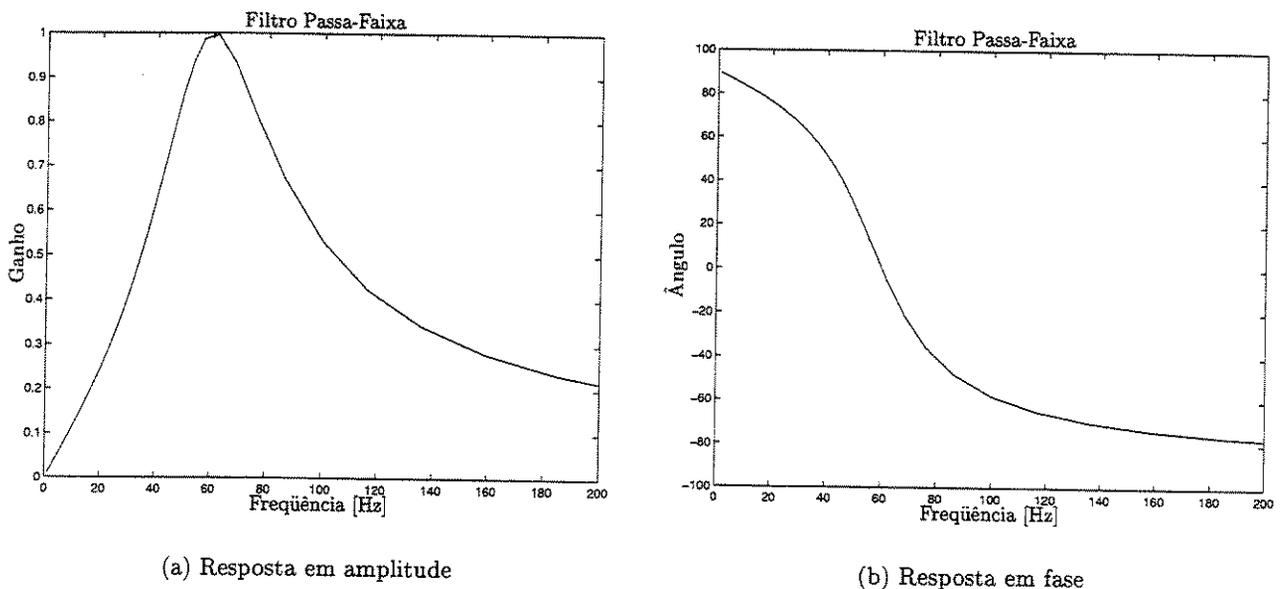


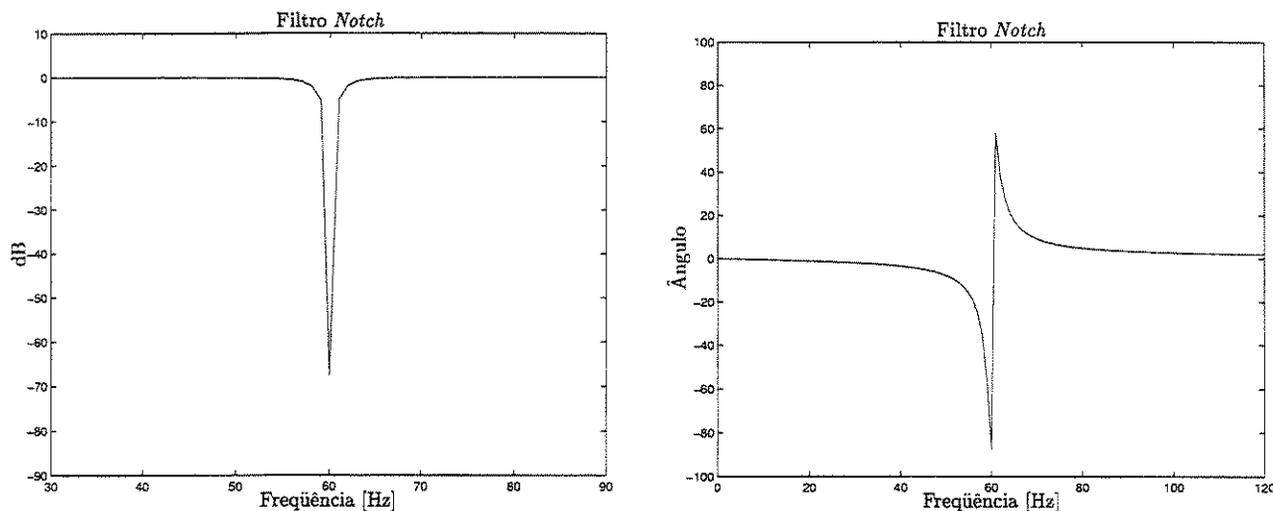
Figura 2.5: Resposta do filtro passa-faixa

Pode-se melhorar a seletividade do filtro e com isso aumentar a atenuação das frequências em torno de f_0 , aumentando a ordem do filtro. Porém isso acarreta uma excursão maior da fase do sinal filtrado. Uma vez que a rotação de fase dos sinais compromete a análise que se pretende realizar, essa forma de decomposição não é adequada aos nossos propósitos.

Uma outra alternativa para resolver o problema consiste em primeiro identificar o sinal residual, eliminando a onda fundamental, ou seja, implementando um filtro que realize a função:

$$x_{res}(t) = x(t) - x_1(t) \quad (2.17)$$

Essa operação é realizada pelo filtro rejeita-faixa ("notch"), cuja característica básica é possuir um par de zeros e de pólos próximos da frequência que se deseja eliminar ($f_0 \rightarrow f_1$).



(a) Resposta em amplitude

(b) Resposta em fase

Figura 2.6: Resposta do filtro *notch*

Neste caso, a rotação de fase ocorre apenas em torno da frequência de “notching” f_0 . A faixa em que ocorre a rotação de fase corresponde à faixa de modulação da fundamental ($f_0 \pm \Delta f$), isto significa que o sinal residual, que contém as frequências harmônicas, praticamente não sofre rotação de fase.

Uma vez obtido o sinal residual através do filtro “notch” pode-se recuperar a onda fundamental pela relação (2.16). A figura 2.7 ilustra o processo descrito:

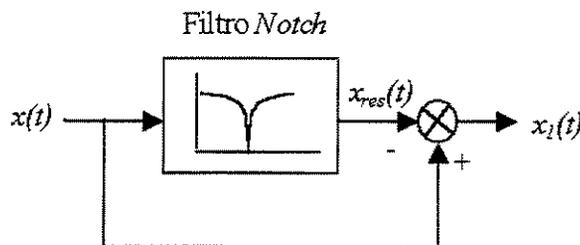


Figura 2.7: Processo de decomposição em sinal residual e onda fundamental

Para ilustrar tal decomposição, as figuras 2.8 e 2.9 representam situações onde os sinais, os quais possuíam componentes de diferentes frequências, são decompostos em onda fundamental e resíduo.

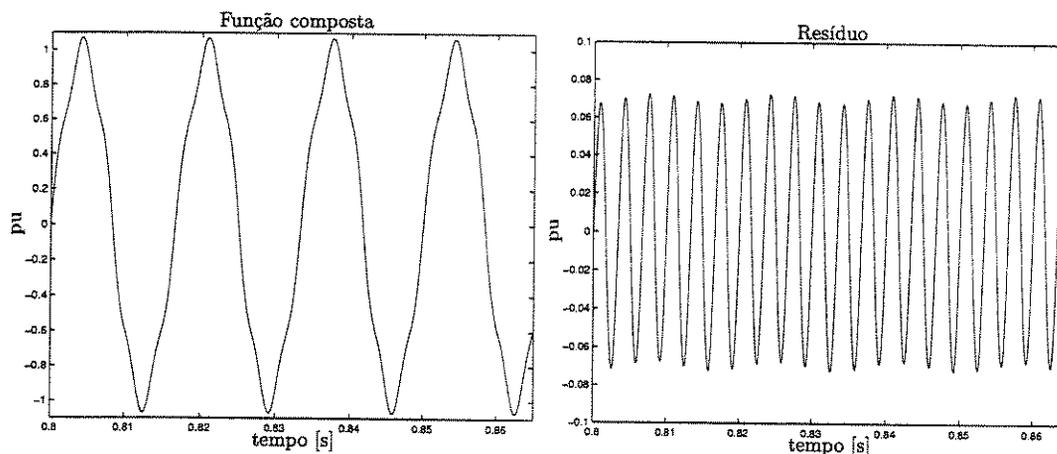
A figura 2.8(a) mostra uma função uni-dimensional distorcida, a qual é composta por dois sinais de frequências múltiplas entre si. Após o processo de decomposição apresentado, a função original pode ser separada em sinal residual 2.8(b) e onda fundamental 2.8(c).

Na figura 2.9(a) está indicada a função multi-dimensionai do tipo

$$[f] = (a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4),$$

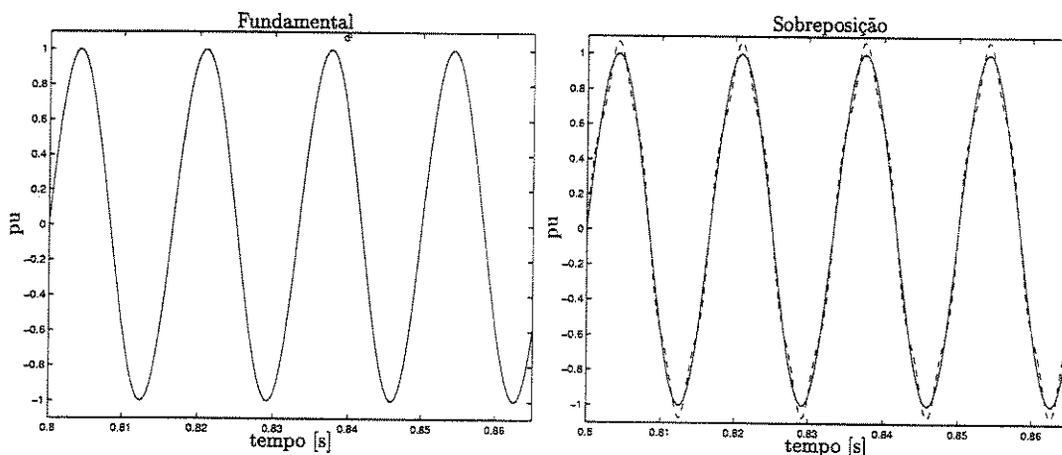
2 Decomposições de Sinais Temporais

a qual possuía diferentes composições de frequências em cada variável (dimensão) da função original, além de possuir um desequilíbrio de amplitude em uma delas. Estas foram separadas em sinais residuais (cada um com sua frequência distinta) 2.9(b) e ondas fundamentais 2.9(c) pelo processo descrito.



(a) Função com sinais de diferentes frequências

(b) Sinal residual de 5° harmônica

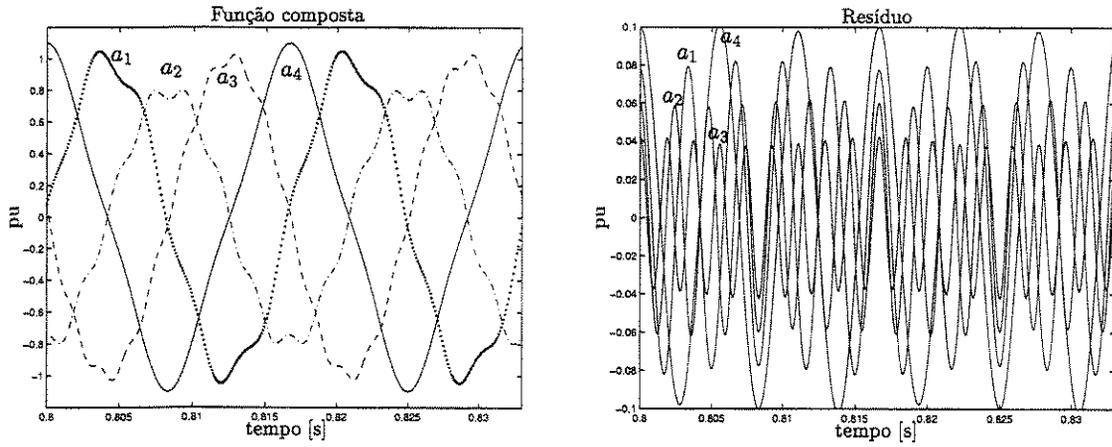


(c) Onda fundamental

(d) Função original e onda fundamental

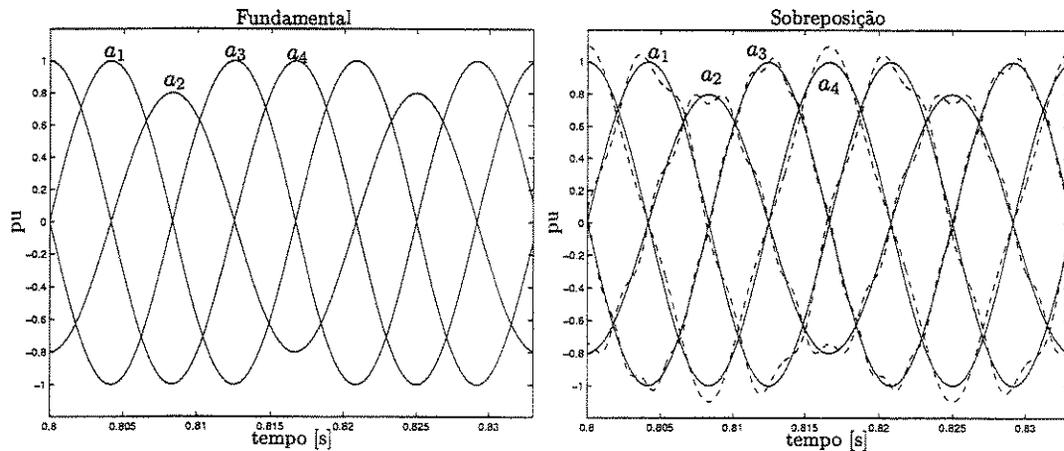
Figura 2.8: Decomposição em fundamental e resíduo para função uni-dimensional

Notar que nos dois casos a decomposição não altera nem a amplitude nem a fase relativa dos sinais, o que pode ser observado pelas figuras 2.8(d) e 2.9(d).



(a) Função com sinais de diferentes frequências

(b) Sinal residual



(c) Onda fundamental

(d) Função original e onda fundamental

Figura 2.9: Decomposição em fundamental e resíduo para função multi-dimensional

2.4 Conclusão

Os dois métodos para decomposição de sinais (funções) temporais apresentados, serão úteis para um melhor entendimento de fenômenos físicos associados a grandezas elétricas, tais como os descritos nos Capítulos 3 e 4.

A primeira decomposição apresentada, cuja função é dividir sinais co-relacionados em parcelas escalares e ortogonais entre si, pode ser aplicada a qualquer tipo de sinal, independentemente de forma de onda, periodicidade ou número de variáveis. Por outro lado, a decomposição em onda fundamental e resíduo é válida apenas enquanto os sinais forem periódicos em torno da fundamental.

Será mostrado que a utilização conjunta dessas duas técnicas de decomposição permite simplificar a identificação de distúrbios que atingem sistemas elétricos e definir indicadores da deterioração da qualidade da energia suprida.

A base matemática desenvolvida neste capítulo serve de balizamento para a validação das aplicações que serão feitas. Os exemplos apresentados ajudam na compreensão dos conceitos envolvidos.

No próximo capítulo será apresentada a aplicação das decomposições expostas, para os sistemas com grandezas elétricas.

Capítulo 3

Aplicação das Decomposições em Grandezas Elétricas

3.1 Introdução

Dado o que foi apresentado no Capítulo 2, pode-se associar os sinais instantâneos de tensão e corrente elétricas de sistemas polifásicos às funções ou vetores temporais, para os quais foram desenvolvidas as duas decomposições citadas.

Uma vez que as grandezas elétricas nada mais são do que funções inter-relacionadas, a aplicação dos conceitos matemáticos apresentados no capítulo anterior são totalmente válidas e interessantes para a análise de tais sinais.

Isto significa que tensões e correntes podem ser decompostas em parcelas escalares ou ortogonais, de frequência fundamental ou termo residual.

Nas próximas seções, as decomposições do capítulo anterior serão aplicadas às grandezas elétricas, resultando em parcelas de tensão e corrente com interpretações físicas de interesse prático.

Para as análises que serão apresentadas, os sinais de tensão e corrente são tomados como vetores n -dimensionais instantâneos, ou seja:

$$[v] = (v_1 \ v_2 \ \dots \ v_n) \quad (3.1)$$

$$[i] = (i_1 \ i_2 \ \dots \ i_n), \quad (3.2)$$

onde n é o número de dimensões ou fases de um sistema.

Neste ponto é interessante destacar alguns conceitos sobre sinais e circuitos elétricos e os sistemas formados por estes. De um modo geral, os circuitos elétricos são ditos simétricos, equilibrados ou balanceados: se a impedância de todos os ramos do mesmo são idênticas. Por sua vez, os sinais de tensão são simétricos, equilibrados ou balanceados: se suas amplitudes são iguais, as defasagens entre os sinais nos ramos do circuito são idênticas ($\frac{360}{n}$) e ainda se as formas de onda dos sinais são senoidais. As correntes elétricas dependem diretamente do tipo de circuito e da tensão aplicada, sendo equilibradas somente se ambos também forem. Portanto, neste contexto, as três definições (simétrico/equilibrado/balanceado) serão consideradas equivalentes.

Os sistemas compostos por circuitos e sinais de tensão e corrente, apresentam-se equilibrados (simétricos / balanceados) ou não, dependendo da configuração da tabela 3.1.

Condições de Equilíbrio		
Circuito	Tensões	Sistema
equilibrado	equilibradas senoidais	equilibrado
	desequilibradas senoidais	
desequilibrado	equilibradas senoidais	desequilibrado
	desequilibradas senoidais	
equilibrado	não-senoidais	
desequilibrado		

Figura 3.1: Condições para sistema equilibrado

3.2 Decomposição dos sinais de corrente e tensão em parcelas fundamental e residual

Quando se pretende preservar as formas de onda senoidais da tensão e corrente, há necessidade de identificar as parcelas relativas à onda fundamental das demais componentes.

Considerando a hipótese de periodicidade, citada na seção 2.3, utiliza-se da decomposição, a qual aplicada aos sinais de tensão e/ou corrente, permite identificar a parcela de frequência fundamental do sistema (50/60 Hz) e a parcela que possui frequências diferentes da fundamental.

Na decomposição dos sinais instantâneos de tensão e corrente em parcelas fundamental e residual, tem-se:

$$[v] = [v_1] + [v_{res}] \quad (3.3)$$

$$[i] = [i_1] + [i_{res}] \quad (3.4)$$

onde:

- $[v]$ e $[i]$ - vetores das tensões e correntes originais (frequências sobrepostas) ;
- $[v_1]$ e $[i_1]$ - vetores das ondas de tensão e corrente de frequência fundamental;
- $[v_{res}]$ e $[i_{res}]$ - vetores com os sinais residuais de tensão e corrente.

Com esta decomposição é possível, identificar a contribuição de sinais harmônicos e inter-harmônicos na deterioração da forma de onda dos sinais elétricos. Nos Capítulos 4 e 5 estão discutidas formas de se utilizar tais parcelas para avaliação da qualidade da energia em um determinado sistema.

No contexto deste trabalho, esta separação é de extrema importância, uma vez que objetiva isolar dos sinais originais de tensão e corrente, as parcelas ditas *ideais*, das parcelas perturbadoras dos sistemas elétricos.

Desta forma, os sinais residuais calculados por este método podem ser utilizados não somente para avaliação da qualidade da energia, mas também para controle de dispositivos de filtragem, compensação ou mesmo tarifação de energia.

As figuras contidas em 3.2 ilustram a decomposição apresentada, para uma situação onde um sistema trifásico possui 10% de 3^o harmônica nas tensões de cada fase (a, b, c). Na figura 3.2(a) estão as tensões distorcidas originais do sistema; em 3.2(b) estão os sinais residuais (3^o harmônica) idênticos nas três fases e obtidos pela decomposição; na figura 3.2(c) estão as ondas fundamentais após a filtragem e finalmente, a figura 3.2(d) traz a sobreposição dos sinais, o que mostra que não existem alterações de amplitude nem de fase dos sinais envolvidos.

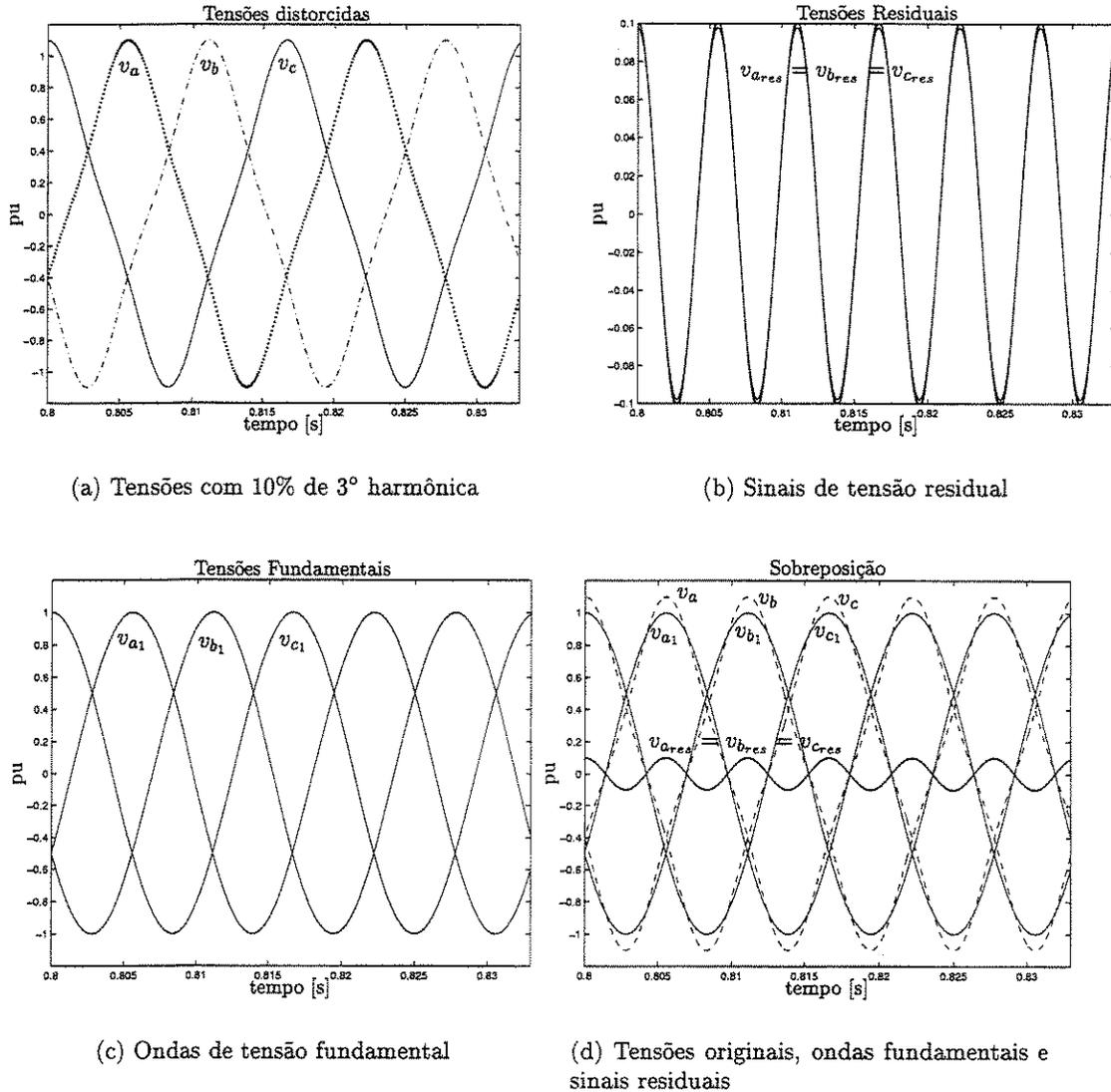


Figura 3.2: Decomposição da tensão em fundamental e resíduo

Por se tratar de uma decomposição no domínio do tempo (aplicável às grandezas instantâneas), baseada no domínio da frequência (separa a onda fundamental dos sinais residuais), esta decomposição pode ser apresentada como sendo de domínio duplo. Esta particularidade torna seu potencial de aplicação

bastante amplo.

Uma aplicação bastante interessante para esta decomposição, refere-se por exemplo, à identificação dos componentes de seqüência positiva das tensões de fornecimento de um sistema polifásico. Ou seja, uma vez identificadas as ondas fundamentais e os sinais residuais de tensão, poder-se-ia utilizar uma transformação no domínio do tempo, a qual possibilitaria o cálculo das componentes de seqüência. No Apêndice 1 está apresentada uma breve discussão deste problema.

No presente trabalho está sendo considerada a hipótese de que as tensões *fundamentais* do sistema de fornecimento estão *equilibradas*. Tal consideração visa principalmente simplificar as análises que serão apresentadas, particularmente a decomposição em termos das tensões (referências).

3.3 Decomposição da corrente em parcelas escalar e ortogonal à tensão

Partindo do princípio de que uma corrente elétrica genérica é composta por diferentes sinais que se sobrepõem instantaneamente, os quais expressam as condições reais de consumo em uma determinada carga ou grupo destas, tais correntes podem ser decompostas em dois conjuntos: o conjunto que combinado é escalar à tensão instantânea do sistema e o conjunto que combinado é ortogonal à mesma.

O termo escalar, significa que no espaço vetorial formado pelas tensões e correntes, o produto escalar entre tal parcela das correntes com as tensões, produz valor maior ou igual a zero. Por sua vez, a parcela ortogonal significa que no mesmo espaço vetorial, o resultado do produto escalar entre estas parcelas de corrente e tensão, resulta nulo a todo instante.

Desejando conhecer a parcela das correntes que é escalar às tensões, pode-se aproximar as correntes $[i]$ em termos das tensões $[v]$ utilizando a decomposição ortogonal descrita no capítulo anterior. Ou seja:

$$[i_{sc}] = \lambda \cdot [v], \quad (3.5)$$

dá a parcela de corrente escalar à tensão, obtida através do multiplicador de Lagrange (λ) da seção 2.2. E, por conseguinte:

$$[i_{ort}] = [i] - [i_{sc}] = \begin{bmatrix} i_1 - i_{sc1} \\ i_2 - i_{sc2} \\ \vdots \\ i_n - i_{scn} \end{bmatrix}, \quad (3.6)$$

dá a parcela de corrente ortogonal ou não escalar à tensão, obtida pela função de erro da mesma seção.

Uma vez que $[i] = [i_{sc}] + [i_{ort}]$, onde $[i_{sc}]$ é escalar à $[v]$ e $[i_{ort}]$ é ortogonal à $[v]$, então vale:

$$[v] \cdot [i_{ort}] = 0 \quad (3.7)$$

onde (\cdot) é o produto interno ou escalar. Portanto, também pode-se concluir que:

$$[i_{sc}] \cdot [i_{ort}] = 0, \quad (3.8)$$

ou seja, $[i_{sc}]$ e $[i_{ort}]$ são ortogonais entre si.

Essa última relação pode ser demonstrada usando a *NEI*:

$$\| [i] \|^2 = [i] \cdot [i] = ([i_{sc}] + [i_{ort}]) \cdot ([i_{sc}] + [i_{ort}])$$

$$\| [i] \|^2 = [i_{sc}] \cdot [i_{sc}] + [i_{sc}] \cdot [i_{ort}] + [i_{sc}] \cdot [i_{ort}] + [i_{ort}] \cdot [i_{ort}]$$

em função de (3.8) resulta:

$$\| [i] \|^2 = \| [i_{sc}] \|^2 + \| [i_{ort}] \|^2, \quad (3.9)$$

que é válida para vetores ortogonais, ou seja, $[i_{sc}] \perp [i_{ort}]$.

Considerando agora a decomposição sobre um intervalo T qualquer, tem-se:

$$\lambda = \frac{\int_0^T [v] \cdot [i] dt}{\int_0^T [v]^2 dt} = \frac{\int_0^T (v_1 \cdot i_1 + v_2 \cdot i_2 + \dots + v_n \cdot i_n) dt}{\int_0^T (v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2) dt} \quad (3.10)$$

Se T corresponder ao período do sinal, podemos escrever: $\int_0^T [v] \cdot [i] dt = T \cdot P$ e $\int_0^T [v]^2 dt = T \cdot V^2$, e portanto:

$$\lambda = \frac{P}{V^2} = g_e \quad (3.11)$$

onde P é a potência ativa média por período e V^2 é a norma quadrática média por período, ou seja, o valor eficaz (RMS) ao quadrado das tensões, como visto na seção 2.2.1. A relação (3.10) pode ser aplicada a intervalos diferente do período da onda. Neste caso utiliza-se o conceito de Norma Instantânea (NEI) em lugar do valor eficaz.

Com isso fica claro que λ é a *condutância equivalente* (g_e) do circuito e que a parcela de corrente escalar à tensão ($[i_{sc}] = \lambda \cdot [v]$), é responsável pela potência ativa envolvida. Por outro lado, para sistemas n-dimensionais equilibrados ($n > 1$), o produto escalar da parcela ortogonal $[i_{ort}]$ pela tensão é nulo a todo instante.

Ou seja, se a potência instantânea for dada por:

$$p = [v] \cdot [i] = [v] \cdot [i_{sc}] + [v] \cdot [i_{ort}] \quad (3.12)$$

então

$$p = [v] \cdot [i] = [v] \cdot [i_{sc}], \quad (3.13)$$

pois

$$[v] \cdot [i_{ort}] = 0$$

Notar que segundo esta decomposição, a parcela de corrente escalar é definida considerando condutância constante, pois P e V^2 são valores médios por período. Esta definição coincide com a desenvolvida por Fryze (1932).

No entanto, a decomposição ortogonal é mais geral e pode ser aplicada a qualquer intervalo $\Delta t > 0$. Nessas condições, a equação 3.14 pode resultar em dois casos:

$$\lambda = \frac{\int_0^{\Delta t} [v] \cdot [i] dt}{\int_0^{\Delta t} [v]^2 dt} = g_e \quad (3.14)$$

Caso 01 - A condutância equivalente é constante ($g_e = cte$)

Neste caso pode-se escrever:

$$\int_0^{\Delta t} \lambda [v]^2 dt = \int_0^{\Delta t} [v] \cdot [i] dt \quad (3.15)$$

Como a integração nos dois membros é sobre o mesmo intervalo, pode-se simplificar:

$$\lambda [v]^2 = [v] \cdot [i] = p \quad (3.16)$$

Conclui-se portanto que a decomposição continua válida instantaneamente desde que a potência varie proporcionalmente à norma quadrática instantânea das tensões. De (3.10) e (3.11) pode-se escrever que a condutância equivalente g_e representa o valor médio das condutâncias dos n circuitos envolvidos, ou seja:

$$g_e = \frac{\int_0^T (v_1 \cdot g_1 \cdot v_1 + v_2 \cdot g_2 \cdot v_2 + \dots + v_n \cdot g_n \cdot v_n) dt}{\int_0^T (v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2) dt} \quad (3.17)$$

ou,

$$g_e = \frac{\int_0^T (g_1 \cdot v_1^2 + g_2 \cdot v_2^2 + \dots + g_n \cdot v_n^2) dt}{\int_0^T (v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2) dt}. \quad (3.18)$$

Para g_e constante pode-se escrever (3.18) na forma seguinte:

$$\int_0^T (g_1 \cdot v_1^2 + g_2 \cdot v_2^2 + \dots + g_n \cdot v_n^2) dt = \int_0^T g_e \cdot (v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2) dt \quad (3.19)$$

resultando em:

$$g_e = \frac{g_1 \cdot v_1^2 + g_2 \cdot v_2^2 + \dots + g_n \cdot v_n^2}{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2} = cte. \quad (3.20)$$

A relação (3.20) mostra que a condutância equivalente é dada pela média das condutâncias, ponderadas pelas respectivas tensões quadráticas.

Da equação 3.14, a condutância equivalente pode então ser representada como:

$$g_e = \frac{v_1 \cdot i_1 + v_2 \cdot i_2 + \dots + v_n \cdot i_n}{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2} = \frac{[v] \cdot [i]}{[v] \cdot [v]} = \frac{p}{\| [v] \|^2} = cte \quad (3.21)$$

que é a razão entre o produto escalar de tensões e correntes instantâneas (potência n-dimensional instantânea) pela norma instantânea quadrática das tensões (referência). Notar que é a razão entre p e a norma quadrática da tensão que deve ser constante para garantir $\lambda = g_e = cte$.

Existem dois tipos de sistemas elétricos onde esta razão resulta em $g_e = cte$, ou seja:

- Circuitos polifásicos resistivos equilibrados ($g_1 = g_2 = \dots = g_n$), onde as tensões de alimentação podem ser quaisquer (inclusive desequilibradas ou não-senoidais). De 3.20 conclui-se que $g_e = g_i$, sendo $i = 1, 2, \dots, n$, para qualquer sinais de tensão;

- Circuitos polifásicos reativos equilibrados, onde as tensões de alimentação são puramente senoidais e equilibradas. Esse é o caso particular de interesse prático onde cada ramo do circuito pode ser representado por uma condutância e uma susceptância em paralelo, formando um circuito equilibrado. A condição senoidal neste caso é importante para garantir que as formas de onda da tensão e da corrente sejam mantidas sobre a susceptância b_i onde valem as relações de derivada:

$$v = L \frac{di}{dt}$$

$$i = C \frac{dv}{dt} \tag{3.22}$$

A figura 3.3 ilustra a decomposição para um sistema onde o circuito é resistivo equilibrado e as tensões são não-senoidais e desequilibradas 3.3(a), mostrando que se a potência e a norma quadrática oscilam instantaneamente da mesma forma, o valor de g_e é constante 3.3(b). Pelo tipo do circuito, as parcelas de corrente escalar correspondem a toda corrente original e são exatamente proporcionais à tensão 3.3(c). Neste caso, as parcelas ortogonais são todas nulas 3.3(d).

A figura 3.4 ilustra a decomposição para um sistema onde o circuito é reativo equilibrado e as tensões são senoidais equilibradas 3.4(a), mostrando que a decomposição separa as correntes originais em parcelas escalares e ortogonais. As figuras 3.4(c) e 3.4(d) indicam as parcelas escalares e ortogonais da corrente, respectivamente.

Neste caso onde $g_e = cte$, a decomposição mostra que para circuitos resistivos equilibrados, qualquer que seja a forma de onda das tensões (inclusive senoidais desequilibradas ou com harmônicas), é possível obter as parcelas escalares de corrente, as quais correspondem a corrente total do circuito e são exatamente proporcionais à tensão. Se o circuito for reativo equilibrado e as tensões forem senoidais equilibradas, a decomposição fornece as parcelas escalares e ortogonais da corrente, sendo que as parcelas $[i_{sc}]$ são exatamente em fase (proporcionais) com as tensões.

Ressalta-se portanto, que quando o valor da condutância equivalente g_e é constante, pode-se encontrar uma parcela de corrente que segue instantaneamente a forma de onda da tensão. Se a tensão for senoidal e equilibrada, essa parcela corresponde a parcela ideal de corrente.

