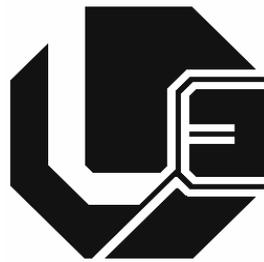


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



UMA CONTRIBUIÇÃO À AVALIAÇÃO DE
DESEMPENHO DOS PRINCIPAIS MÉTODOS
PARA A ATRIBUIÇÃO DE
RESPONSABILIDADES SOBRE AS
DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Ivan Nunes Santos

Uberlândia
2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

**UMA CONTRIBUIÇÃO À AVALIAÇÃO DE
DESEMPENHO DOS PRINCIPAIS MÉTODOS PARA A
ATRIBUIÇÃO DE RESPONSABILIDADES SOBRE AS
DISTRORÇÕES HARMÔNICAS**

Dissertação apresentada por Ivan Nunes Santos à Universidade Federal de Uberlândia, para a obtenção do título de Mestre em Ciências. Aprovada em 27 de fevereiro de 2007.

BANCA EXAMINADORA:

José Carlos de Oliveira, PhD (Orientador) - UFU

Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira, PhD - UnB

Kleiber David Rodrigues, Dr. - UFU

Milton Itsuo Samesima, Dr. - UFU

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

- S237c Santos, Ivan Nunes, 1979-
Uma contribuição à avaliação de desempenho dos principais métodos para a atribuição de responsabilidades sobre as distorções harmônicas / Ivan Nunes Santos. - 2007.
81 p. : il.
- Orientador: José Carlos de Oliveira.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.
1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Energia elétrica - Qualidade - Teses.
I. Oliveira, José Carlos de. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

**UMA CONTRIBUIÇÃO À AVALIAÇÃO DE
DESEMPENHO DOS PRINCIPAIS MÉTODOS PARA A
ATRIBUIÇÃO DE RESPONSABILIDADES SOBRE AS
DISTORÇÕES HARMÔNICAS**

Ivan Nunes Santos

Dissertação apresentada por Ivan Nunes Santos à
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Mestre em Ciências.

Prof. José Carlos de Oliveira, PhD
Orientador

Prof. Darizon Alves de Andrade, PhD
Coordenador da Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus pais Ivo e Nelita e a Tia Sebastiana, que em suas simplicidades me ensinaram a viver e a sonhar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Ana Cristina, pela compreensão, incentivo e dedicação em todos os momentos de nossa jornada ao longo destes 11 anos.

Meus sinceros agradecimentos ao Prof. José Carlos pela confiança e dedicação sempre dispensadas.

Agradeço ao meu irmão Nelivan e aos amigos e parentes, D. Marli, S. João, Ana Paula, Francisca, Juliano, Guilherme Correia, Joaquim Pedro, Darlon, pelo carinho, amizade e apoio.

Aos colegas de pós-graduação, Fernando Belchior, Ana Cláudia, Paulo Naves, Sérgio Ferreira, Nilo e Carlos Eduardo (Cadu), pelo companheirismo e apoio.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo subsídio financeiro.

RESUMO

O tema qualidade da energia elétrica contempla aspectos diversos relativos à conformidade do produto energia elétrica, em especial, à tensão. Dentre os assuntos que são tratados sob tal designação está a questão das distorções harmônicas, as quais na atualidade têm aumentado consideravelmente nos mais diversos pontos constituintes dos sistemas elétricos. Por isso, órgãos reguladores, concessionárias e mesmo consumidores têm mostrado uma crescente preocupação acerca dos níveis atingidos por este indicador da qualidade do fornecimento elétrico. Devido ao caráter nocivo destes distúrbios, normas e recomendações internacionais e nacionais têm procurado estabelecer limites para as distorções. Estes documentos, de um modo global, primam pela definição de valores de referência para os indicadores das distorções totais e individuais, sem, todavia, entrar no mérito da origem das mesmas. Nestes termos, uma vez constatada uma violação dos limites estabelecidos e definida a necessidade da implementação de uma sistemática de mitigação dos efeitos, surge a questão da responsabilidade financeira associada ao processo a ser implementado. Inserido neste contexto, situa-se o tema “compartilhamento de responsabilidade”, o qual consiste no cerne desta dissertação. Desta forma, este trabalho encontra-se direcionado a sintetizar o estado da arte sobre o tema, considerando, acima de tudo, as principais propostas de compartilhamento encontradas na literatura, quais sejam: Método da Potência Harmônica, Método da Corrente Conforme e Não-conforme e Método da Superposição. A partir destes, utilizando-se procedimentos experimentais e computacionais, procede-se à avaliação e análise crítica dos procedimentos sugeridos, destacando suas potencialidades e limitações.

Palavras-Chave: qualidade da energia elétrica, harmônicos, compartilhamento de responsabilidade, potência harmônica, corrente conforme, corrente não-conforme, princípio da superposição.

ABSTRACT

The subject power quality contemplates diverse aspects relative to the conformity of the product electric energy, in special, the voltage. Amongst the subjects that are treated under such assignment, it is the question of the harmonic distortions, which in the present time have increased considerably in the most distinct constituent points of the electrical systems. Therefore, regulating agencies, concessionaires and consumers have shown an increasing concern on the reached levels for this pointer of the quality of the electric supply. For the harmful character of these riots, international and national norms and recommendations have looked for to establish limits for the distortions. These documents, in a general way, prime for the definition of values of reference for the pointers of the total and individual distortions, without, however, entering in the merit of the origin of the same ones. In these terms, a time evidenced a breaking of the established limits and defined the necessity of the implementation of a systematic of mitigating of the effect, appears the question of the financial responsibility associated to the process to be implemented. Inserted in this context, the subject is placed "sharing of responsibility", which consists of center of this work. Thus, this work meets directed to synthesize the state of the art on the subject, considering, above of everything, the main found proposals of sharing in literature, which is: Method of the Harmonic Power, Method of the Current Conforming and Non-conforming and Method of the Overlapping. To leave of these, using experimental and computational procedures, it is proceeded the evaluation and critical analysis from the suggested procedures, detaching its potentialities and limitations.

Words-Key: power quality, harmonic, sharing of responsibility, harmonic power, current conforming, current non-conforming, principle of the overlapping.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL	01
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAS	01
1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E ESTABELECIMENTO DE DIRETRIZES	02
1.3 CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESTA DISSERTAÇÃO	07
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	08

CAPÍTULO II

SISTEMA TESTE PARA APLICAÇÃO DAS METODOLOGIAS	10
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAS	10
2.2 SISTEMA TESTE – MONTAGEM EXPERIMENTAL	11
2.3 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO SISTEMA TESTE	17
2.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E COMPUTACIONAIS	19
2.4.1 Resultados para a tensão puramente senoidal – Sistema Teste contendo cargas lineares e não-lineares (Condição 1)	20
2.4.2 Resultados para a tensão distorcida – Sistema Teste contendo apenas cargas lineares (Condição 2).....	22
2.4.3 Resultados para a tensão distorcida – Sistema Teste contendo cargas lineares e não-lineares (Condição 3)	23

CAPÍTULO III

MÉTODO DA POTÊNCIA HARMÔNICA	25
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAS	25
3.2 ESTADO DA ARTE E FUNDAMENTAÇÃO ANALÍTICA	26
3.3 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA	29
3.3.1 Resultados experimentais	30
<i>a) Condição 1 – Experimental</i>	<i>30</i>
<i>b) Condição 2 – Experimental</i>	<i>31</i>
<i>c) Condição 3 – Experimental</i>	<i>33</i>
3.3.2 Resultados computacionais	35
<i>a) Condição 1 – Computacional</i>	<i>35</i>
<i>b) Condição 2 – Computacional</i>	<i>36</i>
<i>c) Condição 3 – Computacional</i>	<i>36</i>
3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	37

CAPÍTULO IV

MÉTODO DA CORRENTE CONFORME E NÃO-CONFORME	39
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAS	39
4.2 ESTADO DA ARTE E FUNDAMENTAÇÃO ANALÍTICA	40
4.3 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA	45
4.3.1 Resultados experimentais	46
4.3.2 Resultados computacionais	47
4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	48

CAPÍTULO V

MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO	50
5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAS	50
5.2 ESTADO DA ARTE E FUNDAMENTAÇÃO ANALÍTICA	51

5.2.1	Caso 1 – Impedâncias constantes	53
5.2.2	Caso 2 – Impedância da concessionária variável e do consumidor constante	56
5.2.3	Caso 3 – Impedância do consumidor variável e da concessionária constante	58
5.2.4	Caso 4 – Impedâncias variáveis	59
5.2.5	Síntese do processo para implementação do Método da Superposição	60
5.3	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA	61
5.3.1	Resultados experimentais	61
	<i>a) Condição 1 – Experimental</i>	62
	<i>b) Condição 2 – Experimental</i>	64
	<i>c) Condição 3 – Experimental</i>	66
5.3.2	Resultados computacionais	68
	<i>a) Condição 1 – Computacional</i>	68
	<i>b) Condição 2 – Computacional</i>	69
	<i>c) Condição 3 – Computacional</i>	70
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	71

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES	74
<i>a) Quanto ao Método da Potência Harmônica</i>	75
<i>b) Quanto ao Método da Corrente Conforme e Não-conforme</i>	75
<i>c) Quanto ao Método da Superposição</i>	76

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
---	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Distorção de corrente causada por uma resistência não-linear	03
Figura 1.2 – Decomposição de uma forma de onda distorcida através da Série de Fourier	04
Figura 2.1 – Diagrama de blocos do sistema teste para aplicação das metodologias	12
Figura 2.2 – Arranjo físico utilizado para os testes de desempenho	13
Figura 2.3 – Curva de saturação da indutância da carga	14
Figura 2.4 – Foto do indutor de linha e do equipamento de medição	15
Figura 2.5 – Foto do retificador com suas cargas (resistiva e capacitiva)	15
Figura 2.6 – Foto das demais cargas do barramento	16
Figura 2.7 – Foto da fonte usada no laboratório	16
Figura 2.8 – Circuito elétrico completo implementado no ATP	18
Figura 2.9 – Circuito elétrico contendo apenas cargas lineares (situação 3)	20
Figura 4.1 – Composição de uma típica carga segundo o Método da Corrente Conforme e Não-conforme	41
Figura 5.1 – Circuito simplificado para a aplicação do Método da Superposição	52
Figura 5.2 – Circuitos equivalentes utilizados no processo da superposição	53
Figura 5.3 – Composição da corrente total no PAC – sentidos concordantes para as componentes individuais	55
Figura 5.4 – Composição da corrente total no PAC – sentidos discordantes para as componentes individuais	55
Figura 5.5 – Metodologia para a modelagem de um supridor com impedância variável	57
Figura 5.6 – Circuito equivalente com variação da impedância da concessionária	58
Figura 5.7 – Circuito equivalente com variação da impedância do consumidor	59
Figura 5.8 – Circuito equivalente com variação da impedância da concessionária e do consumidor	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Parâmetros dos componentes do sistema elétrico	14
Tabela 2.2 – Parâmetros dos componentes complementares implementados no ATP	18
Tabela 2.3 – Comparação dos valores de tensão e corrente – Experimental e Computacional - Fonte de tensão contendo 127V de valor fundamental - Sistema Teste contendo cargas lineares e não-lineares (Situação 1)	21
Tabela 2.4 – Comparação dos valores de tensão e corrente – Experimental e Computacional - Fonte de tensão contendo 127V de valor fundamental , 10% de 3° harmônico, 11% de 5° harmônico e 6% de 7° harmônico, todos com defasagem igual a 0° - Sistema Teste contendo apenas cargas lineares (Situação 3)	22
Tabela 2.5 – Comparação dos valores de tensão e corrente – Experimental e Computacional - Fonte de tensão contendo 127V de valor fundamental , 10% de 3° harmônico, 11% de 5° harmônico e 6% de 7° harmônico, todos com defasagem igual a 0° - Sistema Teste contendo cargas lineares e não-lineares (Situação 2)	23
Tabela 3.1 – Avaliação experimental do Método da Potência Harmônica – Tensão de suprimento senoidal com 127V - Sistema Teste contendo cargas lineares e não-lineares (Condição 1)	30
Tabela 3.2 – Avaliação experimental do Método da Potência Harmônica – Tensão de suprimento com 127V de valor fundamental, 10% de 3° harmônico, 11% de 5° harmônico e 6% de 7° harmônico, todos com defasagem igual a 0° - Sistema Teste contendo apenas cargas lineares (Condição 2)	32
Tabela 3.3 – Avaliação experimental do Método da Potência Harmônica – Tensão de suprimento com 127V de valor fundamental, 10% de 3° harmônico, 11% de 5° harmônico e 6% de 7° harmônico, todos com defasagem igual a 0° - Sistema Teste contendo cargas lineares e não-lineares (Condição 3)	33
Tabela 3.4 – Avaliação computacional do Método da Potência Harmônica – Tensão de suprimento senoidal com 127V - Sistema Teste contendo cargas lineares e não-lineares (Condição 1)	35
Tabela 3.5 – Avaliação computacional do Método da Potência Harmônica – Tensão de suprimento com 127V de valor fundamental, 10% de 3° harmônico, 11% de 5° harmônico e 6% de 7° harmônico, todos com defasagem igual a 0° - Sistema Teste contendo apenas cargas lineares (Condição 2)	36
Tabela 3.6 – Avaliação computacional do Método da Potência Harmônica – Tensão de suprimento com 127V de valor fundamental, 10% de 3° harmônico, 11% de 5° harmônico e 6% de 7° harmônico, todos com defasagem igual a 0° - Sistema Teste contendo cargas lineares e não-lineares (Condição 3)	37

Tabela 4.1 – Avaliação experimental do Método da Corrente Conforme e Não-conforme – Tensão de suprimento senoidal com 127V - Sistema Teste contendo cargas lineares e não-lineares	46
Tabela 4.2 – Avaliação computacional do Método da Corrente Conforme e Não-conforme – Tensão de suprimento senoidal com 127V - Sistema Teste contendo cargas lineares e não-lineares	47
Tabela 5.1 – Avaliação experimental do Método da Superposição – Tensão de suprimento senoidal com 127V - Sistema Teste contendo cargas lineares e não-lineares (Condição 1)	62
Tabela 5.2 – Valores das fontes de corrente e impedâncias obtidas para Condição 1 – Experimental	62
Tabela 5.3 – Avaliação experimental do Método da Superposição – Tensão de suprimento com 127V de valor fundamental, 10% de 3° harmônico, 11% de 5° harmônico e 6% de 7° harmônico, todos com defasagem igual a 0° - Sistema Teste contendo apenas cargas lineares (Condição 2)	64
Tabela 5.4 – Valores das fontes de corrente e impedâncias obtidas para Condição 2 – Experimental	65
Tabela 5.5 – Avaliação experimental do Método da Superposição – Tensão de suprimento com 127V de valor fundamental, 10% de 3° harmônico, 11% de 5° harmônico e 6% de 7° harmônico, todos com defasagem igual a 0° - Sistema Teste contendo cargas lineares e não-lineares (Condição 3)	66
Tabela 5.6 – Valores das fontes de corrente e impedâncias obtidas para Condição 3 – Experimental	67
Tabela 5.7 – Avaliação computacional do Método da Superposição – Tensão de suprimento senoidal com 127V - Sistema Teste contendo cargas lineares e não-lineares (Condição 1)	68
Tabela 5.8 – Valores das fontes de corrente e impedâncias obtidas para Condição 1 – Computacional	69
Tabela 5.9 – Avaliação computacional do Método da Superposição – Tensão de suprimento com 127V de valor fundamental, 10% de 3° harmônico, 11% de 5° harmônico e 6% de 7° harmônico, todos com defasagem igual a 0° - Sistema Teste contendo apenas cargas lineares (Condição 2)	69
Tabela 5.10 – Valores das fontes de corrente e impedâncias obtidas para Condição 2 – Computacional	70
Tabela 5.11 – Avaliação computacional do Método da Superposição – Tensão de suprimento com 127V de valor fundamental, 10% de 3° harmônico, 11% de 5° harmônico e 6% de 7° harmônico, todos com defasagem igual a 0° - Sistema Teste contendo cargas lineares e não-lineares (Condição 3)	70
Tabela 5.12 – Valores das fontes de corrente e impedâncias obtidas para Condição 3 – Computacional	71

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL

1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O termo "Qualidade da Energia Elétrica" constitui-se em tema de crescente importância no cenário energético nacional e internacional. De fato, os distintos fenômenos atrelados à área [1] e que se determinam desvios ou perda de qualidade da energia elétrica podem acarretar grandes transtornos para os diversos grupos de consumidores conectados na rede, sejam eles, industriais, comerciais ou residenciais. Estes, atualmente atentos com seus direitos previstos pela legislação e também diante do emprego, cada dia maior, de equipamentos altamente sensíveis às variações de tensão, já não ignoram que o fornecimento da energia deva, necessariamente, ocorrer na forma de um serviço ou produto que reúna propriedades como: segurança, continuidade, qualidade e outros. O assunto, todavia, não fica restrito ao mercado consumidor visto que, também, as concessionárias de eletricidade têm se preocupado sobremaneira com os problemas relacionados à qualidade da energia. De fato, atender às expectativas do consumidor e manter sua confiança tem gerado grandes motivações junto a empresas.

Associado a estes fatores vale ressaltar, nos dias atuais, o crescente interesse por normas ou documentos orientativos que permeiem, através de uma legislação própria, os padrões mínimos de suprimento e as sanções aplicáveis quando os valores de referência forem violados.

Dentro do grande cenário da qualidade da energia elétrica surge a presente dissertação de mestrado, a qual se encontra direcionada exclusivamente para as questões vinculadas com os impactos das distorções harmônicas sobre os padrões de qualidade do produto energia elétrica.

1.2 – CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E ESTABELECIMENTO DE DIRETRIZES

As distorções harmônicas são causadas pela utilização de dispositivos não-lineares nos mais distintos sistemas de potência. Sob a designação “não-linear”, deve ser entendido como todo e qualquer dispositivo eletro-eletrônico para o qual a correlação entre a tensão e a correspondente corrente não obedece a formas similares. A figura 1.1 mostra o caso de uma tensão senoidal aplicada a um simples resistor não-linear. Como se vê, muito embora a forma senoidal para a tensão, a respectiva corrente não atende o mesmo padrão. Esta situação é um exemplo que ilustra o surgimento das distorções harmônicas no sistema elétrico.