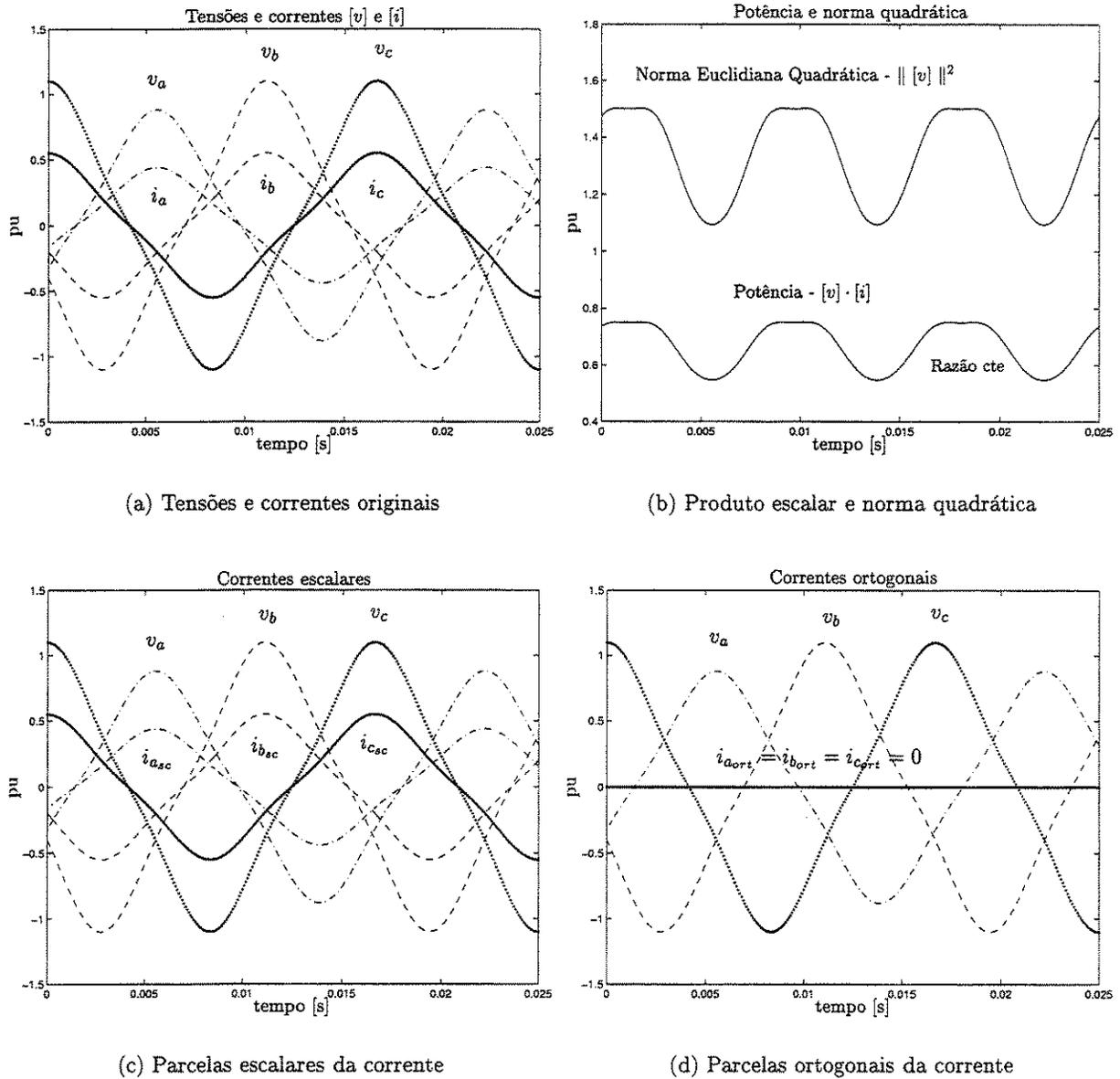
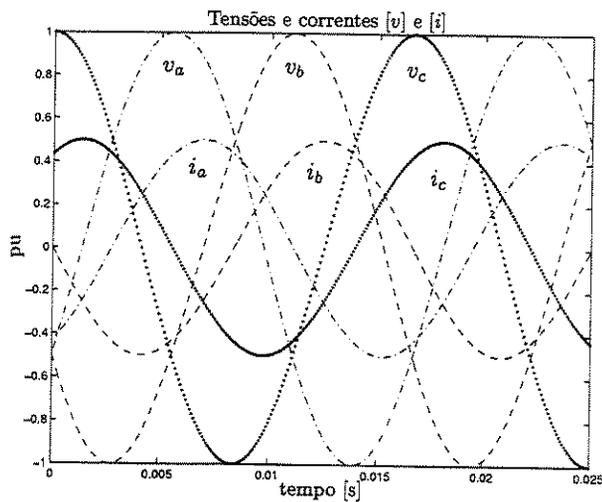
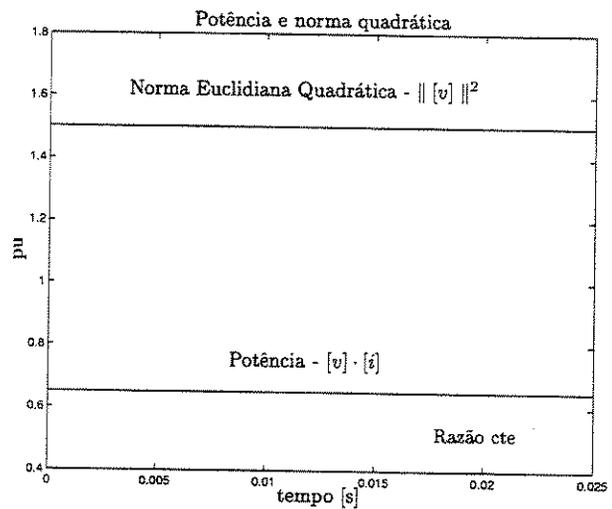


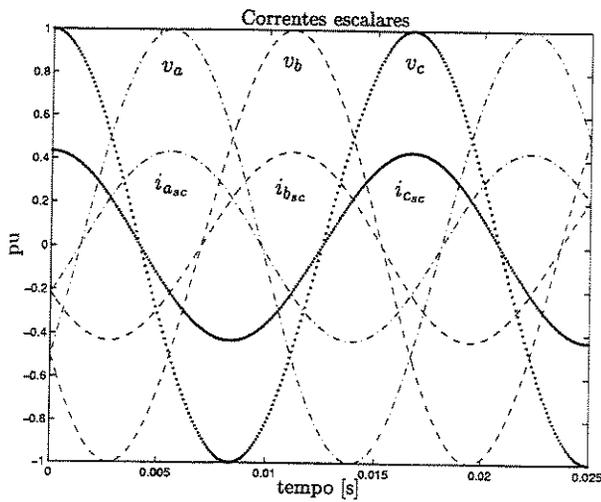
Figura 3.3: Decomposição para circuito resistivo equilibrado com tensões distorcidas desequilibradas



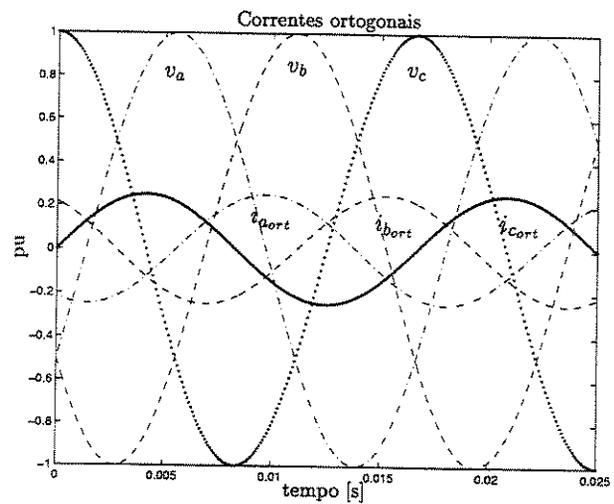
(a) Tensões e correntes originais



(b) Produto escalar e norma quadrática



(c) Parcelas escalares da corrente



(d) Parcelas ortogonais da corrente

Figura 3.4: Decomposição das correntes em parcelas escalares e ortogonais

Caso 02 - A condutância equivalente é variável ($g_e \neq cte$)

Existem diversos casos práticos onde a condutância equivalente resulta variável, dentre os quais pode-se destacar:

- circuitos reativos equilibrados, com tensões de alimentação desequilibradas;
- circuitos desequilibrados, com tensões de alimentação equilibradas;
- circuitos desequilibrados, com tensões de alimentação desequilibradas.

Notar que a presença de harmônicos provoca desequilíbrio das tensões.

Nestes casos tem-se:

$$g_e = \frac{\int_0^T (v_1 \cdot i_1 + v_2 \cdot i_2 + \dots + v_n \cdot i_n) dt}{\int_0^T (v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2) dt} = \frac{\int_0^T [v] \cdot [i] dt}{\int_0^T [v] \cdot [v] dt} = \frac{\int_0^T p dt}{\int_0^T \| [v] \|^2 dt} \neq cte \quad (3.23)$$

Ao contrário da hipótese anterior ($g_e = cte$), a corrente escalar instantânea obtida através da relação 3.23 deixa de ser proporcional à tensão. Isto significa que a potência ativa varia de forma não-proporcional à norma quadrática das tensões no tempo.

Como visto na seção anterior, para que a decomposição forneça parcelas escalares de corrente proporcionais à tensão, é necessário que $g_e = cte$. Sabendo que grande parte dos sistemas práticos não satisfazem esta condição, torna-se necessário encontrar o valor médio (constante) da condutância equivalente.

Neste caso pode-se utilizar a expansão por série de Taylor para dividir a condutância equivalente em parcelas média em um dado intervalo e oscilatória, de forma que:

$$g_e = \bar{g}_e + \Delta g_e = \lambda \quad (3.24)$$

A decomposição neste caso fornece:

$$[i_{sc}] = (\bar{g}_e + \Delta g_e) \cdot [v] = \bar{g}_e \cdot [v] + \Delta g_e \cdot [v] \triangleq [i_p] + [\Delta i_{sc}] \quad (3.25)$$

onde:

$$[i_p] = \bar{g}_e \cdot [v] = \frac{P}{V^2} \cdot [v] \quad (3.26)$$

que pode ser associada à parcela de corrente definida por (Fryze 1932). E

$$[\Delta i_{sc}] = \Delta g_e \cdot [v] \quad (3.27)$$

que é a parcela oscilatória da corrente escalar devido à variação da condutância equivalente.

Assim, a *corrente escalar instantânea* $[i_{sc}]$ é formada por duas parcelas diferentes, a primeira $[i_p]$ é proporcional à tensão e refere-se às condições simétricas do circuito (\bar{g}_e). A segunda $[\Delta i_{sc}]$ é não-proporcional e relaciona-se com os efeitos das assimetrias e não-linearidades envolvidas no sistema. Ressalta-se que o produto escalar desta última parcela pela tensão não é nulo, por serem vetores colineares.

Assim como em 3.6, a parcela denominada *corrente ortogonal instantânea* $[i_{ort}]$ é dada pela diferença entre a corrente instantânea total $[i]$ e a corrente escalar instantânea $[i_{sc}]$.

$$[i_{ort}] = [i] - [i_{sc}] \quad (3.28)$$

No caso de $g_e \neq cte$ é necessário portanto, separar a parte variável da média por período.

$$g_e = \bar{g}_e + \tilde{g}_e = \bar{g}_e + \Delta g_e \quad (3.29)$$

A obtenção de \bar{g}_e por período pode ser feita por meio da integral:

$$\bar{g}_e = \frac{1}{T} \int_0^T g_e \cdot dt \quad (3.30)$$

Para aplicações práticas, como por exemplo sistemas amostrados, a média pode ser calculada por meio de uma janela móvel temporal, contendo 1 período de "N" amostras. Ou seja:

$$\bar{g}_e = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N g_e(k) \quad (3.31)$$

Portanto, é possível aplicar a decomposição inclusive em sistemas onde $g_e \neq cte$.

3.3.1 Correntes ativa e não-ativa instantâneas

Uma vez associado o *Multiplicador de Lagrange à condutância equivalente* dos circuitos elétricos, resta associar as parcelas de corrente provenientes da decomposição (escalar e ortogonal) aos conceitos de corrente conhecidos e utilizados.

Em analogia às definições convencionais, a parcela de corrente escalar pode ser definida como a *corrente ativa instantânea*, enquanto a parcela de corrente ortogonal é definida como a *corrente não-ativa instantânea*. Ressaltando que, dependendo do tipo de circuito a ser analisado, a corrente ativa pode ter ou não a mesma forma de onda da tensão. Os dois casos anteriores auxiliam nestas definições.

Caso 01 - A condutância equivalente é constante ($g_e = cte$)

Para os dois tipos de sistemas analisados onde a condutância equivalente é constante, ou seja, circuito resistivo equilibrado com tensões quaisquer ou circuito reativo com tensões senoidais equilibradas, a relação 3.32 permite decompor a corrente total em parcelas ativa e não-ativa:

$$g_e = \lambda = \frac{v_1 \cdot i_1 + v_2 \cdot i_2 + \dots + v_n \cdot i_n}{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2} = \frac{[v] \cdot [i]}{[v] \cdot [v]} = \frac{p}{\| [v] \|^2} = cte \quad (3.32)$$

Assim a corrente total instantânea pode ser expressa como a soma de correntes ativas e não-ativas:

$$[i] = [i_a] + [i_{na}], \quad (3.33)$$

onde a *corrente ativa instantânea* corresponde às componentes escalares:

$$[i_a] = [i_{sc}] = g_e \cdot [v] = \frac{p}{\| [v] \|^2} \cdot [v] \quad (3.34)$$

e a *corrente não-ativa instantânea* corresponde às parcelas ortogonais resultantes:

$$[i_{na}] = [i] - [i_a] = [i] - \frac{p}{\| [v] \|^2} \cdot [v]. \quad (3.35)$$

Neste sistema, onde g_e assume um valor constante, a parcela de corrente $[i_a]$ é aquela responsável pela potência ativa instantânea do sistema multidimensional. A corrente $[i_{na}]$, por sua vez, é a parcela da corrente que não produz potência ativa, uma vez que seu produto escalar com a tensão é nulo a todo instante. O próximo capítulo trata especificamente das definições de potências envolvidas com tais parcelas de corrente.

Associando aos sistemas onde ($g_e = cte$): No caso do circuito resistivo equilibrado, notar que mesmo sendo as tensões distorcidas, se a potência ativa instantânea varia na mesma proporção que a norma quadrática, a corrente ativa corresponde a toda corrente do circuito e é proporcional à forma de onda da tensão, enquanto a corrente não-ativa é nula (vide figura 3.2). No caso do circuito reativo equilibrado com tensões senoidais equilibradas, a corrente instantânea total pode ser decomposta em parcelas de corrente ativa, a qual é proporcional (em fase) à tensão e corrente não-ativa, a qual é ortogonal à tensão (vide figura 3.3).

Caso 02 - A condutância equivalente é variável ($g_e = \bar{g}_e + \Delta g_e$)

Para os sistemas onde a condutância equivalente é variável (equação 3.22) a corrente ativa instantânea não é proporcional à tensão, uma vez que a potência ativa varia de forma não-proporcional à norma quadrática das tensões.

Buscando encontrar a parcela de corrente ativa que segue exatamente a forma de onda da tensão, utiliza-se a expansão por série de Taylor para identificar as parcelas média e oscilatória de g_e , pode-se então decompor a corrente ativa instantânea em:

$$[i_a] = [i_{sc}] = (\overline{g_e} + \Delta g_e) \cdot [v] = \overline{g_e} \cdot [v] + \Delta g_e \cdot [v] \quad (3.36)$$

$$[i_a] = [i_p] + [\Delta i_a] \quad (3.37)$$

onde:

$$[i_p] = \overline{g_e} \cdot [v] = \frac{P}{V^2} \cdot [v] \quad (3.38)$$

é a parcela de corrente ativa proporcional à tensão e pode ser associada à parcela de corrente definida por Fryze (1932). E

$$[\Delta i_a] = \Delta g_e \cdot [v] \quad (3.39)$$

é a parcela oscilatória da corrente ativa devido à variação da condutância equivalente.

Assim, a *corrente ativa instantânea* $[i_a]$ é formada por $[i_p]$ que é proporcional à tensão e relaciona-se com $\overline{g_e}$, e $[\Delta i_a]$ que é não-proporcional e relaciona-se com os efeitos das assimetrias e não-linearidades envolvidas no circuito.

A parcela denominada *corrente não-ativa instantânea* $[i_{na}]$ é dada pela diferença entre a corrente instantânea total $[i]$ e a corrente ativa instantânea $[i_a]$. Tal corrente não participa do fluxo de potência entre fonte e carga, uma vez que é ortogonal à tensão.

$$[i_{na}] = [i] - [i_a] \quad (3.40)$$

Em analogia com (3.37), é possível decompor a parcela $[i_{na}]$ na forma:

$$[i_{na}] = [i_{ort}] + [\Delta i_{na}] \quad (3.41)$$

onde $[i_{ort}]$ é a parcela de corrente não-ativa ortogonal à tensão. E a parcela modulante $[\Delta i_{na}]$ é a parcela de corrente não-ativa oscilatória, relativa à assimetria do circuito. O produto escalar destas duas parcelas pela tensão é nulo a todo instante.

Uma vez que a corrente não-ativa instantânea $[i_{na}]$, assim como a parcela variável da corrente ativa instantânea $[\Delta i_a]$, são originadas por condições indesejadas ou mesmo prejudiciais aos sistemas elétricos,

pode-se agrupá-las em uma parcela de corrente denominada *corrente não-proporcional instantânea* $[i_{np}]$, a qual pode ou deve ser eliminada para que o sistema formado pelas fontes geradoras e cargas opere em condições de mínimas perdas de energia, ou seja, eliminando-se tais parcelas indesejadas de corrente, reduz-se a corrente total que circula pelos sistemas elétricos, reduzindo as perdas por condução (perdas *Joule*).

$$[i_{np}] = [i_{na}] + [\Delta i_a] = [i] - [i_p] \quad (3.42)$$

Esta corrente $[i_{np}]$ está intimamente relacionada com cargas reativas, assimetrias de fase ou amplitude, não-linearidades, etc. Por isso a necessidade de minimizá-la para que o sistema opere maximizando a conservação de energia.

Resumindo os dois casos analisados, tem-se as seguintes parcelas de corrente:

- Caso 01 $\Rightarrow g_e = cte$:

$$[i_a] = [i_{sc}] = \lambda \cdot [v] = g_e \cdot [v] \quad (3.43)$$

que é *corrente ativa instantânea*;

$$[i_{na}] = [i] - [i_a] \quad (3.44)$$

que é *corrente não-ativa instantânea*¹

- Caso 02 $\Rightarrow g_e \neq cte$:

$$[i_a] = [i_{sc}] = (\overline{g_e} + \Delta g_e) \cdot [v] = [i_p] + [\Delta i_a] \quad (3.45)$$

sendo:

$$[i_p] = \overline{g_e} \cdot [v] = \frac{P}{V^2} \cdot [v] \quad (3.46)$$

a *corrente proporcional instantânea*, e

¹Se neste caso o circuito em estudo for puramente resistivo e equilibrado, $[i_{na}] = 0$.

$$[i_{np}] = [i] - [i_p] = [i] - \frac{P}{\sqrt{2}} \cdot [v] = [i_{na}] + [\Delta i_a] \quad (3.47)$$

a corrente não-proporcional instantânea.

Ressaltando que $[i_p]$ é a parcela de *corrente ativa instantânea proporcional* à tensão, independentemente da forma de onda desta. Por outro lado, $[i_{np}]$ contém uma parcela ortogonal à tensão e outra relativa às variações da corrente ativa instantânea.

A figura 3.5 representa o algoritmo de decomposição da corrente elétrica, baseado no método do multiplicador de Lagrange. Este pode ser aplicado para valores constantes ou não de g_e , desde que sejam feitas as devidas considerações.

As definições das componentes de corrente apresentadas buscam compatibilizar as definições que vêm sendo utilizadas por diversos autores (Willems 1992, Rosseto e Tenti 1994a, Depenbrock e Staudt 1998a, Depenbrock e van Wyk 1994, Czarnecki 1990, Nabae e Tanaka 1996, Furuhashi *et al.* 1990) dentre outros, no entanto foi necessário a introdução de uma nomenclatura baseada nos principais conceitos matemáticos, para que o significado das componentes fosse mais didático.

No Capítulo 5 estão apresentados alguns resultados experimentais que comprovam a validade da aplicação do método exposto.

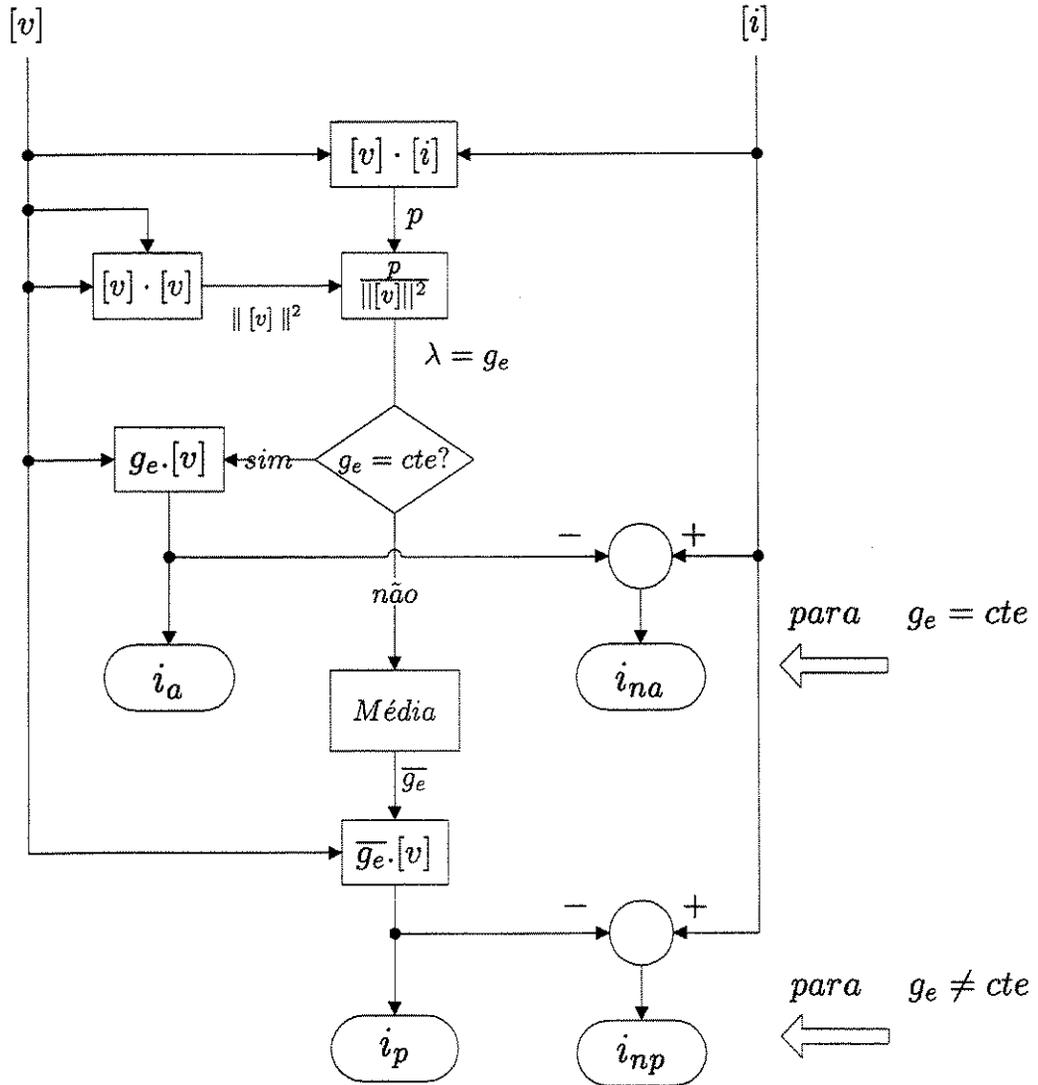


Figura 3.5: Esquema de decomposição das correntes

3.4 Aplicação conjunta das duas decomposições aos sinais de tensão e corrente

Na seções anteriores pode-se observar que é possível decompor a corrente instantânea total em parcelas ativa e não-ativa, sendo ainda que a corrente ativa pode seguir ou não a forma de onda da tensão. Neste caso a corrente ativa pode ser separada em parcela proporcional à tensão e parcela oscilatória, através do cálculo da condutância equivalente média.

Como citado no Capítulo 01, um sistema elétrico ideal baseia-se em formas de onda senoidais, portanto não basta calcular a parcela de corrente que segue a forma de onda da tensão, pois estas podem estar distorcidas e neste caso os sinais calculados ainda estão distantes das condições ótimas de operação dos sistemas elétricos. No sentido de solucionar este problema, pode-se aplicar as duas decomposições apresentadas nas seções 3.2 (fundamental/resíduo) e 3.3 (ativa/não-ativa), de forma que resultem tensões e correntes do tipo:

$$[v] = [v_1] + [v_{res}] \quad (3.48)$$

$$[i] = [i_1] + [i_{res}] = [i_a] + [i_{na}] \quad (3.49)$$

que pode ser desenvolvido e reagrupado como:

$$[i] = ([i_{a1}] + [i_{ares}]) + ([i_{na1}] + [i_{nares}]) \quad (3.50)$$

Em se tratando da equação 3.48, percebe-se que a parcela $[v_{res}]$ é responsável pela distorção da onda da tensão, e $[v_1]$ por hipótese é simétrica.

As correntes ativas e não-ativas podem ser de frequência fundamental ou conter resíduos, dependendo da tensão de referência e de não-linearidades do circuito. Com excessão da parcela de corrente ativa fundamental $[i_{a1}]$, as outras três poderiam ser associadas diretamente à deterioração da corrente total.

Para validar a união das duas decomposições desenvolvidas, será apresentado a seguir um caso genérico, onde a condutância equivalente é variável e a tensão de alimentação é distorcida.

Caso 03 - Sistema com condutância equivalente variável ($g_e = \bar{g}_e + \Delta g_e$) e tensão não-senoidal

Se a tensão de alimentação é distorcida (não-senoidal), esta pode ser expressa pela equação 3.48. A corrente nesta situação é dada pela expressão 3.50 e pode ser dividida instantaneamente em parcelas ativa fundamental $[i_{a1}]$, ativa residual $[i_{ares}]$, não-ativa fundamental $[i_{na1}]$ e não-ativa residual $[i_{nares}]$.

Além disso, se a condutância equivalente do circuito for variável (assimetrias e/ou não-linearidades), as correntes ativa e não-ativa também podem ser decompostas em parcelas proporcional, ortogonal e oscilatórias (3.37 e 3.39), ou seja:

$$[i_a] = [i_{a_1}] + [i_{a_{res}}] = [i_p] + [\Delta i_a] \quad (3.51)$$

Desenvolvendo e reagrupando esta equação, tem-se:

$$[i_a] = [i_{p_1}] + [i_{p_{res}}] + [\Delta i_{a_1}] + [\Delta i_{a_{res}}] \quad (3.52)$$

Isto significa que a corrente ativa instantânea é composta por várias parcelas de corrente: a corrente fundamental $[i_{p_1}]$, proporcional à tensão fundamental equilibrada; a corrente residual $[i_{p_{res}}]$, proporcional à tensão residual; a corrente oscilatória fundamental $[\Delta i_{a_1}]$, devido a assimetrias do circuito e uma última parcela de corrente oscilatória residual $[\Delta i_{a_{res}}]$, devido a não-linearidades do circuito e distorções da tensão.

Portanto, em um sistema polifásico podem existir assimetrias as quais influenciam diretamente no surgimento das oscilações nas correntes ativas instantâneas de cada fase. E mais, tais variações não se restringem às ondas fundamentais, mas também aos sinais residuais, quando estes estiverem presentes. As componentes harmônicas de cada fase podem formar sistemas simétricos ou não entre si. O que significa que podem existir componentes de seqüência (+,-,0) tanto para as ondas fundamentais, quanto para os sinais residuais provenientes de freqüências harmônicas. Daí a necessidade de se desenvolver um método de decomposição das componentes de seqüência no domínio do tempo, como citado no Apêndice 1.

Em relação às parcelas de corrente não-ativa instantâneas, estas por imposição são ortogonais às tensões do sistema e também são compostas por parcelas fundamental e residual, as quais são ortogonais às tensões fundamental e residual, respectivamente. Ou seja:

$$[i_{na}] = [i_{na_1}] + [i_{na_{res}}] = [i_{ort}] + [\Delta i_{na}] \quad (3.53)$$

Assim como feito para 3.52, tem-se:

$$[i_{na}] = [i_{ort_1}] + [i_{ort_{res}}] + [\Delta i_{na_1}] + [\Delta i_{na_{res}}] \quad (3.54)$$

O interesse em desmembrar a corrente total em todas estas parcelas vem da necessidade de se encontrar as diferentes origens de cada uma, para fins de avaliação da qualidade de energia ou mesmo para atribuição de responsabilidades a seus causadores. No entanto, destas parcelas todas, a única realmente de interesse ao sistema elétrico é a corrente ativa fundamental instantânea $[i_{p_1}]$, escalar (proporcional) à tensão fundamental, uma vez que é a corrente que representa as condições ideais de fornecimento e

consumo em situações adversas. Assim como na seção 3.3.1 (caso 02), todas as parcelas indesejadas de corrente podem ser agrupadas em uma única, a qual representa a deterioração da corrente instantânea total:

$$[i_{np}] = \underbrace{[i_{pres}] + [\Delta i_{a1}] + [\Delta i_{ares}]}_{ativas} + \underbrace{[i_{ort1}] + [i_{ortres}] + [\Delta i_{na1}] + [\Delta i_{nares}]}_{n\tilde{a}o-ativas} \quad (3.55)$$

É fácil perceber que tanto as parcelas de corrente não-ativas instantâneas, como as oscilações da corrente ativa instantânea, de frequência fundamental ou residual, são indesejadas na instalação elétrica. Todavia, uma das grandes vantagens da associação das decomposições apresentadas está voltada para a identificação da parcela de corrente proporcional residual instantânea $[i_{pres}]$, a qual se origina quando a rede possui tensão de alimentação distorcida e contribui somente para o acréscimo de perdas e oscilações nos sistemas de geração de energia, dado que possui uma ou mais frequências diferentes da nominal e com isso impõe às máquinas de geração, que forneçam energia nestas frequências.

Para este caso genérico destacam-se as seguintes parcelas de correntes instantâneas:

$$[i_{p1}] = \bar{g}_e \cdot [v_1] \quad (3.56)$$

que é definida como *corrente ativa proporcional fundamental*, a qual possui forma de onda senoidal e está relacionada com correntes fundamentais simétricas, ou seja componentes de seqüência positiva fundamentais. Neste ponto é fundamental observar que para que a corrente $[i_{p1}]$ seja proporcional apenas às tensões fundamentais, o cálculo da condutância equivalente e de sua média \bar{g}_e devem ser efetuados utilizando as tensões fundamentais na equação 3.22, assim como indicado no diagrama da figura 3.6. Do contrário, se existirem tensões e correntes residuais de mesma frequência, estas podem produzir um acréscimo ou decréscimo no valor de \bar{g}_e , alterando assim a corrente $[i_{p1}]$.

Por sua vez,

$$\begin{aligned} [i_{np}] &= [i] - [i_{p1}] \\ &= ([i_{pres}] + [\Delta i_{a1}] + [\Delta i_{ares}]) + ([i_{ort1}] + [i_{ortres}] + [\Delta i_{na1}] + [\Delta i_{nares}]) \end{aligned} \quad (3.57)$$

é definida como *corrente não-proporcional à tensão fundamental*, a qual pode assumir qualquer forma de onda, pois é composta de todas as parcelas que não são escalares às tensões fundamentais.

As parcelas de corrente que compõem $[i_{np}]$ podem ser interpretadas como:

$$[i_{pres}] = \bar{g}_e \cdot [v_{res}] \quad (3.58)$$

é a *corrente ativa proporcional residual*. Seu surgimento relaciona-se à existência de tensões residuais (simétricas ou não) entre as fases do sistema, o que significa que podem existir componentes de seqüência positiva em frequências distintas da fundamental;

$$[\Delta i_{a_1}] = \Delta g_e \cdot [v_1] \quad (3.59)$$

é a *corrente ativa oscilatória fundamental*, a qual relaciona-se com desequilíbrios dos parâmetros do circuito, resultando em componentes de seqüência negativa e zero das correntes fundamentais;

$$[\Delta i_{a_{res}}] = \Delta g_e \cdot [v_{res}] \quad (3.60)$$

é a *corrente ativa oscilatória residual*, a qual se origina também pela presença de assimetrias, devido aos efeitos das várias freqüências sobre os parâmetros assimétricos;

Para a corrente não-ativa instantânea (i_{na}), formada pelas parcelas descritas em (3.54), as seguintes interpretações podem ser feitas:

$$[i_{ort_1}] \quad (3.61)$$

é a *corrente não-ativa ortogonal fundamental*. Tal parcela pode ser associada com o conceito convencional de corrente reativa senoidal (i_r) ou (i_q), a qual pode estar em avanço ou atraso de fase com relação à tensão fundamental, dependendo do tipo de carga envolvida (indutiva ou capacitiva). Assim como $[i_{p_1}]$, esta também associa-se com componentes de seqüência positiva da corrente fundamental;

$$[i_{ort_{res}}] \quad (3.62)$$

é a *corrente não-ativa ortogonal residual*, a qual refere-se a sinais de corrente ortogonais ao resíduo de tensão;

$$[\Delta i_{na_1}] \quad (3.63)$$

é a *corrente não-ativa oscilatória fundamental*, assim como $[\Delta i_{a_1}]$ relaciona-se com desequilíbrios do circuito, ou seja componentes de seqüência negativa e zero fundamentais;

$$[\Delta i_{na_{res}}] \quad (3.64)$$

é a *corrente não-ativa oscilatória residual*, corresponde à parcela de corrente oscilatória ortogonal à tensão residual.

A definição analítica das parcelas de (3.61-3.64) é importante para a compreensão dos fenômenos físicos envolvidos com cada uma, ressaltando que todas estas parcelas são indesejáveis ao sistema e deveriam ser eliminadas.

Em analogia com outras definições usadas na literatura, todas as parcelas residuais de corrente poderiam ser agrupadas em uma única, definida como *corrente harmônica ou distorciva* $[i_h]$, a qual representaria a contribuição dos componentes harmônicos e inter-harmônicos nos sinais:

$$[i_h] = [i_{pres}] + [\Delta i_{ares}] + [i_{ortres}] + [\Delta i_{nares}] \quad (3.65)$$

Por outra ótica, as parcelas oscilatórias poderiam ser agrupadas em uma componente definida como *corrente de desbalanço* $[i_d]$, a qual representaria a assimetria dos sistemas polifásicos envolvidos, sejam de frequência fundamental ou não:

$$[i_d] = [\Delta i_{a1}] + [\Delta i_{ares}] + [\Delta i_{na1}] + [\Delta i_{nares}] \quad (3.66)$$

Das equações (3.65-3.66) pode-se notar que existem duas parcelas comuns $[\Delta i_{ares}]$ e $[\Delta i_{nares}]$ às correntes harmônicas e de desbalanço, o que explica a grande dificuldade em identificar a exata contribuição de cada parcela no contexto de oscilações em sistemas onde os parâmetros são variantes e a tensão de alimentação é distorcida. Outros autores também trazem este tipo de abordagem (Willems e Aeyels 1993, Willems 1993, Czarnecki 1990), no entanto, a forma como está apresentada neste trabalho, permite uma compreensão bastante didática de como as grandezas elétricas evoluem e quais as inter-relações no domínio do tempo.

No aspecto de conservação de energia, as parcelas de tensão residual $[v_{res}]$ e a parcela da corrente não-proporcional instantânea $[i_{np}]$ podem ser utilizadas como referências para os dispositivos de compensação, filtragem ou mesmo para fins de atribuição de responsabilidades às eventuais fontes causadoras de tais distúrbios.

A figura 3.6 representa um diagrama de decomposição das correntes no caso onde as tensões não são senoidais e a condutância equivalente é variável.

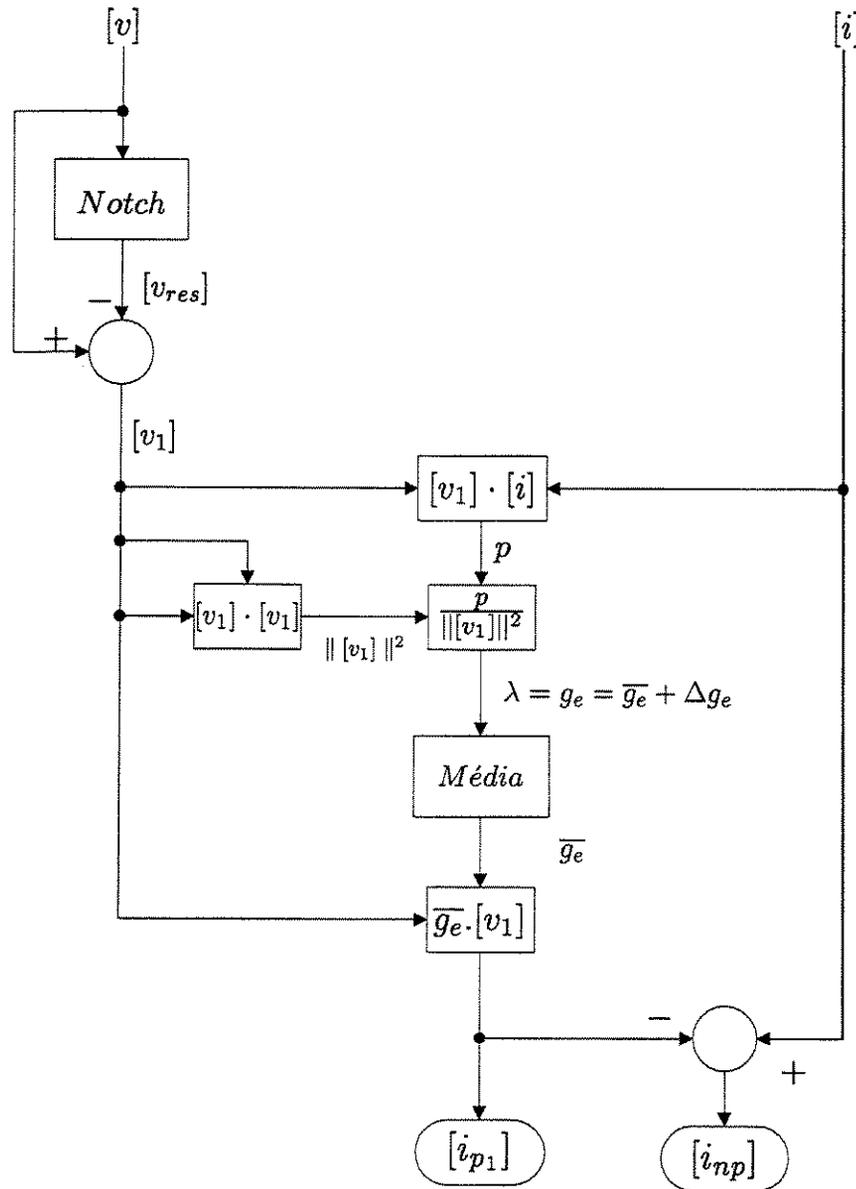


Figura 3.6: Esquema de decomposição das correntes para sinais não-senoidais

3.5 Conclusão

O objetivo é encontrar uma metodologia capaz de separar e identificar condições elétricas ideais de operação. A aplicação simultânea das duas decomposições expostas, constitui de forma simples um método capaz de identificar no domínio do tempo, cada parcela perturbadora dos sinais de tensão e corrente presentes em um determinado circuito elétrico. Isso torna possível a avaliação da qualidade das grandezas envolvidas.

Em relação à implementação, a decomposição da corrente em parcela ativa e não-ativa não apresenta problemas, uma vez que em qualquer sistema de aquisição de sinais podem ser inseridos algoritmos que efetuam as operações necessárias. Para a separação em fundamental e resíduo, sugere-se um filtro rejeita-faixa ou *notch*. Estas decomposições podem ser realizadas tanto em nível analógico quanto digital. Lembrando que este último resulta em menos problemas de ressonância com componentes *RLC*.

As limitações tecnológicas para aplicação das decomposições ficam por conta de transitórios de curta duração, os quais são atenuados até mesmo pelos algoritmos digitais, devido a limitações da faixa de passagem usada para amostragem.

No próximo capítulo está descrito um método que permite calcular as diferentes componentes instantâneas de potência, cada qual relacionada com o tipo de sinal de tensão ou corrente encontrado, combinando as duas decomposições anteriores e associando-as aos respectivos fenômenos físicos existentes.

Capítulo 4

Definições de Potência Instantânea sob Condições Não-Ideais

4.1 Introdução

Ao longo dos anos foram desenvolvidos diferentes métodos para avaliar e classificar a potência elétrica sob condições não-ideais. Tais desenvolvimentos foram realizados basicamente no domínio da frequência (Budeanu 1927, Czarnecki 1990, Emanuel 1998) ou no domínio do tempo (Fryze 1932, Akagi *et al.* 1983, Willems 1992, Rosseto e Tenti 1994a, Watanabe *et al.* 1993) e, sobretudo nos últimos anos, com os trabalhos envolvendo a teoria de “*Wavelets*”, método que praticamente faz fronteira entre os domínios do tempo e da frequência, vem sendo possível inclusive o diagnóstico de tais grandezas sob condições transitórias nos sistemas analisados (Galli *et al.* 1996).

Entretanto, ainda não existe uma convergência de opiniões sobre como o sistema elétrico deva ser analisado em condições não-ideais. Tanto as definições conhecidas no domínio do tempo, quanto no domínio da frequência, estão normalmente relacionadas com limitações nas aplicações.

Combinando as duas decomposições temporais expostas no capítulo anterior (ativa/não-ativa e fundamental/resíduo), este trabalho apresenta definições de componentes de potências instantâneas, as quais podem ser associadas diretamente com os fenômenos físicos que as originam e possuem um grau de liberdade de aplicação bastante amplo.

A idéia é apresentar parcelas que representam um sistema ideal de suprimento e consumo de energia e parcelas provenientes da deterioração dos sinais de tensão e/ou corrente, indesejáveis do ponto de vista de qualidade de energia elétrica.

4.2 Componentes de potência instantânea

Como no capítulo anterior, para decomposição em potências instantâneas, a tensão e corrente serão utilizadas em sua forma multidimensional (sistema n-fásico):

$$[v] = (v_1 \quad v_2 \quad \dots \quad v_n)$$

$$[i] = (i_1 \quad i_2 \quad \dots \quad i_n)$$

Assim como foi feito para a corrente elétrica (seção 3.3.1), pode-se decompor a potência em parcelas ortogonais no domínio do tempo, a partir da associação com a tensão. Para isto utiliza-se a função de decomposição ortogonal das correntes ($\lambda = g_e$) e de conceitos de produto escalar, produto vetorial e ortogonalidade de vetores.

Uma vez calculadas as parcelas de corrente escalares $[i_{sc}]$ ou ativas $[i_a]$ e ortogonais $[i_{ort}]$ ou não-ativas $[i_{na}]$, através do Método de Lagrange, tem-se:

$$[i] = [i_{sc}] + [i_{ort}] = [i_a] + [i_{na}]$$

Buscando encontrar uma forma de relacionar cada parcela de corrente com a tensão, de maneira que resultem parcelas de potência com significado distinto, utilizam-se os dois tipos de produtos de vetores citados.

Produto escalar

O *produto escalar* de $[v]$ por $[i]$ é utilizado por se tratar da operação matemática que explicita o valor do produto das parcelas colineares ($[v] \cdot [i_{sc}]$):

$$[v] \cdot [i] = [v] \cdot [i_{sc}] + [v] \cdot [i_{ort}] = [v] \cdot [i_{sc}] = [v] \cdot [i_a], \quad (4.1)$$

ou seja, se o produto escalar entre tensão e corrente é calculado, as parcelas devidas às correntes ortogonais se anulam, não contribuindo para o valor final. Por outro lado, as parcelas colineares contribuem para o valor do produto escalar. O resultado dessa operação é uma função temporal.

A parcela do produto de tensão por correntes escalares constitui a potência ativa instantânea e a parcela proveniente das correntes ortogonais constitui a potência não-ativa instantânea.

Produto vetorial

Uma vez que o produto escalar de $[v]$ por $[i_{ort}]$ se anula a todo instante, é necessário definir uma operação que permita quantificar a magnitude da potência relacionada a tal parcela de corrente. Para isto utiliza-se a operação de *produto vetorial*.

Por ser a corrente decomposta em parcelas escalares e ortogonais, o produto vetorial

$$[v] \times [i] = [v] \times [i_{sc}] + [v] \times [i_{ort}] = [v] \times [i_{ort}] = [v] \times [i_{na}] \quad (4.2)$$

explicita as parcelas ortogonais, ou seja, as correntes colineares não contribuem para este produto. O resultado dessa operação é um vetor com “n” funções temporais.

O vetor resultante deste produto vetorial, será definido como potência imaginária instantânea, apresentada por Akagi *et al.* (1983) e também utilizada neste trabalho. A direção e o sentido deste vetor serão discutidos na próxima seção.

Desta forma fica justificado o uso das operações de produtos escalar e vetorial no cálculo de potências, aplicado diretamente às grandezas instantâneas, sem a necessidade de transformações do tipo $(\alpha, \beta, 0$ ou $d, q, 0)$. Como visto no Capítulo 2, a decomposição em escalar e ortogonal independe do número de variáveis das funções (fases do sistema) e da forma de onda das mesmas, o que torna possível a identificação das componentes de potência instantânea do sistema. A decomposição em fundamental e resíduo auxilia este trabalho de maneira a identificar as parcelas de potência que contribuem para a média e as que produzem oscilações.

4.2.1 Potências ativa, não-ativa e imaginária

Utilizando as definições de correntes ativas e não-ativas instantâneas definidas no Capítulo 03, aliadas com as operações de produto entre vetores acima definidos, apresentam-se a seguir o desenvolvimento necessário para o cálculo das componentes de potência instantânea para os casos onde a condutância equivalente é constante ou variável.

Caso 01 - Sistemas com condutância equivalente constante ($g_e = cte$)

Como discutido no capítulo anterior, nos dois tipos de circuitos onde a condutância equivalente possui valor constante a parcela de corrente ativa possui a mesma forma de onda da tensão, enquanto a corrente não-ativa, quando não for nula, é dada pela diferença entre a corrente total e a ativa (vide equações 3.33-3.35). Neste caso, o cálculo das potências instantâneas se dá como a seguir:

I. Potências ativas e não-ativas - Produto escalar

O produto escalar entre tensões e correntes instantâneas dado por:

$$p = [v] \cdot [i] = v_1 \cdot i_1 + v_2 \cdot i_2 + \dots + v_n \cdot i_n, \quad (4.3)$$

constitui a *potência polifásica instantânea* do sistema.

Pela decomposição da corrente, pode-se reescrever este produto como:

$$p = [v] \cdot [i_a] + [v] \cdot [i_{na}] = p_a + p_{na} \quad (4.4)$$

Devido à ortogonalidade entre $[v]$ e $[i_{na}]$ resulta:

$$p_{na} = [v] \cdot [i_{na}] = v_1 \cdot i_{na1} + v_2 \cdot i_{na2} + \dots + v_n \cdot i_{nan} = 0 \quad (4.5)$$

e portanto:

$$p = p_a = [v] \cdot [i_a] = v_1 \cdot i_{a1} + v_2 \cdot i_{a2} + \dots + v_n \cdot i_{an}, \quad (4.6)$$

é definida como *potência ativa instantânea*.

Isto mostra que apenas a parcela de corrente ativa ou escalar contribui para a *potência ativa instantânea* de um sistema polifásico. No entanto, mesmo sendo p_{na} nulo a todo instante neste sistema, isto não significa que nas “n” fases distintas, não possa existir esta parcela de potência.

Ou seja, a parcela de corrente i_{na} pode produzir componentes instantâneas de potência, distintas em cada fase, onde a interação produz valor nulo a todo instante. Estas componentes de potência são denominadas de *potências não-ativas instantâneas*. Tal definição coincide com as *potências reativas instantâneas* definidas por Willems (1992), Akagi e Nabae (1993), Aredes (1996), Peng e Lai (1996) e Nabae e Tanaka (1996), as quais circulam entre as fases do sistema e poderiam ser eliminadas por dispositivos de compensação sem elementos armazenadores de energia. Neste trabalho reservamos o termo *reativo* para expressar a potência armazenada por capacitores e indutores à frequência fundamental (como na teoria convencional).

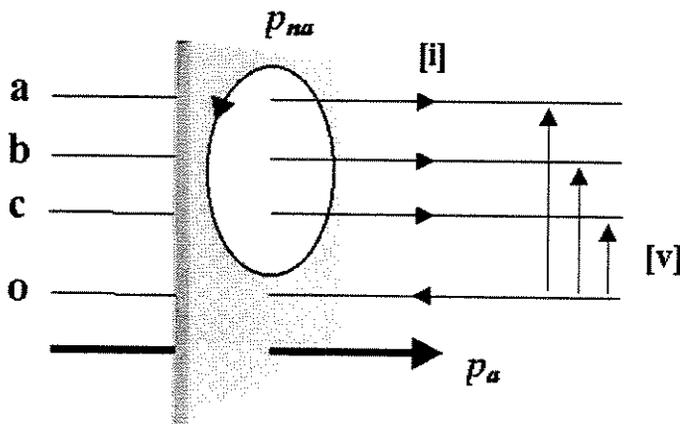


Figura 4.1: Fluxo de potência ativa e não-ativa no sistema

A figura 4.1 indica que enquanto o fluxo de *potência ativa instantânea* ocorre ao longo do sistema (fontes e cargas), as componentes de *potência não-ativa instantânea* correspondem a trocas entre as fases do sistema, sem transferência efetiva de energia para a carga.

II. Potência imaginária - Produto vetorial

O produto vetorial da tensão pela corrente, por sua vez resulta no vetor instantâneo:

$$[q] = [v] \times [i] \quad (4.7)$$

que é definido como a *potência imaginária instantânea* do sistema de forma similar à definição de Akagi *et al.* (1983).

O termo “*imaginário*” vem da analogia com o plano complexo, onde $[q]$ possui a direção ortogonal em relação aos vetores de tensão e corrente. O cálculo de $[q]$ é uma maneira de se poder encontrar a contribuição, em magnitude, das correntes não-ativas em termos de potência polifásica, uma vez que p_{na} não traz esta informação, por ser nulo (4.5).

Por definição, o vetor instantâneo $[q]$ possui direção ortogonal à superfície formada pelos vetores $[v]$ e $[i]$. Entretanto, o sentido depende da condição de avanço ou atraso da corrente em relação à tensão.

Para coincidir com a convenção de que correntes atrasadas (indutivas) em relação à tensão, produzem potência reativa (imaginária) positiva, utiliza-se da *regra da mão direita* para definir o sentido de rotação dos vetores $[v]$ e $[i]$, a direção e o sentido do vetor $[q]$.

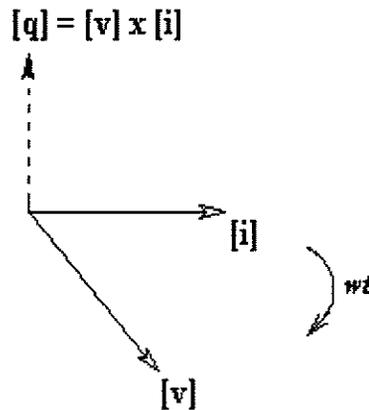


Figura 4.2: Orientação dos vetores do produto vetorial

Na seqüência, o vetor $[q]$ também pode ser reescrito como:

$$[q] = [v] \times [i_a] + [v] \times [i_{na}] \quad (4.8)$$

resultando em

$$[q] = [v] \times [i_{na}] = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix}, \quad (4.9)$$

pois devido à co-linearidade entre $[v]$ e $[i_a]$, resulta:

$$[v] \times [i_a] = 0. \quad (4.10)$$

Para melhor quantificar a *potência imaginária instantânea*, pode-se calcular a sua *magnitude* ou *norma* como:

$$\| [q] \| = \| [v] \times [i] \| = \| [v] \times [i_a] + [v] \times [i_{na}] \|, \quad (4.11)$$

ou seja,

$$\| [q] \| = \| [v] \times [i_{na}] \| = \| [v] \| \cdot \| [i_{na}] \|. \quad (4.12)$$

Com isso, a expressão anterior pode ser expressa por:

$$\begin{aligned} \| [q] \| &= \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2} \cdot \sqrt{i_{na_1}^2 + i_{na_2}^2 + \dots + i_{na_n}^2} \\ &= \sqrt{(v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2) \cdot (i_{na_1}^2 + i_{na_2}^2 + \dots + i_{na_n}^2)} \end{aligned} \quad (4.13)$$

ou

$$\| [q] \| = \sqrt{q_1^2 + q_2^2 + \dots + q_n^2}, \quad (4.14)$$

onde

$$q_i^2 = v_i^2 \cdot (i_{na_1}^2 + \dots + i_{na_n}^2) \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (4.15)$$

mostra que a potência imaginária corresponde à interação de cada fase com as demais, relacionando-se com as parcelas de potência não-ativas instantâneas.

A partir da equação (3.9)

$$\| [i] \|^2 = \| [i_a] \|^2 + \| [i_{na}] \|^2,$$

é possível desenvolver (4.6 e 4.12) obtendo:

$$\| [v] \|^2 \cdot \| [i_a] \|^2 = (\| [v] \| \cdot \| [i_a] \|)^2 = ([v] \cdot [i_a])^2 = p^2 \quad (4.16)$$

e

$$\| [v] \|^2 \cdot \| [i_{na}] \|^2 = (\| [v] \| \cdot \| [i_{na}] \|)^2 = \| [v] \times [i_{na}] \|^2 = \| q \|^2. \quad (4.17)$$

Da soma das duas potências ortogonais p e $\| [q] \|$ resulta:

$$\begin{aligned} \| [v] \|^2 \cdot \| [i_a] \|^2 + \| [v] \|^2 \cdot \| [i_{na}] \|^2 &= \| [v] \|^2 \cdot (\| [i_a] \|^2 + \| [i_{na}] \|^2) \\ &= (\| [v] \| \cdot \| [i] \|^2) = s^2 \end{aligned} \quad (4.18)$$

ou seja:

$$s^2 = p^2 + \| [q] \|^2, \quad (4.19)$$

que é definida como *potência aparente instantânea* (s) e assim como a potência aparente convencional (S), representa a hipotenusa do triângulo retângulo formado por p^2 e $\| [q] \|^2$.

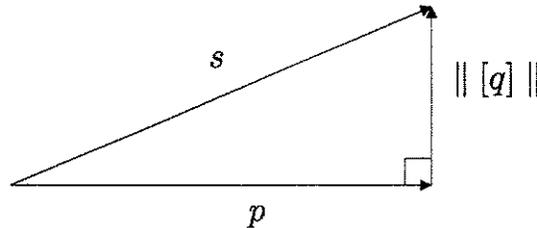


Figura 4.3: Triângulo de potências instantâneas

A figura 4.3 é definida como *triângulo de potências instantânea*, uma vez que p e $\| [q] \|$ podem variar a todo instante, porém mantendo a ortogonalidade.

Portanto no caso de circuitos simétricos, pode-se definir uma teoria de potências no domínio do tempo, para quaisquer que sejam os sinais de tensão e corrente envolvidos, que concorda com o conceito convencional de ortogonalidade entre potências ativa (P) e reativa (Q) para sinais senoidais e com o conceito de potência aparente (S).

Em relação às unidades elétricas das potências ativa, imaginária e aparente, sugere-se adotar a nomenclatura sugerida em Akagi *et al.* (1983), onde p tem unidade em *Watts* [W], s em Volt-Ampere [VA] e q em Volt-Ampere-Imaginário [VAI].

Caso 02 - Sistemas com condutância equivalente variável ($g_e = \bar{g}_e + \Delta g_e$)

Como já apresentado no Capítulo 3, se a condutância equivalente do sistema não é constante ($g_e \neq cte$) é necessário separar a parte média por período, da parte variável da condutância equivalente, para encontrar a parcela de corrente que segue (proporcional) a forma de onda da tensão. Ou seja:

$$g_e = \bar{g}_e + \Delta g_e,$$

o que resulta nas seguintes parcelas de corrente pela decomposição vista nas equações 3.23, 3.29 e 3.33:

$$[i] = [i_a] + [i_{na}],$$

onde

$$[i_a] = [i_{sc}] = [i_p] + [\Delta i_a]$$

e

$$[i_{na}] = [i_{ort}] + [\Delta i_{na}].$$

Para o cálculo das potências instantâneas, substituem-se estas parcelas de corrente nas equações 4.6 e 4.10, resultando em:

I. Potências ativas e não-ativas

$$\begin{aligned} p &= [v] \cdot [i] = [v] \cdot [i_a] + [v] \cdot [i_{na}] \\ &= [v] \cdot [i_p] + [v] \cdot [\Delta i_a] + [v] \cdot [i_{ort}] + [v] \cdot [\Delta i_{na}] \end{aligned} \quad (4.20)$$

Sendo que, a *potência polifásica instantânea* neste caso pode ser desmembrada em 4 parcelas:

$$p = p_a + p_{na} = p_p + \tilde{p}_a + p_{ort} + \tilde{p}_{na}, \quad (4.21)$$

onde

$$p_p = [v] \cdot [i_p] \quad (4.22)$$

é a componente de *potência ativa proporcional instantânea*. Essa parcela será constante se as tensões de alimentação forem simétricas e sem distorção. No caso de haver desequilíbrios ou harmônicas nas tensões, resultará $p_p = \bar{p}_p + \tilde{p}_p$. Portanto, torna-se necessário separar as contribuições das ondas fundamentais equilibradas para identificar a parcela desejável das não desejáveis de potência.

A segunda parcela da potência (4.21):

$$\tilde{p}_a = [v] \cdot [\Delta i_a] \quad (4.23)$$

é a *potência ativa oscilatória instantânea*, a qual relaciona-se não só as assimetrias da tensão, mas também aos desequilíbrios do circuito. Para separar estas contribuições, torna-se necessário encontrar as ondas de tensão fundamentais equilibradas.

A terceira parcela:

$$p_{ort} = [v] \cdot [i_{ort}] \quad (4.24)$$

é uma parcela de *potência não-ativa ortogonal instantânea*, a qual circula entre as fases, não contribuindo para o valor final da potência ativa. Refere-se a correntes ortogonais às tensões.

A quarta parcela:

$$\tilde{p}_{na} = [v] \cdot [\Delta i_{na}] \quad (4.25)$$

corresponde à *potência não-ativa oscilatória instantânea*, a qual também não contribui para potência ativa final e refere-se às assimetrias do circuito ou da tensão.

Assim, pode-se associar:

$$p \begin{cases} p_a = [v] \cdot [i_a] = p_p + \tilde{p}_a \\ p_{na} = [v] \cdot [i_{na}] = p_{ort} + \tilde{p}_{na} = 0 \end{cases}$$

Desta forma fica claro que a *potência polifásica instantânea* p pode ser composta por parcelas constantes (médias) e oscilatórias. Como visto na equação 4.5, as parcelas de *potência não-ativa instantânea* se anulam entre as fases a todo instante.

II. Potência imaginária

Para a *potência imaginária instantânea*, tem-se:

$$[q] = [v] \times [i] = [v] \times [i_a] + [v] \times [i_{na}] = [v] \times [i_{na}], \quad (4.26)$$

ou seja,

$$[q] = [v] \times [i_{ort}] + [v] \times [\Delta i_{na}], \quad (4.27)$$

resultando em

$$[q] = [q_{ort}] + [\tilde{q}], \quad (4.28)$$

onde

$$[q_{ort}] = [v] \times [i_{ort}] \quad (4.29)$$

é a *potência imaginária ortogonal instantânea*, a qual refere-se a sinais de corrente ortogonais à tensão. Se a tensão de alimentação for simétrica e sem distorção, o valor deste vetor torna-se constante. Esta componente pode ser associada com a Potência Reativa Convencional (Q_1). Portanto $[q_{ort}]$ pode conter parcelas médias e variáveis ($\bar{q}_{ort} + \tilde{q}_{ort}$). A parte oscilatória está associada à assimetria das tensões.

A segunda parcela de (4.28):

$$[\tilde{q}] = [v] \times [\Delta i_{na}] \quad (4.30)$$

é a *potência imaginária oscilatória instantânea*, a qual relaciona-se com desequilíbrios do circuito e/ou da tensão.

As parcelas de $[q]$ resultam, segundo 4.26, da contribuição das correntes não-ativas em cada fase. O produto escalar 4.5 mostra que estas se cancelam a todo instante, não contribuindo para a transferência de potência da fonte para a carga.

A *magnitude* de $[q]$ pode ser expressa a partir de (4.26) pela *NEI*:

$$\| [q] \| = \| [v] \times [i_{na}] \| = \| [v] \| \cdot \| [i_{na}] \| \quad (4.31)$$

a qual, como visto, pode conter valor médio e parcela oscilatória.

$$\| [q] \| = \overline{\| [q] \|} + \widetilde{\| [q] \|} \quad (4.32)$$

Sabendo que p e $\| [q] \|$ possuem componentes constantes e variáveis, é natural que a *potência aparente instantânea* (s) se apresente como:

$$\| [v] \| \cdot \| [i] \| = \sqrt{p^2 + \| [q] \|^2} = s = \bar{s} + \tilde{s} \quad (4.33)$$

Assim como foi feito por outros autores (Akagi e Nabae 1993, Aredes 1996, Peng e Lai 1996), os valores médios e oscilatórios das potências ativa, imaginária e aparente instantâneas, podem ser calculados através da média móvel por período (filtro passa-baixas).

Resumindo, a potência instantânea pode ser decomposta em:

- **Sistemas com condutância equivalente constante** $\Rightarrow g_e = cte$:

A *potência polifásica instantânea* é dada por:

$$p = p_a + p_{na}, \quad (4.34)$$

onde o produto escalar

$$p_a = [v] \cdot [i_a] \quad (4.35)$$

é a *potência ativa instantânea* e

$$p_{na} = [v] \cdot [i_{na}] = 0 \quad (4.36)$$

é a *potência não-ativa instantânea*.

A *potência imaginária instantânea* é dada pelo produto vetorial:

$$[q] = [v] \times [i_{na}] \quad (4.37)$$

e sua magnitude pode ser calculada como

$$\| [q] \| = \| [v] \| \cdot \| [i_{na}] \|. \quad (4.38)$$

A *potência aparente instantânea* é definida como:

$$s = \sqrt{p^2 + \| [q] \|^2} \quad (4.39)$$

- **Sistemas com condutância equivalente variável** $\Rightarrow g_e \neq cte$:

A *potência polifásica instantânea* é dada por:

$$p = p_a + p_{na}, \quad (4.40)$$

onde

$$p_a = p_p + \tilde{p}_a \quad (4.41)$$

é a *potência ativa instantânea*, a qual é formada de parcelas proporcional e oscilatória. E ainda

$$p_{na} = p_{ort} + \tilde{p}_{na} = 0 \quad (4.42)$$

é a *potência não-ativa instantânea*, a qual é composta de parcelas ortogonal e oscilatória.

A *potência imaginária instantânea* é dada por:

$$[q] = [v] \times [i_{na}] = [q_{ort}] + [\tilde{q}] \quad (4.43)$$

e sua magnitude pode ser calculada como

$$\| [q] \| = \| [v] \| \cdot \| [i_{na}] \| = \| [q] \| + \| \widetilde{[q]} \|. \quad (4.44)$$

A *potência aparente instantânea* definida como

$$s = \sqrt{p^2 + \| [q] \|^2}, \quad (4.45)$$

pode ser decomposta em parte média e variável

$$s = \bar{s} + \tilde{s}. \quad (4.46)$$

4.2.2 Potências fundamental e residual

Como já discutido, uma vez que os sistemas elétricos tem apresentado distorções de forma de onda nas tensões e correntes, estas podem ser decompostas em relação à frequência, resultando ondas de frequência fundamental e sinais residuais (frequências harmônicas e inter-harmônicas).

Assim, a associação das duas decomposições (seção 3.4) resulta nas equações:

$$[v] = [v_1] + [v_{res}]$$

$$[i] = ([i_{a_1}] + [i_{a_{res}}]) + ([i_{na_1}] + [i_{na_{res}}])$$

Utilizando o mesmo *caso 03* do capítulo anterior, pode-se relacionar tensões e correntes para efetuar o cálculo das componentes instantâneas de potência fundamental e residual.

Caso 03 - Sistema com condutância equivalente variável ($g_e = \bar{g}_e + \Delta g_e$) e tensão não-senoidal

Neste tipo de circuito, cada conjunto (fundamental + resíduo) da corrente pode ainda ser decomposto em parcelas proporcional, ortogonal e oscilatórias, ou seja:

$$[i] = \underbrace{([i_{p_1}] + [\Delta i_{a_1}] + [i_{p_{res}}] + [\Delta i_{a_{res}}])}_{\text{ativas}} + \underbrace{([i_{ort_1}] + [\Delta i_{na_1}] + [i_{ort_{res}}] + [\Delta i_{na_{res}}])}_{\text{não-ativas}}, \quad (4.47)$$

ressaltando que o para o cálculo de g_e são utilizadas as tensões fundamentais $[v_1]$ na equação 3.22, de acordo com o diagrama da figura 3.6.

Associando as as tensões decompostas como em 3.48 e as correntes como em 4.47, pode-se desenvolver o cálculo de potências instantâneas de forma a encontrar a componente de potência que melhor se aproxime das condições ideais e outras relacionadas com a deterioração da qualidade da energia.

I. Potências ativas e não-ativas

A *potência polifásica instantânea* é então calculada pelo produto escalar:

$$p = [v] \cdot [i] = [v_1] \cdot [i] + [v_{res}] \cdot [i] \quad (4.48)$$

Substituindo 4.47 na equação anterior e desenvolvendo, tem-se:

$$\begin{aligned} p &= [v_1] \cdot [i_{p_1}] + [v_1] \cdot [i_{p_{res}}] + [v_1] \cdot [\Delta i_{a_1}] + [v_1] \cdot [\Delta i_{a_{res}}] + \\ &+ [v_1] \cdot [i_{ort_1}] + [v_1] \cdot [i_{ort_{res}}] + [v_1] \cdot [\Delta i_{na_1}] + [v_1] \cdot [\Delta i_{na_{res}}] + \\ &+ [v_{res}] \cdot [i_{p_1}] + [v_{res}] \cdot [i_{p_{res}}] + [v_{res}] \cdot [\Delta i_{a_1}] + [v_{res}] \cdot [\Delta i_{a_{res}}] + \\ &+ [v_{res}] \cdot [i_{ort_1}] + [v_{res}] \cdot [i_{ort_{res}}] + [v_{res}] \cdot [\Delta i_{na_1}] + [v_{res}] \cdot [\Delta i_{na_{res}}] \end{aligned} \quad (4.49)$$

Todas estas parcelas podem ser agrupadas da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 p &= \bar{p} + \tilde{p} \\
 &= \underbrace{p_{p_1} + \tilde{p}_{a_1}}_{p_{a_1}} + p_{a_{res}} + \tilde{p}_{a_{cross}} + \underbrace{p_{ort_1} + \tilde{p}_{na_1}}_{p_{na_1}} + p_{na_{res}} + \tilde{p}_{na_{cross}}
 \end{aligned} \tag{4.50}$$

onde cada componente de potência instantânea é interpretada como:

$$p_{p_1} = \bar{p}_{a_1} = [v_1] \cdot [i_{p_1}] \tag{4.51}$$

é a *potência ativa fundamental média*, relaciona-se com as tensões de alimentação fundamentais simétricas (impostas) e a parte constante de g_e . Ou seja, pode-se associá-la a componentes de potência de seqüência positiva. Dentre todas as outras, esta parcela de potência é aquela relacionada com a mínima perda de energia;

$$\tilde{p}_{a_1} = [v_1] \cdot [\Delta i_{a_1}] \tag{4.52}$$

é a *potência ativa fundamental oscilatória*, a qual relaciona-se com assimetrias do circuito (\tilde{g}_e) e pode ser associada a componentes de potência de seqüência negativa e zero;

$$p_{a_{res}} = [v_{res}] \cdot [i_{p_{res}}] + [v_{res}] \cdot [\Delta i_{a_{res}}] \tag{4.53}$$

é a *potência ativa residual*, a qual pode conter valor médio, dependendo das tensões e correntes residuais, ou oscilatório, devido a assimetrias das tensões ou circuitos. Esta parcela é gerada estritamente por sinais harmônicos e inter-harmônicos;

$$\tilde{p}_{a_{cross}} = [v_1] \cdot [i_{p_{res}}] + [v_1] \cdot [\Delta i_{a_{res}}] + [v_{res}] \cdot [i_{p_1}] + [v_{res}] \cdot [\Delta i_{a_1}] \tag{4.54}$$

a combinação destas parcelas de frequências distintas está sendo denominada como a *potência ativa cruzada*, a qual relaciona-se com o produto escalar de tensões por correntes ativas de frequências distintas, ou seja, um cruzamento de frequências. Quando não existem inter-harmônicos, o valor médio desta parcela torna-se nulo por período;

Estas quatro parcelas de potência ativa constituem o produto escalar da tensão pela corrente ativa:

$$p_{p_1} + \tilde{p}_{a_1} + p_{a_{res}} + \tilde{p}_{a_{cross}} = [v] \cdot [i_a] = p = \bar{p} + \tilde{p} \tag{4.55}$$

As demais parcelas constituem o produto escalar da tensão pela corrente não-ativa. São elas:

$$p_{ort_1} = \bar{p}_{na_1} = [v_1] \cdot [i_{ort_1}] \quad (4.56)$$

é a parcela de *potência não-ativa ortogonal fundamental*, a qual circula entre as fases do sistema, não contribuindo para o valor final da potência ativa. Refere-se a correntes fundamentais ortogonais às tensões fundamentais simétricas;

$$\tilde{p}_{na_1} = [v_1] \cdot [\Delta i_{na_1}] \quad (4.57)$$

é a parcela de *potência não-ativa oscilatória fundamental*, a qual também não contribui para a potência ativa final e relaciona-se com desequilíbrios do circuito;

$$p_{na_{res}} = [v_{res}] \cdot [i_{ort_{res}}] + [v_{res}] \cdot [\Delta i_{na_{res}}] \quad (4.58)$$

é a parcela de *potência não-ativa residual*. Também circula entre as fases do sistema, não contribuindo para a potência ativa;

$$\tilde{p}_{na_{cross}} = [v_1] \cdot [i_{ort_{res}}] + [v_1] \cdot [\Delta i_{na_{res}}] + [v_{res}] \cdot [i_{ort_1}] + [v_{res}] \cdot [\Delta i_{na_1}] \quad (4.59)$$

é a *potência não-ativa cruzada*, a qual relaciona-se com o produto escalar de tensões por correntes não-ativas de frequências distintas, ou seja, um cruzamento de frequências. O valor desta parcela também é oscilatório de média zero.

Da definição de produto escalar, o somatório das parcelas de potência não-ativas (ortogonais) é nulo a todo instante, ou seja:

$$p_{ort_1} + \tilde{p}_{na_1} + p_{na_{res}} + \tilde{p}_{na_{cross}} = [v] \cdot [i_{na}] = 0. \quad (4.60)$$

Estas quatro componentes de potência circulam entre as fases do sistema e não contribuem para transferência de potência entre as fontes geradoras e as cargas, no entanto, contribuem para o vetor instantâneo de potência imaginária, uma vez que são formadas por parcelas de corrente não-ativas (i_{na}).