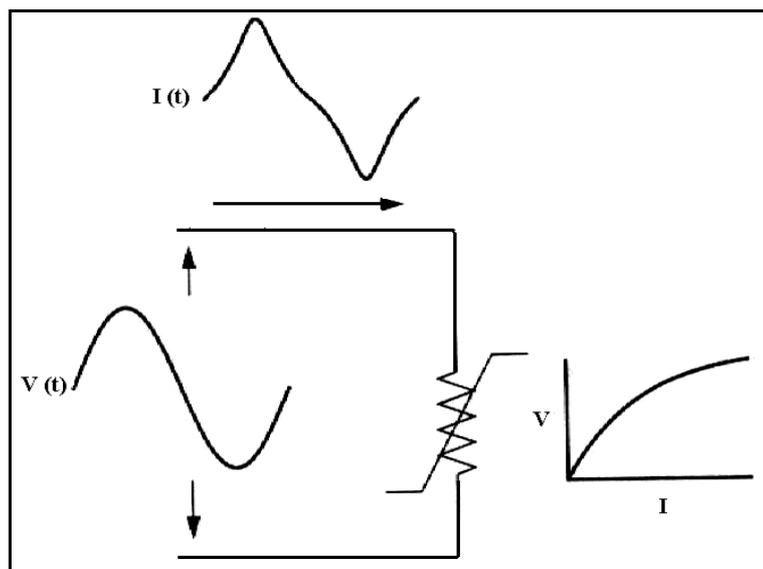


Figura 1.1 – Distorção de corrente causada por uma resistência não-linear.

Classicamente, é sabido que uma onda não-senoidal pode ser representada como uma somatória de ondas puramente senoidais de frequências múltiplas inteiras da onda original. Excetuando a componente de corrente ou tensão que tem a mesma frequência que a da tensão aplicada, as demais são conhecidas por componentes harmônicas ou, simplesmente, harmônicos. A título de visualização, a essência da base matemática aplicável a tais situações, qual seja, da Série de Fourier [2], pode ser interpretada em consonância com a figura 1.2.

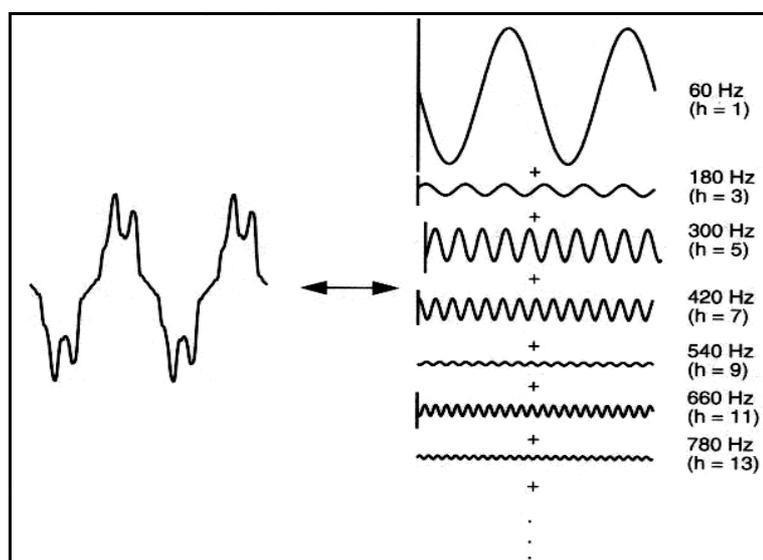


Figura 1.2 – Decomposição de uma forma de onda distorcida através da Série de Fourier.

Para quantificar as distorções harmônicas presentes nos sinais de tensões e/ou correntes, utiliza-se definições amplamente empregadas na área. Uma delas é a denominada “distorção harmônica total”, sendo esta uma das designações mais utilizadas no meio técnico/científico. Utilizando convenções adotadas pelo ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) [3] têm-se as equações (1.1) e (1.2) sintetizando tais definições.

$$DTHT = \sqrt{\sum_{h=2}^{hmáx} V_h^2} \quad (\text{em \%}) \quad (1.1)$$

$$DIHT = \sqrt{\sum_{h=2}^{hmáx} I_h^2} \quad (\text{em \%}) \quad (1.2)$$

Sendo: $DTHT$ – distorção de tensão harmônica total em porcentagem da fundamental;
 $DIHT$ – distorção de corrente harmônica total em porcentagem da fundamental;
 $V_h = 100 \frac{V(\omega_h)}{V(\omega_1)}$ – tensão harmônica de ordem h em porcentagem da fundamental;
 $V(\omega_h)$ – tensão harmônica de ordem h;
 $V(\omega_1)$ – tensão fundamental nominal ou de referência;
 $I_h = 100 \frac{I(\omega_h)}{I(\omega_1)}$ – corrente harmônica de ordem h em porcentagem da fundamental;
 $I(\omega_h)$ – corrente harmônica de ordem h;
 $I(\omega_1)$ – corrente fundamental nominal ou de referência.

As grandezas V_h e I_h da maneira como foram apresentadas também são conhecidas, respectivamente, como índices ou indicadores individuais de tensão e corrente harmônica.

Tendo em vista os efeitos negativos causados pelas componentes harmônicas de tensão e/ou corrente no sistema elétrico, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) através dos procedimentos de distribuição (PRODIST) [4], que se encontram em fase de discussão e aprimoramento, vem definindo valores máximos para distorções harmônicas na rede de distribuição. Somada a este documento nacional, há de se reconhecer também, em nível da rede básica do sistema elétrico brasileiro, a existência de diretrizes estabelecidas nos Procedimentos de Rede - Submódulo 2.2 – Padrões de Desempenho da Rede Básica [3]. Existem também normas e recomendações internacionais que tratam de limites para distorções harmônicas, dentre elas destacam-se: a IEC 1000-3 [5] e a IEEE 519 [6]. Estes documentos, e outros não destacados no texto, de um modo global, primam pela definição de valores de referência para os indicadores das distorções totais e individuais, sem, todavia, entrar no mérito da origem das mesmas. Nestes termos, uma vez constatada uma violação dos limites estabelecidos e definida a necessidade da implementação de uma sistemática de mitigação dos efeitos, surge a questão vinculada com a responsabilidade financeira associada ao processo a ser implementado no campo. Inserido neste contexto situa-se o tema “compartilhamento de responsabilidade”, o qual consiste no cerne desta dissertação. Neste particular, é importante destacar que várias pesquisas e publicações têm sido realizadas com vistas à identificação das parcelas de responsabilidade sobre as distorções harmônicas. Alguns documentos associados com este tema são contemplados na seqüência. Não obstante a citação de alguns deles, é importante destacar que os aprofundamentos sobre as principais metodologias aplicáveis à matéria, irão, oportunamente, ocupar o cerne desta dissertação.

As referências mais relevantes na literatura, com estes fins, estão alicerçadas em princípios que envolvem:

- Fluxo de potência harmônica [7][8];
- Corrente conforme e não-conforme [9][10][11][12];
- Separação do consumidor e da concessionária por meio do método da superposição [13][14][15][16].

Contudo, existem também outros estudos embasados, dentre outros, em:

- Modelagem de cargas [17][18];
- Redes neurais [19][20];
- Estimção de estado com filtro de Kalman [21][22].

De um modo geral, estas últimas publicações procuram identificar tão somente a origem da principal fonte de distorções, não se preocupando, de forma direta, em estabelecer procedimentos para a separação das parcelas de contribuição referentes ao consumidor e a concessionária. Por isso as mesmas não são pormenorizadas neste trabalho.

Por outro lado, até o momento, na literatura nacional, muito pouco foi produzido neste sentido. Dentre aquelas mais significativas, destacam-se [23] e [24]. Estes trabalhos encontram-se fundamentados, respectivamente, no método da superposição e na estimção de estado com filtro de Kalman.

Diante da conjuntura apresentada, e devido à ausência de um consenso sobre o mecanismo de compartilhamento das responsabilidades, facilmente se conclui que o tema pode dar margem a grandes conflitos quando da ocorrência de violação dos limites e necessária implementação de mecanismos mitigadores para a adequação dos valores àqueles destacados nos documentos normativos.

Reconhecendo estas questões, a presente dissertação se encontra direcionada a focar este ponto estratégico na aplicação de normas regulamentadoras sobre a qualidade da energia. A pesquisa, dentre outros aspectos, concentra-se nos temas abaixo esclarecidos.

1.3 – CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESTA DISSERTAÇÃO

Tendo contextualizado o tema e estabelecidas as diretrizes que nortearam a concepção e o desenvolvimento da presente pesquisa, vale ressaltar que esta dissertação apresenta as seguintes contribuições direcionadas ao estudo dos métodos de atribuição de responsabilidade na questão harmônica:

- Síntese da bibliografia existente sobre o tema;
- Detalhamento físico e matemático dos principais procedimentos existentes na literatura;
- Implementação computacional das propostas e estudos avaliativos de desempenho das mesmas;
- Avaliação crítica sobre as principais propostas existentes para atribuição de responsabilidade, destacando seus aspectos positivos e negativos.

1.4 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Com o intuito de atender as metas supracitadas, esta dissertação apresenta-se estruturada, além deste capítulo introdutório, da seguinte maneira:

Capítulo II – Sistema Teste para Aplicação das Metodologias

Este capítulo destina-se a propor um arranjo físico, formado por um suprimento elétrico alimentando um conjunto de cargas lineares e não-lineares. Este sistema constitui-se no arranjo utilizado para as investigações experimentais e computacionais para fins da aplicação das metodologias selecionadas.

Capítulo III – Método da Potência Harmônica

Tendo em vista a investigação da eficácia da primeira concepção de metodologia para o compartilhamento das responsabilidades entre concessionárias e consumidores, este capítulo contempla a proposta baseada na determinação do fluxo de potência harmônica. Deste modo, são considerados assuntos como: estado da arte, aplicação experimental, análise computacional e discussão do método para atribuição de responsabilidade.

Capítulo IV – Método da Corrente Conforme e Não-conforme

Avançando na direção de procedimentos mais elaborados, este capítulo está centrado numa proposta baseada na separação da corrente de suprimento em duas parcelas. Por meio da determinação da parte conforme e da não-conforme da corrente, o método conclui sobre as parcelas de responsabilidade. O conteúdo do capítulo é similar ao anteriormente esclarecido.

Capítulo V – Método da Superposição

Esta unidade tem por meta tecer considerações sobre uma outra estratégia baseada na separação dos efeitos advindos da rede e da carga. O método encontra-se alicerçado nos princípios da superposição, já amplamente utilizados na engenharia elétrica. As investigações primam, como anteriormente, por: estabelecimento dos fundamentos físicos e matemáticos, ensaios experimentais, simulações computacionais e análise do desempenho da proposta.

Capítulo VI – Conclusões

Este capítulo sintetiza as principais contribuições do trabalho e suas conclusões finais, bem como aponta para as fragilidades e adequabilidades dos processos recomendados pela literatura para fins de se obter, com base em critérios técnicos e científicos, as parcelas de responsabilidades de supridores e consumidores no que tange à questão das distorções harmônicas.

Referências Bibliográficas

Por fim, condensa-se o material bibliográfico utilizado para o desenvolvimento da dissertação.

CAPÍTULO II

SISTEMA TESTE PARA APLICAÇÃO DAS METODOLOGIAS

2.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A estrutura organizacional desta dissertação, como antecipada no texto anterior, contempla análises detalhadas de três filosofias para se atingir o propósito maior desta pesquisa, qual seja, a apresentação de um procedimento com relativo grau de confiabilidade para a separação das parcelas de responsabilidade no que se refere às distorções harmônicas detectadas em barramentos elétricos. Para se atingir este propósito final, cada método será oportunamente avaliado quanto aos seus princípios físicos e matemáticos e, uma vez devidamente compreendido, cada um deles deverá ser aplicado e avaliado com vistas a obter-se termos conclusivos que destaquem suas potencialidades e fragilidades. Para tanto, torna-se imperativa a definição de uma estrutura de um complexo elétrico a ser utilizada para tais testes de avaliação. Tal sistema, em vista do fato que deverá ser empregado tanto experimentalmente como computacionalmente, deverá ser suficientemente simples, eficaz, flexível e capaz de permitir análises conclusivas sobre a metodologia utilizada.

Nestes termos, as etapas a serem seguidas para se atingir a tais propósitos compreendem:

- Definição do sistema;
- Montagem experimental do arranjo físico selecionado;
- Implementação computacional do sistema teste adotado;
- Realização de experimentos laboratoriais;
- Análise dos resultados obtidos experimentalmente e computacionalmente;
- Avaliação de desempenho da metodologia em questão.

Para fins do presente capítulo, apenas a definição da estrutura do sistema teste e respectiva implementação experimental e computacional serão consideradas, como esclarecido na seqüência.

2.2 – SISTEMA TESTE – MONTAGEM EXPERIMENTAL

O sistema teste adotado, pelas suas características, busca a representação de uma unidade consumidora industrial, com cargas resistivas (lâmpadas incandescentes, aquecedores, etc.), cargas capacitivas (banco de capacitores), cargas indutivas (motores) e cargas especiais (retificadores, controladores de velocidade, etc.).

A figura 2.1 apresenta o diagrama de blocos do sistema teste adotado para aplicação das metodologias.

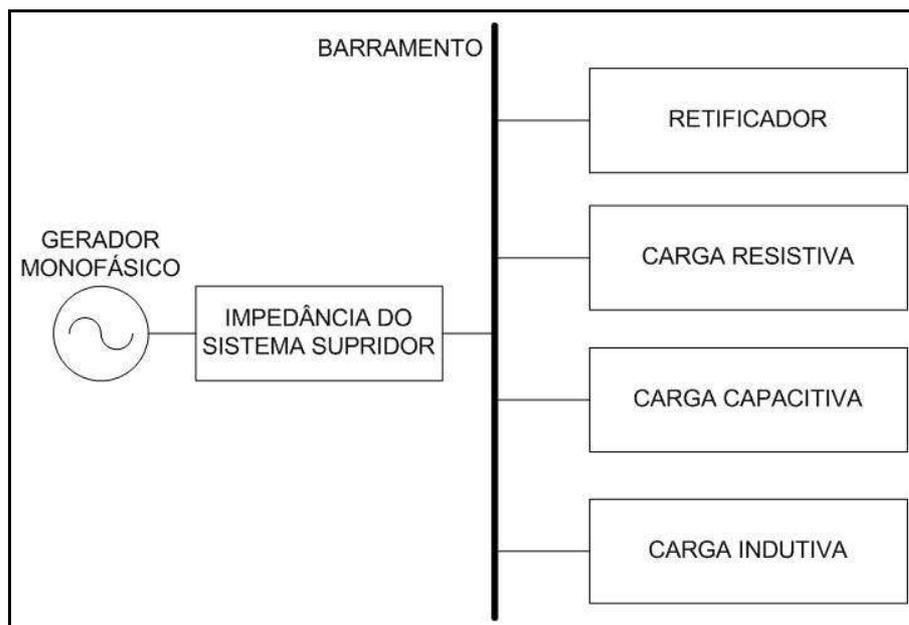


Figura 2.1 – Diagrama de blocos do sistema teste para aplicação das metodologias.

Vale ressaltar que, para fins da presente pesquisa, a geração foi adotada como constituída por uma fonte alternada monofásica. Para a representação de sua impedância interna, definida por um determinado nível de curto-circuito, foi escolhida uma indutância com resistência própria. Os parâmetros desta topologia encontram-se fornecidos posteriormente. Para fins da representação da carga, esta, como já mencionada, é formada pela associação paralela de cargas lineares (capacitor e resistor) e cargas não-lineares (retificador e indutor com núcleo de ferro), cujos parâmetros também são destacados na seqüência.

O arranjo físico utilizado para fins dos trabalhos experimentais e de simulação encontra-se apresentado na figura 2.2. Como se observa, a figura obedece aos procedimentos estabelecidos pela modelagem no Simulador ATP, ferramenta esta empregada para os estudos computacionais.

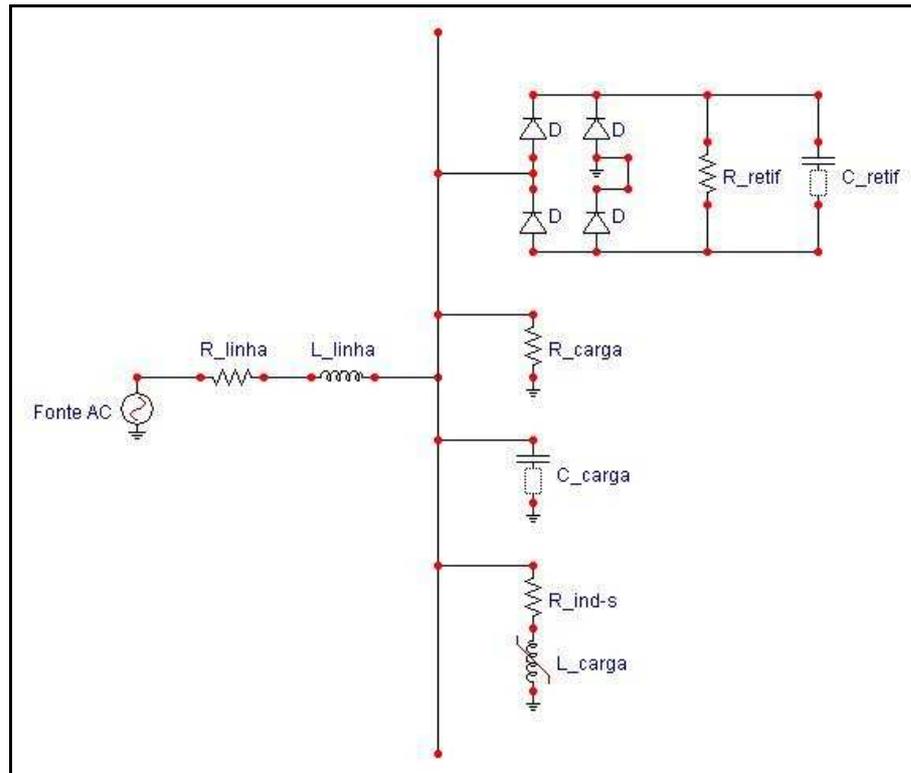


Figura 2.2 – Arranjo físico utilizado para os testes de desempenho.

Na figura:

Fonte AC – fonte alternada de tensão monofásica;

R_linha – resistência do sistema supridor;

L_linha – indutância do sistema supridor (núcleo de ar);

D – diodo;

R_retif – resistência do lado CC (Corrente Contínua) do retificador;

C_retif – capacitância do lado CC do retificador;

R_carga – resistência de carga conectada no barramento;

C_carga – capacitância de carga conectada no barramento;

R_ind-s – resistência intrínseca do indutor de carga;

L_carga – indutância de carga conectada no barramento (núcleo de ferro).

A tabela 2.1 apresenta os parâmetros dos componentes acima citados, com exceção da indutância da carga que será descrita na seqüência.

Tabela 2.1 – Parâmetros dos componentes do sistema elétrico.

Componente	Valor Medido
R_linha	1,3 Ω
L_linha	10,3mH
R_retif	146 Ω
C_retif	306 μ F
R_carga	69 Ω
C_carga	20,5 μ F
R_ind-s	2,5 Ω

O indutor de carga (L_{carga}), por possuir núcleo de ferro, apresenta uma curva de saturação não-linear. Face a isto, houve a necessidade de um levantamento da correspondente curva de saturação, indicada na figura 2.3. As demais indutâncias foram adotadas como lineares.

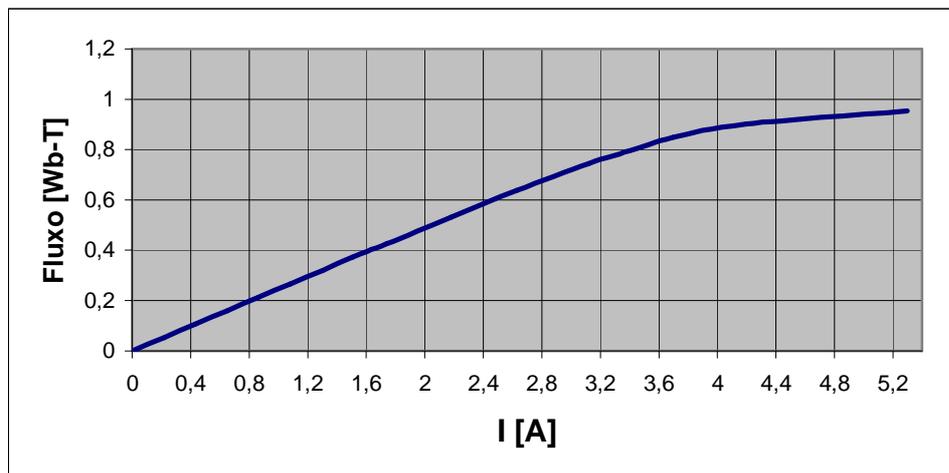


Figura 2.3 – Curva de saturação da indutância da carga.

Os componentes físicos que perfazem o sistema elétrico a ser empregado para fins dos testes de desempenho das metodologias para separação das distorções harmônicas encontram-se mostrados nas figuras 2.4, 2.5, 2.6 e 2.7. De fato, além dos dispositivos que perfazem o

complexo elétrico, é mostrada também a fonte de tensão empregada para os ensaios. Trata-se de um gerador HP, modelo 6834A, potência 4500VA e programável. Este último recurso viabiliza a geração de uma fonte de tensão com quaisquer distorções harmônicas desejáveis.

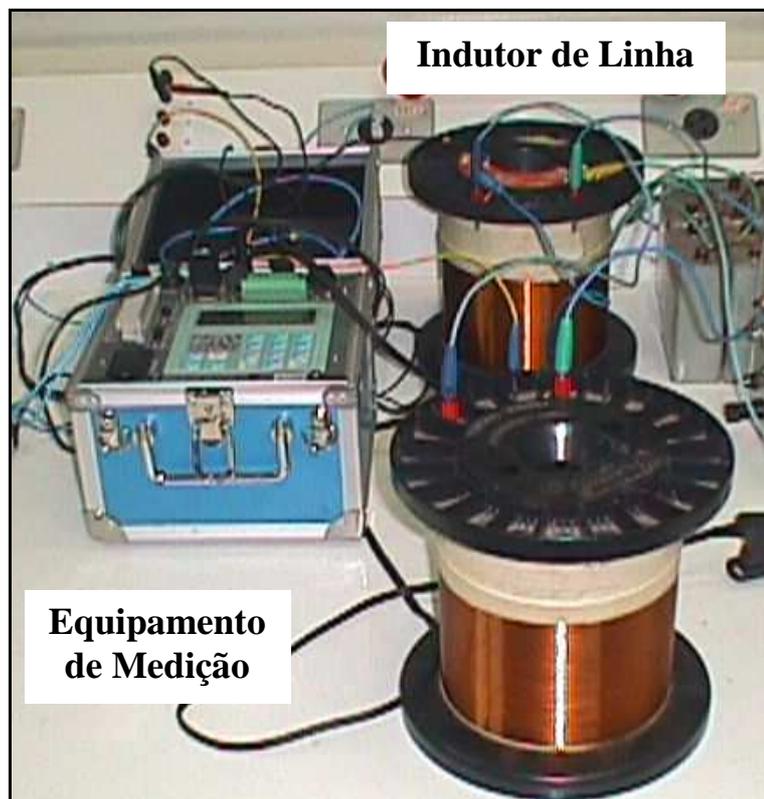


Figura 2.4 – Foto do indutor de linha e do equipamento de medição.

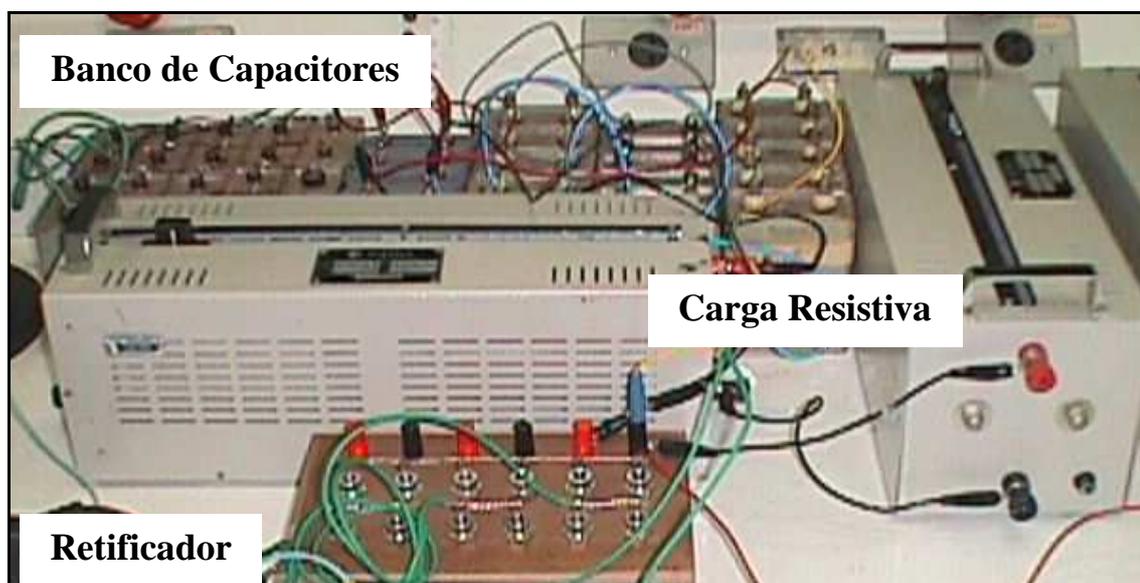


Figura 2.5 – Foto do retificador com suas cargas (resistiva e capacitiva).

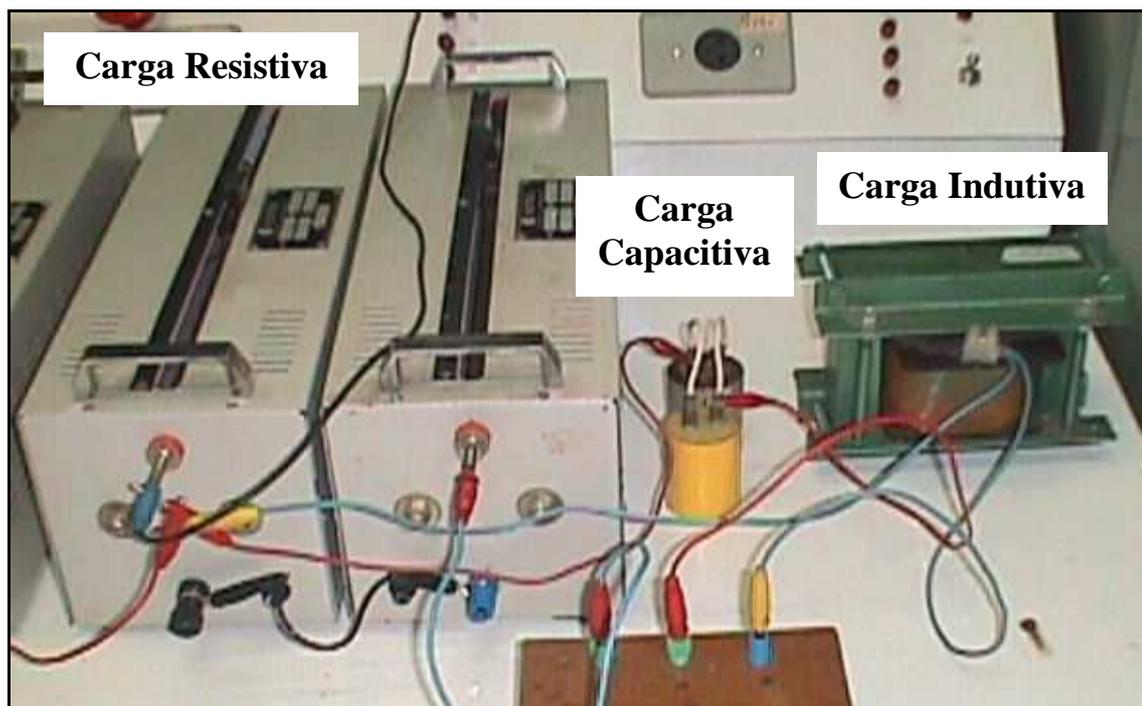


Figura 2.6 – Foto das demais cargas do barramento.



Figura 2.7 – Foto da fonte usada no laboratório.

Para a realização das diversas medições requeridas durante a aplicação dos métodos, ou seja, das distorções harmônicas totais e individuais das tensões e correntes, utilizou-se do equipamento RMS Marh 21, da empresa RMS Sistemas Eletrônicos, conforme mostrado na figura 2.4. Este medidor realiza a aquisição dos ciclos de onda de tensão e corrente, com seus respectivos harmônicos, e os envia para um microcomputador, onde os mesmos são processados e armazenados.

2.3 – IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO SISTEMA TESTE

O programa usado para implementação computacional foi o Simulador ATP-Draw, versão 4.0p2, cuja escolha se justifica por tratar de um *software* gratuito, validado e plenamente difundido.

A implementação do sistema teste contemplou as unidades abaixo descritas. Os valores numéricos, como já foram explicitados anteriormente, não são aqui repetidos, a não ser aqueles ainda não declarados.

- Fonte de tensão: composta de um gerador de tensão alternada, monofásico, com frequência fundamental de 60Hz, sobre a qual podem ser adicionadas componentes harmônicas definidas pelo usuário;
- Impedância de linha: formada por um indutor em série e respectiva resistência;
- Cargas lineares: formada por uma unidade capacitiva e uma resistência, conectadas em paralelo;
- Cargas não-lineares: constituída por um reator não-linear e um retificador de onda completa alimentando uma carga resistiva. O barramento CC do retificador possui um banco de capacitores que atua como filtro. Por questões

de maior identidade com situações reais, foi também implementado um circuito de amortecimento (*snubber*) para a ponte de diodos.

O sistema simulado no ATP pode ser visualizado na figura 2.8. As informações numéricas ainda não explicitadas encontram-se fornecidas na tabela 2.2.

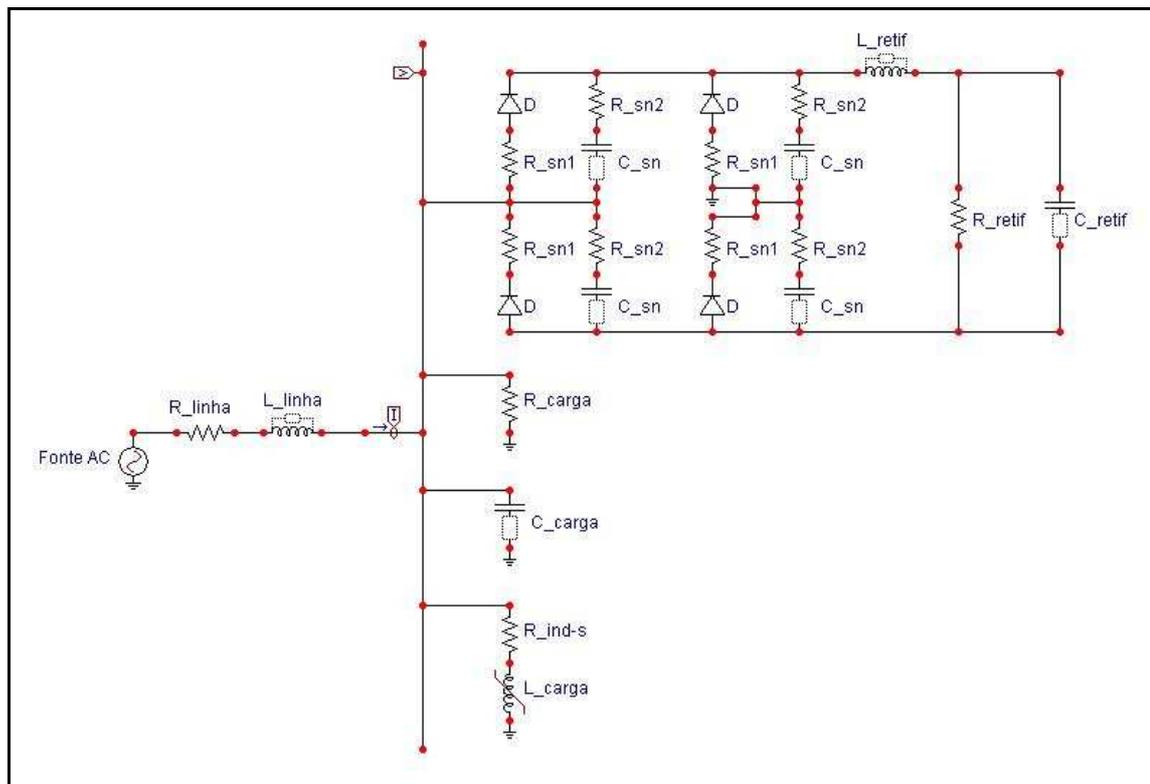


Figura 2.8 – Circuito elétrico completo implementado no ATP.

Tabela 2.2 – Parâmetros dos componentes complementares implementados no ATP.

Componente	Valor de Simulação
R_sn1	0,01Ω
R_sn2	333Ω
C_sn	0,01μF
L_retif	0,165mH
V	Medidor de Tensão
I	Medidor de Corrente

2.4 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS E COMPUTACIONAIS

Como esclarecido no início do capítulo, o motivo principal pelo qual se selecionou um Sistema Teste foi o interesse em seu posterior uso para fins do processo avaliativo do desempenho das propostas para a atribuição das responsabilidades no que tange à contribuição para as distorções harmônicas.

Não obstante os esclarecimentos já prestados sobre as questões associadas com a topologia do sistema, os parâmetros de seus componentes, uma visão da estrutura experimental e finalmente os passos para sua implementação computacional, esta seção tem por objetivo confrontar a operacionalidade do arranjo físico experimental com o modelo do ATP.

Para se atingir tal propósito, a idéia básica consiste em impor três situações operacionais para as duas estratégias, a saber:

- **Condição 1:** aplicação de uma tensão puramente senoidal no Sistema Teste contendo cargas lineares e não-lineares, conforme já apresentado na figura 2.8;
- **Condição 2:** Aplicação de uma tensão com padrão de distorção pré-definido no Sistema Teste contendo apenas cargas lineares, conforme figura 2.9 a seguir;
- **Condição 3:** Aplicação de uma tensão com padrão de distorção pré-definido no Sistema Teste contendo cargas lineares e não-lineares, conforme figura 2.8.

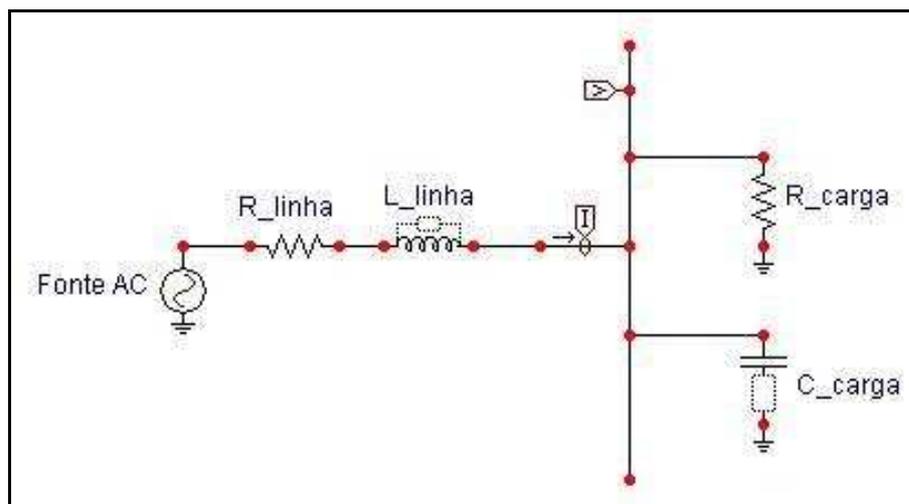


Figura 2.9 – Circuito elétrico contendo apenas cargas lineares (condição 3).

No que tange aos valores dos dispositivos deste circuito da figura 2.9, estes estão em total consonância com as informações anteriores.

Assim sendo, os resultados a serem comparados nas três situações compreendem não apenas as tensões, mas também as correntes advindas do suprimento das respectivas cargas, sejam elas lineares e não-lineares (condição 1 e 3), ou apenas lineares (condição 2).

2.4.1 – RESULTADOS PARA A TENSÃO PURAMENTE SENOIDAL – SISTEMA TESTE CONTENDO CARGAS LINEARES E NÃO-LINEARES (CONDIÇÃO 1)

Uma vez aplicada uma tensão monofásica, de valor eficaz igual a 127 volts, tanto no arranjo experimental como no simulador computacional, obteve-se os desempenhos sintetizados na tabela 2.3. Esta compara os valores finais obtidos via experimentos com aqueles extraídos do processo de simulação. Como já informado, tanto as tensões como as correntes são avaliadas. É importante reafirmar que, embora apenas uma tensão senoidal tenha sido aplicada, em decorrência da produção de componentes harmônicas pelas cargas não-lineares, a tabela apresenta tensões harmônicas resultantes do processo da injeção das

componentes de frequência de corrente e da impedância harmônica oferecida pelo sistema de suprimento.

Tabela 2.3 – Comparação dos valores de tensão e corrente – Experimental e Computacional - Fonte de tensão contendo 127V de valor fundamental - Sistema Teste contendo cargas lineares e não-lineares (Condição 1).

Grandeza	Experimental		Computacional		Erro	
	Magnitude	Ângulo*	Magnitude	Ângulo*	Magnitude (%)**	Ângulo (°)
V (1ª ordem)	120,93 V	-5,41°	120,30 V	-5,26°	0,52%	0,15°
V (3ª ordem)	12,71 V	27,69°	12,39 V	29,54°	2,52%	0,32°
V (5ª ordem)	11,75 V	127,97°	12,57 V	127,00°	6,98%	0,97°
V (7ª ordem)	6,14 V	127,87°	6,77 V	126,60°	10,26%	1,27°
I (1ª ordem)	3,30 A	-13,35°	3,20 A	-14,64°	3,03%	1,29°
I (3ª ordem)	1,03 A	125,42°	1,06 A	125,90°	2,91%	0,48°
I (5ª ordem)	0,59 A	-138,59°	0,64 A	-139,20°	8,47%	0,61°
I (7ª ordem)	0,22 A	-139,57°	0,24 A	-140,70°	9,09%	1,13°

* O ângulo da tensão fundamental é tomado como referência (ângulo = 0°)

** O percentual de erro tem por referência o valor experimental

Como pode ser observado, de um modo geral, os erros percentuais encontrados na tabela 2.3 se apresentam dentro de patamares aceitáveis. No que tange às magnitudes, as maiores discrepâncias foram constatadas para a 7ª ordem. Isto poderia ser atribuído a fatores diversos como: imprecisões dos equipamentos de medição e da própria fonte, utilização de parâmetros com certo grau de imprecisão (como se faz necessário para os cálculos computacionais), baixo valor para as frequências mais elevadas, etc. Não obstante os erros para as magnitudes, vale ressaltar que os ângulos não se mostraram tão sensíveis.