II. Potência imaginária

Aplicando a decomposição em fundamental e resíduo aos sinais de tensão e corrente da equação 4.26, tem-se:

$$[q] = [v] \times [i_{na}] = [v_1] \times [i_{na}] + [v_{res}] \times [i_{na}] \quad (4.61)$$

$$\begin{aligned}
[q] &= [v_1] \times [i_{ort_1}] + [v_1] \times [\Delta i_{na_1}] + [v_1] \times [i_{ort_{res}}] + [v_1] \times [\Delta i_{na_{res}}] + \\
&+ [v_{res}] \times [i_{ort_1}] + [v_{res}] \times [\Delta i_{na_1}] + [v_{res}] \times [i_{ort_{res}}] + [v_{res}] \times [\Delta i_{na_{res}}]
\end{aligned} \tag{4.62}$$

Agrupando por componentes de potência, tem-se:

$$[q] = [\bar{q}_1] + [\tilde{q}_1] + [q_{res}] + [\tilde{q}_{cross}] \tag{4.63}$$

sendo os termos definidos como:

$$[\bar{q}_1] = [v_1] \times [i_{ort_1}] \tag{4.64}$$

é a *potência imaginária fundamental média*, relaciona-se às ondas de tensão e corrente fundamentais, simétricas e ortogonais (componentes de seqüência positiva fundamentais e ortogonais). Esta parcela pode ser interpretada como a Potência Reativa Convencional (Q_1);

$$[\tilde{q}_1] = [v_1] \times [\Delta i_{na_1}] \tag{4.65}$$

é a *potência imaginária fundamental oscilatória*, relaciona-se com assimetrias do circuito;

$$[q_{res}] = [v_{res}] \times [i_{ort_{res}}] + [v_{res}] \times [\Delta i_{na_{res}}] \tag{4.66}$$

é a *potência imaginária residual*, a qual pode conter valor médio ou oscilatório, dependendo da condição de assimetria do circuito;

$$[\tilde{q}_{cross}] = [v_1] \times [i_{ort_{res}}] + [v_1] \times [\Delta i_{na_{res}}] + [v_{res}] \times [i_{ort_1}] + [v_{res}] \times [\Delta i_{na_1}] \tag{4.67}$$

esta combinação de parcelas é denominada como *potência imaginária cruzada*, a qual relaciona-se com o produto vetorial de tensões por correntes não-ativas de frequências distintas. Quando não existem inter-harmônicos, o valor médio desta parcela também torna-se nulo por período;

A magnitude de $[q]$ pode ser expressa por:

$$\| [q] \| = \| [v] \| \cdot \| [i_{na}] \|, \tag{4.68}$$

e poderia ser separada em termos de parcelas médias e oscilantes de frequência fundamental, residual ou cruzada, ou seja:

$$\| [q] \| = \overline{\| [q] \|_1} + \widetilde{\| [q] \|_1} + \overline{\| [q] \|_{res}} + \widetilde{\| [q] \|_{res}} + \widetilde{\| [q] \|_{cross}} \quad (4.69)$$

Neste caso, a *potência aparente instantânea* calculada por:

$$s = \sqrt{p^2 + \| [q] \|^2}, \quad (4.70)$$

também pode ser associada com parcelas médias e oscilatórias, de frequência fundamental, residual ou cruzada, ou seja:

$$s = s_1 + s_{res} + s_{cross} = \bar{s}_1 + \tilde{s}_1 + \bar{s}_{res} + \tilde{s}_{res} + \tilde{s}_{cross} \quad (4.71)$$

Essa abordagem é interessante no sentido de mostrar que a potência em um sistema elétrico genérico é composta por várias parcelas distintas, dependendo da forma como se decompõe as tensões e correntes. O trabalho desenvolvido no domínio da frequência por Emanuel (1998) obteve resultados semelhantes à equação (4.71).

4.2.3 Potências unidirecional e bidirecional

Trabalhos como Khalsa e Mielczarski (1998) e Depenbrock e Staudt (1998b), apresentam um outro conceito de potências, os quais referem-se a potências uni e bidirecionais.

Potências unidirecionais seriam aquelas parcelas de potência com valor médio diferente de zero, sem oscilações, ou seja, relacionam-se ao fluxo ou transferência real de energia entre as fontes e cargas do sistema. Em analogia à decomposição de potências apresentadas no Caso Exemplo, pode-se dizer que dentre todas as parcelas calculadas, duas podem ser consideradas como unidirecionais. A primeira pode ser facilmente associada a *potência ativa fundamental média* (p_{p_1}), que é a parcela dita *ideal* do sistema. A segunda parcela unidirecional é a *potência ativa residual média* ($\bar{p}_{a_{res}}$).

Portanto, se a princípio poderia ser dito que a potência unidirecional de um sistema qualquer está associada à parcela útil ou ideal do mesmo, deve-se ressaltar que quando as tensões não são senoidais, podem surgir potências médias em frequências não-fundamentais.

Assim, pode-se apresentar a *potência unidirecional* (P_u) como:

$$P_u = P_{p_1} + P_{a_{res}}, \quad (4.72)$$

sendo que a utilização de letras “maiúsculas” na equação anterior ressalta que tais parcelas são relacionadas com valores médios.

A potência bidirecional (p_b) por sua vez, está relacionada com todas oscilações de potência, sejam entre as fontes e as cargas ou entre as fases do sistema. Esta parcela pode ser associada às parcelas oscilatórias da potência ativa e a todas as parcelas de potência não-ativa. Ou seja,

$$p_b = \tilde{p}_a + p_{na} \quad (4.73)$$

ou

$$p_b = \tilde{p}_{a_1} + \tilde{p}_{a_{res}} + \tilde{p}_{a_{cross}} + p_{ort_1} + \tilde{p}_{na_1} + p_{na_{res}} + \tilde{p}_{na_{cross}}. \quad (4.74)$$

A potência bidirecional é totalmente indesejada nos sistemas elétricos e está estritamente relacionada com a parcela de corrente definida em 3.57 como *corrente não-proporcional à tensão fundamental*,

$$[i_{np}] = \underbrace{[i_{p_{res}}] + [\Delta i_{a_1}] + [\Delta i_{a_{res}}]}_{ativas} + \underbrace{[i_{ort_1}] + [i_{ort_{res}}] + [\Delta i_{na_1}] + [\Delta i_{na_{res}}]}_{não-ativas},$$

a qual representa a união de todas parcelas de corrente originárias de distúrbios do sistema.

4.3 Indicadores de qualidade de potência

Uma vez apresentadas nas seções anteriores as componentes de potência instantânea p , $[q]$ e s , e discutido que estas podem conter parcelas médias e oscilatórias, de frequência fundamental ou residual, pode-se então definir algumas relações entre as mesmas, de forma a avaliar a qualidade da potência (energia) envolvida no sistema elétrico.

O conceito usual de *fator de deslocamento da fundamental* ($\cos \phi_1$), muitas vezes chamado de fator de potência em sistemas lineares com excitação senoidal, pode ser expresso pela relação entre a componente de potência ativa fundamental e a componente de potência aparente fundamental, ou seja,

$$f_d = \cos \phi_1 = \frac{p_{a_1}}{s_1}. \quad (4.75)$$

A relação entre a potência ativa instantânea total (4.55) e a potência aparente instantânea total (4.70), é definida como *fator de potência instantâneo* (f_p), ou seja :

$$f_p = \frac{p}{s} = \frac{p_{p_1} + \tilde{p}_{a_1} + p_{a_{res}} + \tilde{p}_{a_{cross}}}{\sqrt{p^2 + \|[q]\|^2}} \quad (4.76)$$

Outra relação interessante para avaliar a qualidade da energia pode ser definida como *eficiência na transferência da potência ativa* e expressa por :

$$\eta_p = \frac{P_{p1}}{P_{p1} + \tilde{P}_{a1} + P_{ares} + \tilde{P}_{across}}, \quad (4.77)$$

a qual indica quanto de toda a potência ativa do sistema é de frequência fundamental e constante, ou seja, a parcela de potência unidirecional de frequência fundamental.

A interação das duas últimas relações possibilita definir o *fator de potência fundamental*, o qual é calculado como

$$f_{p1} = \eta_p \times f_p = \frac{P_{p1}}{s} \quad (4.78)$$

e indica o quanto de toda potência presente no sistema elétrico (s) é realmente utilizada para fornecer trabalho útil.

As quatro relações anteriores podem ser interessantes quando se necessita avaliar a qualidade de energia de um determinado sistema elétrico para fins, por exemplo, de tarifação ou atribuição de responsabilidades a fontes geradores de distúrbios.

Para tais aplicação práticas, sugere-se que estes indicadores (relações) sejam avaliados por meio de uma janela de média móvel, uma vez que as componentes de potência podem variar bruscamente, levando a resultados instantâneos de difícil interpretação e pouco interesse.

No capítulo seguinte estão apresentados resultados experimentais de alguns casos, onde os *indicadores de potência* trazem resultados que poderiam ser utilizados para as finalidades sugeridas.

4.4 Conclusão

Se o objetivo é encontrar um método de decomposição das potências instantâneas, o qual se baseia nas condições ideais do sistema para separar a parcela desejável ou ideal à máxima conservação de energia, das parcelas originadas por distúrbios elétricos de naturezas distintas, as definições apresentadas neste capítulo atingem bons resultados, não havendo restrições quanto à forma de onda dos sinais envolvidos e nem mesmo em relação ao número de fases do sistema.

Por não necessitar de transformações de sistemas de eixos do tipo $a, b, c \Rightarrow \alpha, \beta, 0$ ou $a, b, c \Rightarrow d, q, 0$, o método apresentado permite o cálculo das componentes de potência para sistemas polifásicos, inclusive o monofásico, desde que as associações aos fenômenos físicos seja levada em consideração.

Pela identificação de p_{p1} , encontra-se a componente de potência relacionada à mínima corrente que precisa circular no sistema para suprir a necessidade das cargas na realização de trabalho útil. Todas as outras parcelas de potência ativa, não-ativa e imaginárias devem ser eliminadas para que o sistema opere em condição de máxima transferência de energia entre as fontes geradoras e as cargas, minimizando as perdas envolvidas neste processo.

As definições de potências *não-ativas* e *imaginárias*, as quais são intimamente relacionadas, pois se originam das correntes não-ativas, auxiliam na compreensão de que existem componentes de potência envolvidas com interações entre as fases do sistema, sem interferir no fluxo de energia da rede. No caso de condicionadores de energia, estas componentes de potência são bastante importantes para identificar e quantificar que parcelas podem ser eliminadas sem o auxílio de armazenadores de energia, por meio das técnicas adequadas de eletrônica de potência, e quais necessitam dos mesmos.

Através das definições de potências baseadas em grandezas ortogonais, foi possível definir a *potência aparente instantânea*, assim como na teoria convencional, e ainda relacionar as componentes de potência de modo a obter *indicadores de qualidade de potência* (energia), os quais podem contribuir para trabalhos futuros de tarifação e atribuição de responsabilidades aos fornecedores e consumidores de energia elétrica.

É interessante observar que só foi possível identificar a parcela de potência p_{p1} , devido à aplicação simultânea das duas decomposições descritas nos capítulos 2 e 3, e os conceitos da álgebra vetorial e ortogonalidade de vetores. No trabalho de Willems (1992), o autor sugere que contribuições fossem feitas ao mesmo, no sentido de associá-lo a definições como as apresentadas por Czarnecki (1990). Acredita-se que as definições apresentadas neste capítulo, contribuem de forma a auxiliar na compreensão prática e didática dos conceitos de potências instantâneas.

No próximo capítulo estão apresentados resultados dos três casos utilizados como exemplos nos capítulos 3 e 4. Tais resultados contribuem para o entendimento e para a validação da metodologia exposta nestes capítulos.

Capítulo 5

Resultados e Aplicações

5.1 Resultados

Para validar a metodologia apresentada nos Capítulos 3 e 4, as decomposições e formulações aplicadas às grandezas elétricas foram implementadas em um sistema de aquisição e processamento digital de dados. Trata-se de um protótipo em desenvolvimento no Laboratório de Condicionamento de Energia Elétrica/FEEC/UNICAMP, o qual foi denominado *Monitor Digital de Qualidade da Energia - MDQE*.

Uma descrição mais detalhada do MDQE pode ser encontrada em Paiva *et al.* (1999) e Marafão *et al.* (1999b), destacando que tal sistema dispõe de 8 canais de aquisição de dados, os quais são amostrados, multiplexados, digitalizados e transmitidos a um microcomputador para serem processados digitalmente em *tempo real*.

Dado o processamento em tempo real, as decomposições puderam ser avaliadas no domínio do tempo, onde as características *instantâneas* ficam restritas à frequência de amostragem utilizada (2,4kHz por canal), garantindo uma análise de sinais até a vigésima harmônica.

Para obtenção dos resultados apresentados nas próximas seções, foram utilizados além do MDQE, um Gerador de Sinais Programável (YOKOGAWA - AG1200) e uma carga experimental de baixa potência.

De posse destes equipamentos, foram desenvolvidos experimentos representando alguns dos casos citados nos capítulos 3 e 4 para apresentação do método de decomposição.

O circuito da carga que serviu como base para os testes está representado na figura 5.1, onde os valores dos resistores, capacitores e das tensões aplicadas pelo gerador eram alterados de acordo com o caso desejado.

5.1.1 Caso 01 - Sistema com condutância equivalente constante ($g_e = cte$)

Foram feitos dois experimentos para este caso, no primeiro o circuito utilizado era puramente resistivo e no segundo o circuito possuía característica RC.

Caso 1a - Circuito resistivo equilibrado

Neste experimento os capacitores da figura 5.1 não foram utilizados e os resistores tinham a configuração da tabela 5.1.

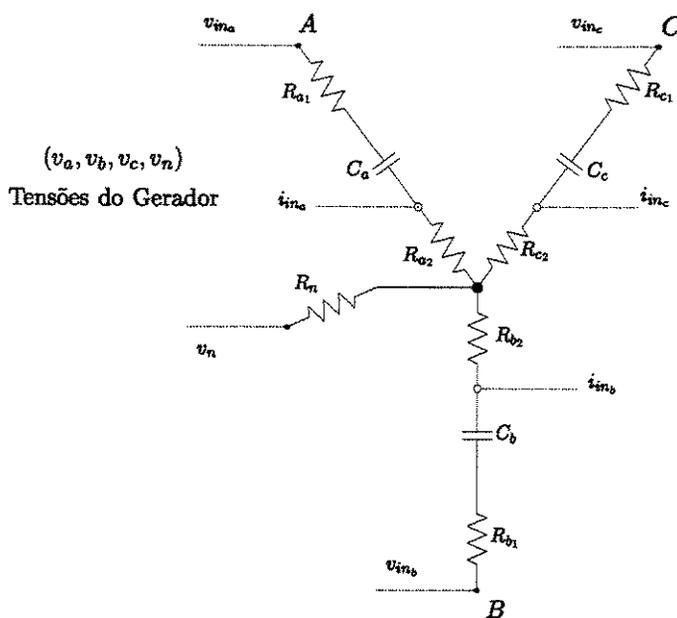


Figura 5.1: Circuito utilizado como carga no experimento

$R_{a1} = R_{b1} = R_{c1} = 10,2k\Omega$
$R_{a2} = R_{b2} = R_{c2} = 5,6k\Omega$
$R_n = 5,6k\Omega$
C_a, C_b, C_c : não utilizados

Tabela 5.1: Caso 1a - Circuito resistivo equilibrado

As tensões impostas ao circuito eram equilibradas e puramente senoidais. Os valores utilizados estão indicados na tabela 5.2:

Gerador de Sinais Programável	
Fase A	$v = 8sen(\omega t)$ [V]
Fase B	$v = 8sen(\omega t - \frac{2\pi}{3})$ [V]
Fase C	$v = 8sen(\omega t - \frac{4\pi}{3})$ [V]

Tabela 5.2: Tensões senoidais equilibrados

Com esta montagem, pode-se obter várias das parcelas de corrente e potência descritas anteriormente, de onde destacamos as mais interessantes para análise. As figuras a seguir foram obtidas usando a tela gráfica do MDQE. É importante observar que as figuras que serão apresentadas não foram processadas simultaneamente, ou seja, apesar do intervalo utilizado para as análises ser o mesmo (33ms - dois períodos da fundamental, 60Hz), sendo o MDQE um instrumento de aquisição em tempo real, a cada análise (figura) os dados eram obtidos instantaneamente. Isto explica o não sincronismo das formas de onda apresentadas, de uma figura para outra.

A figura 5.2(a) permite observar que, em se tratando de um circuito resistivo equilibrado, alimentado

com tensões senoidais equilibradas (sistema ideal), tensões e correntes de entrada estão em fase. As figuras 5.2(b) e 5.2(c) permitem notar que as parcelas de corrente ativa (i_a) correspondem a toda corrente de entrada, uma vez que as correntes não-ativas (i_{na}) neste caso são nulas.

A figura 5.3(a) mostra que para este tipo de sistema, a potência aparente instantânea coincide com as potências polifásica e com a potência ativa instantâneas, as quais a menos das aproximações da montagem são constantes. As potências não-ativa e imaginária são nulas.

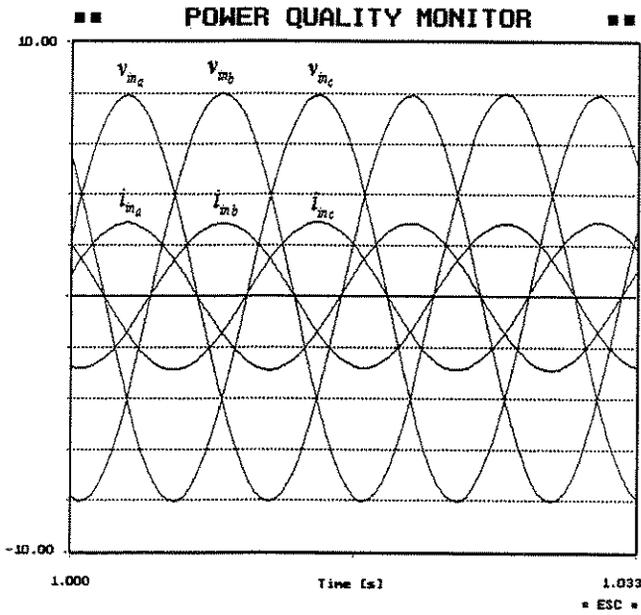
O valor estimado de p_a pela figura 5.3(a) é de aproximadamente 34W. Em analogia com o cálculo convencional da potência ativa, seu valor esperado pode ser calculado como:

$$P = 3 \times \frac{V_p}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_p}{\sqrt{2}} = 3 \times \frac{8}{\sqrt{2}} \times \frac{2,8}{\sqrt{2}} = 33,6W, \quad (5.1)$$

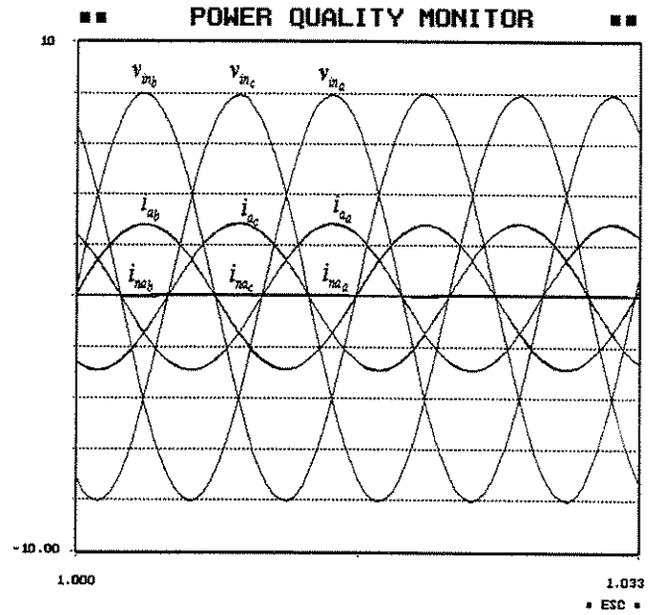
o que demonstra que o cálculo através das parcelas de corrente ativa coincide com o cálculo convencional.

O valor da condutância equivalente do sistema é constante e pode ser observado na figura 5.3(b). Os indicadores de qualidade apresentados, possuem todos valor unitário e podem ser visualizados em 5.3(c) e 5.3(d).

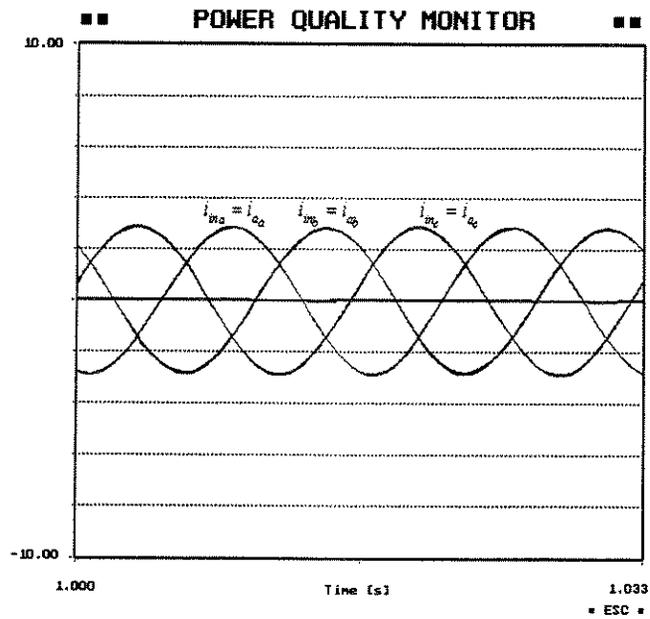
É importante destacar que as pequenas oscilações observadas nas componentes de potência ($p, s, \| q \|$) e em g_e têm dois tipos de origem: primeiro o fato do equipamento MDQE possuir uma faixa de erro de 1,5% em suas medidas e segundo, mesmo utilizando resistores de precisão (1%) na configuração do circuito, existe um mínimo desequilíbrio entre as fases inerente a tais elementos.



(a) Tensões e correntes de entrada

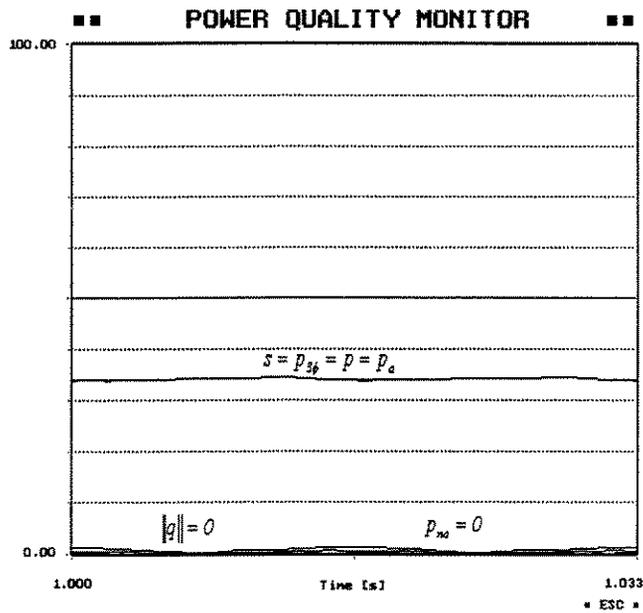


(b) Tensões de entrada e correntes ativa e não-ativa

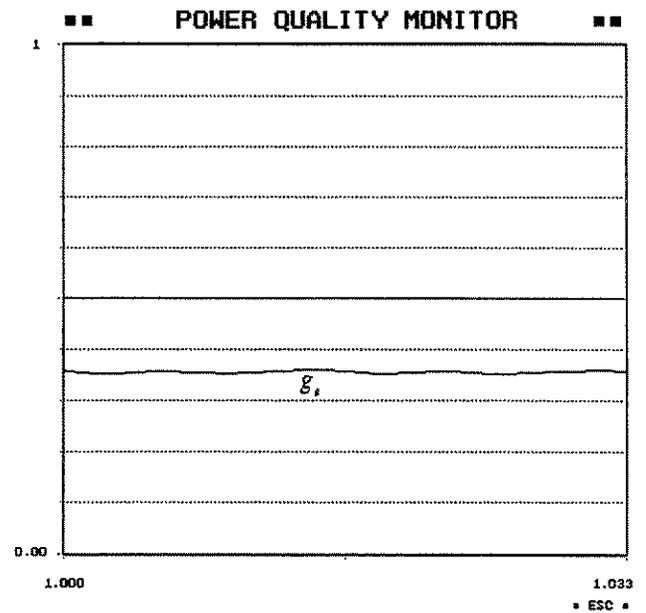


(c) Correntes de entrada, ativa e não-ativa

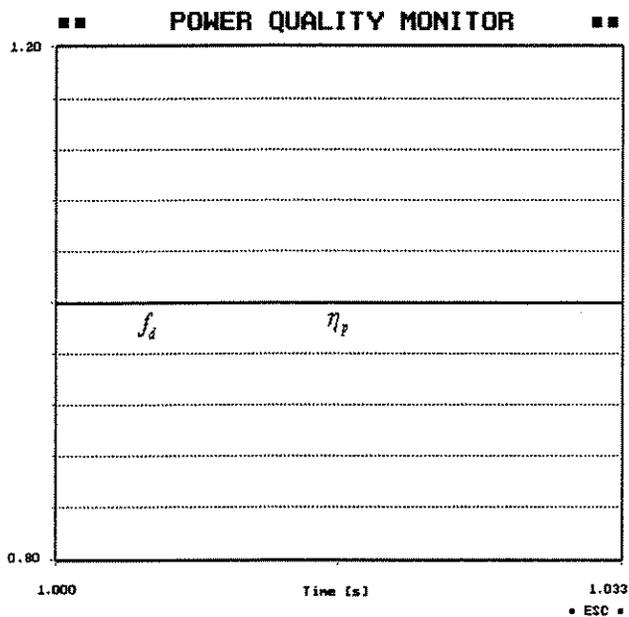
Figura 5.2: Tensões e parcelas de corrente - circuito resistivo equilibrado



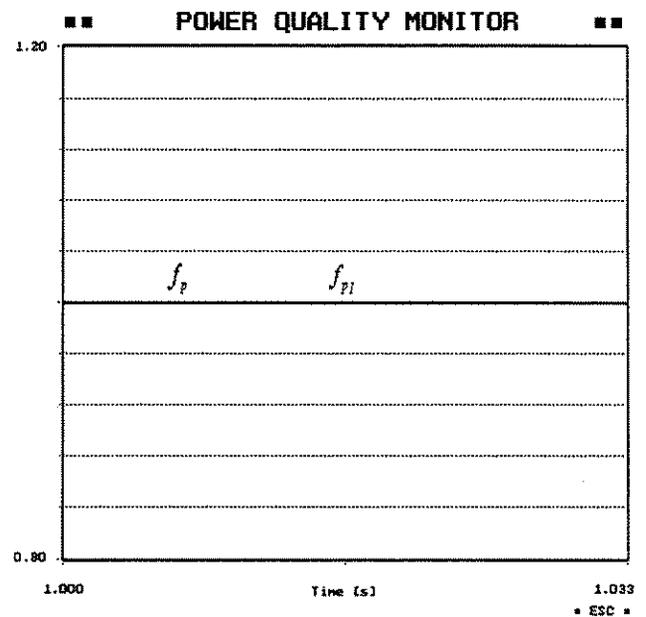
(a) Potências instantâneas trifásica, ativa, não-ativa, imaginária e aparente



(b) Condutância equivalente ($\frac{p}{\|v\|^2}$)



(c) Fator de deslocamento da fundamental e eficiência da potência ativa



(d) Fator de potência instantâneo e fator de potência fundamental

Figura 5.3: Potências instantâneas, condutância e fatores - circuito resistivo

Caso 1b - Circuito reativo equilibrado

Os resistores deste circuito tinham a mesma configuração do *Caso 1a* e os capacitores tinham valores como na tabela 5.3.

$$C_a = C_b = C_c = 200nF$$

Tabela 5.3: Caso 1b - Circuito reativo equilibrado

As tensões impostas ao circuito eram formadas pela mesma configuração do caso anterior (tabela 5.2).

Pela figura 5.4(a) pode-se observar que se trata de um circuito reativo equilibrado, alimentado com tensões senoidais equilibradas, onde as correntes de entrada encontram-se adiantadas em relação às tensões (característica capacitiva). As figuras 5.4(b) e 5.4(c) permitem notar que a corrente de entrada (i_{in}) é composta por parcelas de corrente ativa (i_a) e não-ativa (i_{na}). As parcelas não-ativas correspondem à corrente drenada pela parte reativa do circuito. Nestas figuras apenas uma das fases foi identificada, para facilitar a visualização. Sendo o circuito simétrico e as tensões equilibradas, o que ocorre em uma fase se repete nas demais.

Observar na figura 5.4(b) que a corrente ativa está em fase com a tensão respectiva, enquanto as não-ativas são ortogonais à mesma.

A figura 5.5(a) mostra que neste caso a potência aparente instantânea é composta pelas potências ativa e imaginária instantâneas, as quais são praticamente constantes (circuito equilibrado). É interessante observar que a potência não-ativa instantânea total é nula a todo instante, uma vez que as contribuições de cada fase independente se cancelam se avaliados no sistema polifásico.

O valor da condutância equivalente do sistema é constante e pode ser observado na figura 5.5(b). Em relação aos indicadores de qualidade, como era de se esperar, o valor de n_p é unitário, enquanto f_d, f_p, f_{p1} assumem valor de aproximadamente 0,77 em função da carga reativa, o que pode ser visto em 5.5(d) e 5.5(c). Este valor pode ser facilmente conferido, calculando a impedância equivalente do circuito (Z), ou seja:

$$Z = R + jX_c = R + j\frac{1}{2\pi 60C} = 15,8.10^3 + j13,263.10^3 \quad (5.2)$$

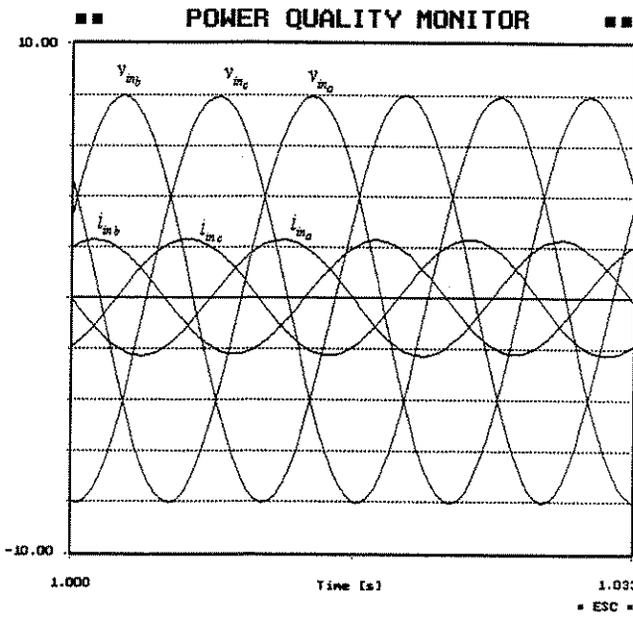
ou na forma polar,

$$Z = |Z| \angle \phi = 20,63.10^3 \angle 40,01. \quad (5.3)$$

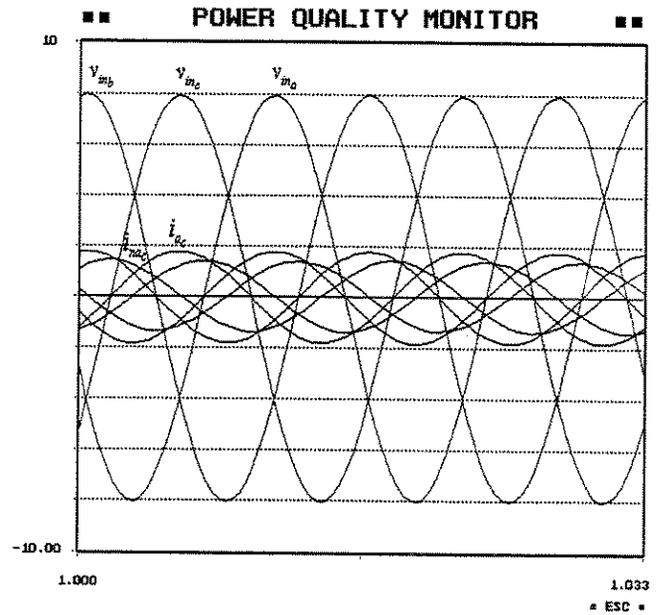
Uma vez que o sistema analisado possui tensões senoidais, o fator de deslocamento da fundamental pode ser obtido por:

$$f_d = \cos 40,01 = 0,766. \quad (5.4)$$

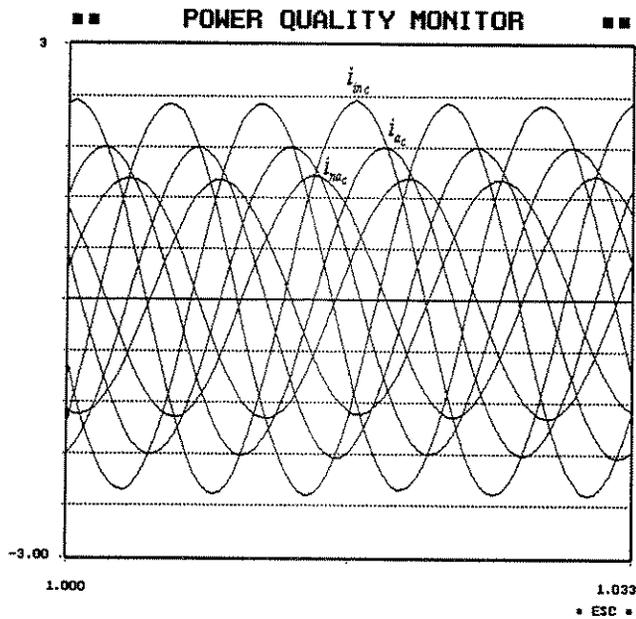
Da mesma forma como citado no caso anterior, as oscilações nas potências ($p, s, \| q \|\|$) e na condutância são devidas a imperfeições na simetria do circuito utilizado (agora com capacitores) e no MDQE.



(a) Tensões e correntes de entrada

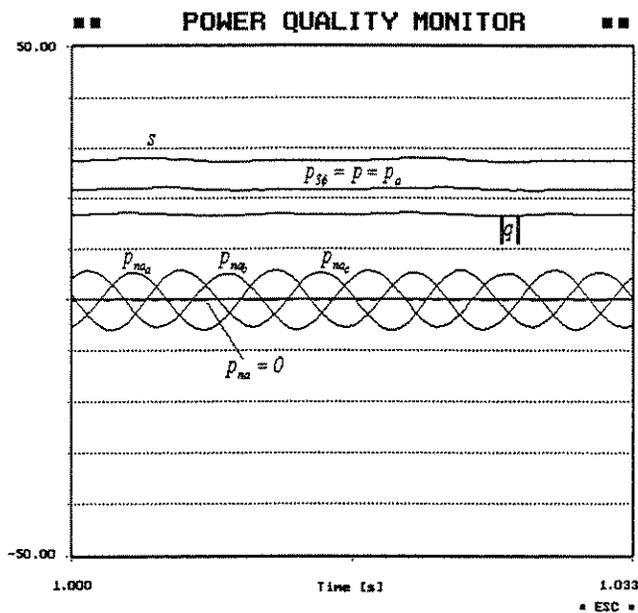


(b) Tensões de entrada e correntes ativa e não-ativa

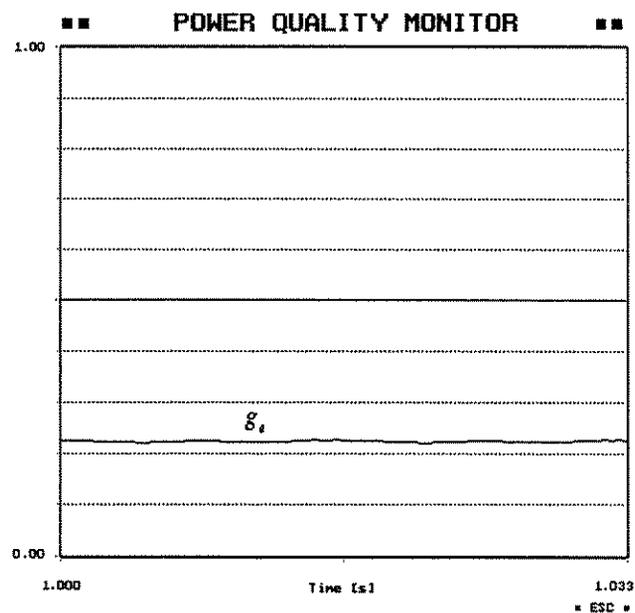


(c) Correntes de entrada, ativa e não-ativa - ampliadas

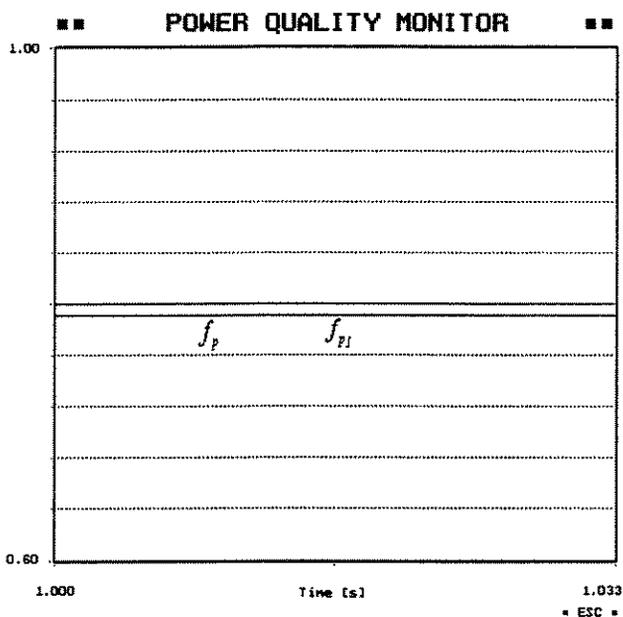
Figura 5.4: Tensões e parcelas de corrente - circuito reativo equilibrado



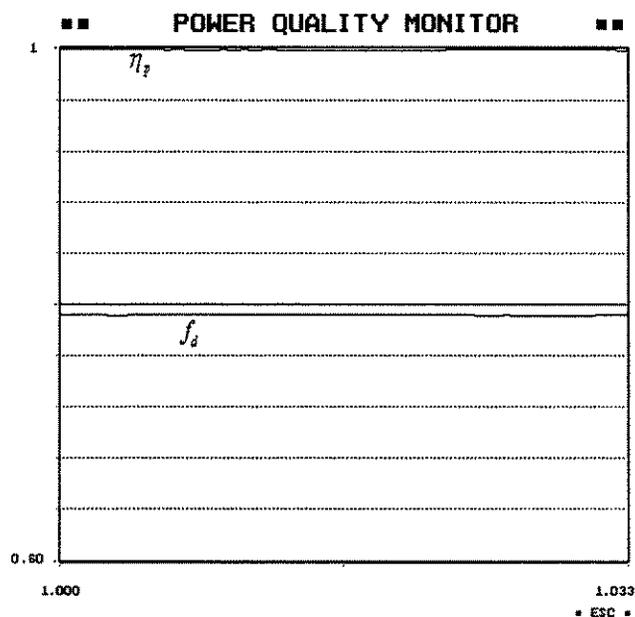
(a) Potências instantâneas total, ativa, não-ativa, imaginária e aparente



(b) Condutância equivalente ($\frac{P}{\|v\|^2}$)



(c) Fator de deslocamento da fundamental e eficiência da potência ativa



(d) Fator de potência instantâneo e fator de potência fundamental

Figura 5.5: Potências instantâneas, condutância e fatores - circuito reativo

5.1.2 Caso 02 - Sistema com condutância equivalente variável ($g_e \neq cte$)

Assim como no caso anterior foram feitos dois experimentos, um com circuito puramente resistivo e outro com circuito RC. No entanto, nestes dois casos os parâmetros do circuito eram assimétricos para que o valor da condutância equivalente instantânea fosse oscilatório.