2.4.2 – RESULTADOS PARA A TENSÃO DISTORCIDA – SISTEMA TESTE CONTENDO APENAS CARGAS LINEARES (CONDIÇÃO 2)

Desta feita, como princípio, utilizou-se de uma tensão de suprimento (fonte e computacional) com um apreciável nível de distorção inicial. Na condição à vazio para o barramento, a fonte produziria: uma tensão fundamental de 127 volts, 10% de 3° harmônico, 11% de 5° harmônico e 6% de 7° harmônico, todos com defasagem angular igual a zero. Uma vez adicionadas as cargas, as novas tensões passam a ser aquelas indicadas na tabela 2.4. Estes últimos valores, como se sabe, correspondem à composição das distorções originalmente presentes na tensão e aquelas associadas com as injeções das correntes harmônicas.

Tabela 2.4 – Comparação dos valores de tensão e corrente – Experimental e Computacional - Fonte de tensão contendo 127V de valor fundamental , 10% de 3° harmônico, 11% de 5° harmônico e 6% de 7° harmônico, todos com defasagem igual a 0° - Sistema Teste contendo apenas cargas lineares (Condição 2).

Grandeza	Experimental		Computacional		Erro	
	Magnitude	Ângulo*	Magnitude	Ângulo*	Magnitude (%)**	Ângulo (°)
V (1ª ordem)	126,70 V	-3,55°	128,10 V	-3,87°	1,10%	0,32°
V (3ª ordem)	16,54 V	-14,34°	16,39 V	-15,02°	0,91%	0,68°
V (5ª ordem)	30,97 V	-48,76°	32,72 V	-51,16°	5,65%	2,40°
V (7ª ordem)	11,83 V	-129,12°	11,77 V	-134,40°	0,51%	5,28°
I (1ª ordem)	2,10 A	25,88°	2,11 A	24,21°	0,48%	1,67°
I (3ª ordem)	0,45 A	43,93°	0,45 A	43,01°	0%	0,92°
I (5ª ordem)	1,29 A	20,34°	1,35 A	18,29°	4,65%	2,05°
I (7ª ordem)	0,68 A	-55,13°	0,66 A	-59,41°	2,94%	4,28°

* O ângulo da tensão fundamental é tomado como referência (ângulo = 0°)

** O percentual de erro tem por referência o valor experimental

Embora em proporções mais favoráveis, de um modo geral, os resultados evidenciam uma boa correlação entre os desempenhos experimental e computacional. As diferenças, naturalmente, podem ser atribuídas aos mesmos fatores já mencionados anteriormente.

2.4.3 – RESULTADOS PARA A TENSÃO DISTORCIDA – SISTEMA TESTE CONTENDO CARGAS LINEARES E NÃO-LINEARES (CONDIÇÃO 3)

Dando seguimento, nesta terceira condição utilizou-se, mais uma vez, de uma tensão de suprimento com um apreciável nível de distorção, conforme realizado na condição 2, ou seja, com a fonte produzindo: uma tensão fundamental de 127 volts, 10% de 3° harmônico, 11% de 5° harmônico e 6% de 7° harmônico, todos com defasagem angular igual a zero. Uma vez adicionadas as cargas, neste caso carga lineares e não-lineares, as tensões no barramento serão de acordo com aquelas indicadas na tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Comparação dos valores de tensão e corrente – Experimental e Computacional - Fonte de tensão contendo 127V de valor fundamental, 10% de 3° harmônico, 11% de 5° harmônico e 6% de 7° harmônico, todos com defasagem igual a 0° - Sistema Teste contendo cargas lineares e não-lineares (Condição 3).

Grandeza	Experimental		Computacional		Erro	
	Magnitude	Ângulo*	Magnitude	Ângulo*	Magnitude (%)**	Ângulo (°)
V (1ª ordem)	119,37 V	-5,37°	120,40 V	-5,12°	0,86%	0,25°
V (3ª ordem)	26,98 V	-1,05°	27,23 V	0,28°	0,93%	1,33°
V (5ª ordem)	9,77 V	-60,80°	10,18 V	-59,17°	4,20%	1,63°
V (7ª ordem)	9,52 V	-129,27°	9,93 V	-129,40°	4,31%	0,13°
I (1ª ordem)	3,18 A	-13,69°	3,13 A	-14,89°	1,57%	1,20°
I (3ª ordem)	1,17 A	95,75°	1,24 A	97,00°	5,98%	1,25°
I (5ª ordem)	0,62 A	-44,32°	0,63 A	-41,31°	1,61%	3,01°
I (7ª ordem)	0,55 A	-60,29°	0,58 A	-58,47°	5,45%	1,82°

* O ângulo da tensão fundamental é tomado como referência (ângulo = 0°)

** O percentual de erro tem por referência o valor experimental

Mais uma vez nota-se que os resultados, de um modo geral, evidenciam uma boa correlação entre os desempenhos experimental e computacional. As diferenças, novamente, podem ser atribuídas aos fatores já mencionados.

Do exposto segue que o Sistema Teste proposto, no que se refere ao seu desempenho experimental e computacional, reflete, com relativa qualidade, a operacionalidade do conjunto.

CAPÍTULO III

MÉTODO DA POTÊNCIA HARMÔNICA

3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo contempla uma das primeiras concepções destacadas na literatura relacionada à questão da identificação da responsabilidade sobre as distorções harmônicas. A metodologia está alicerçada no princípio da determinação da direcionalidade das potências: fundamental e harmônicas.

Não obstante a sua menção no passado como uma alternativa para uma melhor identificação das questões atreladas com as distorções harmônicas encontradas nos pontos de acoplamento comum (PAC) entre supridores e consumidores, o método, embora ainda praticado para algumas situações, foi um dos mais criticados procedimentos destinados aos fins aqui almejados.

Dentro deste enfoque, o presente capítulo centraliza os seguintes pontos fundamentais:

- Apresentação do estado da arte do método e respectiva fundamentação analítica;
- Aplicação do método no âmbito experimental e computacional;

- Análise dos resultados e estabelecimento de termos conclusivos sobre a adequação do método.

3.2 – ESTADO DA ARTE E FUNDAMENTAÇÃO ANALÍTICA

O método da potência harmônica tem por princípio a análise da direcionalidade do fluxo de potência harmônica ativa na rede e sua correlação com o fluxo da potência fundamental.

A equação (3.1) destaca o procedimento utilizado para o cálculo da potência harmônica ativa para uma determinada ordem harmônica h .

$$P_h = \Re \left(\dot{V}(\omega_h) \cdot \dot{I}(\omega_h)^* \right) \quad (3.1)$$

Sendo: P_h – potência harmônica ativa de ordem h ;

\Re – representa a parte real do complexo;

$\dot{V}(\omega_h)$ – fasor tensão harmônica de ordem h ;

$\dot{I}(\omega_h)$ – fasor corrente harmônica de ordem h ;

* - representa o conjugado do complexo.

De acordo com a referência [7], a qual apresenta os princípios do método da potência harmônica constata-se que, uma vez obtida a tensão e a corrente do sistema junto a um PAC, as mesmas podem ser decompostas através da série de Fourier. A partir do conhecimento das componentes harmônicas individuais, o procedimento para se determinar o fluxo da potência

harmônica e a característica da carga (geradora ou receptora) para uma determinada ordem harmônica é o que segue:

- Primeiramente calcula-se a potência harmônica fundamental, observando o seu sinal, o qual, na ausência de geração interna do consumidor, é adotado como positivo;
- No que tange às componentes harmônicas de tensão e corrente de mesma ordem, deve-se determinar a respectiva diferença angular ou de fases (α_h). Esta grandeza é essencial para a atribuição da direcionalidade do fluxo harmônico e consiste num dos pilares do método;
- A partir da referência tomada como sendo o sinal da potência fundamental, através de princípios da teoria de circuitos tem-se que se:
 - $\alpha_h < 90^\circ$: o consumidor estaria predominantemente atuando como receptor da ordem harmônica sob consideração. Nestas circunstâncias a potência harmônica calculada será também positiva;
 - $\alpha_h > 90^\circ$: o consumidor atua, predominantemente, como gerador da ordem harmônica sob enfoque e a potência harmônica assim calculada receberia um sinal contrário ao da fundamental.

Portanto, a atribuição de responsabilidade neste método da potência harmônica ocorre unicamente por meio da análise do fluxo de potência harmônica. É importante ressaltar que, no caso da existência de mais de um consumidor conectado ao PAC, a avaliação deverá considerar os demais fluxos dos consumidores adjacentes.

Apesar de o presente método ser o mais simples e difundido procedimento para a atribuição da responsabilidade no processo das distorções harmônicas, existem várias críticas

levantadas contra a sua aplicação prática. Em [7] e outras fontes são destacados os seguintes pontos:

- Necessidade de um medidor digital de potência que possua recursos apropriados à análise de Fourier;
- A precisão na investigação do fluxo da potência harmônica ativa é dificultada quando $\alpha_h \approx 90^\circ$;
- Os baixos níveis de distorção, em particular das tensões harmônicas, podem dificultar a medição e precisão dos resultados;
- Erros advindos dos sensores de medição (transformadores de corrente e tensão) podem comprometer os resultados de forma decisiva.

Objetivando contornar parte destes inconvenientes, a mencionada referência sugere o emprego de um procedimento de cálculo através da análise instantânea da potência harmônica ativa trifásica do sistema. Todavia, não se encontrou maiores evidências da eficácia desta proposta.

Em [25], têm-se também comentários altamente desfavoráveis à utilização do método em discussão. Esta referência é taxativa em afirmar que o procedimento é inconsistente e que não deve ser empregado para os fins aqui delineados.

Não obstante as observações anteriores, vale ressaltar que na atualidade ainda se encontram trabalhos que têm por meta resgatar a metodologia da potência harmônica [26]. Em sua maioria, os artigos relacionados a este tema geralmente propõem procedimentos alternativos, tal como já referenciado em [7], que sugere o cálculo instantâneo da potência ativa. Em [27] sugere-se a substituição dos cálculos das potências ativas pelas potências reativas. De qualquer modo, os levantamentos bibliográficos feitos nesta pesquisa apontam

para outros procedimentos que não o aqui considerado para a atribuição da responsabilidade sobre a questão das distorções harmônicas encontradas no PAC.

3.3 – APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

A avaliação de desempenho do método da potência harmônica para a atribuição das responsabilidades dominantes entre as partes envolvidas, de acordo com a estratégia geral desta dissertação, será realizada através de investigações envolvendo experimentos e trabalhos de simulação computacional. Para tal, utilizar-se-á, tanto experimentalmente como computacionalmente, do Sistema Teste anteriormente selecionado e também das situações operacionais postuladas no Capítulo II.

Nestes termos, os trabalhos feitos e discutidos na seqüência compreendem a apresentação, análise e conclusões extraídas de três condições operacionais para o Sistema Teste, a saber:

- **Condição 1:** fonte de tensão puramente senoidal suprindo cargas lineares e não-lineares;
- **Condição 2:** fonte de tensão contendo distorções suprindo apenas cargas lineares;
- **Condição 3:** fonte de tensão com distorções suprindo o conjunto de cargas lineares e não-lineares.

3.3.1 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Empregando o arranjo físico detalhado no Capítulo II, os resultados apresentados na seqüência ressaltam o desempenho do Método da Potência Harmônica para as 3 condições operacionais anteriormente definidas.

a) Condição 1 – Experimental

A tabela 3.1 sintetiza os resultados experimentais obtidos para a Condição 1.

Tabela 3.1 – Avaliação experimental do Método da Potência Harmônica – Tensão de suprimento senoidal com 127V - Sistema Teste contendo cargas lineares e não-lineares (Condição 1).

Ordem	Experimental		Resultados da Aplicação do Método	
	Grandeza	Fasor	Defasagem Angular	Potência Harmônica Ativa
1^a	V	120,93/-5,41° V	7,94°	395,243 W
	I	3,30/-13,35° A		
3^a	V	12,71/27,69° V	-97,73°	-1,761 W
	I	1,03/125,42° A		
5^a	V	11,75/127,97° V	-93,44°	-0,416 W
	I	0,59/-138,59° A		
7^a	V	6,14/127,87° V	-92,56°	-0,060 W
	I	0,22/-139,57° A		

Os resultados obtidos revelam que:

- A tensão do barramento, originalmente senoidal e de 127 volts, foi alterada em seu valor fundamental, pelo aparecimento das componentes harmônicas apresentadas. Isto seria esperado devido ao fato que a carga não-linear, injetando correntes harmônicas, produz correspondentes distorções de tensão;
- Os ângulos de defasagem entre as tensões e suas correspondentes correntes harmônicas situam-se dentro do 3° quadrante, excetuando-se a fundamental,

que, conforme já estabelecido como premissa, está no 1º quadrante. Disto desprende que os fluxos de potências harmônicas ativas encontram-se em oposição ao da potência fundamental. Estes resultados ratificam as expectativas, visto que as componentes harmônicas responsáveis pelas distorções estão fisicamente atreladas à carga, ou seja, são de total responsabilidade do consumidor;

- Ainda em relação aos valores das potências harmônicas, como antecipado quando da discussão dos princípios da metodologia, estes se mostram com magnitudes bastante pequenas quando comparadas ao valor da potência fundamental. Como ressaltado, isto pode originar uma das causas da imprecisão do processo. Também, face à natureza dos circuitos típicos, em que predomine o efeito indutivo em suas impedâncias, os ângulos de defasagem das ordens harmônicas estão muito próximos a 90° . Como tal valor corresponde à fronteira do processo decisório, qualquer desvio a mais ou a menos poderá acarretar erros de interpretação sobre a direcionalidade predominante na caracterização das distorções harmônicas no PAC;
- Não obstante às dificuldades relacionadas com as medições, o Método das Potências Harmônicas, para a situação avaliada, mostrou-se satisfatório. Os resultados determinam que a responsabilidade dominante pelas distorções harmônicas do PAC é devida, unicamente, ao consumidor.

b) Condição 2 – Experimental

Considerando agora a rede com uma tensão distorcida e contendo apenas cargas lineares, a tabela 3.2 mostra os resultados experimentais obtidos.

Tabela 3.2 – Avaliação experimental do Método da Potência Harmônica – Tensão de suprimento com 127V de valor fundamental, 10% de 3º harmônico, 11% de 5º harmônico e 6% de 7º harmônico, todos com defasagem igual a 0º - Sistema Teste contendo apenas cargas lineares (Condição 2).

Ordem	Experimental		Resultados da Aplicação do Método	
	Grandeza	Fasor	Defasagem Angular	Potência Harmônica Ativa
1ª	V	126,70/ <u>-3,55°</u> V	-29,43°	231,735 W
	I	2,10/ <u>25,88°</u> A		
3ª	V	16,54/ <u>-14,34°</u> V	-58,27°	3,914 W
	I	0,45/ <u>43,93°</u> A		
5ª	V	30,97/ <u>-48,76°</u> V	-69,10°	14,252 W
	I	1,29/ <u>20,34°</u> A		
7ª	V	11,83/ <u>-129,12°</u> V	-73,99°	2,219 W
	I	0,68/ <u>-55,13°</u> A		

Os resultados evidenciam que:

- A tensão fundamental do barramento, originalmente de 127 volts, teve seu valor levemente alterado. Também, devido à superposição de níveis individuais de tensões harmônicas sobre a fundamental, nos termos já esclarecidos, a nova tensão aplicada sobre a carga, agora linear, passou a apresentar uma distorção total de 29,24%. Como consequência de um suprimento de cargas lineares através de tensões distorcidas surge, como esperado, correspondentes correntes harmônicas;
- Os ângulos de defasagem entre as tensões e correspondentes correntes estão, todos, situados no 4º quadrante. Isto determina que os fluxos de potências harmônicas ativas se encontram no mesmo sentido que a potência fundamental. Novamente, esta constatação seria esperada, visto que todos os harmônicos

existentes neste sistema são oriundos da fonte, ou seja, de responsabilidade da concessionária;

- No que tange aos valores das potências harmônicas, mais uma vez se percebe que suas magnitudes são bastante pequenas, fato este que pode comprometer a precisão do processo. Todavia, os ângulos de fase entre os harmônicos de tensão e corrente correspondentes não apresentam a particularidade observada anteriormente, ou seja, não se situam nas imediações de 90° ;
- Não obstante as questões apontadas, também para a Condição 2 o desempenho do Método das Potências Harmônicas mostrou-se mais uma vez satisfatório, atribuindo toda responsabilidade pelas distorções harmônicas do PAC à fonte.

c) Condição 3 – Experimental

Esta situação reflete a operação do Sistema Teste quando da presença de uma rede com distorções iniciais suprindo cargas lineares e não-lineares. Desta forma, há de se compreender que existem injeções harmônicas por ambas as partes, quais sejam, o supridor e o consumidor. A tabela 3.3 mostra os resultados experimentais obtidos.

Tabela 3.3 – Avaliação experimental do Método da Potência Harmônica – Tensão de suprimento com 127V de valor fundamental, 10% de 3º harmônico, 11% de 5º harmônico e 6% de 7º harmônico, todos com defasagem igual a 0° - Sistema Teste contendo cargas lineares e não-lineares (Condição 3).

Ordem	Experimental		Resultados da Aplicação do Método	
	Grandeza	Fasor	Defasagem Angular	Potência Harmônica Ativa
1ª	V	119,37/ <u>-5,37°</u> V	8,32°	375,601 W
	I	3,18/ <u>-13,69°</u> A		
3ª	V	26,98/ <u>-1,05°</u> V	-96,80°	-3,738 W
	I	1,17/ <u>95,75°</u> A		
5ª	V	9,77/ <u>-60,80°</u> V	-16,48°	5,809 W
	I	0,62/ <u>-44,32°</u> A		
7ª	V	9,52/ <u>-129,27°</u> V	-68,98°	1,878 W
	I	0,55/ <u>-60,29°</u> A		

Os resultados obtidos permitem constatar que:

- A tensão fundamental do barramento, originalmente de 127 volts, teve seu valor alterado devido ao suprimento das cargas, pela imposição de distorções e pela injeção das correntes harmônicas;
- Observando a tensão harmônica de ordem 3, constata-se que a magnitude da mesma foi incrementada quando comparadas com a Condição 2. Este aumento pode ser justificado pela composição de dois efeitos de mesma frequência, um associado com a pré-distorção imposta e outra pela contribuição da carga não-linear. Por outro lado, ao se observar as 5^a e 7^a harmônicas de tensão, verifica-se um comportamento oposto ao acima comentado. De fato, a composição entre as parcelas de responsabilidades do supridor e consumidor conduz, desta feita, a uma atenuação dos valores individuais encontrados para a Condição 2. Este fenômeno pode ser facilmente compreendido quando se leva em conta a questão das defasagens entre os efeitos correlacionados com as componentes advindas do suprimento e da carga;
- No que se refere às potências harmônicas finais, os resultados evidenciam direcionalidades correspondentes e também opostas à fundamental. Como já observado, o método em questão não permite a separação das parcelas de responsabilidade, porém indica o sentido predominante da fonte de harmônicos. Desta forma, os valores evidenciam que a componente de ordem 3 é predominantemente advinda da carga, enquanto que as duas demais estão mais diretamente relacionadas com a fonte.

3.3.2 – RESULTADOS COMPUTACIONAIS

De modo similar aos estudos experimentais, procede-se, na seqüência, a apresentação e discussão dos resultados obtidos computacionalmente para as mesmas três condições de funcionamento do Sistema Teste anteriormente empregadas.

a) Condição 1 – Computacional

A tabela 3.4 sintetiza o desempenho computacional do sistema dentro da situação imposta pela Condição 1.

Tabela 3.4 – Avaliação computacional do Método da Potência Harmônica – Tensão de suprimento senoidal com 127V - Sistema Teste contendo cargas lineares e não-lineares (Condição 1).

Ordem	Computacional		Resultados da Aplicação do Método	
	Grandeza	Fasor	Defasagem Angular	Potência Harmônica Ativa
1 ^a	V	120,30/ <u>-5,26°</u> V	9,38°	379,813 W
	I	3,20/ <u>-14,64°</u> A		
3 ^a	V	12,39/ <u>29,54°</u> V	-96,36°	-1,455 W
	I	1,06/ <u>125,90°</u> A		
5 ^a	V	12,57/ <u>127,00°</u> V	-93,80°	-0,533 W
	I	0,64/ <u>-139,20°</u> A		
7 ^a	V	6,77/ <u>126,60°</u> V	-92,70°	-0,077 W
	I	0,24/ <u>-140,70°</u> A		

Os resultados obtidos evidenciam um desempenho similar àqueles derivados dos trabalhos experimentais. As observações são as mesmas e, por este motivo, não serão aqui repetidas.

b) Condição 2 – Computacional

A tabela 3.5 mostra os resultados computacionais obtidos para a Condição 2, o qual difere do anterior pela distorção imposta à tensão de suprimento e pela eliminação da parcela não-linear da carga.

Tabela 3.5 – Avaliação computacional do Método da Potência Harmônica – Tensão de suprimento com 127V de valor fundamental, 10% de 3º harmônico, 11% de 5º harmônico e 6% de 7º harmônico, todos com defasagem igual a 0º - Sistema Teste contendo apenas cargas lineares (Condição 2).

Ordem	Computacional		Resultados da Aplicação do Método	
	Grandeza	Fasor	Defasagem Angular	Potência Harmônica Ativa
1 ^a	V	128,10/ <u>-3,87°</u> V	-28,08°	238,475 W
	I	2,11/ <u>24,21°</u> A		
3 ^a	V	16,39/ <u>-15,02°</u> V	-58,03°	3,905 W
	I	0,45/ <u>43,01°</u> A		
5 ^a	V	32,72/ <u>-51,16°</u> V	-69,45°	15,505 W
	I	1,35/ <u>18,29°</u> A		
7 ^a	V	11,77/ <u>-134,40°</u> V	-74,99°	2,012 W
	I	0,66/ <u>-59,41°</u> A		

Estes resultados computacionais novamente evidenciam um desempenho similar àqueles derivados dos trabalhos experimentais. As observações são as mesmas e, por esta razão, não serão aqui colocadas outra vez.

c) Condição 3 – Computacional

A tabela 3.6 mostra os resultados computacionais obtidos para a Condição 3. Este caso, como já esclarecido, é determinado pela presença de harmônicos na rede de alimentação e também pela produção de harmônicos da carga.

Tabela 3.6 – Avaliação computacional do Método da Potência Harmônica – Tensão de suprimento com 127V de valor fundamental, 10% de 3º harmônico, 11% de 5º harmônico e 6% de 7º harmônico, todos com defasagem igual a 0° - Sistema Teste contendo cargas lineares e não-lineares (Condição 3).

Ordem	Computacional		Resultados da Aplicação do Método	
	Grandeza	Fasor	Defasagem Angular	Potência Harmônica Ativa
1ª	V	120,40/-5,12° V	9,77°	371,386 W
	I	3,13/-14,89° A		
3ª	V	27,23/0,28° V	-96,72°	-3,951 W
	I	1,24/97,00° A		
5ª	V	10,18/-59,17° V	-17,86°	6,104 W
	I	0,63/-41,31° A		
7ª	V	9,93/-129,40° V	-70,93°	1,882 W
	I	0,58/-58,47° A		

Os resultados anteriores muito pouco diferem daqueles obtidos experimentalmente. Por tal motivo considera-se dispensável maiores comentários sobre o desempenho numérico e físico da metodologia para a investigação aqui reportada.

3.4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Método da Potência Harmônica foi, inicialmente, considerado quanto aos seus fundamentos e aplicabilidade para fins da identificação da responsabilidade dominante no que tange às distorções harmônicas encontradas num PAC. Através dos desenvolvimentos feitos, ficou esclarecido que o procedimento aqui discutido não se aplica à questão da separação das parcelas de responsabilidades entre o consumidor e o supridor, mas sim, como já mencionado, conduz a resultados que permitem avaliar a origem dominante das distorções harmônicas. O método é aplicável às componentes harmônicas individuais, permitindo, assim, que sejam esclarecidas as responsabilidades dominantes para cada uma das componentes que totalizam a distorção harmônica total detectada junto ao PAC.

Apesar da simplicidade do presente método, é notória a sua fragilidade do ponto de vista prático. Embora os resultados obtidos não tenham evidenciado tal ponto, vale ressaltar que, nos trabalhos reais em campo, erros de medição e problemas com a precisão dos equipamentos, dentre outros, podem fortemente comprometer os resultados e conclusões. Estes aspectos têm sido apontados em diversas referências e somente não foi detectado nos estudos avaliativos aqui feitos devido ao fato que o arranjo físico utilizado primou por grande simplicidade em sua composição. Também, objetivando enaltecer o uso do método, os valores de distorção utilizados na rede de baixa tensão foram bastante altos em relação aos padrões usualmente encontrados em instalações reais.

Finalmente, os resultados obtidos foram suficientemente claros no sentido de mostrar a consistência física do processo, visto que os indicadores obtidos foram em total consonância com as expectativas. Os casos avaliados primaram por situações em que, propositalmente, a origem das distorções era da fonte (Condição 2), da carga (Condição 1) e mista (Condição 3). Para todas as situações a metodologia produziu resultados condizentes.

Apesar da aplicação do procedimento proposto ao Sistema Teste não ter evidenciado nenhuma inconsistência do Método da Potência Harmônica, é importante destacar que:

- O processo não permite a separação das parcelas de responsabilidade entre supridor e consumidor. Apenas o efeito dominante é identificado para cada uma das componentes harmônicas. Por tal razão, a proposta não atende aos objetivos desta pesquisa;
- Embora o tema não tenha sido explorado nesta dissertação, as referências bibliográficas apontam para uma grande fragilidade do método quando de sua utilização em sistemas reais. Os motivos para tal foram destacados no texto.

CAPÍTULO IV

MÉTODO DA CORRENTE CONFORME E NÃO-CONFORME

4.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresenta, avalia e discute as bases da metodologia definida por “Método da Corrente Conforme e Não-conforme”. Esta proposta, idealizada por Krishnaswamy Srinivasan, fundamenta-se num princípio físico em que a corrente total que se estabelece entre a fonte de suprimento e a carga pode ser subdividida em duas parcelas. Uma denominada por “corrente conforme”, que está em total consonância com as condições impostas pela tensão de suprimento, e outra, convencionada por “corrente não-conforme”, que está associada com a natureza da carga suprida.

Obedecendo à mesma estratégia organizacional empregada para o capítulo anterior, a estrutura para a composição da presente unidade contempla os seguintes pontos focais:

- Apresentação do estado da arte do método e respectiva fundamentação analítica;
- Aplicação do método no âmbito experimental e computacional;

- Análise dos resultados e estabelecimento de termos conclusivos sobre a adequação do método.

4.2 – ESTADO DA ARTE E FUNDAMENTAÇÃO ANALÍTICA

O primeiro artigo acerca do Método da Corrente Conforme e Não-conforme corresponde àquele identificado como referência [9]. Esta publicação, em sua essência, considera que as cargas supridas podem ser divididas em duas categorias:

- **Grupo I:** que não produzem distorções adicionais àquelas já presentes na fonte de tensão de suprimento;
- **Grupo II:** que produzem distorções adicionais àquelas originalmente presentes na tensão de suprimento.

Ainda como hipótese simplificadora, a mencionada referência destaca que as cargas do Grupo I possuem a mesma impedância para todas as frequências sob avaliação. Esta condição se mostra bastante conflitante com os fundamentos elétricos, principalmente quando a carga se apresenta com elementos indutivos e capacitivos.

Quanto àquelas pertencentes ao Grupo II, estas poderiam ainda ser classificadas em três tipos:

- **Cargas Desejáveis:** que atenuam os níveis relativos de harmônicos originalmente presentes na rede;
- **Cargas Indesejáveis:** que amplificam os níveis relativos dos harmônicos originalmente presentes na rede;

- **Cargas Geradoras de Distorção**: que produzem uma corrente distorcida, mesmo quando a tensão de suprimento original se apresenta puramente senoidal. Naturalmente, como decorrência das correntes harmônicas produzidas pela carga, as tensões de suprimento poderão se apresentar, a posteriori, também distorcidas.

A partir dos conceitos anteriores é possível idealizar um circuito equivalente simplificado nos moldes indicados na figura 4.1. Esta evidencia um suprimento através de uma fonte de tensão (senoidal ou não), uma impedância representativa da rede e uma carga genérica compreendendo os dois grupos de consumidores anteriormente discutidos (Grupo I e Grupo II). O barramento de conexão entre o suprimento e a carga, como já é convencionalmente tratado, corresponde ao PAC.

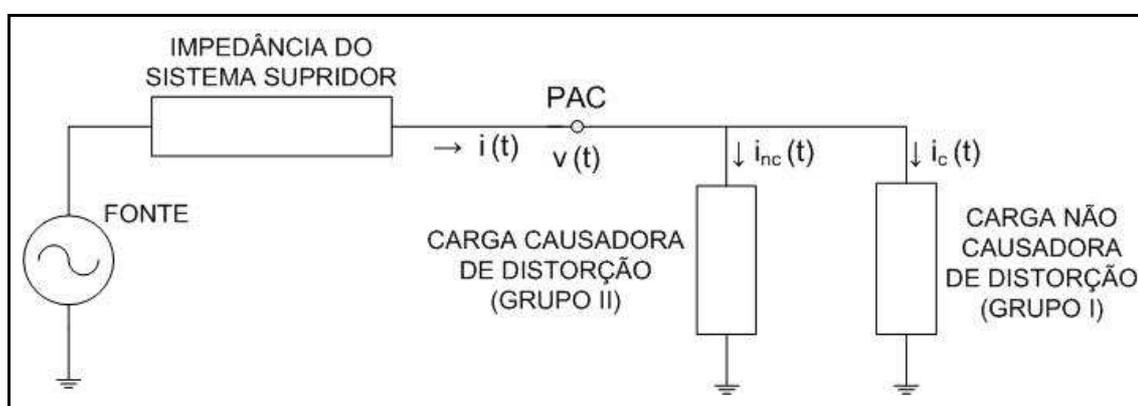


Figura 4.1 – Composição de uma típica carga segundo o Método da Corrente Conforme e Não-conforme.

Na figura:

$v(t)$ – tensão instantânea medida no PAC;

$i(t)$ – corrente instantânea total medida no PAC;

$i_c(t)$ – corrente de suprimento da carga do Grupo I ou corrente conforme;

$i_{nc}(t)$ – corrente de alimentação da carga do Grupo II ou corrente não-conforme.

Observando o circuito anterior e empregando-se o domínio do tempo, pode-se escrever:

$$i(t) = i_c(t) + i_{nc}(t) \quad (4.1)$$

Ou, no domínio da frequência, empregando a simbologia fasorial e admitindo que a formulação seja aplicável a qualquer frequência genérica ω :

$$\dot{I}(\omega) = \dot{I}_c(\omega) + \dot{I}_{nc}(\omega) \quad (4.2)$$

Considerando a hipótese imposta pela metodologia, a qual determina que a relação entre qualquer tensão harmônica e sua respectiva corrente é dada por uma impedância constante, tem-se que a parcela de corrente denominada por “conforme” pode ser calculada através da equação (4.3). Naturalmente, a grandeza y corresponde a uma constante complexa que expressa a razão entre as tensões e correntes para todas as frequências harmônicas.

$$\dot{I}_c(\omega) = y \cdot \dot{V}(\omega) \quad (4.3)$$

Voltando agora as atenções para a outra corrente, qual seja, a “não-conforme”, é importante ressaltar que, pelo fato da carga não gerar potência ativa (não-conforme) na frequência fundamental, a corrente não-conforme para a frequência fundamental deve ser necessariamente nula, isto é:

$$\dot{I}_{nc}(\omega_1) = 0 \quad (4.4)$$

Tomando agora a equação (4.3), particularizada para a frequência fundamental e adicionando o resultado à expressão (4.4), obtém-se a corrente total fundamental no domínio da frequência. Este resultado é dado na expressão (4.5), a partir da qual torna-se viável a extração da relação complexa y .

$$\dot{I}_c(\omega_1) + \dot{I}_{nc}(\omega_1) = y \cdot \dot{V}(\omega_1) \quad (4.5)$$

$$y = \frac{\dot{I}(\omega_1)}{\dot{V}(\omega_1)} \quad (4.6)$$

Inserindo a constante y de (4.6) em (4.3), tem-se então a expressão genérica para a corrente conforme válida para qualquer frequência ω . Tal equação é fornecida a seguir:

$$\dot{I}_c(\omega) = \frac{\dot{I}(\omega_1)}{\dot{V}(\omega_1)} \cdot \dot{V}(\omega) \quad (4.7)$$

Uma vez obtidas as correntes harmônicas totais medidas no PAC e também calculadas as parcelas correspondentes das componentes harmônicas associadas com a corrente conforme, torna-se factível a obtenção das correntes harmônicas não-conformes. A equação (4.8) estabelece a correlação entre tais componentes de correntes.

$$\dot{I}_{nc}(\omega) = \dot{I}(\omega) - \frac{\dot{I}(\omega_1)}{\dot{V}(\omega_1)} \cdot \dot{V}(\omega) \quad (4.8)$$

Avançando na metodologia proposta, a referência [10] dá continuidade à discussão do método da corrente conforme e não-conforme envolvendo outros dois itens de qualidade, quais sejam: flutuações e desequilíbrios de tensão de sistemas trifásicos. Não obstante a correlação com o assunto qualidade da energia, estes pontos fogem ao escopo desta dissertação. No que tange às contribuições quanto à questão das distorções harmônicas, esta referência muda a técnica de análise do domínio da frequência para o domínio do tempo.

Nestes termos, as equações anteriores são substituídas pelo conjunto de expressões abaixo, as quais, fisicamente, têm o mesmo significado que aquelas designadas por expressões (4.1) à (4.8). Assim procedendo obtém-se:

$$v(t) = \sum_{k=1}^n V_k \text{sen}(k\omega_1 t + \theta_k) \quad (4.9)$$

$$i(t) = \sum_{k=1}^n I_k \text{sen}(k\omega_1 t + \phi_k) \quad (4.10)$$

$$i_c(t) = \sum_{k=1}^n \frac{I_1}{V_1} \cdot V_k \text{sen}[k\omega_1 t + \theta_k + k(\phi_1 - \theta_1)] \quad (4.11)$$

$$i_{nc}(t) = i(t) - i_c(t) \quad (4.12)$$

Sendo: V_k – amplitude de onda da tensão de ordem harmônica k ;
 I_k – amplitude de onda da corrente de ordem harmônica k ;
 V_1 – amplitude de onda da tensão fundamental;
 I_1 – amplitude de onda da corrente fundamental;
 θ – ângulo de fase da tensão;
 ϕ – ângulo de fase da corrente.

Nota-se, mais uma vez, que as componentes harmônicas da corrente conforme possuem a mesma proporção da razão da corrente fundamental pela tensão fundamental.

Finalmente, para fins de atribuição das responsabilidades entre supridores e consumidores, no que se refere às distorções harmônicas, o processo em pauta considera que as parcelas de contribuição estão diretamente associadas com as proporções existentes entre as correntes conforme e não-conforme para cada frequência [11]. Isto será melhor esclarecido através das aplicações numéricas consideradas na seqüência.

4.3 – APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

A avaliação do desempenho do processo descrito para a separação das responsabilidades entre as partes envolvidas na sistemática da distorção harmônica será feita na forma de investigações experimentais e computacionais. Para tanto utiliza-se, mais uma vez, do arranjo físico proposto no Capítulo II desta dissertação.

Dentre uma extensa gama de investigações, optou-se por apresentar apenas a situação mais simples, a qual se encontra associada com as seguintes condições operativas para o Sistema Teste:

- Fonte de tensão puramente senoidal;
- Topologia da rede em conformidade com a proposição completa apresentada no Capítulo II.

Tendo em vista que o desempenho do método sob tais condições demonstrou notada fragilidade, consideraram-se dispensáveis estudos complementares sob condições adversas para a fonte e cargas. Portanto, o Método das Correntes Conforme e Não-conforme foi verificado na forma de um único caso.

4.3.1 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A tabela 4.1 mostra os resultados obtidos sob as condições anteriormente descritas.

Tabela 4.1 – Avaliação experimental do Método da Corrente Conforme e Não-conforme – Tensão de suprimento senoidal com 127V - Sistema Teste contendo cargas lineares e não-lineares.

Ordem	Experimental		Resultados da Aplicação do Método			
	Grandeza	Fasor	Corrente Conforme		Corrente Não-conforme	
			Fasor [A]	%	Fasor [A]	%
1 ^a	V	120,93/ <u>-5,41°</u> V	3,30/ <u>-13,35°</u>	100	0/ <u>0°</u>	0
	I	3,30/ <u>-13,35°</u> A				
3 ^a	V	12,71/ <u>27,69°</u> V	0,347/ <u>3,87°</u>	21,77	1,247/ <u>139,13°</u>	78,23
	I	1,03/ <u>125,42°</u> A				
5 ^a	V	11,75/ <u>127,97°</u> V	0,321/ <u>88,27°</u>	27,60	0,842/ <u>-122,46°</u>	72,40
	I	0,59/ <u>-138,59°</u> A				
7 ^a	V	6,14/ <u>127,87°</u> V	0,168/ <u>72,29°</u>	31,05	0,373/ <u>-125,85°</u>	68,95
	I	0,22/ <u>-139,57°</u> A				

Os resultados obtidos revelam que:

- A tensão do barramento, originalmente senoidal e de 127 volts, foi alterada em seu valor fundamental, pelo aparecimento das componentes harmônicas apresentadas. Isto seria esperado devido ao fato que a carga não-linear injetando correntes harmônicas produz correspondentes distorções de tensão;
- A corrente fundamental conforme é dominante, como seria também esperado, visto a mesma ser responsável pelo suprimento das cargas no que tange ao processo energético;
- Quanto às componentes harmônicas de corrente, como se constata, aquelas associadas com a corrente não-conforme são dominantes. Este fato seria também esperado, uma vez que apenas as cargas não-lineares são geradoras de correntes harmônicas (a fonte de tensão foi adotada senoidal). Não obstante

esta predominância foram também encontradas correspondentes correntes harmônicas enquadradas como conformes. A título de exemplo, observa-se que 21,77% da corrente de 3ª ordem é conforme, ou seja, o método atribui 21,77% da corrente de 3º harmônico como sendo de responsabilidade da concessionária, enquanto o restante, 78,23% (não-conforme), como de responsabilidade do consumidor;

- Esta constatação mostra que, muito embora o indicativo que a maior responsabilidade das distorções seja atribuída ao consumidor, o supridor também possui (embora numa escala menor) sua parcela de responsabilidade. Isto evidencia erros conclusivos sobre a questão da responsabilidade e mostra fragilidade do método.