Caso 2a - Circuito resistivo desequilibrado

Neste experimento o circuito possuía a configuração da tabela 5.4. As tensões eram iguais ao caso anterior, senoidais e equilibradas (tabela 5.2).

$R_{a1} = R_{c1} = 10,2k\Omega$
$\Rightarrow R_{b1} = 12,8k\Omega \Leftarrow$
$R_{a2} = R_{b2} = R_{c2} = 5,6k\Omega$
$R_n = 5,6k\Omega$
$C_a, C_b, C_c : \text{n\~{a}o utilizados}$

Tabela 5.4: Caso 2a - Circuito resistivo desequilibrado (R_{b1})

Como visto nos capítulos anteriores, para circuitos assimétricos a condutância equivalente tem valor oscilatório e com o método adequado é possível analisar várias outras parcelas de corrente e potência, as quais estão nas figuras a seguir. As parcelas média e oscilatórias de g_e são obtidas através de um algoritmo digital, no qual é feito uma média móvel sobre um intervalo correspondente a um período da fundamental.

Na figura 5.6(a) pode-se observar que as correntes estão em fase com as tensões e que o valor de corrente da fase B é menor que nas outras. A figura 5.6(b) indica que a corrente total pode ser dividida em parcelas ativa e não-ativa, as quais estão ampliadas na figura 5.6(c). Neste caso observa-se que a forma de onda das duas parcelas de corrente não é senoidal, isto se dá pela assimetria do sistema, no entanto a decomposição continua válida e a soma das parcelas decompostas é igual à corrente original. A condutância equivalente neste caso é oscilatória e pode ser observada na figura 5.6(d).

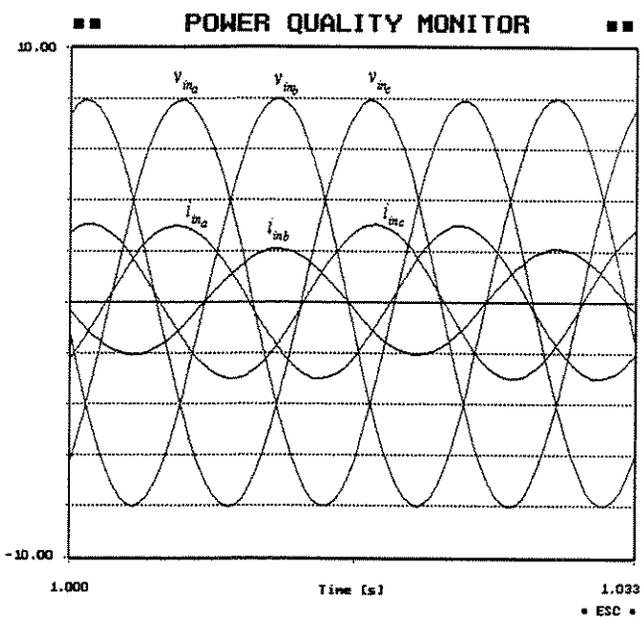
Através das figuras 5.7(a) e 5.7(b) pode-se observar que a corrente ativa instantânea pode ser dividida ainda em parcela proporcional (i_p) e ativa oscilatória (Δi_a). As parcelas proporcionais são exatamente senoidais e equilibradas, uma vez que se originam de \bar{g}_e e das tensões equilibradas.

Com a figura 5.8(a) é possível constatar que a potência aparente instantânea é oscilatória e composta pelas potências ativa e imaginária, onde as oscilações tem sua origem no desequilíbrio do circuito. Em se tratando da potência imaginária, esta se origina nas parcelas de corrente não-ativa, que por sua vez provém do desequilíbrio do circuito. Em relação à potência não-ativa instantânea, esta existe nas fases independentes e se anula quando avaliada em conjunto. É interessante observar que o valor de p_{na} na fase B é igual ao da soma das outras duas fases, o que remete à idéia de que se o método apresentado de decomposição das correntes fosse utilizado para fins de compensação, poder-se-ia usar os conceitos introduzidos por Akagi *et al.* (1984) de compensação sem necessidade de elementos armazenadores de energia. Destaca-se que, neste caso, não seriam necessárias transformações de eixos estacionários, mas poderiam ser utilizadas diretamente as variáveis de cada fase (a,b,c).

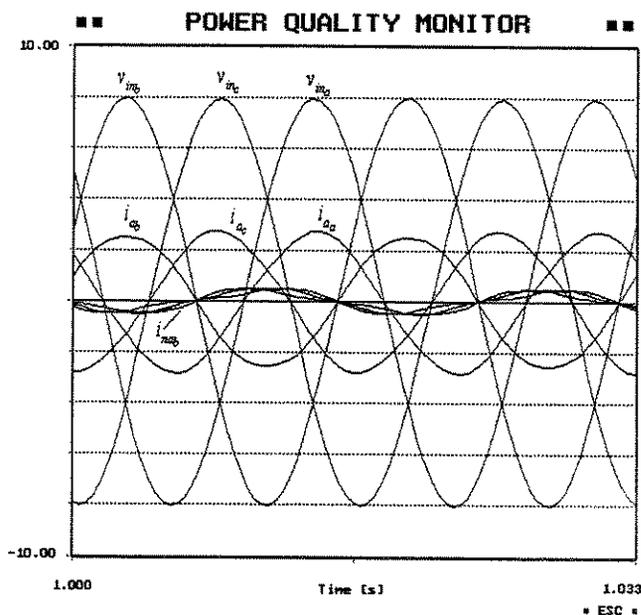
Na figura 5.8(b) observa-se que a componente de potência ativa é oscilatória e pode ser dividida em componentes proporcional (p_p) e ativa oscilatória (\tilde{p}_a), as quais representam o valor médio e a oscilação

de (p_a) . Lembrando que p_p é calculado pela corrente proporcional e não pela média de p_a .

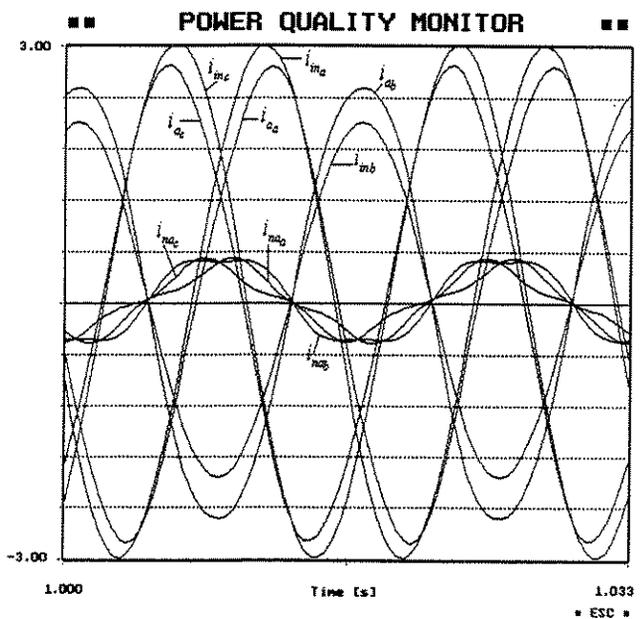
A figura 5.8(c) representa as potências unidirecional e bidirecional, onde a primeira é igual a p_{sc} e a segunda representa as oscilações de potência.



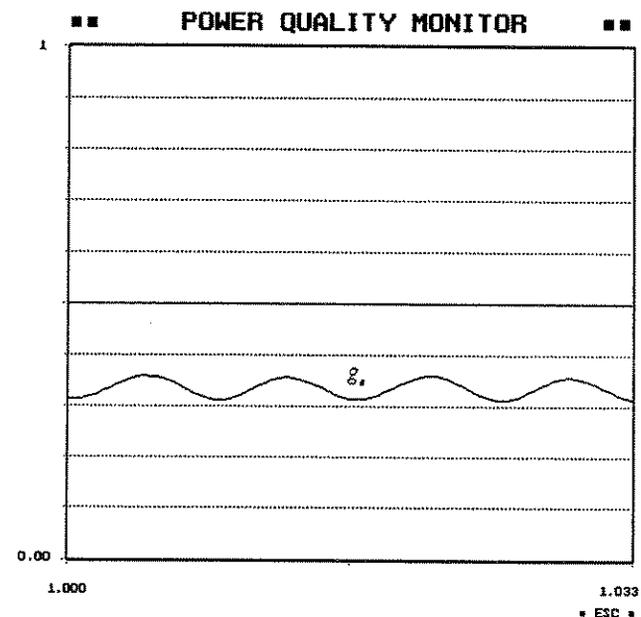
(a) Tensões e correntes de entrada



(b) Tensões de entrada e correntes ativa e não-ativa

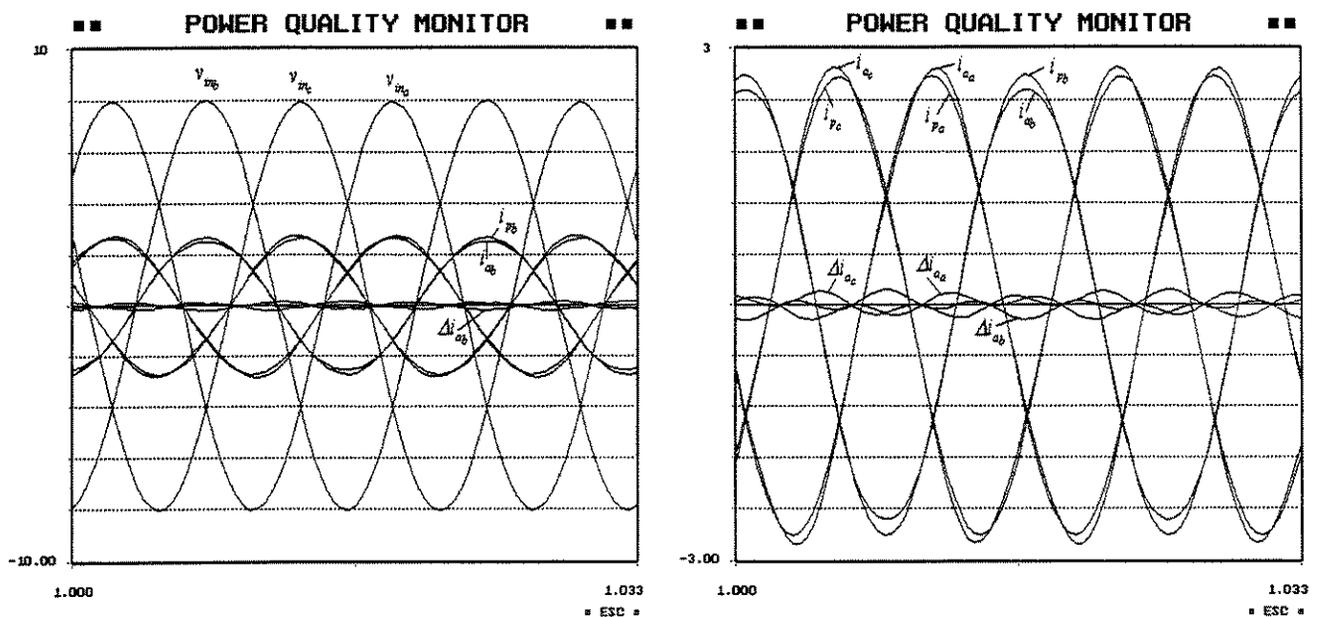


(c) Correntes de entrada, ativa e não-ativa



(d) Condutância equivalente

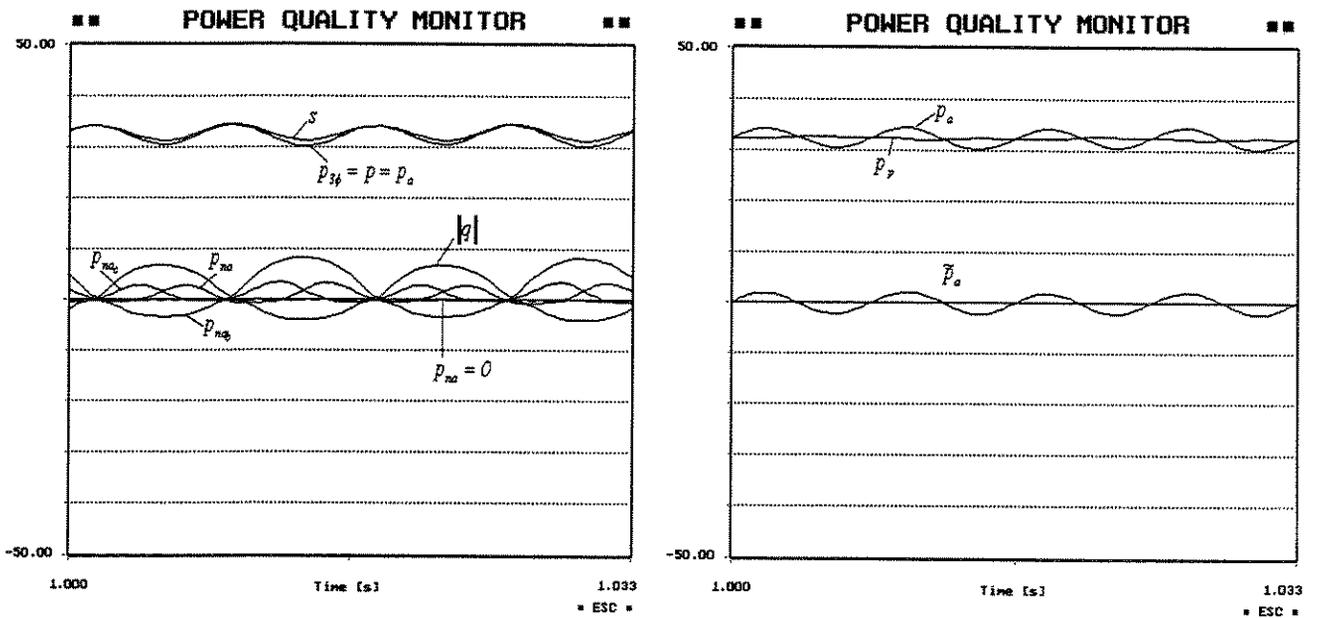
Figura 5.6: Tensões, parcelas de corrente e condutância - circuito resistivo assimétrico



(a) Tensões e correntes ativa, proporcional e oscilatória

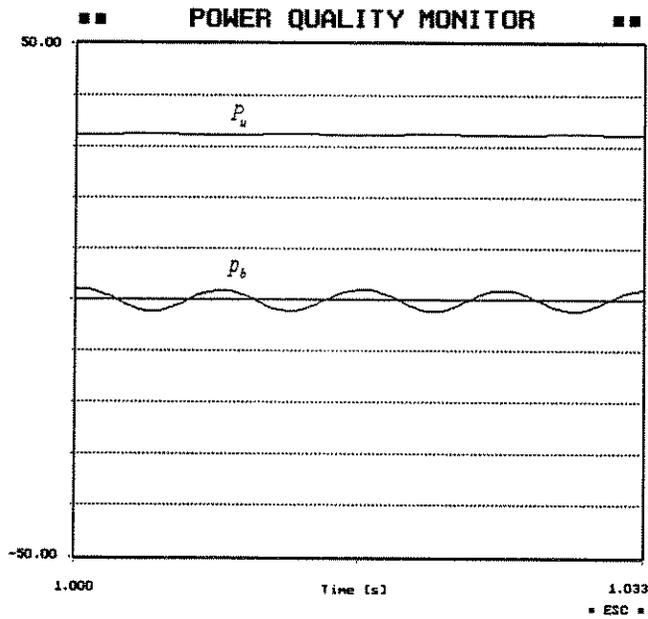
(b) Correntes ativa, proporcional e oscilatória - ampliadas

Figura 5.7: Decomposição da corrente ativa em proporcional e ativa oscilatória - circuito resistivo assimétrico



(a) Potências instantâneas trifásica, ativa, não-ativa, imaginária e aparente

(b) Potências ativa, proporcional e ativa oscilatória



(c) Potências unidirecional e bidirecional

Figura 5.8: Potências instantâneas - circuito resistivo assimétrico

Caso 2b - Circuito reativo desequilibrado

Neste caso os elementos do circuito tinham a configuração da tabela 5.5. As tensões eram iguais a dos casos anteriores, senoidais e equilibradas (tabela 5.2).

$R_{a_1} = R_{b_1} = R_{c_1} = 10,2k\Omega$
$R_{a_2} = R_{b_2} = R_{c_2} = 5,6k\Omega$
$R_n = 5,6k\Omega$
$C_a = C_b = 200nF$
$\Rightarrow C_c = 130nF \Leftarrow$

Tabela 5.5: Caso 2b - Circuito reativo desequilibrado (C_c)

A figura 5.9(a) permite observar que as correntes são adiantadas em relação às tensões e neste caso existe um desequilíbrio oriundo da fase C. Com as figuras 5.9(b) e 5.9(c) nota-se que as correntes de cada fase podem ser decompostas em parcelas ativas e não-ativas, as quais são ortogonais entre si. Notar que a parcela de corrente ativa cruza o eixo de valor zero nos mesmos pontos que a tensão, o que sub-entende-se pela proporcionalidade implícita a estes sinais.

O valor da condutância equivalente, como era de se esperar, é oscilatório e pode ser visto em 5.9(d).

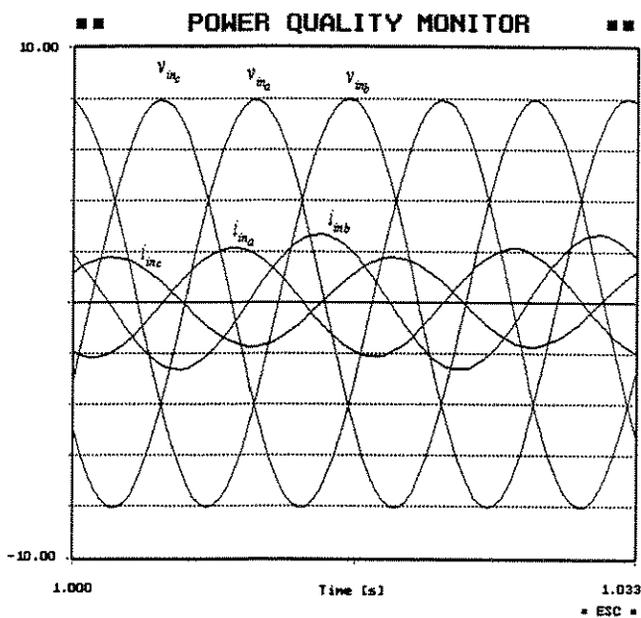
Assim como no caso anterior, através das figuras 5.10(a) e 5.10(b) pode-se observar que a corrente ativa instantânea pode ser dividida ainda em parcela proporcional (i_p) e ativa oscilatória (Δi_a). Sendo as parcelas proporcionais exatamente senoidais e equilibradas, uma vez que se originam de \bar{g}_e e das tensões equilibradas.

Com a figura 5.8(b) é possível constatar que a potência aparente instantânea é oscilatória e composta pelas potências ativa e imaginária, onde as oscilações tem sua origem no desequilíbrio do circuito reativo. A potência imaginária neste caso é devida não só ao desequilíbrio, mas também à parcela de corrente drenada pelos elementos reativos. Assim como no caso anterior, a potência não-ativa instantânea existe nas fases independentes e se anula quando avaliada em conjunto.

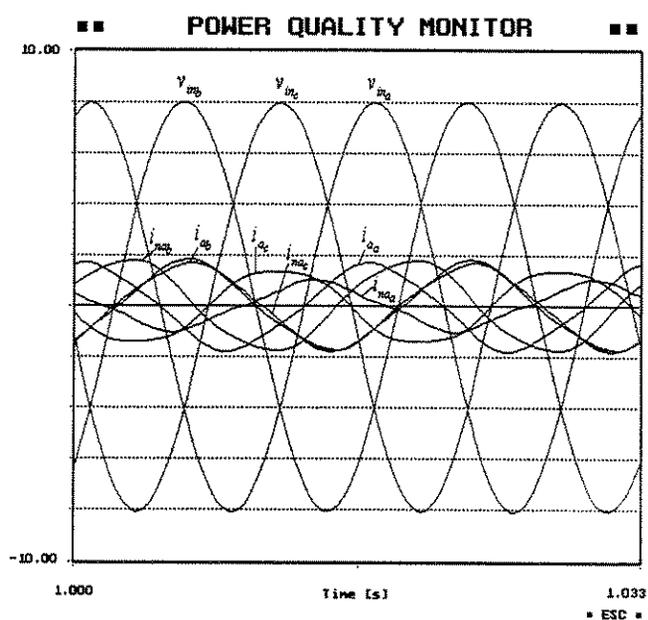
Na figura 5.11(b) observa-se que a componente de potência ativa é oscilatória e pode ser dividida novamente em componentes proporcional (p_p) e ativa oscilatória (\tilde{p}_a), as quais representam o valor médio e a oscilação de (p_a).

A figura 5.11(c) representa as potências unidirecional e bidirecional, sendo a primeira igual a p_{sc} e a segunda representa as oscilações de potência.

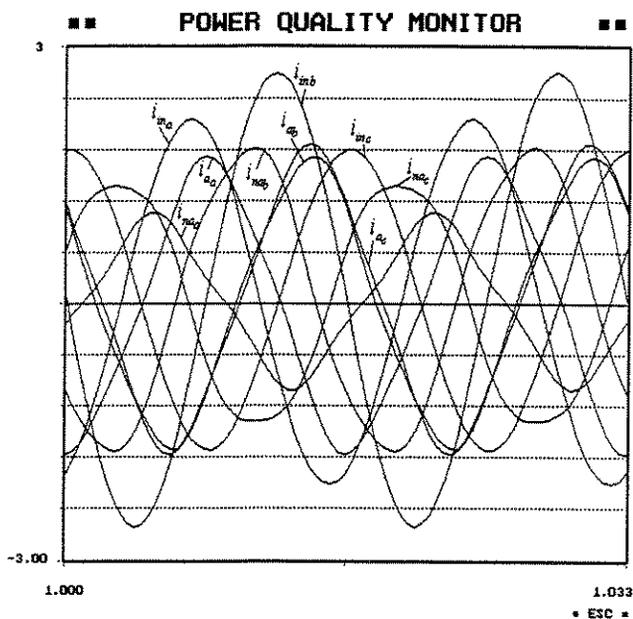
Na figura 5.11(d) estão indicados os valores do fator de potência e fator de potência da fundamental médios. Tais indicadores podem ser calculados instantaneamente, no entanto, se existirem transitórios nos sinais envolvidos, a análise destes indicadores torna-se mais complicada. A análise em torno de uma janela de média móvel, torna mais suave a interferência de tais transitórios no intervalo analisado.



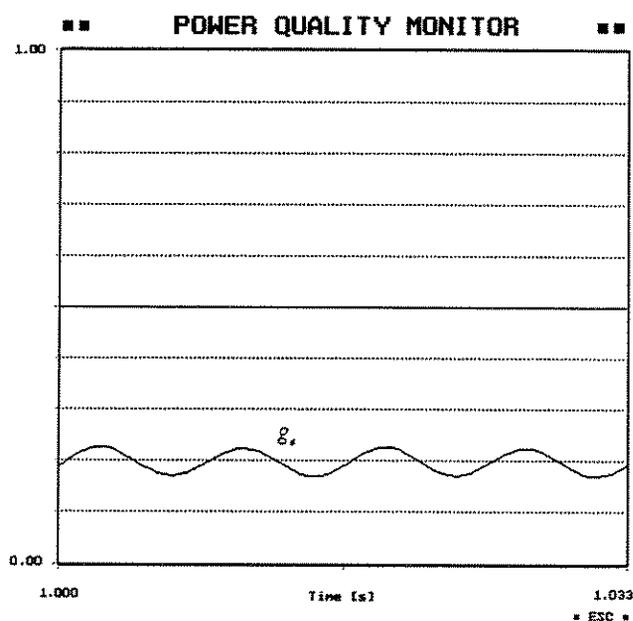
(a) Tensões e correntes de entrada



(b) Tensões de entrada e correntes ativa e não-ativa

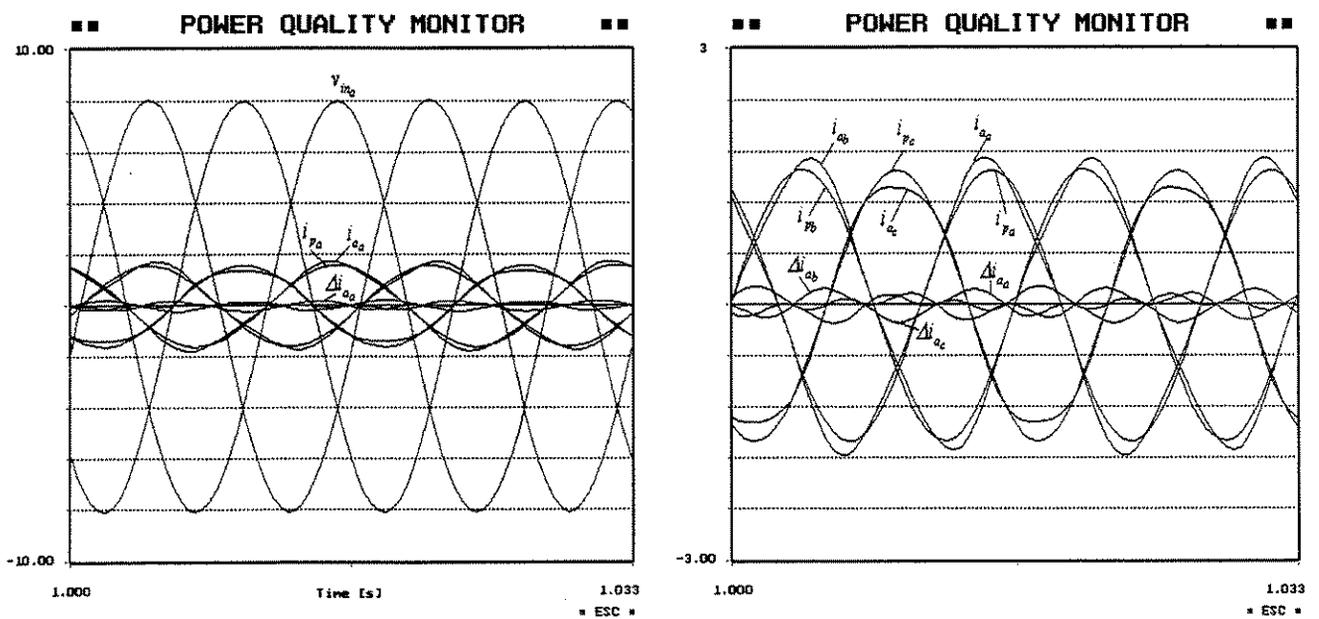


(c) Correntes de entrada, ativa e não-ativa



(d) Condutância equivalente

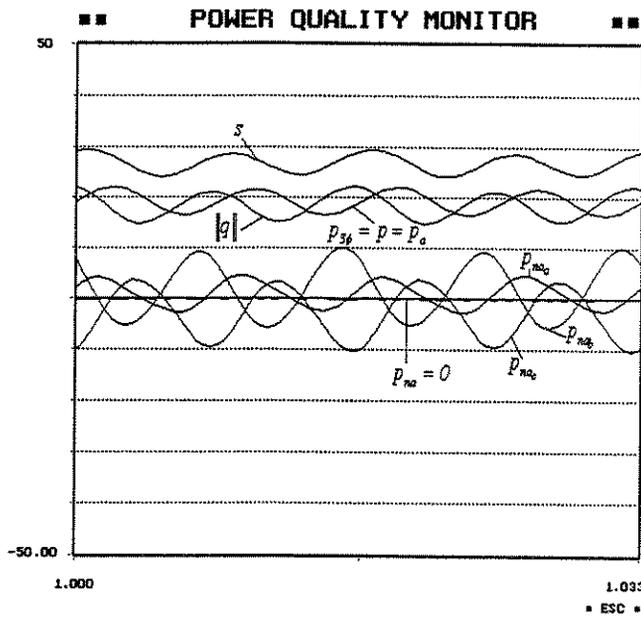
Figura 5.9: Tensões e parcelas de corrente e condutância - circuito reativo assimétrico



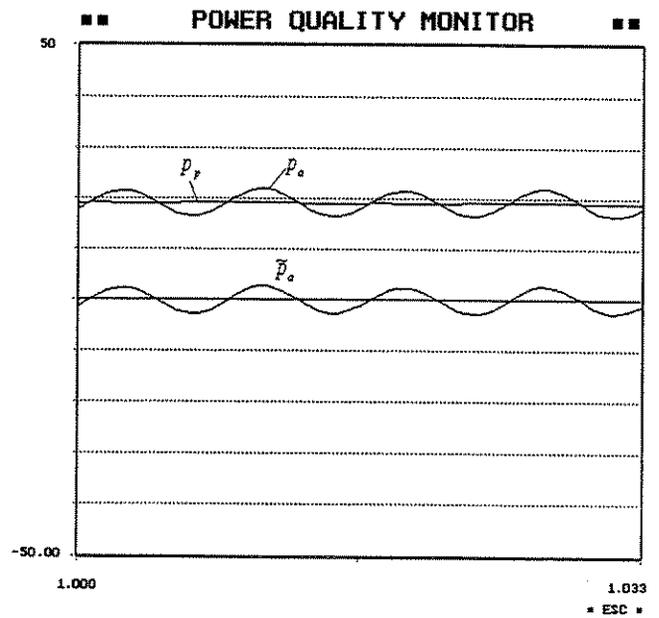
(a) Tensões e correntes ativa, proporcional e ativa oscilatória

(b) Correntes ativa, proporcional e oscilatória - ampliadas

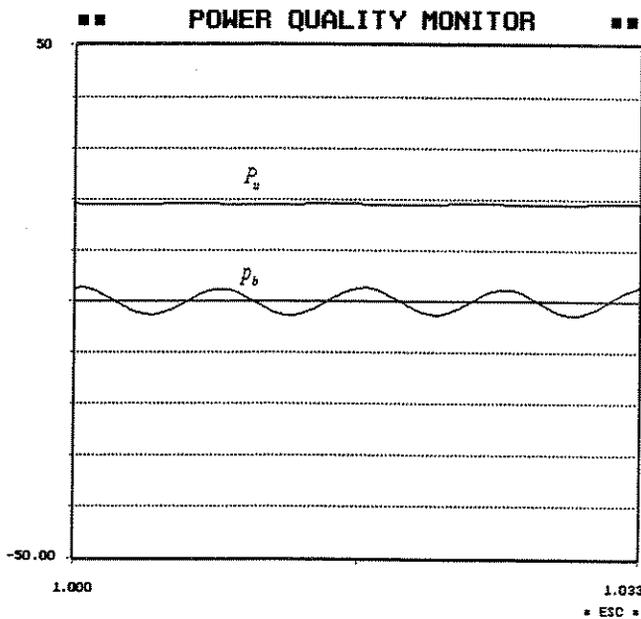
Figura 5.10: Decomposição da corrente ativa em proporcional e ativa oscilatória - circuito reativo assimétrico



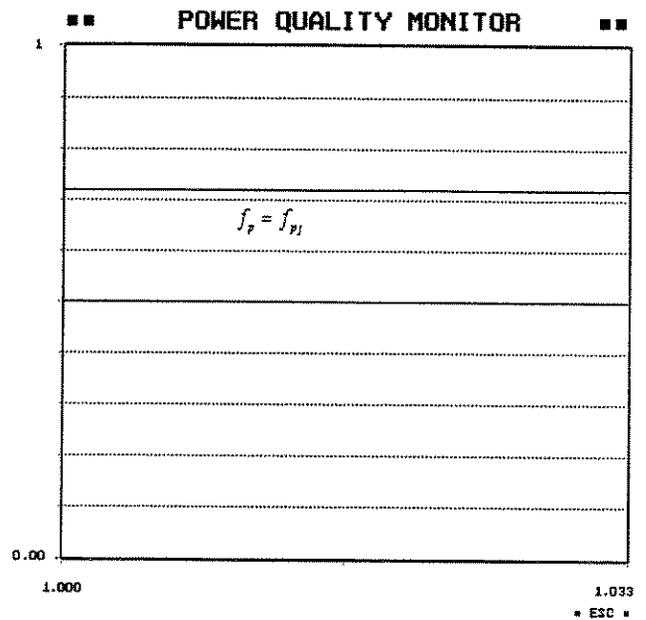
(a) Potências instantâneas total, ativa, não-ativa, imaginária e aparente



(b) Potências ativa, proporcional e ativa oscilatória



(c) Potências unidirecional e bidirecional



(d) Fator de potência e fator de potência fundamental médios

Figura 5.11: Potências instantâneas e fatores - circuito reativo assimétrico

5.1.3 Caso 03 - Sistemas com tensão não-senoidal

Neste caso foram feitos experimentos com circuitos resistivos e reativos, equilibrados ou não, mas sempre com tensões de alimentação não-senoidais (presença de 5^o harmônica), as quais também poderiam estar desequilibradas em amplitude. Desta maneira espera-se demonstrar a validade das decomposições inclusive com formas de onda distorcidas.

Caso 3a - Circuito resistivo equilibrado com tensões harmônicas equilibradas

No primeiro experimento foi utilizado um circuito como o da tabela 5.1 e os sinais de tensão impostos sobre o mesmo estão indicados na tabela 5.6.