4.3.2 – RESULTADOS COMPUTACIONAIS

A tabela 4.2 mostra os resultados obtidos sob as mesmas condições utilizadas para os estudos experimentais.

Tabela 4.2 – Avaliação computacional do Método da Corrente Conforme e Não-conforme – Tensão de suprimento senoidal com 127V - Sistema Teste contendo cargas lineares e não-lineares.

Ordem	Computacional		Resultados da Aplicação do Método			
	Grandeza	Fasor	Corrente Conforme		Corrente Não-conforme	
			Fasor [A]	%	Fasor [A]	%
1ª	V	120,30/ <u>-5,26°</u> V	3,20 / <u>-14,64°</u>	100	0 / <u>0°</u>	0
	I	3,20/ <u>-14,64°</u> A				
3ª	V	12,39/ <u>29,54°</u> V	0,330 / <u>1,40°</u>	20,55	1,276 / <u>138,19°</u>	79,45
	I	1,06/ <u>125,90°</u> A				
5ª	V	12,57/ <u>127,00°</u> V	0,334 / <u>80,10°</u>	26,57	0,923 / <u>-125,94°</u>	73,43
	I	0,64/ <u>-139,20°</u> A				
7ª	V	6,77/ <u>126,60°</u> V	0,180 / <u>60,94°</u>	30,35	0,413 / <u>-131,44°</u>	69,65
	I	0,24/ <u>-140,70°</u> A				

De um modo geral constata-se que:

- O desempenho dos estudos computacionais obedece ao mesmo padrão de observações feitas quanto aos resultados experimentais;
- Desta forma fica mais uma vez evidenciado que o processo em questão se apresenta inconsistente com os objetivos proclamados, quais sejam, de fornecer mecanismos consistentes para a atribuição das parcelas de responsabilidades no que se refere às distorções harmônicas encontradas em barramentos.

4.4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia identificada como “Corrente Conforme e Não-Conforme” foi avaliada quanto aos seus fundamentos e aplicabilidade para fins da identificação das parcelas de responsabilidades entre uma concessionária e um consumidor. O ponto focado corresponde, como de praxe, ao denominado PAC. Para este ponto de conexão são extraídas informações relativas às tensões e correntes, as quais são empregadas como base de cálculo para o processo proposto.

A fragilidade do método já se faz sentir no momento em que se estabelece que, para qualquer frequência, a correlação entre as denominadas grandezas harmônicas conformes é definida através de uma grandeza complexa constante. Ora, é amplamente sabido que tal hipótese é inconsistente com os fundamentos que regem o funcionamento dos circuitos elétricos em seus princípios.

Através da aplicação do processo ao Sistema Teste, mesmo para a situação mais simplificada, qual seja, sob a ação de uma fonte de suprimento puramente senoidal, ficou constatado a atribuição de responsabilidades de forma imprópria. Apesar dos grandes erros

numéricos, há de se reconhecer que o método não errou no sentido de indicar a maior parcela de responsabilidade.

Outras situações, mais complexas, envolvendo fontes distorcidas, retirada e inserção de parcelas de cargas, etc., foram também investigadas. Todavia, a inserção destes resultados no texto apenas estenderia o volume do trabalho sem qualquer contribuição adicional ao que foi observado. Por tal motivo considerou-se dispensável a inclusão de outros casos que não aquele selecionado para apresentação e discussão.

CAPÍTULO V

MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO

5.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresenta, discute e avalia os fundamentos do “Método da Superposição” voltado para os objetivos desta dissertação.

A metodologia foi idealizada por Wilsun Xu e baseia-se num princípio matemático amplamente conhecido e comumente aplicado à análise de circuitos elétricos, o qual determina que, havendo duas ou mais fontes que contribuem para uma dada corrente ou tensão num ponto da rede elétrica, esta pode ser partilhada entre as suas fontes de origem.

A metodologia tem sido aceita e largamente empregada na análise de circuitos lineares para os mais distintos fins da engenharia elétrica. Não obstante a menção de sua aplicabilidade para sistemas lineares, mesmo reconhecendo que os fenômenos associados com distorções harmônicas envolvem não-linearidades, a idéia de seu emprego para tais fins foi sugerida e aplicada em algumas referências bibliográficas, conforme será destacado oportunamente.

Direcionando a metodologia da superposição ao tema central desta pesquisa, o qual encontra-se focado na determinação das parcelas de responsabilidade das distorções

harmônicas, a proposta surge como uma alternativa de resposta para os desafios impostos neste processo de separação das responsabilidades entre a concessionária e carga.

Nesta perspectiva, e obedecendo a mesma estratégia organizacional empregada para os capítulos anteriores, a presente unidade destaca os seguintes pontos fundamentais:

- Apresentação do estado da arte do método e respectiva fundamentação analítica;
- Aplicação do método no âmbito experimental e computacional;
- Análise dos resultados e estabelecimento de termos conclusivos sobre a adequação do método.

5.2 – ESTADO DA ARTE E FUNDAMENTAÇÃO ANALÍTICA

A referência [13] corresponde ao primeiro artigo publicado acerca do Método da Superposição aplicado às questões da separação das responsabilidades das distorções harmônicas num dado PAC.

A figura 5.1 sintetiza o princípio da metodologia em discussão. Como se percebe, existem duas partes que formam o circuito, uma associada com a fonte de suprimento de energia, e outra, representando a carga suprida. Os modelos utilizados são extremamente simples, porém suficientes para esclarecer sobre os procedimentos de cálculo destinados aos fins aqui requeridos.

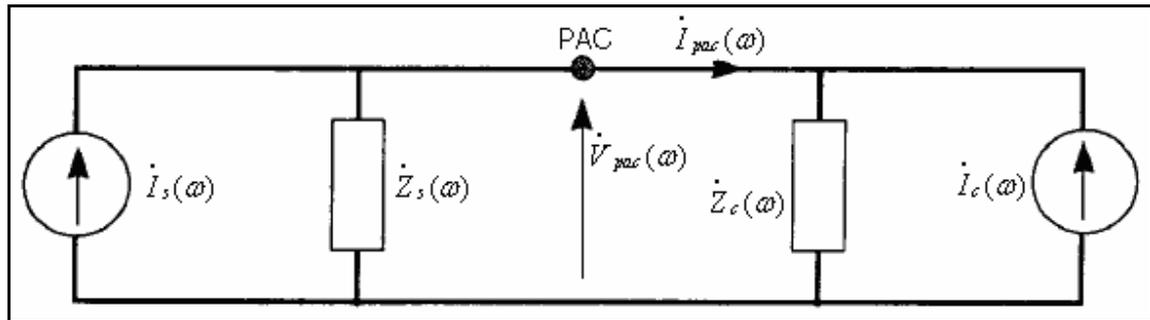


Figura 5.1 – Circuito simplificado para a aplicação do Método da Superposição.

Na figura:

$\dot{I}_s(\omega)$ – corrente da concessionária;

$\dot{Z}_s(\omega)$ – impedância do circuito da concessionária;

$\dot{I}_{pac}(\omega)$ – corrente no ponto de acoplamento comum;

$\dot{V}_{pac}(\omega)$ – tensão no ponto de acoplamento comum;

$\dot{I}_c(\omega)$ – corrente do consumidor;

$\dot{Z}_c(\omega)$ – impedância do circuito do consumidor.

No que tange às impedâncias indicadas, estas poderão assumir distintas condições. Por tal motivo, os desenvolvimentos subseqüentes encontram-se subdivididos em quatro casos, a saber:

- **Caso 1:** Impedâncias constantes;
- **Caso 2:** Impedância da concessionária variável e do consumidor constante;
- **Caso 3:** Impedância do consumidor variável e da concessionária constante;
- **Caso 4:** Impedâncias variáveis.

5.2.1 – CASO 1 – IMPEDÂNCIAS CONSTANTES

Do circuito anterior obtêm-se as equações (5.1) e (5.2), que fornecem as correntes harmônicas advindas da fonte e da carga. Vale lembrar que todas as equações aqui referidas são aplicadas para cada uma das componentes harmônicas consideradas no processo.

$$\dot{I}_s(\omega) = \frac{\dot{V}_{pac}(\omega)}{\dot{Z}_s(\omega)} + \dot{I}_{pac}(\omega) \quad (5.1)$$

$$\dot{I}_c(\omega) = \frac{\dot{V}_{pac}(\omega)}{\dot{Z}_c(\omega)} - \dot{I}_{pac}(\omega) \quad (5.2)$$

Os resultados anteriores permitem uma interpretação física da aplicação do método da superposição. Como se vê na figura 5.2, a estratégia utilizada consiste em decompor o circuito original em dois circuitos distintos que interagem através dos princípios da superposição. Um dos arranjos é representativo do efeito do supridor e outro associado ao consumidor.

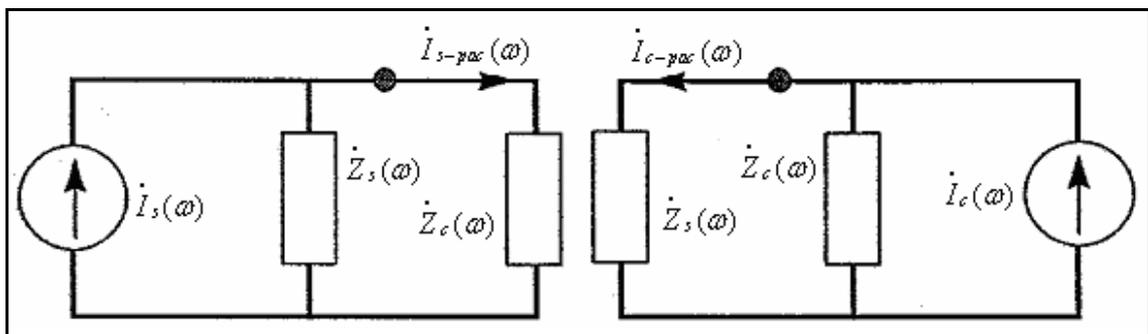


Figura 5.2 – Circuitos equivalentes utilizados no processo da superposição.

Na figura:

$\dot{I}_{s-pac}(\omega)$ – parcela de contribuição da concessionária para $\dot{I}_{pac}(\omega)$;

$\dot{I}_{c-pac}(\omega)$ – parcela de contribuição do consumidor para $\dot{I}_{pac}(\omega)$.

A partir dos circuitos individuais anteriores é possível estabelecer as seguintes relações matemáticas para as grandezas acima destacadas:

$$\dot{I}_{s-pac}(\omega) = \frac{\dot{Z}_s(\omega)}{\dot{Z}_s(\omega) + \dot{Z}_c(\omega)} \cdot \dot{I}_s(\omega) \quad (5.3)$$

$$\dot{I}_{c-pac}(\omega) = \frac{\dot{Z}_c(\omega)}{\dot{Z}_s(\omega) + \dot{Z}_c(\omega)} \cdot \dot{I}_c(\omega) \quad (5.4)$$

Através da composição das duas parcelas de corrente anteriores pode-se obter a corrente total no PAC, a qual é dada por:

$$\dot{I}_{pac}(\omega) = \dot{I}_{s-pac}(\omega) + \left(-\dot{I}_{c-pac}(\omega) \right) \quad (5.5)$$

A corrente total $\dot{I}_{pac}(\omega)$ pode ser ainda considerada como o resultado da composição das duas componentes das contribuições individuais de corrente projetadas sobre o fasor corrente total. Assim procedendo, verifica-se que o módulo de $\dot{I}_{pac}(\omega)$ poderá ser obtido através das parcelas $I_{sf}(\omega)$ e $I_{cf}(\omega)$. As figuras 5.3 e 5.4 ilustram na forma fasorial e no domínio do tempo as grandezas referidas.

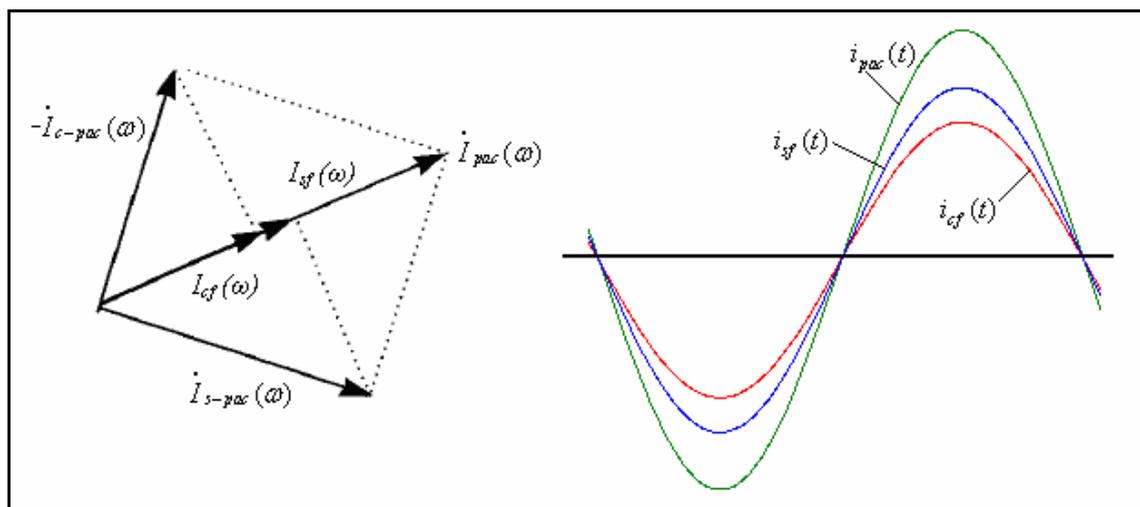


Figura 5.3 – Composição da corrente total no PAC – sentidos concordantes para as componentes individuais.

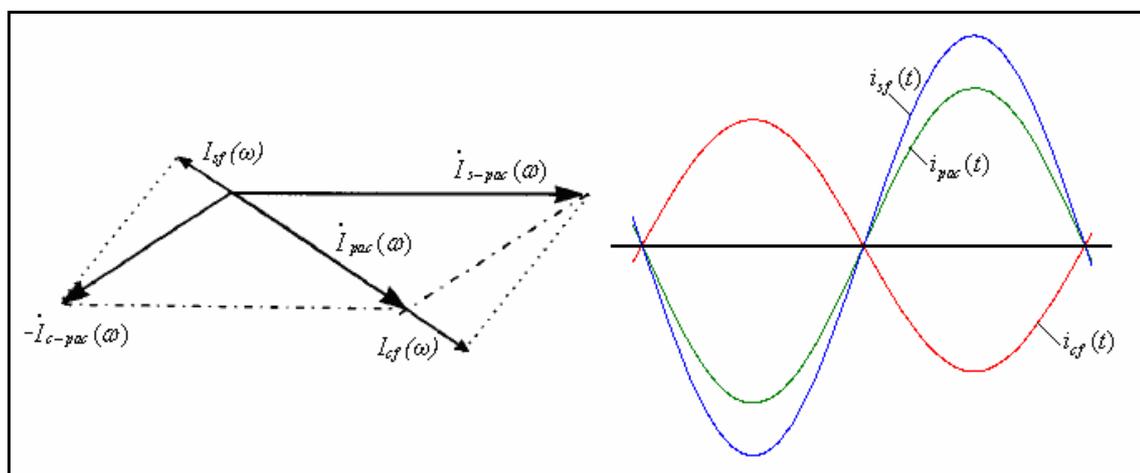


Figura 5.4 – Composição da corrente total no PAC – sentidos discordantes para as componentes individuais.

As projeções de correntes identificadas anteriormente como $I_{sf}(\omega)$ e $I_{cf}(\omega)$, segundo o autor, podem ser usadas como indicadores dos níveis de contribuição harmônica da concessionária e do consumidor no PAC. Quando as mesmas apresentarem sinais iguais, tanto o consumidor como a concessionária estarão injetando harmônicos de corrente no barramento. Por outro lado, caso apresentem sinais opostos, isto significa que um está injetando e o outro recebendo harmônicos de corrente do PAC.

5.2.2 – CASO 2 – IMPEDÂNCIA DA CONCESSIONÁRIA VARIÁVEL E DO CONSUMIDOR CONSTANTE

Naturalmente, a hipótese da invariabilidade das impedâncias constitui-se numa idealização que não encontra maiores identidades com a operação de um sistema real. Por tal motivo foram investigadas outras situações que contemplam variações das impedâncias. Para o presente caso, utilizou-se tão apenas de variações da impedância da concessionária, mantendo-se o consumidor inalterado.

O efeito de variação da impedância da concessionária é considerado através da estratégia indicada na figura 5.5. Como se vê, o mecanismo empregado consiste em adicionar uma impedância incremental, a qual, em paralelo com a original, produz o efeito da variação aqui considerado. A nova impedância ($\dot{Z}_s(\omega)$) é, portanto, modelada como uma composição da impedância de referência ou original ($\dot{Z}_{s-ref}(\omega)$) com uma impedância incremental $\Delta \dot{Z}(\omega)$. Na seqüência, a impedância incremental é correlacionada com uma alteração da injeção de corrente por parte da concessionária. Assim procedendo, como evidencia o último arranjo da figura, a variação da impedância da fonte fica, finalmente, modelada na forma de uma nova injeção de corrente harmônica pelo supridor.