Gerador de Sinais Programável	
Fase A	$v = 8\text{sen}(\omega t) + 0,4\text{sen}(5\omega t)$ [V]
Fase B	$v = 8\text{sen}(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + 0,4\text{sen}(5\omega t - \frac{10\pi}{3})$ [V]
Fase C	$v = 8\text{sen}(\omega t - \frac{4\pi}{3}) + 0,4\text{sen}(5\omega t - \frac{20\pi}{3})$ [V]

Tabela 5.6: Tensões distorcidas equilibradas (*fundamental + 5^o harmônica*)

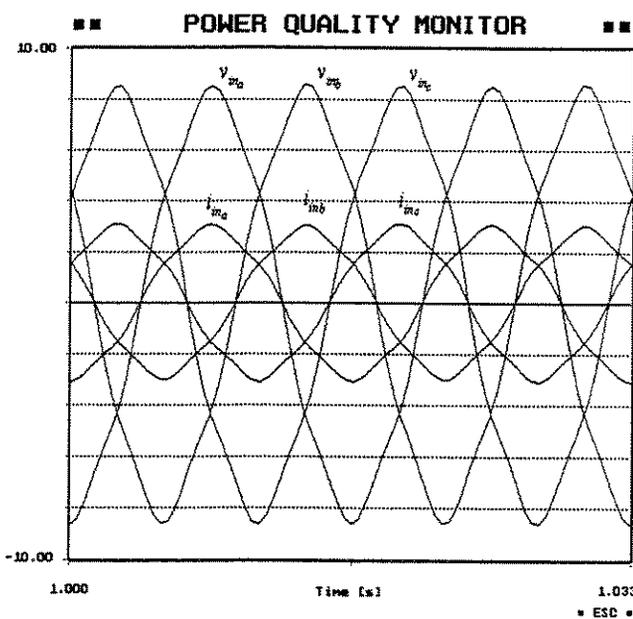
Na figura 5.12(a) pode-se observar que se trata de um circuito resistivo equilibrado, alimentado por tensões distorcidas. As correntes são exatamente proporcionais às tensões.

Através do algoritmo de separação da onda fundamental do resíduo (figura 2.7), pode-se observar as ondas de tensão e corrente fundamentais (60Hz) na figura 5.12(b) e os sinais residuais na figura 5.12(c), os quais não são visualizados como senoides perfeitas em virtude do processamento utilizado no MDQE. Notar que tanto na frequência fundamental como na residual, as tensões e correntes estão em fase (carga resistiva). É importante observar na figura 5.12(d), onde estão sobrepostos os sinais da tensão original, fundamental e residual, que esta decomposição não altera nem a amplitude nem a fase dos sinais envolvidos.

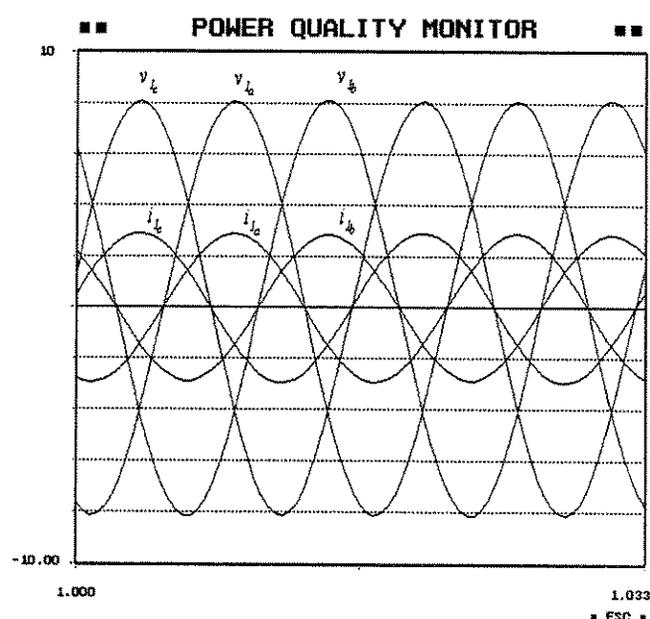
As figuras 5.13(a) e 5.13(b) mostram que a corrente não-ativa neste caso é nula, uma vez que trata-se de um circuito resistivo, alimentado por tensões simétricas. A parcela de corrente ativa, por sua vez, é proporcional às tensões.

Na figura 5.13(c) observa-se que a parcela de corrente proporcional fundamental é igual a toda corrente ativa fundamental, uma vez que a parcela oscilatória é nula (circuito simétrico).

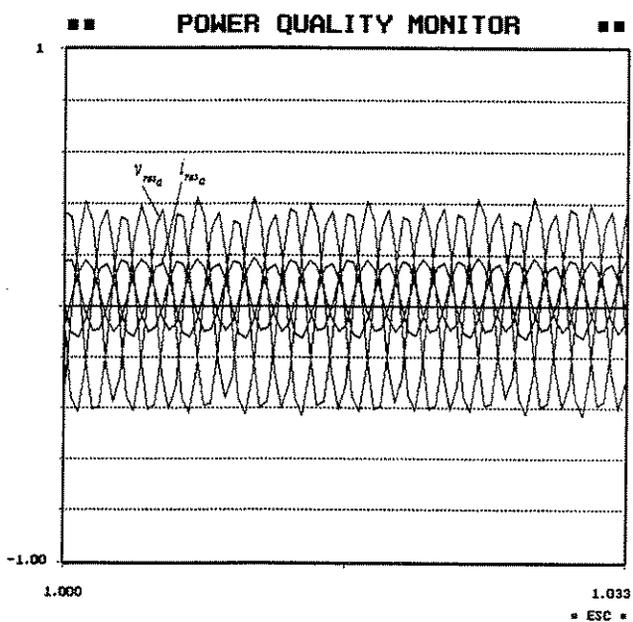
Até mesmo os sinais residuais de corrente podem ser decompostos em parcela de corrente proporcional e oscilatória, sendo que a segunda é nula (figura 5.13(d)).



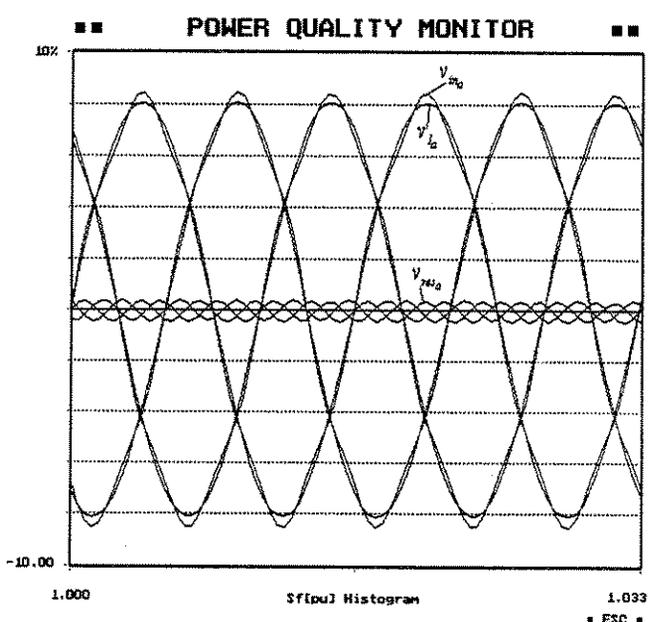
(a) Tensões e correntes de entrada



(b) Tensões e correntes fundamentais

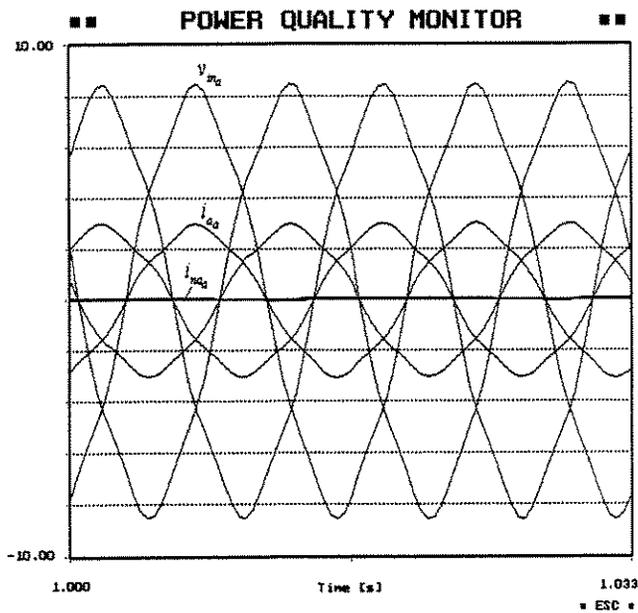


(c) Tensões e correntes residuais

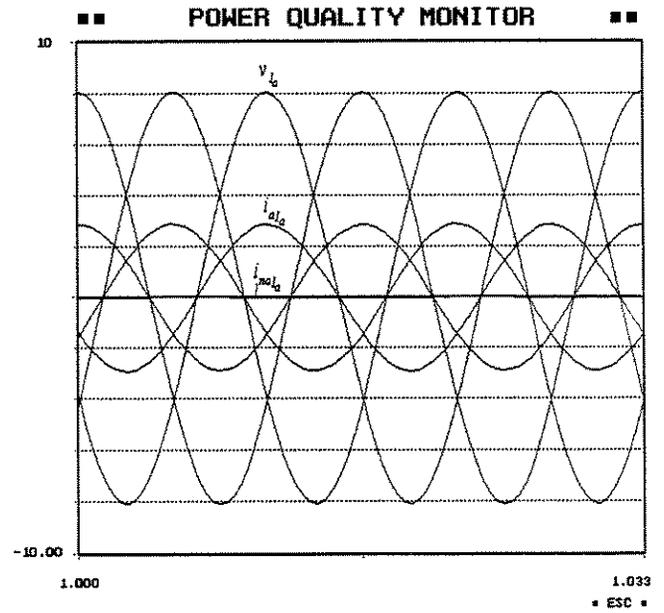


(d) Tensões de entrada, fundamentais e residuais

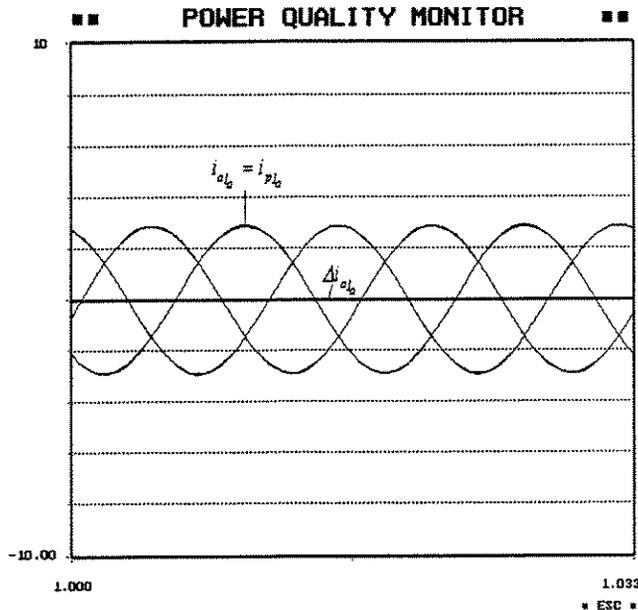
Figura 5.12: Tensões e correntes de entrada, fundamental e residual - circuito resistivo simétrico e tensão distorcida equilibrada



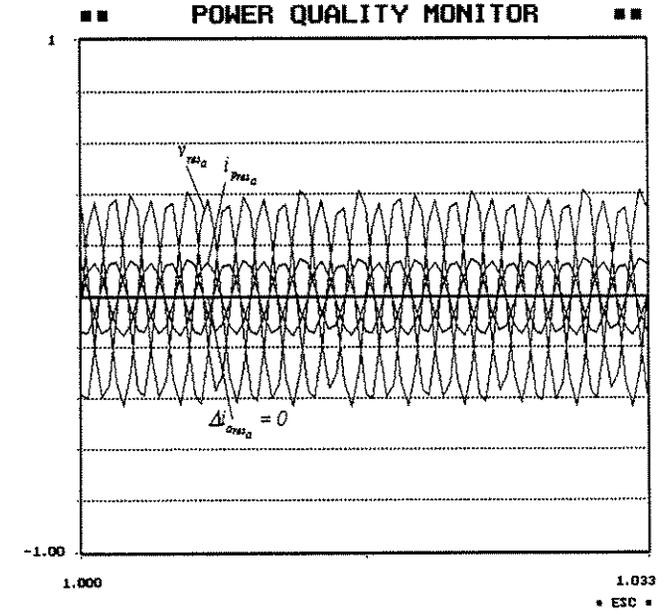
(a) Tensões e correntes ativa e não-ativa



(b) Tensões e correntes ativa e não-ativa fundamentais



(c) Correntes ativa, proporcional e ativa oscilatória fundamentais



(d) Tensões e correntes proporcional e ativa oscilatória residuais

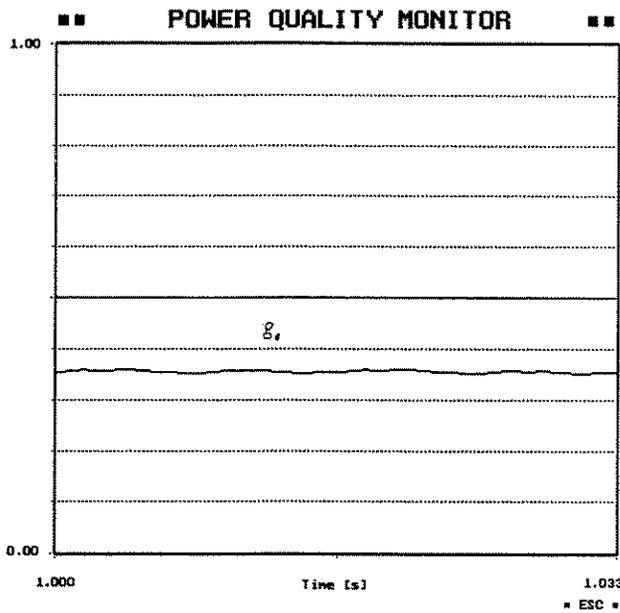
Figura 5.13: Correntes decompostas - circuito resistivo simétrico e tensão distorcida equilibrada

Em se tratando de um sistema simétrico, o valor de g_e é constante, como visto na figura 5.14(a). O valor das potências aparente e ativa instantânea neste caso, é praticamente o mesmo e é oscilatório devido à presença de harmônicos (cruzamento de frequências). Pode-se observar pelas figuras 5.14(b) e 5.14(c) que a potência imaginária possui um pequeno valor oscilatório próximo de zero, este valor é devido a possíveis imperfeições do sistema no momento da análise. No entanto é interessante observar que mesmo em se tratando de imperfeições (ruídos), as potências não-ativas de cada fase possuem valor oscilatório em torno do zero e se cancelam no conjunto trifásico. Notar que para esta última análise foi feita uma ampliação considerável na escala de impressão do MDQE.

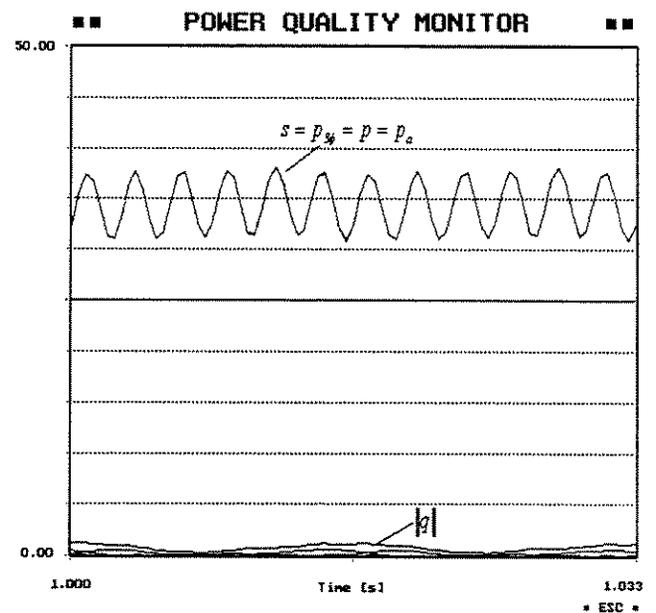
A figura 5.14(d) indica os valores constantes da potência aparente, ativa e imaginária fundamentais. Tais componentes são constantes, dado que o circuito é equilibrado e no cálculo destas existe uma única frequência envolvida.

Na figura 5.15(a) observa-se que a componente de potência proporcional é igual a componente de potência ativa total, uma vez que a parcela oscilatória é nula (circuito simétrico). As oscilações em p_p são devidas ao cruzamento de frequências e não a desequilíbrios. A figura 5.15(b) é uma ampliação de \tilde{p}_{na} e a oscilação existente pode ser considerada como desprezível, dado o fator de ampliação utilizado para sua visualização. A figura 5.15(c) mostra que, se a análise for sobre os sinais fundamentais, as componentes de potência ativa e proporcional são iguais e constantes, dado que referem-se a uma só frequência.

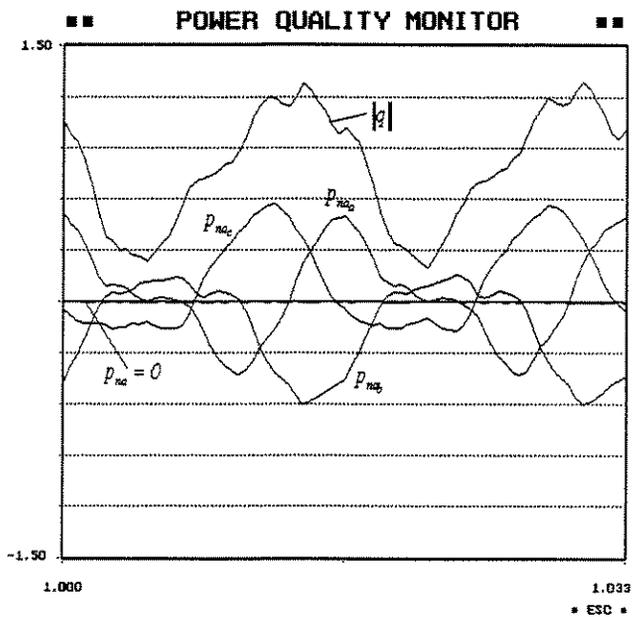
A figura 5.16(a) mostra que a componente de potência ativa cruzada (produto de frequências distintas) possui uma oscilação considerável, a qual é responsável pela oscilação da potência ativa nas figuras 5.14(b) e 5.15(a). Na figura 5.16(b) observa-se que as componentes de potência ativa e proporcional residuais são iguais (circuito simétrico) e possuem valor médio pequeno, mas diferente de zero. Esta última conclusão é importante, pois dependendo do conteúdo harmônico e do nível de potência envolvido, estas componentes de potência representam fluxo médio de potências harmônicas em valores que podem atingir 5% de p_{p1} (Emanuel 1998). As linhas verticais da figura 5.16(b) devem ser desprezadas para esta análise.



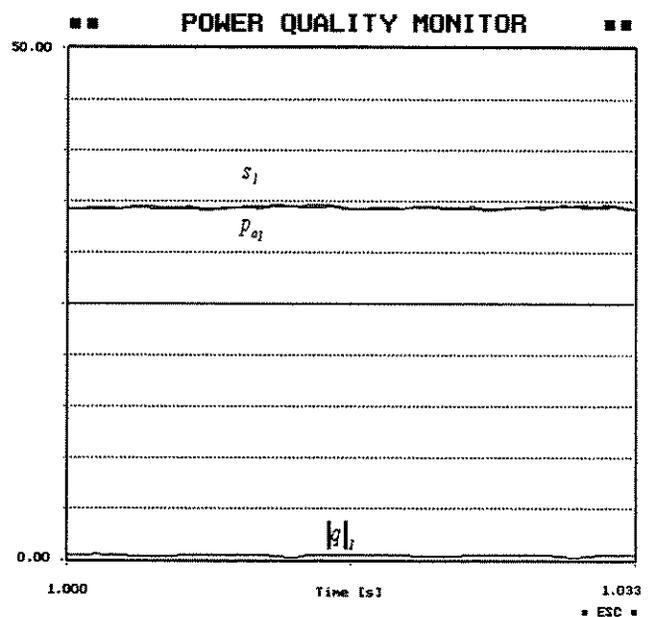
(a) Condutância equivalente



(b) Potências instantâneas total, ativa, não-ativa, imaginária e aparente

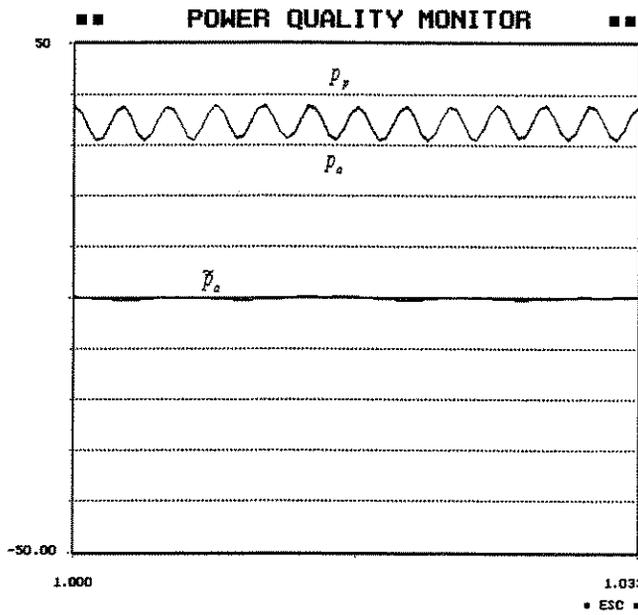


(c) Potências não-ativa total, não-ativa por fase e imaginária - ampliadas

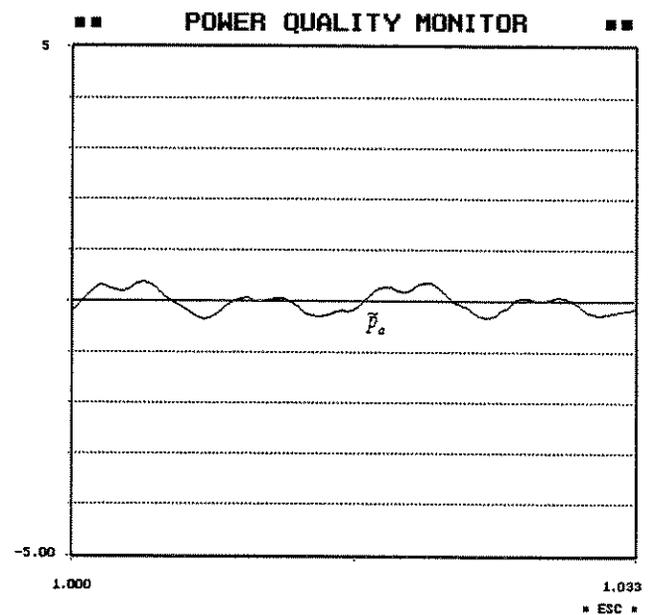


(d) Potências ativa, imaginária e aparente fundamentais

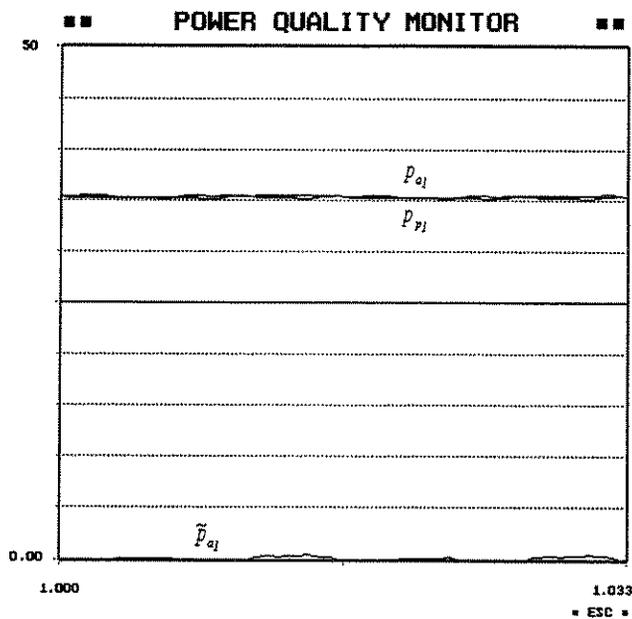
Figura 5.14: Condutância e potências instantâneas - circuito resistivo simétrico e tensão distorcida equilibrada



(a) Potências ativa, proporcional e ativa oscilatória

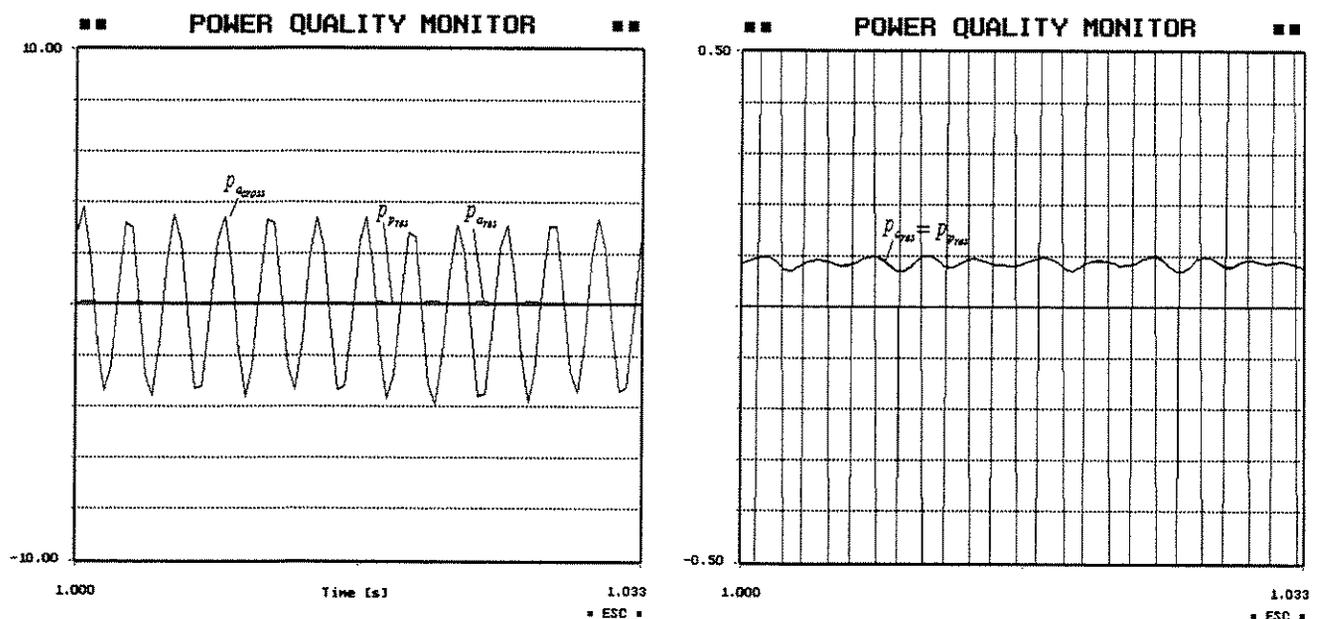


(b) Potência ativa oscilatória - ampliada



(c) Potências ativa, proporcional e ativa oscilatória fundamentais

Figura 5.15: Componentes da potência ativa originais e fundamentais - circuito resistivo simétrico e tensão distorcida equilibrada



(a) Potências residuais ativa, proporcional e ativa cruzada

(b) Potências residuais ativa e proporcional - ampliadas

Figura 5.16: Componentes de potência residual - circuito resistivo simétrico e tensão distorcida equilibrada

Caso 3b - Circuito reativo equilibrado com tensões harmônicas equilibradas

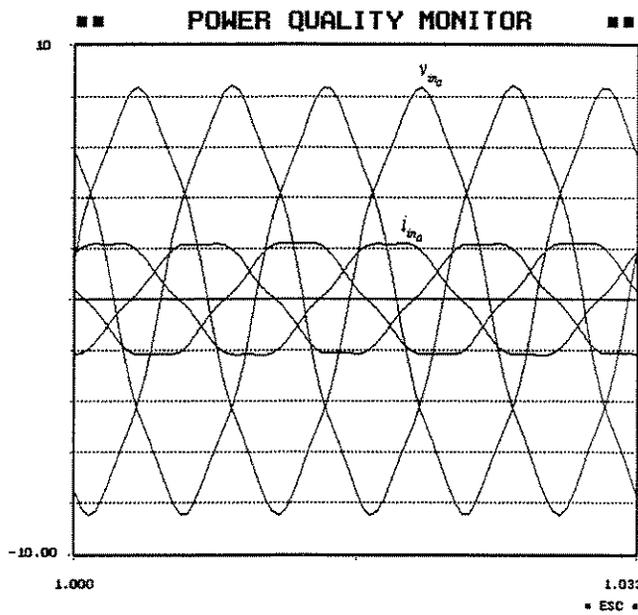
Neste experimento o circuito usado era igual ao da tabela 5.3 e os sinais de tensão eram iguais ao caso anterior, indicados pela tabela 5.6.

A figura 5.17(a) é bastante interessante porque mostra que neste sistema, onde as tensões distorcidas contendo 5% de 5^o harmônica são aplicadas a um circuito com característica RC, as correntes possuem forma de onda não-senoidais, mas diferente das tensões. Isto ocorre porque a presença do capacitor altera as fases dos sinais distorcidos (fundamental + 5^oharmônica), alterando a forma de onda da corrente, o que representa uma não-linearidade entre tensões e correntes.

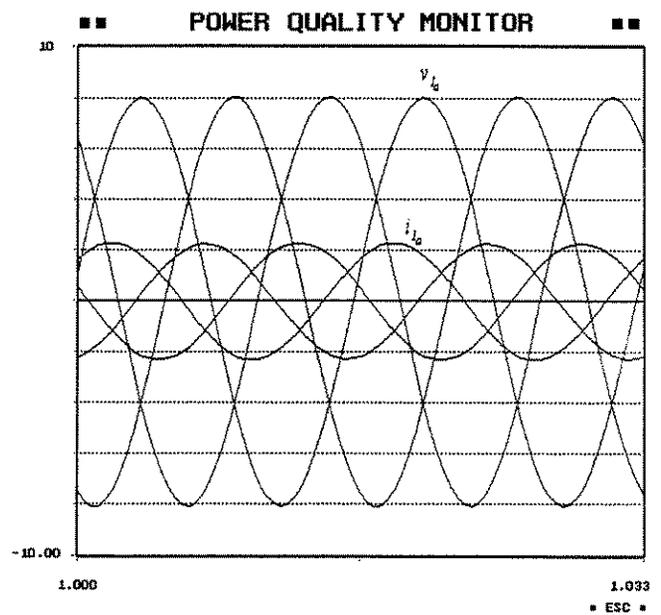
Na figura 5.17(b) pode-se observar que as ondas fundamentais de tensão e corrente são simétricas e a corrente está adiantada em relação à tensão. Observando os sinais residuais da figura 5.17(c) pode-se notar que a defasagem entre tensões e correntes ocorre inclusive no resíduo.

Pelas figuras 5.18(a) e 5.18(b) observa-se que a corrente pode ser decomposta em parcelas ativa e não-ativa, as quais não reproduzem a forma de onda da tensão devido à não-linearidade existente. Notar que i_a cruza o zero nos mesmos pontos que a tensão.

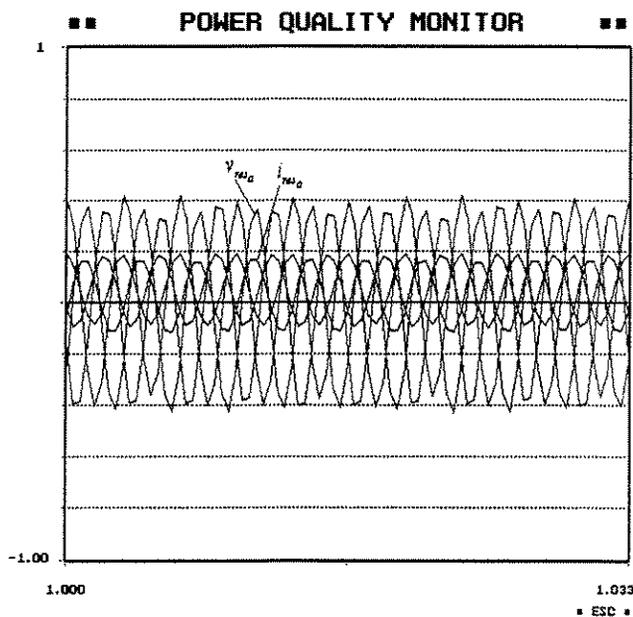
A figura 5.19(a), por sua vez, mostra as parcelas de corrente ativa e não-ativa fundamentais, as quais também não tem a mesma forma de onda da tensão. Quando a corrente ativa fundamental é decomposta em parcela proporcional fundamental (i_{p1}) e parcela oscilatória fundamental (Δi_{a1}), é possível perceber que a componente i_{p1} é senoidal, uma vez que é baseada em \bar{g}_e e nas tensões fundamentais equilibradas (5.19(b)). A figura 5.19(c) indica que é possível decompor a corrente residual em parcelas proporcionais e oscilatórias.



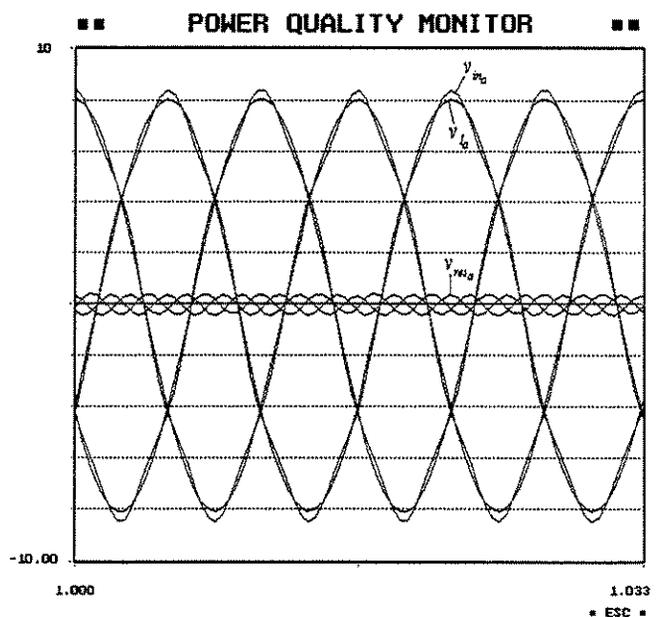
(a) Tensões e correntes de entrada



(b) Tensões e correntes fundamentais

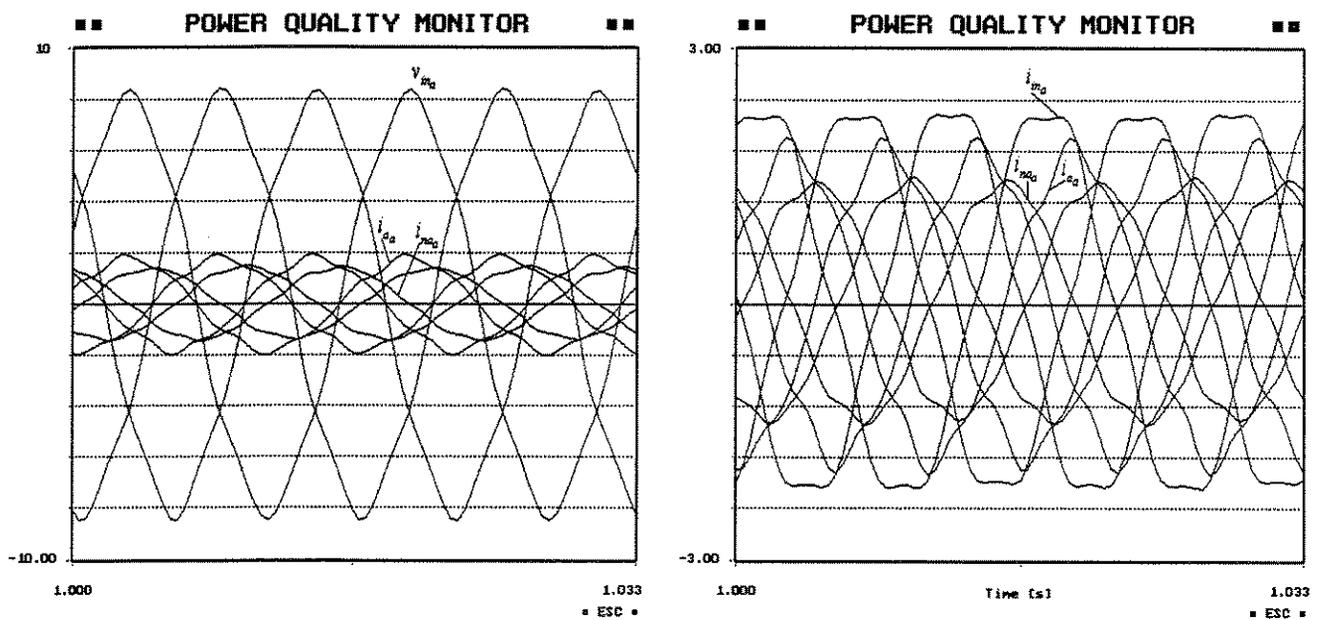


(c) Tensões e correntes residuais



(d) Tensões de entrada, fundamentais e residuais

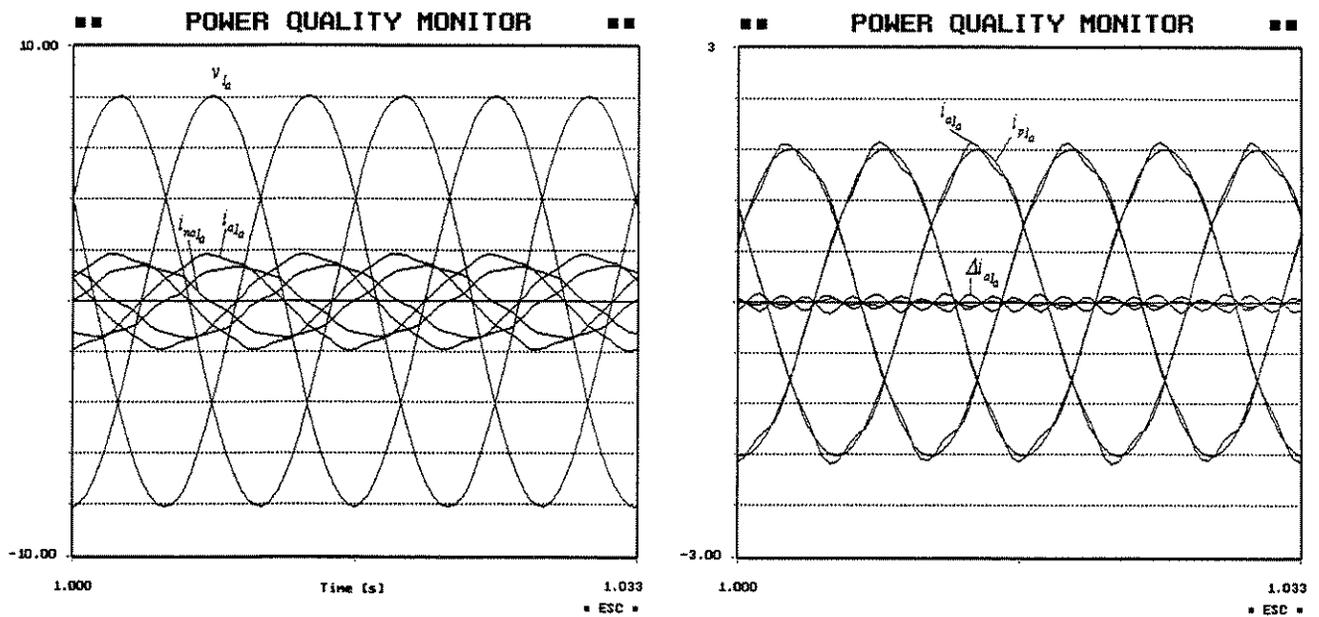
Figura 5.17: Tensão e corrente de entrada, fundamental e residual - circuito reativo simétrico e tensões distorcidas equilibradas



(a) Tensões e correntes de entrada, ativa e não-ativa

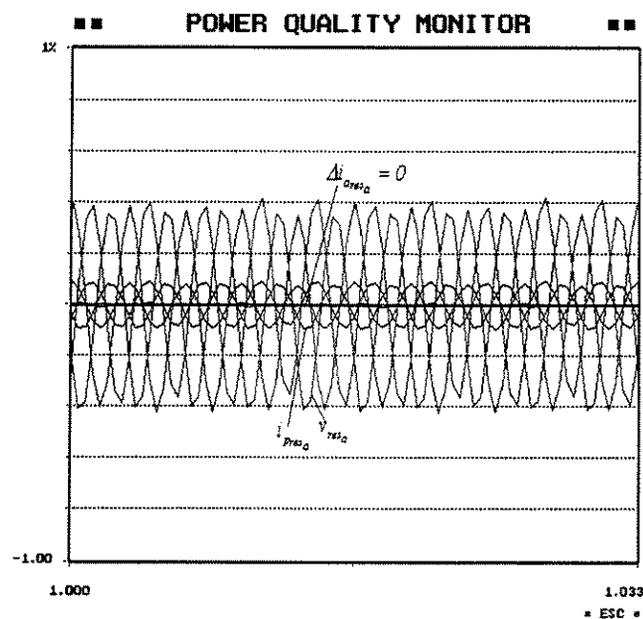
(b) Correntes de entrada, ativa e não-ativa - ampliadas

Figura 5.18: Parcelas de corrente ativa e não-ativa - circuito reativo simétrico e tensões distorcidas equilibradas



(a) Tensões e correntes ativa e não-ativa fundamentais

(b) Correntes ativa, proporcional e ativa oscilatória fundamentais



(c) Tensões e correntes proporcional e ativa oscilatória residuais

Figura 5.19: Correntes decompostas - circuito reativo simétrico e tensões distorcidas equilibradas

A figura 5.20(a) mostra que a potência aparente instantânea é oscilatória e composta pelas potências ativa e imaginária, onde esta última provém do circuito reativo e da não-linearidade existente. As potências não-ativas por fase são equilibradas e se anulam quando em conjunto.

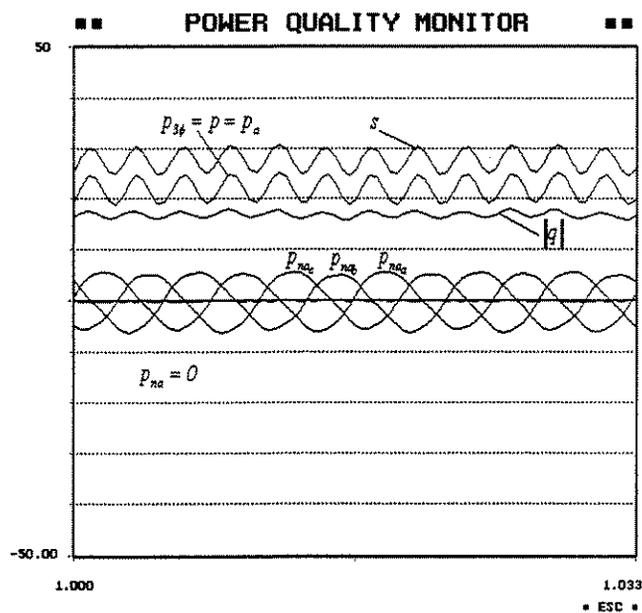
A figura 5.20(b) indica que a potência ativa é composta por componentes proporcional e oscilatória, uma vez que existem tais parcelas de corrente.

A figura 5.20(c) mostra que as potências aparente e imaginária fundamentais possuem valores constantes, uma vez que tem suas origens no circuito reativo equilibrado e nas tensões fundamentais simétricas. A potência ativa fundamental, por sua vez, é oscilatória pois tem sua origem nas tensões fundamentais e na condutância equivalente, a qual é oscilatória devido às não-linearidades.

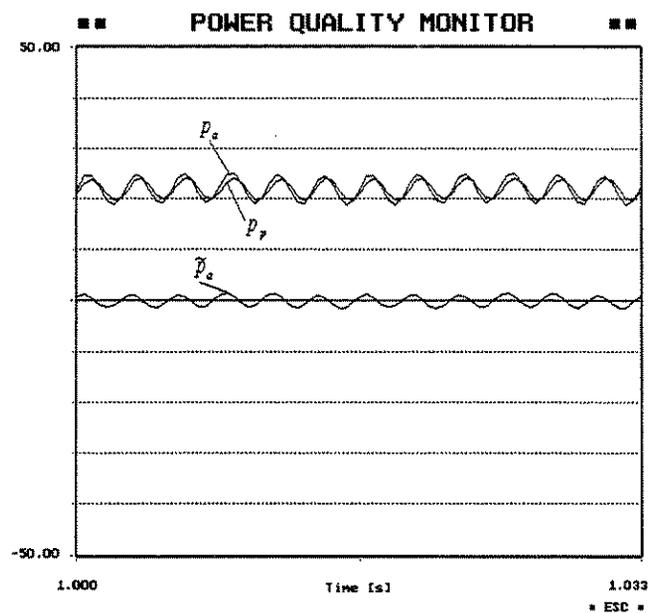
A figura 5.20(d) mostra que a potência ativa fundamental pode ser decomposta em componentes proporcional e oscilatória fundamental. A parcela proporcional tem origem em \bar{g}_e e nas tensões fundamentais, por isso seu valor constante.

Na figura 5.21(a) pode ser observada a componente de potência ativa cruzada residual, a qual é formada pelo cruzamento de sinais com frequências distintas. Pela figura 5.21(b) pode-se notar que as parcelas ativa e proporcional residuais são praticamente iguais e novamente possuem um valor médio não nulo.

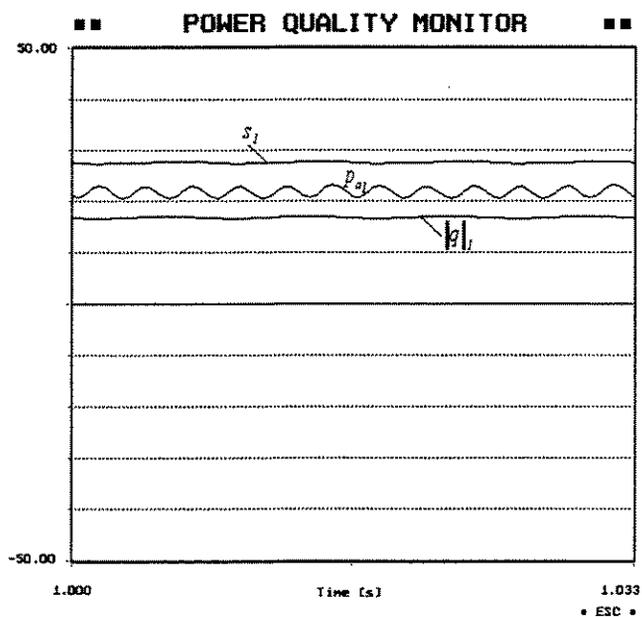
A figura 5.22(a) permite observar as potências unidirecional e bidirecional, enquanto na figura 5.22(b) estão indicados os valores do fator de potência e do fator de potência fundamental médios. Pode-se notar que o valor de f_p é menor do que f_{p1} , dada a presença de harmônicos.



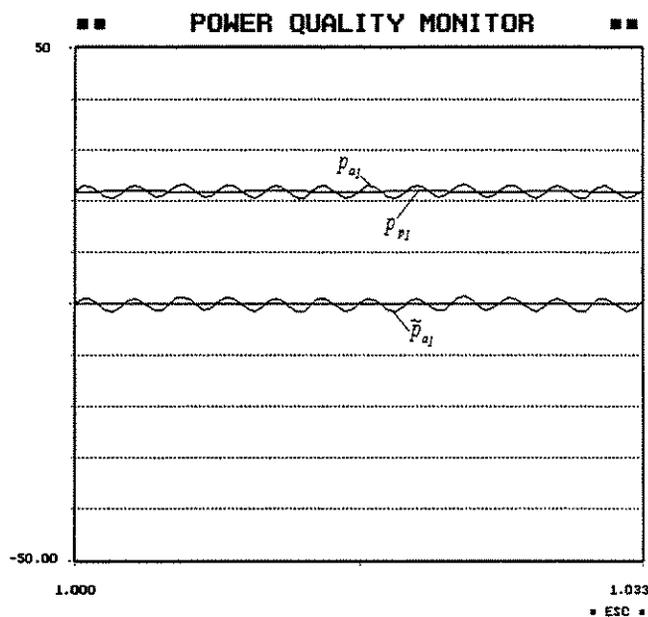
(a) Potências instantâneas total, ativa, não-ativa, imaginária e aparente



(b) Potências ativa, proporcional e ativa oscilatória

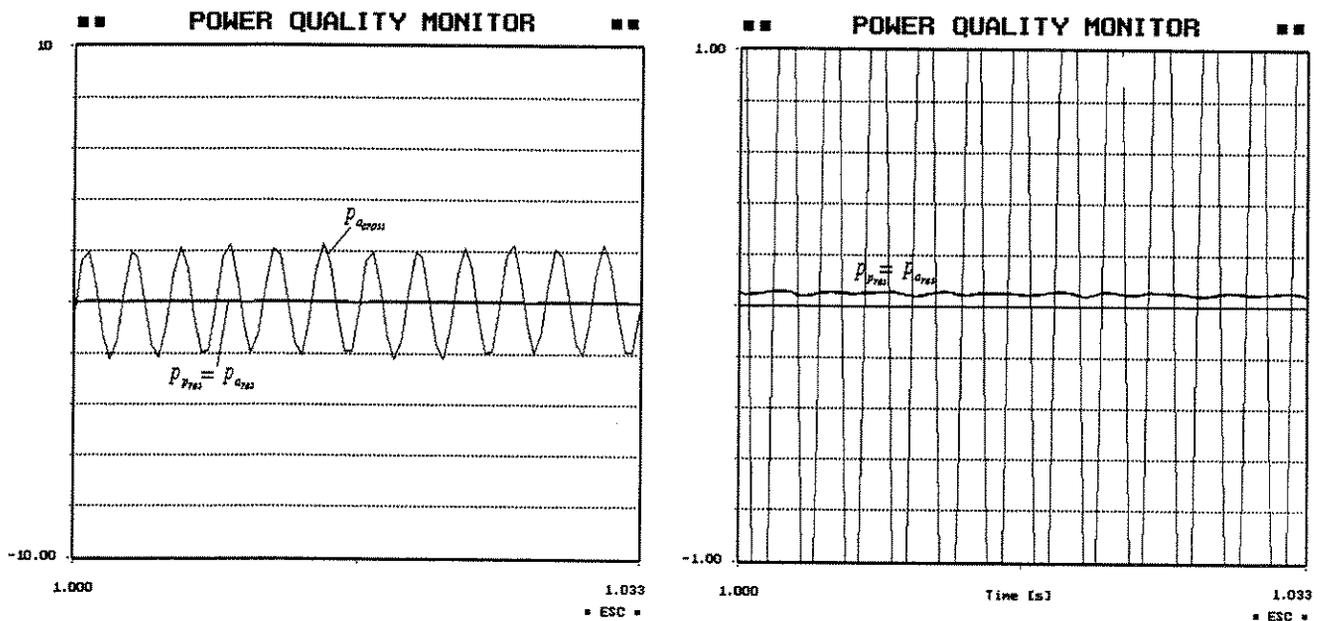


(c) Potências ativa, imaginária e aparente fundamentais



(d) Potências ativa, proporcional e ativa oscilatória fundamentais

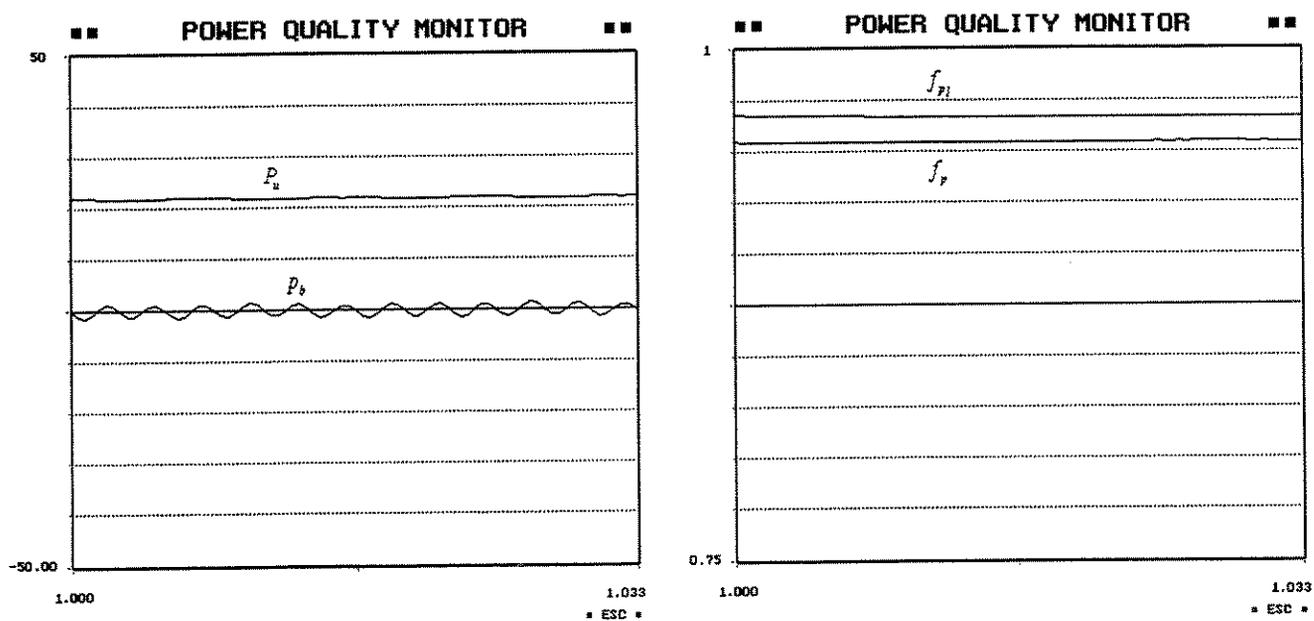
Figura 5.20: Potências instantâneas - circuito reativo simétrico e tensões distorcidas equilibradas



(a) Potências ativa, proporcional e ativa cruzada residuais

(b) Potências ativa e proporcional residuais - ampliadas

Figura 5.21: Potências instantâneas - circuito reativo simétrico e tensões distorcidas equilibradas



(a) Potências unidirecional e bidirecional

(b) Fator de potência e fator de potência fundamental médios

Figura 5.22: Potências instantâneas - circuito resistivo simétrico e tensões distorcidas equilibradas

Caso 3c - Circuito reativo desequilibrado com tensões harmônicas desequilibradas

Neste caso o circuito utilizado tinha sua parcela reativa desequilibrada como mostra a tabela 5.5. As tensões aplicadas sobre este circuito também eram desequilibradas e estão indicados na tabela 5.7. É importante notar que as parcelas fundamentais das tensões eram equilibradas.

Gerador de Sinais Programável	
Fase A	$v = 8\text{sen}(\omega t) + 0, 4\text{sen}(5\omega t)$ [V]
Fase B	$v = 8\text{sen}(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + 0, 16\text{sen}(5\omega t - \frac{10\pi}{3})$ [V]
Fase C	$v = 8\text{sen}(\omega t - \frac{4\pi}{3}) + 0, 4\text{sen}(5\omega t - \frac{20\pi}{3})$ [V]

Tabela 5.7: Tensões distorcidas desequilibradas (*Fase B*)

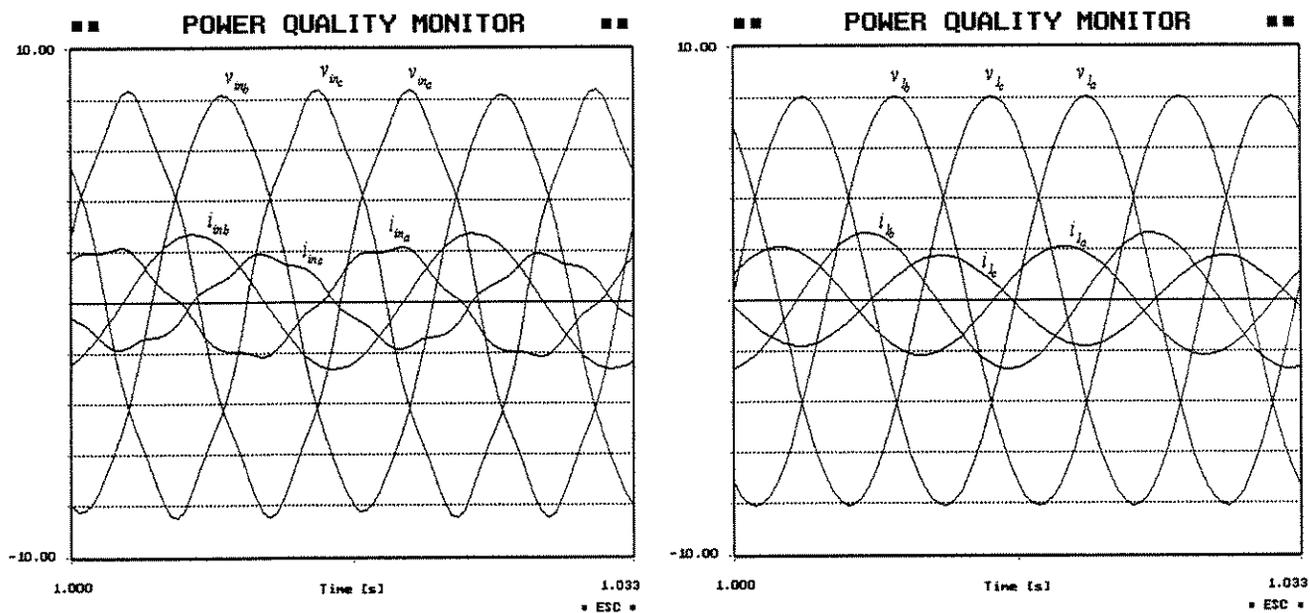
A figura 5.23(a) mostra que as tensões e correntes de entrada, sendo possível observar que existe uma diferença nas formas de onda da tensão (fase B) e pela figura 5.23(b) pode-se notar que também havia uma assimetria entre as fases do circuito RC (fase C). Este é um caso em que as condições do sistema estão bem distantes das ideais.

As tensões e correntes residuais podem ser visualizadas na figura 5.23(c).

Através das figuras 5.24(a) e 5.24(b) pode-se observar que a corrente é composta de parcela ativa e não-ativa, sendo que a primeira sempre cruza o zero nos mesmos pontos que a tensão.

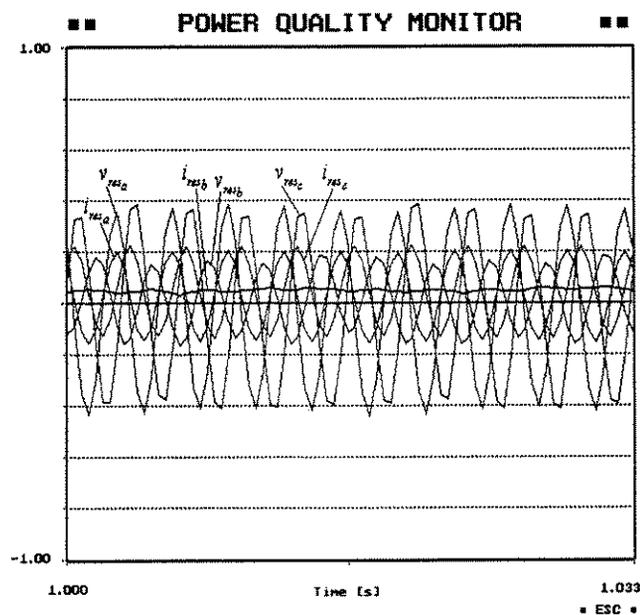
A figura 5.24(c) mostra que mesmo a corrente fundamental pode ser decomposta em parcelas ativa e não-ativa fundamentais. A corrente ativa fundamental (i_{a_1}) pode ser dividida ainda em parcelas proporcional e ativa oscilatória fundamentais 5.24(d). A parcela (i_{p_1}) é senoidal e equilibrada, como discutido anteriormente.

Neste caso as assimetrias e não-linearidades são tantas que pode-se notar na figura 5.25(a) que até mesmo a parcela de corrente ativa residual, pode ser dividida em parcelas proporcional e ativa oscilatória residuais.



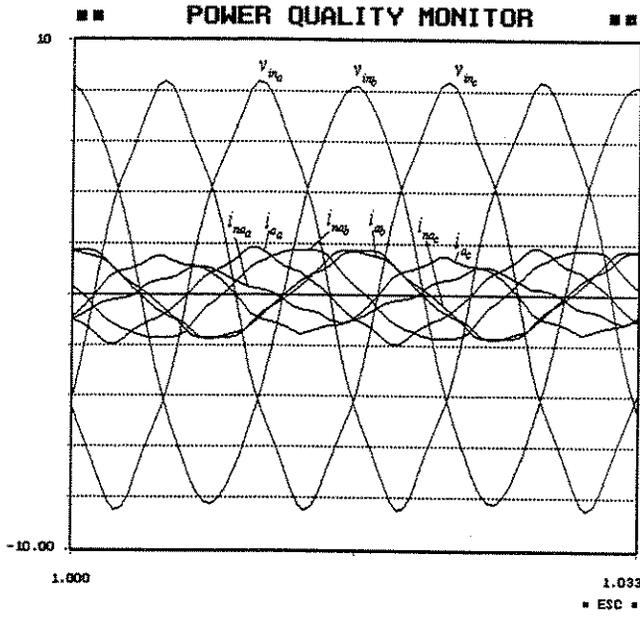
(a) Tensões e correntes de entrada

(b) Tensões e correntes fundamentais

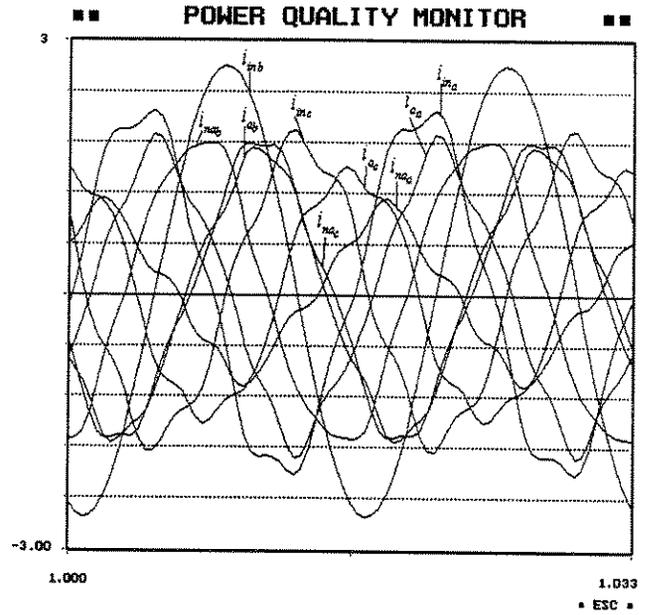


(c) Tensões e correntes residuais

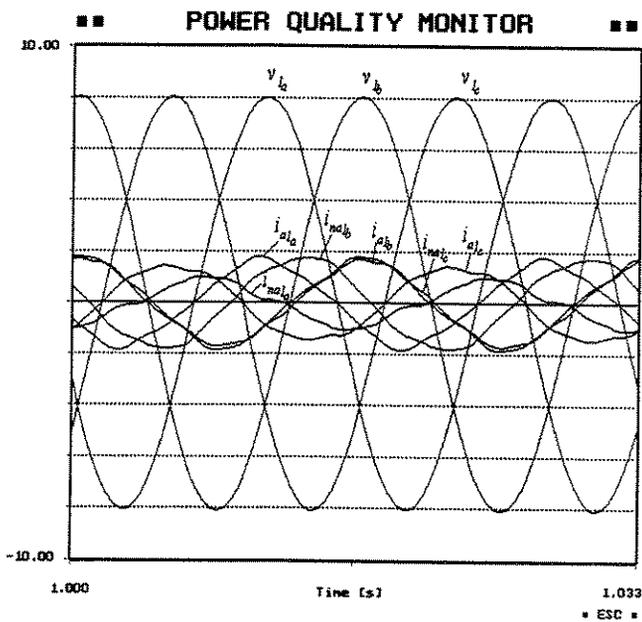
Figura 5.23: Tensão e corrente de entrada, fundamental e residual - circuito reativo assimétrico e tensões distorcidas desequilibradas



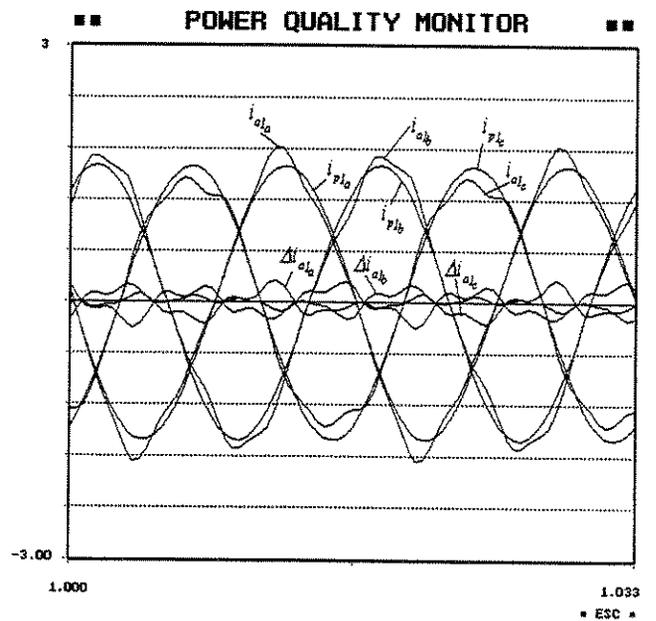
(a) Tensões e correntes de entrada, ativa e não-ativa



(b) Correntes de entrada, ativa e não-ativa - ampliadas



(c) Tensões e correntes ativa e não-ativa fundamentais



(d) Correntes ativa, proporcional e ativa oscilatória fundamentais

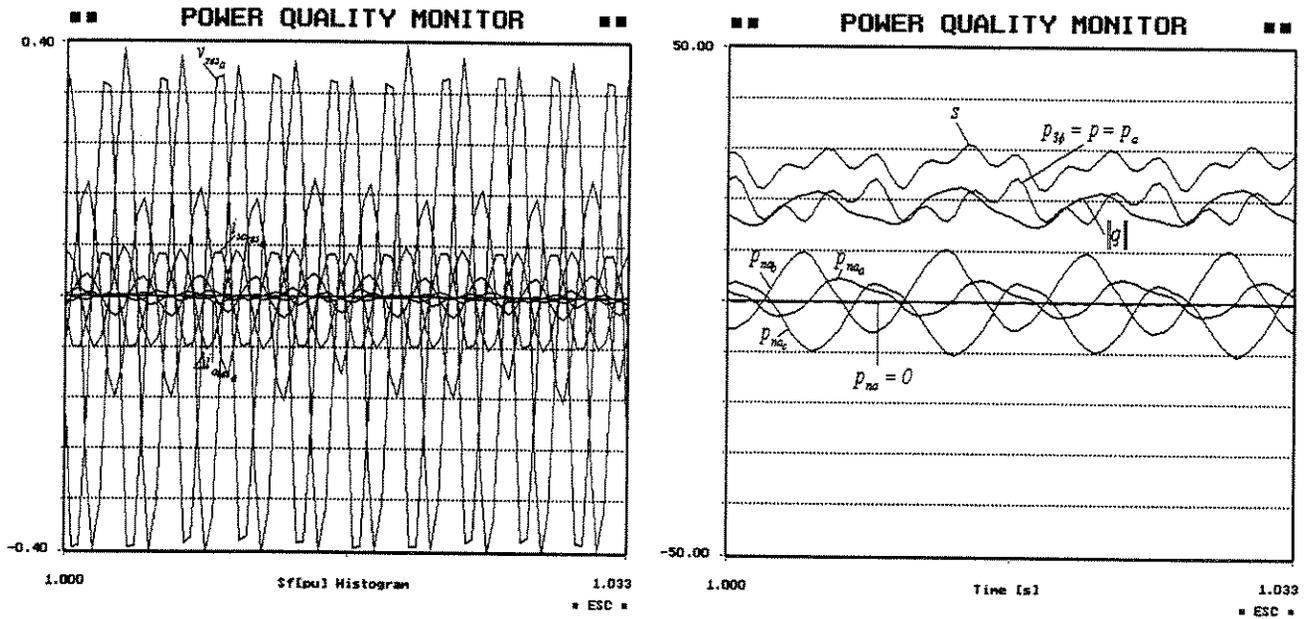
Figura 5.24: Parcelas de corrente ativa, não-ativa, proporcional e oscilatória - circuito reativo assimétrico e tensões distorcidas desequilibradas

Na figura 5.25(b) pode-se observar que as potências aparente, ativa e imaginária são todas oscilatórias devido às condições indesejadas do circuito. Quanto à potência não ativa, é cabível o mesmo comentário dos casos anteriores. A figura 5.25(c) mostra que a componente de potência ativa pode ser decomposta em parcelas proporcional e ativa oscilatória.

A figura 5.26(a) mostra as potência aparente, ativa e imaginária fundamentais, as quais são oscilatórias. Na figura 5.26(b) a potência ativa fundamental está decomposta em componentes proporcional e ativa oscilatória fundamentais.

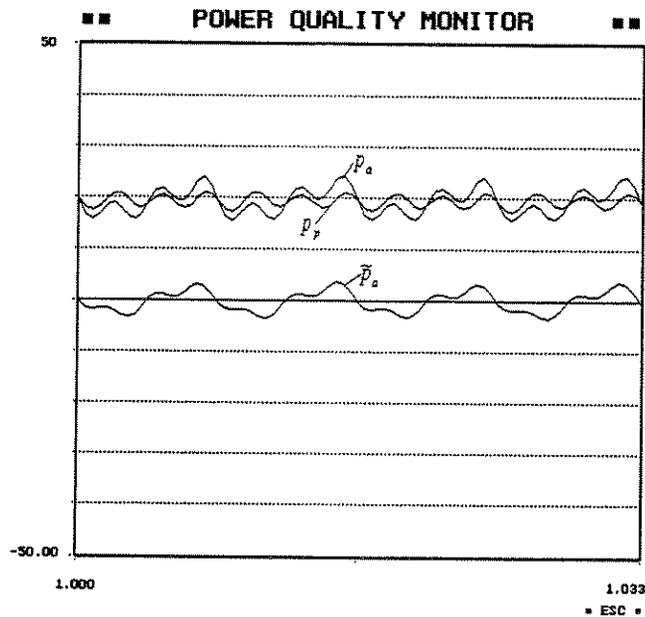
Nas figuras 5.26(c) e 5.26(d) podem ser observadas as parcelas de potência ativa cruzada, ativa residual e ativa proporcional residual. Valem os comentários dos dois casos anteriores.

Na figura 5.27(a) estão indicadas as potências unidirecional e bidirecional, as quais possuem valor médio e oscilatório respectivamente.