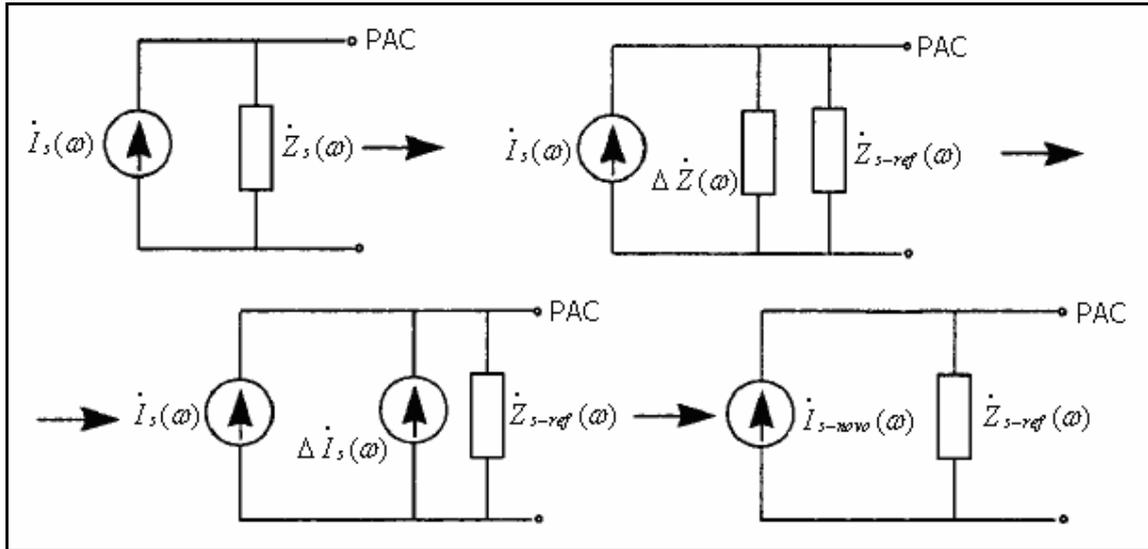


Figura 5.5 – Metodologia para a modelagem de um supridor com impedância variável.

Na figura:

$\Delta \dot{Z}(\omega)$ – variação da impedância da concessionária;

$\dot{Z}_{s-ref}(\omega)$ – impedância de referência da concessionária;

$\Delta \dot{I}_s(\omega)$ – variação de corrente equivalente à variação da impedância;

$\dot{I}_{s-novo}(\omega)$ – nova injeção de corrente da concessionária.

A nova corrente representativa do sistema da concessionária com impedância variável passa a ser dada por:

$$\dot{I}_{s-novo}(\omega) = \frac{\dot{V}_{pac}(\omega)}{\dot{Z}_{s-ref}(\omega)} + \dot{I}_{pac}(\omega) \quad (5.6)$$

Realizadas estas conversões, o circuito assumirá a forma indicada na figura 5.6. O cálculo para atribuição de responsabilidade é o mesmo apresentado anteriormente, dispensando, portanto, maiores esclarecimentos.

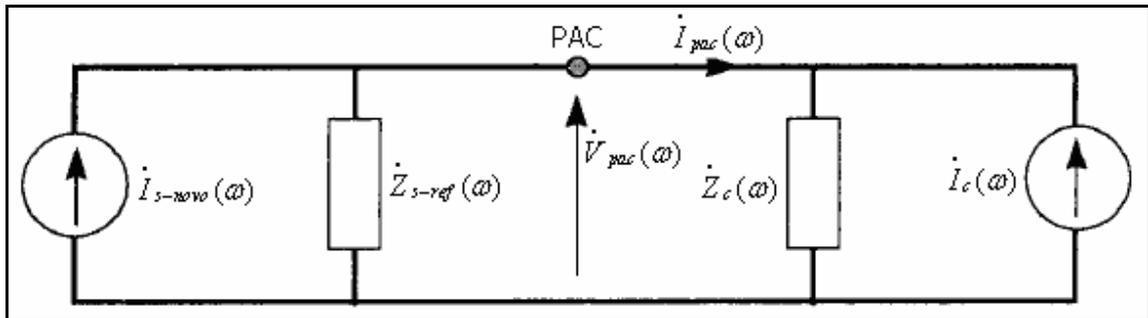


Figura 5.6 – Circuito equivalente com variação da impedância da concessionária.

5.2.3 – CASO 3 – IMPEDÂNCIA DO CONSUMIDOR VARIÁVEL E DA CONCESSIONÁRIA CONSTANTE

O Caso 3 representa uma situação em que a impedância da concessionária é considerada como constante enquanto que a do consumidor é variável.

O procedimento para a inserção do efeito da variação da impedância do consumidor é o mesmo empregado para o caso anterior e, assim procedendo, obtém-se uma nova corrente representativa desta variação. O resultado é expresso através da equação (5.7), enquanto que a figura 5.7 é indicativa do correspondente circuito elétrico que considera a impedância da carga como variável ao longo do processo.

$$\dot{I}_{c-novo}(\omega) = \frac{\dot{V}_{pac}(\omega)}{\dot{Z}_{c-ref}(\omega)} - \dot{I}_{pac}(\omega) \quad (5.7)$$

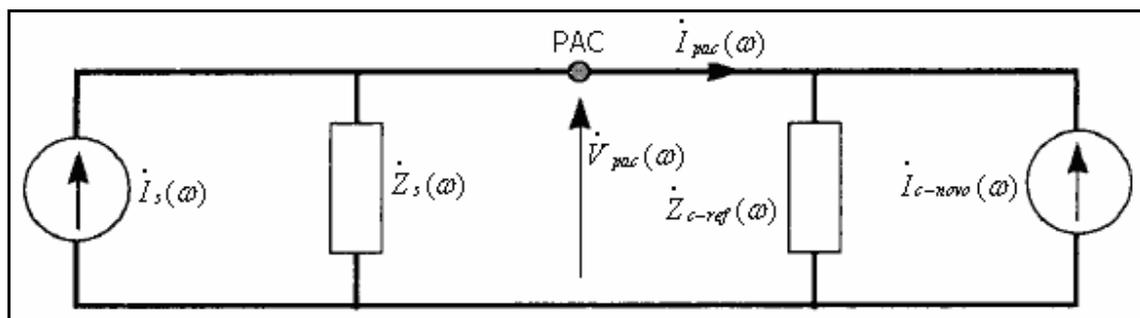


Figura 5.7 – Circuito equivalente com variação da impedância do consumidor.

5.2.4 – CASO 4 – IMPEDÂNCIAS VARIÁVEIS

O Caso 4 expressa uma situação mais realística de se encontrar para as redes elétricas, ou seja, representa a condição em que tanto a concessionária quanto o consumidor apresentam-se com impedâncias variáveis.

Novamente, obedecendo à mesma estratégia anteriormente empregada, qual seja da transformação de variações de impedância em novas correntes injetadas, a figura 5.8 ilustra a situação final obtida. Os procedimentos de cálculo são idênticos aos já esclarecidos, dispensando-se, portanto, maiores detalhes neste ponto.

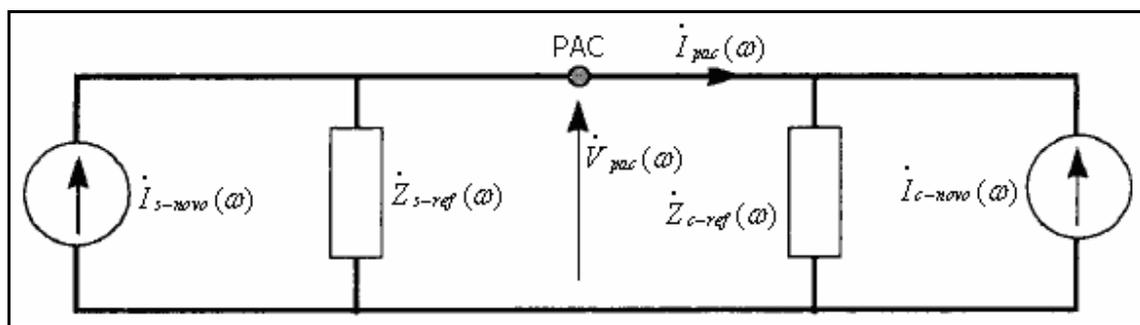


Figura 5.8 – Circuito equivalente com variação da impedância da concessionária e do consumidor.

5.2.5 – SÍNTESE DO PROCESSO PARA IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO

A aplicação prática do Método da Superposição, nos termos discutidos, compreende a seguinte rotina:

- Determinar as impedâncias $\dot{Z}_{s-ref}(\omega)$ e $\dot{Z}_{c-ref}(\omega)$;
- Realizar trabalhos de medição para a determinação de $\dot{V}_{pac}(\omega)$ e $\dot{I}_{pac}(\omega)$;
- Determinar as fontes equivalentes $\dot{I}_s(\omega)$ e $\dot{I}_c(\omega)$ usando, respectivamente, as equações (5.6) e (5.7);
- Determinar $\dot{I}_{s-pac}(\omega)$ e $\dot{I}_{c-pac}(\omega)$ usando, respectivamente, as equações (5.3) e (5.4);
- Projetar $\dot{I}_{s-pac}(\omega)$ e $\dot{I}_{c-pac}(\omega)$ sobre o fasor $\dot{I}_{pac}(\omega)$, calculando-se, assim, as parcelas $I_{sf}(\omega)$ e $I_{cf}(\omega)$ que definem as contribuições advindas da fonte e da carga.

Para fins de implementação prática, a referência [13] reconhece que o consumidor pode ter diferentes níveis de carregamento e condições de operação, o que dificultaria o reconhecimento das impedâncias de referência. Este assunto constitui-se em tema merecedor de maiores investigações. O método proposto pode também ser estendido para redes trifásicas, bastando, para isto, usar a Teoria das Componentes Simétricas para sistemas trifásicos.

5.3 – APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

O Método da Superposição para a atribuição das responsabilidades terá seu desempenho avaliado de acordo com a estratégia geral desta dissertação, a qual será realizada através de investigações envolvendo experimentos e trabalhos de simulação computacional. Nestes termos, utilizar-se-á, tanto experimentalmente como computacionalmente, do Sistema Teste anteriormente selecionado e também das situações operacionais postuladas no Capítulo II.

Para tanto, os trabalhos feitos e discutidos na seqüência compreendem a apresentação, análise e conclusões extraídas de três condições operacionais, tal como feitas no Capítulo III, para o Sistema Teste, a saber:

- **Condição 1:** fonte de tensão puramente senoidal suprindo cargas lineares e não-lineares;
- **Condição 2:** fonte de tensão contendo distorções suprindo apenas cargas lineares;
- **Condição 3:** fonte de tensão com distorções suprindo o conjunto de cargas lineares e não-lineares.

5.3.1 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados apresentados na seqüência, por meio do emprego do arranjo físico detalhado no Capítulo II, ressaltam o desempenho do Método da Superposição para as 3 condições operacionais supra definidas.

a) Condição 1 – Experimental

A tabela 5.1 apresenta os resultados experimentais da aplicação do método para a Condição 1, qual seja, aquela em que a origem das distorções encontra-se totalmente vinculada à carga.

Tabela 5.1 – Avaliação experimental do Método da Superposição – Tensão de suprimento senoidal com 127V - Sistema Teste contendo cargas lineares e não-lineares (Condição 1).

Ordem	Experimental		Resultados da Aplicação do Método					
	Grandeza	Fasor	I_{s-pac} [A]	I_{c-pac} [A]	I_{sf}		I_{cf}	
					[A]	%	[A]	%
3 ^a	V_{pac}	12,71/27,69° V	0,0210/43,29°	1,0274/-53,42°	0,003	0,29	1,027	99,71
	I_{pac}	1,03/125,42° A						
5 ^a	V_{pac}	11,75/127,97° V	0,0243/165,86°	0,5765/43,41°	0,014	2,33	0,576	97,67
	I_{pac}	0,59/-138,59° A						
7 ^a	V_{pac}	6,14/127,87° V	0,0137/77,83°	0,2310/42,49°	-0,011	4,55	0,231	95,45
	I_{pac}	0,22/-139,57° A						

Para fins de maiores informações sobre as grandezas calculadas em consonância com os procedimentos estabelecidos pelo Método da Superposição, a tabela 5.2 explicita os valores obtidos para as fontes de corrente e impedâncias associadas com o sistema supridor e a carga para a Condição 1. Os valores indicados correspondem a cálculos intermediários impostos pelo processo.

Tabela 5.2 – Valores das fontes de corrente e impedâncias obtidas para Condição 1 – Experimental.

Ordem	I_s [A]	Z_s [ohm]	I_c [A]	Z_c [ohm]
3 ^a	0,0599/-80,04°	11,7213/83,63°	0,8365/-39,61°	41,0394/-53,50°
5 ^a	0,0144/57,99°	19,4585/86,17°	0,2607/90,05°	25,4733/-68,34°
7 ^a	0,0057/47,53°	27,2121/87,26°	0,1427/174,03°	18,3424/-74,58°

Os resultados obtidos nas tabelas anteriores revelam que:

- As fontes de correntes representativas do lado da concessionária, para todas as ordens harmônicas apresentadas, têm amplitudes próximas de zero. Isto já era esperado, uma vez que, neste caso, o sistema da concessionária está suprindo o circuito com apenas tensão senoidal fundamental, ou seja, o mesmo não injeta correntes distorcidas. Do outro lado, as fontes de correntes representativas da carga expressam também o desempenho esperado, uma vez que o consumidor, para o presente caso, através de suas cargas lineares e não-lineares representa a parte do sistema totalmente responsável pelas distorções;
- No que tange às parcelas de contribuição de cada parte (fonte e carga) para corrente total do PAC, ou seja, quanto aos valores de $\dot{I}_{s-pac}(\omega)$ e $\dot{I}_{c-pac}(\omega)$, estes encontram-se em concordância com o já observado para as fontes de correntes, qual seja, $\dot{I}_{s-pac}(\omega)$ com valores próximos de zero e $\dot{I}_{c-pac}(\omega)$ com valores mais significativos. Este fato ratifica as previsões teóricas advindas da hipótese utilizada para o presente caso;
- Todos os índices adotados pelo método para a atribuição de responsabilidade apontam como sendo o consumidor o grande responsável pelas distorções do PAC. Isto advém do fato que o índice $I_{cf}(\omega)$ apresenta um percentual próximo a 100%. Estes resultados ratificam as expectativas, visto que as componentes harmônicas responsáveis pelas distorções estão, dentro das hipóteses impostas, fisicamente atreladas à carga, ou seja, são de total responsabilidade do consumidor. Apesar destas certezas, vale ressaltar que, devido a fatores como: erros de medição, aproximações nos cálculos, imprecisões dos modelos de cargas e outros; estes podem resultar em pequenos desvios das previsões

teóricas. Neste particular ressalta-se a presença de pequenos percentuais de distorções que o Método atribuiria à fonte, enquanto que, de fato, para a presente situação isto não corresponde à realidade do sistema;

- Por fim, o Método da Superposição, para a situação avaliada, mostrou-se satisfatório. Os resultados determinam, conforme o esperado, uma atribuição de responsabilidade, quanto à distorção harmônica do PAC, como praticamente atrelada tão somente ao consumidor.

b) Condição 2 – Experimental

Procedendo agora a uma nova avaliação do desempenho da Metodologia, desta vez admitindo que as distorções harmônicas, por princípio, sejam totalmente vinculadas com a fonte de suprimento, tem-se a Condição 2. Os resultados experimentais da aplicação da metodologia encontram-se sintetizados na tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Avaliação experimental do Método da Superposição – Tensão de suprimento com 127V de valor fundamental, 10% de 3° harmônico, 11% de 5° harmônico e 6% de 7° harmônico, todos com defasagem igual a 0° - Sistema Teste contendo apenas cargas lineares (Condição 2).

Ordem	Experimental		Resultados da Aplicação do Método					
	Grandeza	Fasor	I_{s-pac} [A]	I_{c-pac} [A]	I_{sf}		I_{cf}	
					[A]	%	[A]	%
3 ^a	V_{pac}	16,54/-14,34° V	0,4521/43,49°	0,0041/-15,68°	0,452	99,56	-0,002	0,44
	I_{pac}	0,45/43,93° A						
5 ^a	V_{pac}	30,97/-48,76° V	1,2863/21,80°	0,0328/117,60°	1,286	99,68	0,004	0,32
	I_{pac}	1,29/20,34° A						
7 ^a	V_{pac}	11,83/-129,12° V	0,7119/-54,58°	0,0326/-42,97°	0,712	99,58	-0,003	0,42
	I_{pac}	0,68/-55,13° A						

Complementarmente, a tabela 5.4 apresenta os valores associados com as fontes de corrente e impedâncias do sistema supridor e da carga para a Condição 2.

Tabela 5.4 – Valores das fontes de corrente e impedâncias obtidas para Condição 2 – Experimental.

Ordem	I_s [A]	Z_s [ohm]	I_c [A]	Z_c [ohm]
3 ^a	1,0928/ <u>-83,25°</u>	11,7213/ <u>83,63°</u>	0,0031/ <u>-0,80°</u>	36,5738/ <u>-57,99°</u>
5 ^a	0,6836/ <u>-82,82°</u>	19,4585/ <u>86,17°</u>	0,0140/ <u>168,59°</u>	24,2307/ <u>-69,44°</u>
7 ^a	0,3025/ <u>-82,64°</u>	27,2121/ <u>87,26°</u>	0,0211/ <u>91,24°</u>	17,8553/ <u>-75,00°</u>

Os resultados das tabelas anteriores evidenciam que:

- As fontes de correntes representativas do lado do consumidor, para todas as ordens harmônicas apresentadas, têm amplitudes próximas de zero. Isto já era esperado, uma vez que, neste caso, o consumidor possui apenas cargas lineares, ou seja, o mesmo não é capaz de injetar correntes distorcidas no sistema. Por outro lado, as fontes de correntes representativas do lado da concessionária dominam o processo, o que também já era esperado, uma vez que o sistema supridor, para o presente caso, encontra-se caracterizado por tensões distorcidas;
- No que tange às parcelas de contribuição de cada parte (supridor ou consumidor) para corrente total do PAC, ou seja, no que se referem aos valores de $\dot{I}_{s-pac}(\omega)$ e $\dot{I}_{c-pac}(\omega)$, estes encontram-se em concordância com o já observado para as fontes de correntes;
- Todos os índices adotados pelo método para a atribuição de responsabilidade apontam como sendo a concessionária a grande responsável pelas distorções do PAC. De fato, para a presente situação tem-se que $I_{sf}(\omega)$ apresenta-se com um percentual muito próximo a 100%. Estes resultados confirmam as expectativas, visto que as componentes harmônicas responsáveis pelas distorções estão atreladas à concessionária, ou seja, são de total responsabilidade do sistema

supridor. As pequenas alterações de valores em relação às previsões teóricas podem ser atribuídas aos mesmos motivos já comentados anteriormente;

- Por fim, o Método da Superposição, para a situação em questão, mostrou-se bastante satisfatório. Os resultados determinam, conforme o previsto, uma atribuição de responsabilidade quanto à distorção harmônica do PAC, como sendo de total responsabilidade da concessionária.

c) Condição 3 – Experimental

Esta situação reflete a operação do Sistema Teste quando da presença de uma rede com distorções iniciais suprindo cargas lineares e não-lineares. Nestes termos, a tabela 5.5 mostra os resultados experimentais obtidos.

Tabela 5.5 – Avaliação experimental do Método da Superposição – Tensão de suprimento com 127V de valor fundamental, 10% de 3° harmônico, 11% de 5° harmônico e 6% de 7° harmônico, todos com defasagem igual a 0° - Sistema Teste contendo cargas lineares e não-lineares (Condição 3).