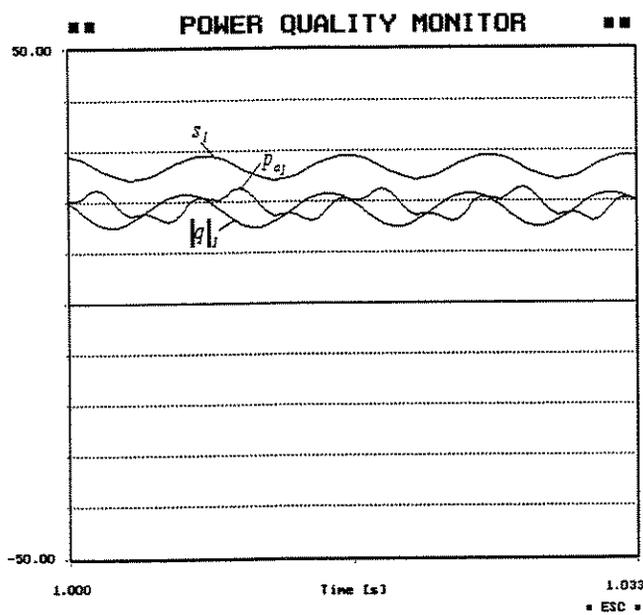
(a) Tensões e correntes proporcional e ativa oscilatória residuais

(b) Potências instantâneas total, ativa, não-ativa, imaginária e aparente

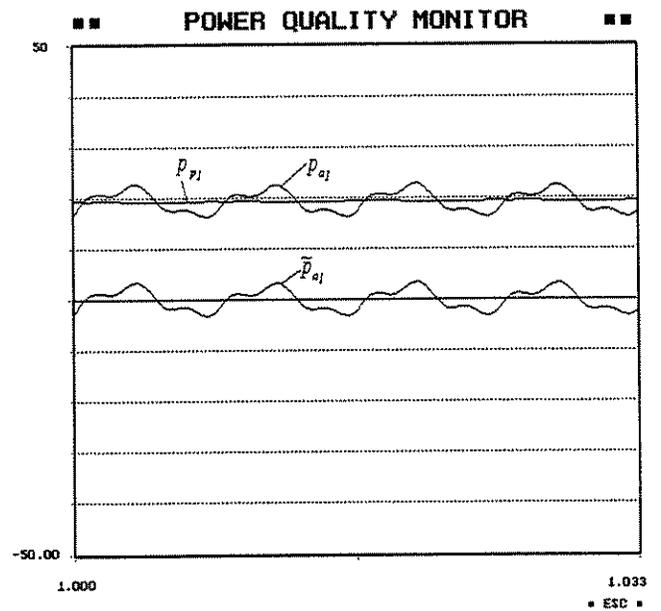


(c) Potências ativa, proporcional e ativa oscilatória

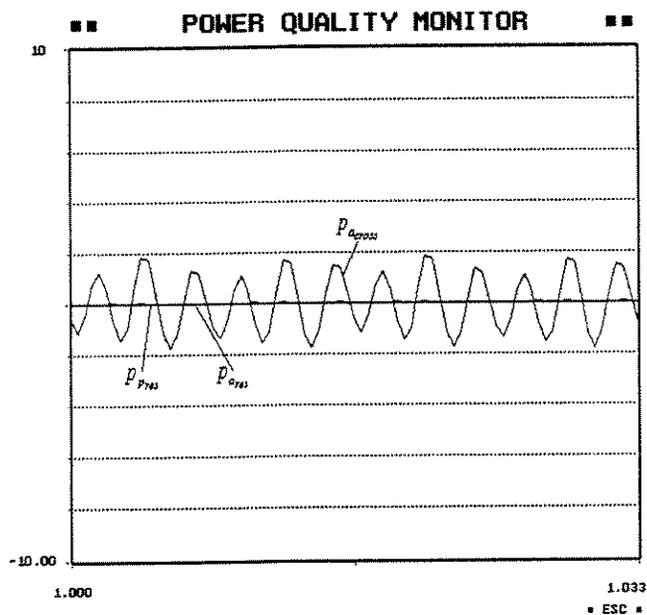
Figura 5.25: Potências instantâneas - circuito reativo assimétrico e tensões distorcidas desequilibradas



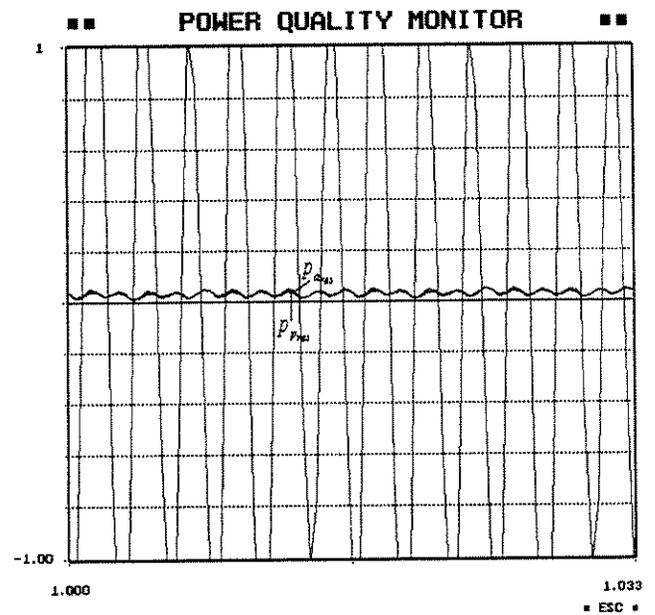
(a) Potências ativa, imaginária e aparente fundamentais



(b) Potências ativa, proporcional e ativa oscilatória fundamentais

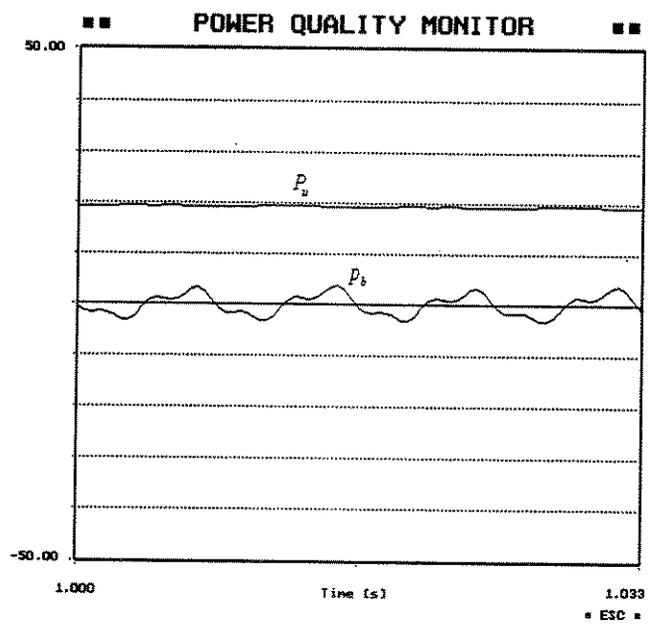


(c) Potências ativa, proporcional e ativa cruzada residuais



(d) Potências ativa e proporcional residuais - ampliadas

Figura 5.26: Componentes de potências instantâneas - circuito reativo assimétrico e tensões distorcidas desequilibradas



(a) Potências unidirecional e bidirecional

Figura 5.27: Potências instantâneas - circuito resistivo simétrico e tensões distorcidas desequilibradas

Com as figuras e comentários apresentados, espera-se ter sido possível mostrar que a metodologia de decomposição das grandezas elétricas e o cálculo das componentes de potência instantânea permitem um estudo bastante rigoroso de distúrbios elétricos e de suas origens. O último caso apresentado, indica que com a aplicação simultânea das duas decomposições, pode-se encontrar todas as parcelas de tensão, corrente e potência com significados físicos distintos.

5.2 Aplicações

Em se tratando de assuntos bastante atuais, em que ainda existem muitas opiniões divergentes, o trabalho exposto possui uma gama de aplicações, as quais podem contribuir de alguma forma para que as discussões sobre teoria de potências e qualidade de energia avancem no sentido de encontrar pontos comuns. Algumas destas aplicações estão comentadas a seguir.

5.2.1 Atribuição de responsabilidades

No novo contexto do setor elétrico, com as privatizações de concessionárias de energia, um assunto bastante discutido relaciona-se com trabalhos de regulamentação e atribuição de responsabilidades a fornecedores e consumidores de energia.

Uma maneira bastante simples e muito utilizada na atribuição de responsabilidades e investimentos a respeito de problemas na qualidade de energia, inclusive potência reativa, é atribuir aos distribuidores de energia problemas relativos à tensão e aos consumidores os problemas relativos à corrente. Isto funciona bem quando tensões e correntes não tem uma interação muito acentuada, do contrário, causa e efeito não podem ser separados. Isto significa que sistemas onde as tensões não se afastam demasiadamente das condições ideais e as assimetrias e não-linearidades dos circuitos não são acentuadas, esta estratégia pode ser válida, entretanto quando tais condições não são satisfeitas, é necessário o desenvolvimento de métodos detalhados para estas finalidades. Acredita-se que os indicadores de qualidade sugeridos no Capítulo 4 podem contribuir para estas discussões.

5.2.2 Condicionamento e compensação de energia

Busca-se cada vez mais o desenvolvimento de teorias de controle capazes de efetuar no domínio do tempo e com a maior simplicidade possível, o comando de sistemas eletrônicos de condicionamento ou compensação de energia. Neste sentido as decomposições de sinais apresentadas possibilitam a formulação direta de métodos de controle, que podem ser aplicados a dispositivos como *filtros ativos* ou *FACTS*.

Por exemplo, na da seção 3.4 o equacionamento exposto possibilitaria utilizar as equações 3.44 e 3.51 como referências para dispositivos de compensação de distúrbios elétricos, uma vez que $[v_{res}]$ e $[i_{np}]$ são responsáveis pela deterioração da qualidade da tensão e corrente, respectivamente.

$$[v] = [v_1] + [v_{res}]$$

$$[i_{np}] = \underbrace{[i_{p_{res}}] + [\Delta i_{a_1}] + [\Delta i_{a_{res}}]}_{ativas} + \underbrace{[i_{ort_1}] + [i_{ort_{res}}] + [\Delta i_{na_1}] + [\Delta i_{na_{res}}]}_{n\tilde{a}o-ativas}$$

Através do desenvolvimento apresentado no Capítulo 4 (seção 4.2.2), pode-se notar que existem parcelas de potência indesejadas ao sistema elétrico. Em analogia com outros trabalhos poderiam ser identificadas as parcelas de potências compensáveis através de elementos passivos (L e C) como na teoria convencional de compensação, ou mesmo identificar as componentes que podem ser eliminadas sem a necessidade de elementos armazenadores de energia, como nas técnicas apresentadas por (Akagi *et al.* 1984).

Seria interessante para aplicação da teoria exposta neste trabalho, a utilização de um dispositivo de condicionamento de energia com uma topologia como a do *UPLC - Universal Active Power Line Conditioner* apresentado em Aredes (1996) e Watanabe e Aredes (1998), o qual utiliza do arranjo *back-to-back* de conversores para controlar um vasto número de variáveis de forma a eliminar os distúrbios do sistema elétrico.

É importante destacar que a aplicação das decomposições para fins de compensação, permite que se obtenha diretamente dos sinais originais das fases ($a, b, c \dots n$) do sistema elétrico, os sinais de referência para os dispositivos eletrônicos. Acredita-se que esta seja uma das vantagens em sua aplicação, ao invés das técnicas de controle que passam por transformações de eixos estacionários, para o cálculo das potências indesejadas e retornam para o cálculo das correntes de referência (Akagi *et al.* 1983).

5.2.3 Monitoração de energia

Com o uso da metodologia apresentada para o cálculo das parcelas de tensão, corrente, potência e a sugestão de alguns indicadores de qualidade, pode-se a partir de um único instrumento (MDQE) avaliar a energia elétrica suprida ou consumida em qualquer sistema ou instalação.

A monitoração em tempo real de funções temporais de potência (p e $\|q\|$) ou ainda indicadores que levam em consideração o quanto tais potências se afastam da situação ideal (f_d, f_p, η_p, f_{p1}), permite, por exemplo, observar que se um determinado sistema não-linear possui tensões e correntes harmônicas de mesma frequência e componente de seqüências, estas produzem uma parcela de potência que é ativa. É sabido que a componente $p_{a_{res}}$ descrita no Capítulo 4, costuma atingir valores da ordem de $0,2 - 0,5\%$ de p_{p1} , o que para sistemas de alta potência é um percentual bastante elevado (Marafão *et al.* 1999b, Emanuel 1998).

Adicionando algumas operações matemáticas, como médias e acumulações no tempo, poder-se-ia obter informações complementares sobre o consumo de energia elétrica em um determinado PAC.

5.2.4 Instrumentação

As decomposições e expressões expostas nos capítulos anteriores, trazem em sua essência uma definição *ideal* de como expressar grandezas relacionadas à transferência e circulação de energia em um sistema polifásico qualquer.

É importante ressaltar que diversos autores, em suas tentativas de elaborar uma teoria que fosse capaz de representar um sistema elétrico sob condições não-ideais, normalmente o fizeram dentro das limitações tecnológicas a que tinham acesso. A teoria descrita neste trabalho, parte do princípio ideal de transferência e conservação de energia para apresentar um conjunto de decomposições dos sinais de tensão, corrente e potência, as quais, com o crescente desenvolvimento tecnológico, sobretudo na área digital, pode ser atingido no domínio do tempo com características cada vez mais *rápidas*.

Capítulo 6

Conclusão Geral

Dado o interesse sobre a qualidade da energia elétrica e o desenvolvimento de uma teoria de potências moderna e didática, a qual possa ser implementada em sistemas de monitoração, controle ou medição de energia, acredita-se que este trabalho tenha contribuído no contexto deste assunto.

A partir das condições consideradas ideais ao fornecimento e consumo de energia, este trabalho apresentou uma metodologia capaz de decompor os sinais de tensão e corrente em parcelas escalares e ortogonais, de frequência fundamental ou residual, as quais podem ser associadas as parcelas úteis dos sinais elétricos e aos sinais responsáveis pela deterioração da qualidade da energia elétrica. Tais decomposições foram inicialmente apresentadas no Capítulo 2, de forma puramente matemática, e no Capítulo 3, aplicadas às grandezas elétricas.

Associando as parcelas obtidas pelas decomposições citadas, foi possível desenvolver um método que resultasse em diferentes componentes de potência no domínio do tempo. Tais componentes de potência apresentam um desmembramento da potência total, de forma que cada uma possua informações distintas sobre o sistema elétrico, sendo que estas informações podem ser utilizadas para estudar as causas e os efeitos de determinados distúrbios nos sistemas elétricos.

No Capítulo 4 foram apresentados alguns *indicadores de qualidade de energia*, os quais possibilitam avaliar a deterioração da energia (potência) envolvida em uma determinada instalação.

Os resultados obtidos através de simulações no Capítulo 5 vieram comprovar e validar o método de tratamento dos sinais de tensão, corrente e potência elétrica apresentado neste trabalho.

Trabalhos futuros

Estão sendo desenvolvidos alguns projetos envolvendo este trabalho, de forma a reafirmar sua viabilidade e aplicabilidade, principalmente em sistemas de monitoração da qualidade da energia elétrica (Marafão *et al.* 1999a, Paiva *et al.* 1999, Marafão *et al.* 1999b) e estão previstos trabalhos relacionados com dispositivos condicionadores de energia (filtros ativos e *FACTS*).

Referências Bibliográficas

- Akagi, H. e A. Nabae (1993). The p-q theory in three-phase systems under non-sinusoidal conditions. *European Transaction Electrical Power Engineering* Vol.3(1), 27–31.
- Akagi, H., Y. Kanazawa e A. Nabae (1983). Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits. *IPEC'83 - Int. Power Electronics Conf.* pp. 1375–1386. Tokyo, Japan.
- Akagi, H., Y. Kanazawa e A. Nabae (1984). Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. *IEEE Transactions on Industry Applications* Vol.IA-20(3), 625–630.
- Aredes, M. (1996). Active Power Line Conditioners. Doctor degree. Technical University of Berlin. Germany.
- Arseneau, R. e A. Emanuel (1996a). Practical definitions for powers in systems with nonsinusoidal waveforms and unbalanced loads: A discussion. *IEEE Trans. on Power Delivery* 11(1), 79–101.
- Arseneau, R. e A. Emanuel (1996b). A survey of north american electric utility concerns regarding non-sinusoidal waveforms. *IEEE Trans. on Power Delivery* 11(1), 73–78.
- Budeanu, C. I. (1927). Reactive and fictitious power. *Instituto Romeno de Energia*.
- Clarke, E. (1943). *Circuits Analysis of A-C Power Systems*. Vol. Vol. I - Symmetrical and Related Components. John Wiley and Sons, Inc.. New York - USA.
- Czarnecki, L. S. (1987). What is wrong with the Budeanu concept of reactive and distortion power and why it should be abandoned. *IEEE Trans. Instr. Meas.* IM-36(3), 834–837.
- Czarnecki, L. S. (1990). Comparison of power definitions for circuits with nonsinusoidal waveforms. *IEEE Tutorial Course on Non-sinusoidal Situations* 90EH0327-7, 43–50.
- Deckmann, S.M. e E. F. Melo (1998). On line evaluation of voltage quality indexes for harmonic distortion, flicker and sequence components. *IEEE 8th ICHQP* pp. 112–113.
- Depenbrock, M. e J. D. van Wyk (1994). Formulating requirements for a universally applicable power theory as control algorithm in power compensators. *ETEP - Eur. Trans. Elect. Power Eng.* 4(6), 445–455.
- Depenbrock, M. e V. Staudt (1998a). The fbd-method as tool for compensating total non-active currents. *IEEE 8th ICHQP* pp. 320–324.

- Depenbrock, M. e V. Staudt (1998b). Stability problems if three-phase systems with bidirectional energy flow are compensated using the fbd-method. *IEEE 8th ICHQP* pp. 325–330.
- Emanuel, A. E. (1990). Powers in nonsinusoidal situations. A review of definitions and physical meaning and a better resolution. *IEEE Trans. Power Delivery* vol. 5(no. 3), 1377–1389.
- Emanuel, A. E. (1998). Apparent power: Components and physical interpretation. *IEEE Trans. Power Delivery* vol.(no.), 1–13.
- Ferrero, A. (1998a). Some considerations about the different possible approaches to the study of the electrical power systems under nonsinusoidal considerations? *IEEE-ICHQP'98 - International Conference on Harmonics and Quality of Power* pp. 14–19.
- Ferrero, A. (1998b). Unbalancing and distorting loads: Can they be measured? *IEEE-ICHQP'98 - International Conference on Harmonics and Quality of Power* pp. 809–813.
- Ferrero, A. e Superti Furga (1991). A new approach to the definition of power components in three-phase systems under nonsinusoidal conditions. *IEEE Trans. on Instr. and Meas.* 40(3), 568–577.
- Filipski, P. (1980). A new approach to reactive current and reactive power measurement in nonsinusoidal systems. *IEEE Trans. Instr. Meas.* IM-29(no. 4), 423–426.
- Filipski, P. e R. Arseneau (1990). Definition and measurement of apparent power under distorted waveform conditions. *IEEE Tutorial Course on Non-sinusoidal Situations* 90 EH0327-7, 37–42.
- Fortescue, C. L. (1918). Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks. *AIEE Trans.* 37, 1027–1140.
- Fryze, S. (1932). Active, reactive and apparent power in circuits with nonsinusoidal voltage and current. *Przegl.Elektrotech.*
- Furuhashi, T., S. Okuma e Y. Uchikawa (1990). A Study on the Theory of Instantaneous Reactive Power. *IEEE Trans. on Industrial Electronics* 37(1), 86–90.
- Galli, A.W., G.T. Heydt e P.F. Ribeiro (1996). Exploring the power of wavelet analysis. *IEEE Computer Applications in Power* pp. 37–41.
- Ghosh, A. e A. Joshi (1998). A new method for load balancing and power correction using instantaneous symmetrical components. *IEEE Power Eng. Review* pp. 60–62.
- Kaplan, W. (1969). *Advanced Calculus*. World Student Series. fourth ed.. Addison-Wesley Publishing Company.
- Khalsa, H. e W. Mielczarski (1998). A concept of unidirectional and bi-direcional componentes to define power flow in non sinusoidal circuits. *IEEE 8th ICHQP* pp. 672–677.
- Kreyszig, E. (1993). *Advanced Engineering Mathematics*. seventh ed.. Jonh Wiley and Sons.Inc. U.S.A.
- Kusters, N. L. e W. J. Moore (1980). On the definition of reactive power under nonsinusoidal conditions. *IEEE Trans. Power App. Syst.* PAS-99(5), 1845–1854.

- Lathi, B. P. (1987). *Sistemas de Comunicação*. Editora Guanabara. Rio de Janeiro, RJ - Brasil.
- Lyon, W. V. (1920). Reactive power and unbalanced circuits. *ELETRICAL WORLD VOL. 75*(no. 25), 1417–1420.
- Lyon, W. V. (1954). *Transient Analysis of Alternating Current Machinery*. Jonh Wiley. New York - USA. Chapter 2.
- Marafão, F.P., S.M. Deckmann e E.P. Paiva (1999a). Instantaneous evaluation of power quality indexes. *Anais do 5º Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência (COBEP'99)* 1, 117–122.
- Marafão, F.P., S.M. Deckmann e E.P. Paiva (1999b). Monitor digital de qualidade da energia elétrica: Obtenção on line de indicadores de qualidade. *Anais do III Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica* pp. 225–230.
- Mohan N. T., Undeland e Robins (1995). *Power Electronics Converters Applications and Design*. Jonh Wiley and Sons.Inc. U.S.A.
- Nabae, A., H. Nakano e S. Togasawa (1995). An instantaneous distorcion current compensator without any coordinate transformation. *IPEC-Yokohama* pp. 1651–1655.
- Nabae, A. e T. Tanaka (1996). A universal theory of instantaneous active-reactive current and power including zero-sequence component. *IEEE 7th ICHQP* pp. 90–95.
- Normas CISPR11 (1990). Limits and methods of measurement of electromagnetics disturbance characteristics of industrial, scientific and medical radio frequency equipment.
- Normas IEC 1000-3-2 (1995). Limits for harmonics current emissions (equipment input current ≤ 16 a per phase).
- Owen, E. (1998). A history of harmonics in power systems. *IEEE Industry Applications Magazine Vol.4*(1), 6–12.
- Page, C. H. (1980). Reactive power in nonsinusoidal situations. *IEEE Trans. on Instr. and Meas.* **IM-29**(4), 420–422.
- Paiva, E.P., S.M. Deckmann e F.P. Marafão (1999). Monitor digital de qualidade da energia elétrica: Aquisição e processamento em tempo real. *Anais do III Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica* pp. 218–224.
- Peng, F., G. Ott e D. Adams (1997). Harmonic and reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive power theory for 3-phase 4-wire systems. *IEEE Power Electronics Specialists Conference - PESC 2*, 1089–1095.
- Peng, F. e J-S. Lai (1996). Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems. *IEEE Trans. on Instr. and Meas.* **45**(1), 293–297.
- Rosseto, L. e P. Tenti (1992). Using ac-fed pwm converts as instantaneous reactive power compensators. *IEEE Trans. on Power Electronics Vol.7*(Nº1), 224–230.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Rosseto, L. e P. Tenti (1994a). Evaluation of instantaneous power terms in multi-phase systems: Techniques and applications to power-conditioning equipments. *ETEP - Eur. Trans. Elect. Power Eng.* 4(6), 469-475.
- Salvatore, L. e M. Savino (1994). Time-frequency representations of instantaneous complex power, voltage and current space vectors. *ETEP - Eur. Trans. Elect. Power Eng.* 4(5), 395-402.
- Sharon, D. (1973). Reactive power definitions and power factor improvement in nonlinear systems. *Proc. IEE* 120(6), 704-706.
- Shepherd, W. e P. Zakikhani (1972). Suggested definitions of reactive power for nonsinusoidal systems. *Proc. IEE* 119(9), 1361-1362.
- Svensson, S. (1999). Power Measurement Techniques for Nonsinusoidal Conditions - The significance of harmonic for the measurement of power and other AC quantities. Doctor degree. Chalmers University of Technology. Sweden.
- Vas, Peter (1996). *Electrical Machines and Drives - A Space-Vector Theory Approach*. second ed.. Oxford Science Publications. New York - USA.
- Watanabe, E. H. e M. Aredes (1998). Teoria de potência ativa e reativa instantânea e aplicações - filtros ativos e facts. *Congresso Brasileiro de Automática - CBA* pp. 81-122.
- Watanabe, E. H., R. M. Stephan e M. Aredes (1993). New concepts of instantaneous active and reactive powers in electrical systems with generic loads. *IEEE Trans. Power Delivery* 8(2), 697-703.
- Willems, J. L. (1992). A new interpretation of the Akagi-Nabae power components for nonsinusoidal three-phase situations. *IEEE Trans. Instr. Meas.* 41(4), 523-527.
- Willems, J. L. (1993). Current compensation in three-phase power systems. *ETEP - Eur. Trans. Elect. Power Eng.* 3(1), 61-66.
- Willems, J. L. (1994). Instantaneous sinusoidal and harmonic active and deactive currents in three-phase power systems. *ETEP - Eur. Trans. Elect. Power Eng.* 4(5), 335-343.
- Willems, J. L. (1995). Mathematical foundations of the instantaneous power concepts: A geometrical approach. *Third International Workshop: Power Definitions and Measurements under Non-sinusoidal Conditions* pp. 1-6.
- Willems, J. L. e D. Aeyels (1993). New decomposition for 3-phase currents in power systems. *IEE Proceedings-C* 140(4), 307-310.

?

Apêndice - Desequilíbrios nas tensões de fornecimento

Como citado na seção 3.2, o desenvolvimento deste trabalho baseia-se na consideração de que as tensões fundamentais de alimentação do sistema elétrico são simétricas. A principal razão é que não se conhece uma técnica de decomposição instantânea para identificação da componente de seqüência positiva.

Com isso, quando se decompõe a corrente elétrica em função da tensão fundamental, sabe-se que a parcela proporcional, obtida através de \bar{g}_e também será simétrica. Isso garante que a potência ativa gerada represente a transferência efetiva de energia entre fonte e cargas do sistema, sendo esta potência associada à maior conservação de energia ou fator de potência. Tal componente de potência não possui oscilações e pode ser associada a um sistema ideal de geração-transmissão-consumo de energia. As equações a seguir representam tais parcelas:

$$[i_{p1}] = \bar{g}_e \cdot [v_1] \quad (1)$$

que foi definida como *corrente ativa proporcional fundamental* e

$$p_{p1} = \bar{p}_{a1} = [v_1] \cdot [i_{p1}] \quad (2)$$

que foi definida como *potência proporcional fundamental média*.

Se as tensões de alimentação fundamentais não fossem equilibradas, até mesmo a corrente i_{p1} poderia ser assimétrica e a potência p_{p1} seria oscilatória. Neste caso, tais oscilações poderiam ser separadas do valor médio por meio de uma janela de média móvel ou um filtro passa-baixas.

No exemplo a seguir estão apresentadas figuras obtidas de um experimento onde as tensões fundamentais são desequilibradas.

Exemplo A

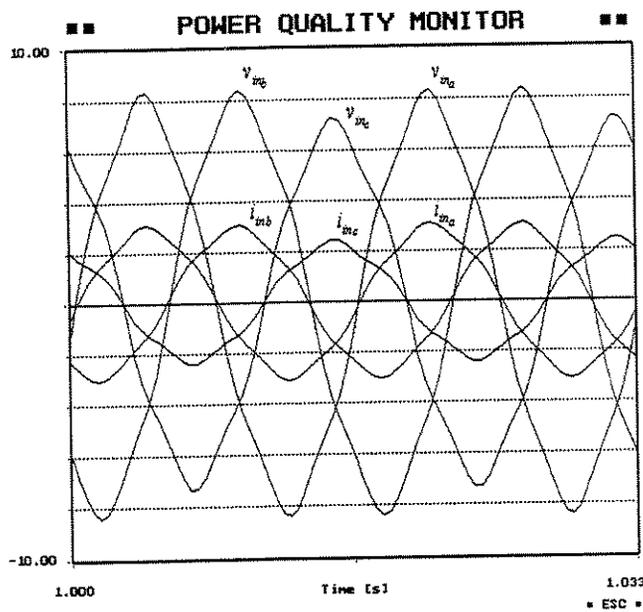
Para este experimento foi utilizado o circuito resistivo da figura 5.1, sendo sua configuração indicada na tabela 5.1. As tensões aplicadas ao circuito estão na tabela 1.

Neste exemplo, por serem as tensões fundamentais desequilibradas e o conteúdo harmônico equilibrado, a parcela de corrente não-ativa instantânea observada na figura 1(c) é devida ao desequilíbrio fundamental.

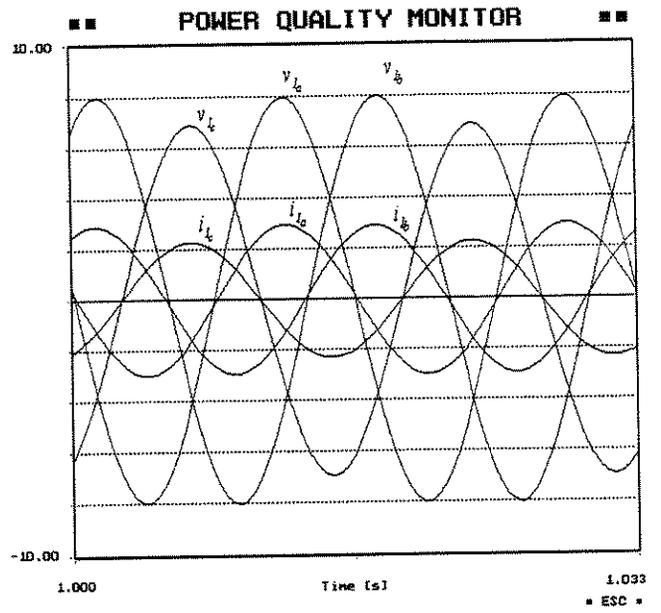
Gerador de Sinais Programável	
Fase A	$v = 8\text{sen}(\omega t) + 0,4\text{sen}(5\omega t)$ [V]
Fase B	$v = 8\text{sen}(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + 0,4\text{sen}(5\omega t - \frac{10\pi}{3})$ [V]
Fase C	$v = 7\text{sen}(\omega t - \frac{4\pi}{3}) + 0,4\text{sen}(5\omega t - \frac{20\pi}{3})$ [V]

Tabela 1: Tensões fundamentais desequilibradas e 5^o harmônica equilibrada

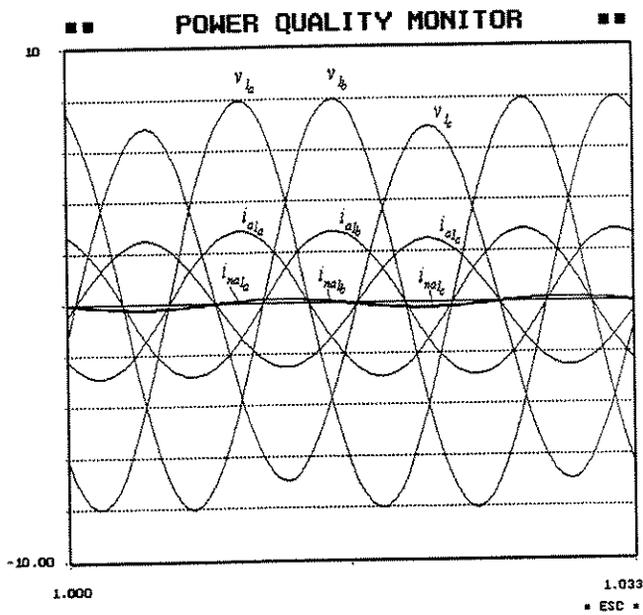
Pode-se observar pela figura 1(d) que as parcelas de corrente proporcional fundamental (i_{p1}) correspondem a toda corrente ativa fundamental (i_{a1}) e formam um conjunto assimétrico dada sua origem em v_1 , as parcelas oscilatórias (Δi_{a1}) por sua vez são nulas. No cálculo da potência, pode ser observado pela figura 2, que mesmo a componente de potência proporcional fundamental é oscilatória e igual à componente ativa fundamental. Isto se dá pela assimetria da tensão fundamental e conseqüentemente da corrente proporcional fundamental.



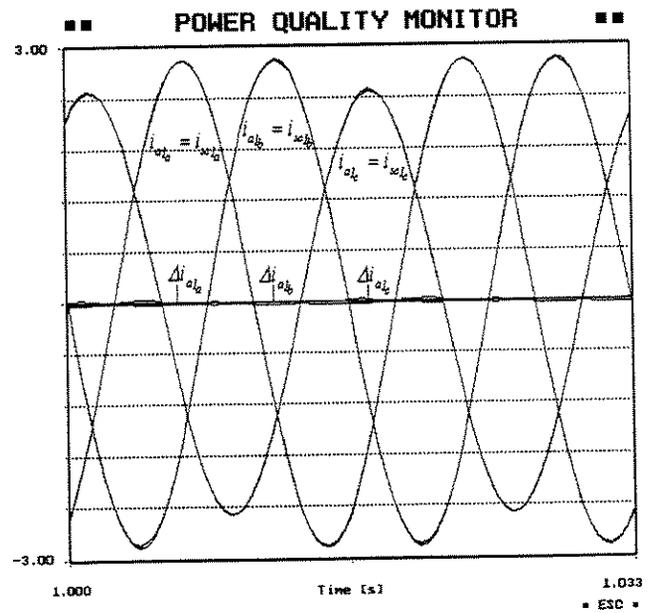
(a) Tensões e correntes originais



(b) Tensões e correntes fundamentais



(c) Tensões e correntes ativa e não-ativa fundamentais



(d) Correntes ativa, proporcional e ativa oscilatória fundamentais

Figura 1: Tensões e correntes decompostas - circuito resistivo simétrico

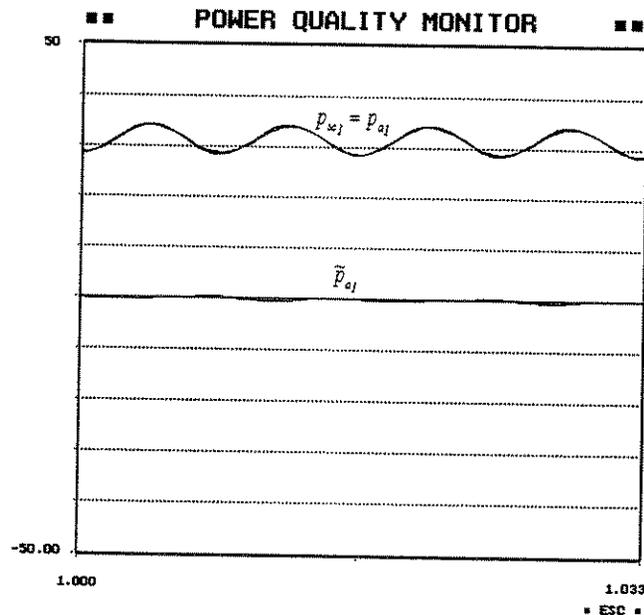


Figura 2: Potências ativa, proporcional e ativa oscilatória fundamentais

Uma solução interessante seria a implementação de um método de decomposição dos sinais no domínio do tempo, baseado nas Componentes de Seqüência de Fortescue.

Vale lembrar que, em se tratando de Componentes Simétricos de Fortescue, *um sistema de “n-fases” desequilibradas pode ser decomposto em “n” sistemas de “n-fases” equilibradas.*

Dentre estes “n” sistemas, o de maior interesse é o sistema de seqüência positiva, onde os sinais referentes a cada fase possuem o mesmo módulo e se encontram defasados de um ângulo θ que depende do número de fases do sistema original, ou seja, $\theta = \frac{2\pi}{n}$. A seqüência de fases deste sistema é igual à do sistema original desbalanceado. Diz-se que este é o sistema de maior interesse, por ser aquele que mais aproxima os sinais das condições ideais de transferência de potência.

Os outros “n-1” sistemas simétricos indicam as condições indesejadas ao sistema original, ou seja, representam desequilíbrios de amplitude e fase das tensões, desequilíbrios dos circuitos (afetam as correntes), oscilações de potência, etc.

Também é importante ressaltar que esta identificação dos componentes simétricos não se restringe à freqüência fundamental da rede, podendo ser aplicada a qualquer conjunto de sinais em quaisquer freqüências, ou seja, podem existir sistemas simétricos em freqüências harmônicas. Isto é importante pois, no caso da separação em fundamental e resíduo, o sistema formado pelos “n” resíduos pode conter componentes de seqüência positiva, os quais são indesejados ao sistema elétrico.

Uma idéia que será explorada em trabalhos futuros, poderia utilizar a mesma metodologia da separação em fundamental e resíduo, onde seria feita a identificação das componentes instantâneas de seqüência positiva dos sinais e o agrupamento das outras componentes em uma única, a qual poderia ser definida como *componente de desequilíbrio* e teria toda informação da assimetria do sinal original.

Tomando como exemplo os sistemas trifásicos, pode-se decompô-los em componentes de seqüência positiva (+), negativa (-) e zero (0), de forma que os sinais de tensão e corrente originais são a soma dos três, ou seja:

$$v = v_+ + v_- + v_0 \quad (3)$$

$$i = i_+ + i_- + i_0 \quad (4)$$

As componentes negativa e zero poderiam ser agrupadas de forma que

$$v_d = v_- + v_0 \quad (5)$$

e

$$i_d = i_- + i_0 \quad (6)$$

seriam as componentes de desequilíbrio das tensões e correntes. Assim, tem-se:

$$v = v_+ + v_d \quad (7)$$

e

$$i = i_+ + i_d. \quad (8)$$

Se tal decomposição puder ser alcançada, e seguindo o raciocínio de se encontrar as parcelas menos danosas ao sistema elétrico (a mínima corrente que forneça a potência útil requerida pela carga), a corrente mais próxima disto seria dada por

$$[i_{p1+}] = \overline{g_e} \cdot [v_{1+}] \quad (9)$$

e associando tal corrente com a tensão fundamental de seqüência positiva, resultaria:

$$p_{p1+} = [v_{1+}] \cdot [i_{p1+}], \quad (10)$$

a qual representaria a componente de potência ativa útil ao sistema elétrico.

De posse de tal decomposição, o equacionamento e as parcelas de tensão, corrente e potência apresentadas nos capítulos 3 e 4, seriam ampliadas em função de novos componentes, os quais também teriam significados físicos distintos.