Ordem	Experimental		Resultados da Aplicação do Método					
	Grandeza	Fasor	I_{s-pac} [A]	I_{c-pac} [A]	I_{sf}		I_{cf}	
					[A]	%	[A]	%
3 ^a	V_{pac}	26,98/ <u>-1,05°</u> V	0,3974/ <u>42,47°</u>	1,0139/ <u>-64,95°</u>	0,238	19,92	0,957	80,08
	I_{pac}	1,17/ <u>95,75°</u> A						
5 ^a	V_{pac}	9,77/ <u>-60,80°</u> V	1,1947/ <u>19,70°</u>	1,0784/ <u>50,83°</u>	0,523	84,39	0,097	15,61
	I_{pac}	0,62/ <u>-44,32°</u> A						
7 ^a	V_{pac}	9,52/ <u>-129,27°</u> V	0,6475/ <u>-61,51°</u>	0,0098/ <u>-68,38°</u>	0,647	98,52	-0,010	1,48
	I_{pac}	0,55/ <u>-60,29°</u> A						

A tabela 5.6 destaca os valores para as fontes de corrente e impedâncias para a Condição 3, em consonância com os procedimentos de cálculo impostos pelo Método.

Tabela 5.6 – Valores das fontes de corrente e impedâncias obtidas para Condição 3 – Experimental.

Ordem	I_s [A]	Z_s [ohm]	I_c [A]	Z_c [ohm]
3 ^a	1,1328/-80,86°	11,7213/83,63°	0,8255/-51,15°	41,0394/-53,50°
5 ^a	0,7072/-88,17°	19,4585/86,17°	0,4876/97,47°	25,4733/-68,34°
7 ^a	0,2696/-91,81°	27,2121/87,26°	0,0607/63,16°	18,3424/-74,58°

Os resultados obtidos nas tabelas anteriores permitem constatar que:

- As fontes de correntes representativas para o supridor e o consumidor, no geral, apresentam valores significativos para ambos. Este fato é revelador que as duas partes possuem contribuições efetivas ao processo da distorção total encontrada para o PAC. Mais uma vez, como esperado, esta constatação condiz com as expectativas visto que tanto a concessionária como o consumidor possuem fontes de geração de distorções harmônicas;
- No que tange às parcelas de contribuição de cada parte para a corrente total do PAC, ou seja, no que se refere aos valores de $\dot{I}_{s-pac}(\omega)$ e $\dot{I}_{c-pac}(\omega)$, estes se encontram, de forma geral, em concordância com o já observado para as fontes de correntes, visto que ambas as parcelas apresentam-se com valores significativos;
- Os índices adotados pelo método para a atribuição de responsabilidade apontam para que, em relação à 3^a ordem harmônica, a maior contribuição é proveniente da carga. Para demais ordens, constata-se o inverso, ou seja, a fonte é predominante. Os valores numéricos para os percentuais de contribuição são destacados na tabela;
- Por fim, o Método da Superposição, para a situação em questão, mostrou-se mais uma vez satisfatório. Os resultados determinam, conforme o previsto,

uma atribuição de responsabilidade quanto à distorção harmônica do PAC compartilhada entre a concessionária e o consumidor.

5.3.2 – RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Da mesma forma que os estudos experimentais, têm-se na seqüência, a apresentação e discussão dos resultados obtidos computacionalmente para as mesmas condições de funcionamento do Sistema Teste.

a) Condição 1 – Computacional

A tabela 5.7 sintetiza o desempenho computacional do sistema para a Condição 1.

Tabela 5.7 – Avaliação computacional do Método da Superposição – Tensão de suprimento senoidal com 127V - Sistema Teste contendo cargas lineares e não-lineares (Condição 1).

Ordem	Experimental		Resultados da Aplicação do Método					
	Grandeza	Fasor	I_{s-pac} [A]	I_{c-pac} [A]	I_{sf}		I_{cf}	
					[A]	%	[A]	%
3 ^a	V_{pac}	12,39/ <u>29,54°</u> V	0,0010/ <u>-113,53°</u>	1,0605/ <u>-54,15°</u>	0	0	1,060	100
	I_{pac}	1,06/ <u>125,90°</u> A						
5 ^a	V_{pac}	12,57/ <u>127,00°</u> V	0,0101/ <u>151,98°</u>	0,6364/ <u>41,65°</u>	0,004	0,57	0,6363	99,43
	I_{pac}	0,64/ <u>-139,20°</u> A						
7 ^a	V_{pac}	6,77/ <u>126,60°</u> V	0,0211/ <u>70,68°</u>	0,2583/ <u>41,74°</u>	-0,018	6,52	0,258	93,48
	I_{pac}	0,24/ <u>-140,70°</u> A						

A tabela 5.8 representa os valores obtidos para as fontes de corrente e impedâncias relacionadas com o sistema supridor e a carga para a Condição 1.

Tabela 5.8 – Valores das fontes de corrente e impedâncias obtidas para Condição 1 – Computacional.

Ordem	I_s [A]	Z_s [ohm]	I_c [A]	Z_c [ohm]
3 ^a	2,9570/123,14°	11,7213/83,63°	0,8635/-40,34°	41,0394/-53,50°
5 ^a	0,0060/44,11°	19,4585/86,17°	0,2878/88,29°	25,4733/-68,34°
7 ^a	0,0089/40,38°	27,2121/87,26°	0,1595/173,28°	18,3424/-74,58°

Os resultados obtidos evidenciam um desempenho similar àqueles derivados dos trabalhos experimentais. As observações são as mesmas e, por este motivo, não serão aqui repetidas.

b) Condição 2 – Computacional

A tabela 5.9 mostra os resultados computacionais obtidos para a Condição 2.

Tabela 5.9 – Avaliação computacional do Método da Superposição – Tensão de suprimento com 127V de valor fundamental, 10% de 3° harmônico, 11% de 5° harmônico e 6% de 7° harmônico, todos com defasagem igual a 0° - Sistema Teste contendo apenas cargas lineares (Condição 2).

Ordem	Experimental		Resultados da Aplicação do Método					
	Grandeza	Fasor	I_{s-pac} [A]	I_{c-pac} [A]	I_{sf}		I_{cf}	
					[A]	%	[A]	%
3 ^a	V_{pac}	16,39/-15,02° V	0,4476/43,04°	0,0024/-142,35°	0,448	99,56	0,002	0,44
	I_{pac}	0,45/43,01° A						
5 ^a	V_{pac}	32,72/-51,16° V	1,3501/18,25°	0,0010/-66,43°	1,350	100	0	0
	I_{pac}	1,35/18,29° A						
7 ^a	V_{pac}	11,77/-134,40° V	0,6610/-59,34°	0,0013/-21,68°	0,661	99,84	-0,001	0,16
	I_{pac}	0,66/-59,41° A						

Complementarmente, a tabela 5.10 contém os valores das fontes de corrente e impedâncias para a Condição 2.

Tabela 5.10 – Valores das fontes de corrente e impedâncias obtidas para Condição 2 – Computacional.

Ordem	I_s [A]	Z_s [ohm]	I_c [A]	Z_c [ohm]
3 ^a	1,0820/ <u>-83,71°</u>	11,7213/ <u>83,63°</u>	0,0019/ <u>-127,47°</u>	36,5738/ <u>-57,99°</u>
5 ^a	0,7175/ <u>-86,37°</u>	19,4585/ <u>86,17°</u>	0,0004/ <u>-15,44°</u>	24,2307/ <u>-69,44°</u>
7 ^a	0,2809/ <u>-87,40°</u>	27,2121/ <u>87,26°</u>	0,0008/ <u>112,53°</u>	17,8553/ <u>-75,00°</u>

Os resultados computacionais novamente evidenciam um desempenho similar àqueles derivados dos trabalhos experimentais. As observações são as mesmas e, por esta razão, não serão aqui colocadas outra vez.

c) Condição 3 – Computacional

A tabela 5.11 mostra os resultados computacionais obtidos para a Condição 3.

Tabela 5.11 – Avaliação computacional do Método da Superposição – Tensão de suprimento com 127V de valor fundamental, 10% de 3° harmônico, 11% de 5° harmônico e 6% de 7° harmônico, todos com defasagem igual a 0° - Sistema Teste contendo cargas lineares e não-lineares (Condição 3).

Ordem	Experimental		Resultados da Aplicação do Método					
	Grandeza	Fasor	I_{s-pac} [A]	I_{c-pac} [A]	I_{sf}		I_{cf}	
					[A]	%	[A]	%
3 ^a	V_{pac}	27,23/ <u>0,28°</u> V	0,3800/ <u>39,57°</u>	1,0838/ <u>-65,82°</u>	0,205	16,53	1,035	83,47
	I_{pac}	1,24/ <u>97,00°</u> A						
5 ^a	V_{pac}	10,18/ <u>-59,17°</u> V	1,2074/ <u>21,31°</u>	1,0747/ <u>52,68°</u>	0,555	88,13	0,075	11,87
	I_{pac}	0,63/ <u>-41,31°</u> A						
7 ^a	V_{pac}	9,93/ <u>-129,40°</u> V	0,6645/ <u>-61,51°</u>	0,0085/ <u>-50,96°</u>	0,664	98,81	-0,008	1,19
	I_{pac}	0,58/ <u>-58,47°</u> A						

Objetivando apresentar informações complementares conforme determinado pelo Método em questão, a tabela 5.12 destaca os valores obtidos para as fontes de corrente e impedâncias para a Condição 3.

Tabela 5.12 – Valores das fontes de corrente e impedâncias obtidas para Condição 3 – Computacional.

Ordem	I_s [A]	Z_s [ohm]	I_c [A]	Z_c [ohm]
3^a	1,0832/ <u>-83,76°</u>	11,7213/ <u>83,63°</u>	0,8825/ <u>-52,01°</u>	41,0394/ <u>-53,50°</u>
5^a	0,7147/ <u>-86,56°</u>	19,4585/ <u>86,17°</u>	0,4860/ <u>99,32°</u>	25,4733/ <u>-68,34°</u>
7^a	0,2767/ <u>-87,81°</u>	27,2121/ <u>87,26°</u>	0,0526/ <u>80,59°</u>	18,3424/ <u>-74,58°</u>

Os resultados anteriores muito pouco diferem daqueles obtidos experimentalmente. Por tal motivo considera-se dispensável maiores comentários sobre o desempenho numérico e físico da metodologia para a investigação aqui colocada.

5.4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Método da Superposição foi, inicialmente, considerado quanto aos seus fundamentos e aplicabilidade para fins de identificação da atribuição de responsabilidade no que tange às distorções harmônicas encontradas num PAC.

Os resultados obtidos experimentalmente e computacionalmente foram suficientemente claros no sentido de mostrar a consistência física do processo, visto que os indicadores obtidos se mostraram consistentes com as expectativas do desempenho físico esperado. Os casos avaliados primaram por situações em que, propositalmente, a origem das distorções era da fonte (Condição 2), da carga (Condição 1) e mista (Condição 3). Para todas as situações a metodologia produziu resultados condizentes.

Nestes termos, pode-se afirmar que o Método da Superposição, a princípio, constitui-se num procedimento que se mostra consistente para o processo da atribuição das parcelas de responsabilidades entre um supridor e um consumidor. Os resultados oferecidos, como destacado no texto, conduzem a indicadores numéricos percentuais das parcelas de responsabilidades entre as partes.

Não obstante o sucesso obtido para o Sistema Teste empregado, é importante destacar que, a exemplo da referência [16], o processo em questão ainda é merecedor das seguintes observações:

- O efeito da existência de erro de medição de ângulo de fase entre $\dot{V}_{pac}(\omega)$ e $\dot{I}_{pac}(\omega)$ não é tão crítico como os impactos advindos de métodos baseados na direcionalidade harmônica. Isto determina que o presente método seja mais robusto com respeito a erros de medições de ângulos de fase;
- A mencionada referência bibliográfica ainda destaca questões vinculadas com os efeitos das ressonâncias harmônicas, que neste caso pode ocorrer em três cenários: ressonância dentro do sistema da concessionária, dentro do sistema do consumidor e entre os dois sistemas. Resultados experimentais apontam que o método é suficientemente confiável mesmo sob tais condições aqui consideradas;
- Um outro ponto merecedor de destaque está na possibilidade do efeito de cancelamento de harmônicos no sistema. Nestas circunstâncias, é mostrado que o Método continua consistente.

Apesar do aparente sucesso do processo avaliado, é importante ressaltar que as maiores dificuldades que podem ser encontradas para aplicação prática do Método da Superposição estão relacionadas com a determinação das impedâncias do sistema, principalmente aquelas vinculadas com a carga, haja vista que estas geralmente se caracterizam por serem muito dinâmicas.

Somada a esta consideração, é também relevante observar que os casos investigados contemplaram arranjos físicos simplificados e ainda isentos, conforme já dito, das fortes

dinâmicas sempre presentes num sistema real. Fatos como estes, associados à necessidade de melhores modelos para as cargas e outros aspectos, com certeza, constituem-se em assuntos meritórios para futuras investigações até a obtenção de uma metodologia final que se mostre mais confiável, robusta e consistente com as necessidades do setor elétrico.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

Esta dissertação, destinada a uma primeira investigação dos principais métodos encontrados na literatura para a atribuição de responsabilidade no que tange às distorções harmônicas num PAC, contemplou uma síntese dos métodos, a aplicação dos mesmos a um sistema elétrico simplificado e, finalmente, uma análise crítica dos desempenhos dos mesmos diante do comportamento físico esperado.

No que se refere aos procedimentos selecionados para os trabalhos, estes foram resumidos em três métodos, a saber: Método da Potência Harmônica, Método da Corrente Conforme e Não-conforme e Método da Superposição.

Para fins de uma exemplificação aplicativa, foi definido um arranjo físico constituído por uma fonte de suprimento e um consumidor, caracterizado pela composição de cargas lineares e não-lineares. Focando aspectos como: simplicidade, clareza na interpretação física, dentre outros, a opção feita recaiu sobre um arranjo bastante simples, em que preze a constância de seus elementos para que as avaliações de consistência dos resultados pudessem ser feitas com segurança. Primando por tais propriedades, e ainda, a viabilidade de sua reprodução tanto computacionalmente como experimentalmente, a decisão final foi pelo Sistema Teste destacado no texto.

a) Quanto ao Método da Potência Harmônica:

Iniciando os trabalhos pelo Método da Potência Harmônica, as discussões, avaliações e resultados obtidos culminaram por observar que este procedimento não se aplica à questão da separação das parcelas de responsabilidades entre o consumidor e o supridor, mas sim, permite uma mera identificação da origem principal das distorções harmônicas. O método é aplicável às componentes harmônicas individuais, permitindo, assim, que sejam esclarecidas as responsabilidades dominantes para cada uma das componentes que compõem a distorção harmônica total detectada junto ao PAC. Muito embora a simplicidade do método, é notória a sua fragilidade do ponto de vista prático. Apesar do fato que os resultados obtidos não tenham evidenciado tal ponto, vale ressaltar que, nos trabalhos reais em campo, erros de medição, problemas com a precisão dos equipamentos, dentre outros, podem fortemente comprometer os resultados e as conclusões. Estes aspectos têm sido apontados em diversas referências, somente não foi detectado nos estudos avaliativos aqui feitos devido ao fato que o arranjo físico utilizado primou por grande simplicidade em sua composição. *Nestes termos, fica esclarecido que o processo em questão não se aplica aos propósitos aqui almejados.*

b) Quanto ao Método da Corrente Conforme e Não-conforme:

Os trabalhos avançaram, na seqüência para a metodologia conhecida por “Corrente Conforme e Não-Conforme”. Esta foi avaliada quanto aos seus fundamentos. A fragilidade do método já se fez presente no momento em que se estabeleceu como premissa que, para qualquer frequência, a correlação entre as denominadas grandezas harmônicas conformes é definida através de uma grandeza complexa constante. Esta hipótese é inconsistente com os princípios que regem o funcionamento dos circuitos elétricos em seus princípios, portanto, o processo em pauta já se mostra frágil e limitado para aplicação em campo. *De fato, mesmo para um sistema simplificado como o empregado para fins desta pesquisa, ficou constatada*

a atribuição de responsabilidades de forma imprópria. Apesar disto, fica aqui esclarecido que o método não errou a indicação da maior parcela de responsabilidade.

c) Quanto ao Método da Superposição:

O terceiro processo investigado foi o da Superposição. Este Método foi, inicialmente, considerado quanto aos seus fundamentos e aplicabilidade para fins de identificação da atribuição de responsabilidade no que tange às distorções harmônicas encontradas num PAC. Os resultados obtidos, tanto experimentalmente como computacionalmente, foram suficientemente claros no sentido de mostrar a consistência física do processo, visto que os indicadores obtidos se mostraram coerentes com as expectativas do desempenho físico esperado. Os casos avaliados primaram por situações em que, propositalmente, a origem das distorções era da fonte, da carga e mista. Para todas as situações a metodologia produziu resultados condizentes, portanto, *o procedimento em pauta oferece consistência suficiente para os avanços que se fazem necessários neste campo de pesquisa*.

Apesar do aparente sucesso do processo avaliado, é importante ressaltar que as maiores dificuldades que podem ser encontradas para aplicação prática do Método da Superposição estão relacionadas com a determinação das impedâncias do sistema, principalmente aquelas vinculadas com a carga, haja vista que estas geralmente se caracterizam por serem muito dinâmicas.

Somada a esta consideração, é também relevante observar que os casos investigados contemplaram arranjos físicos simplificados e ainda isentos, conforme já dito, das fortes dinâmicas sempre presentes num sistema real. Fatos como estes, associados com a necessidade de melhores modelos para as cargas e outros aspectos, com certeza, constituem-se em assuntos meritórios para futuras investigações até a obtenção de uma metodologia final que se mostre mais confiável, robusta e consistente com as necessidades do setor elétrico.

Finalmente, ao término desta dissertação reconhece-se a necessidade de trabalhos investigativos adicionais nas seguintes direções:

- Aplicação do Método da Superposição para sistemas físicos mais complexos e com uma dinâmica condizente com a operação dos sistemas elétricos reais;
- Estabelecimento de procedimentos para uma melhor caracterização da impedância da rede de suprimento e da carga;
- Melhorias no processo da modelagem de cargas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Roger C. Dugan, Mark F. McGranagh, Surya Santoso, H. Wayne Beaty, *Electrical power systems quality – Second Edition*, McGraw-Hill, New York, 2003.
- [2] R. M. Derchner, G. F. Corcoran, *Circuitos de corrente alternada*, Tradução: Reynaldo Resende e Ruy Pinto da Silva Sieczkowski, 3ª Edição, Porto Alegre/RS, 1977.
- [3] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, “Submódulo 2.2 – Padrões de Desempenho da Rede Básica”, Dezembro 2002.
- [4] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, “Módulo 8 – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional”, Revisão: 30 de Agosto de 2006.
- [5] IEC, IEC-1000-3-6, *Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3: Limits – Section 6: Assessment of Emission Limits for Distorting Loads in MV and HV Power Systems*, 1996.
- [6] IEEE, Std. 519-1992, *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, 1992.
- [7] Toshihiko Tanak, Hirofumi Akagi, *A new method of harmonic power detection based on the instantaneous active power in three-phase circuits*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 4, pp 1737-1742, October 1995.

- [8] Xu, Wilsun, *Power direction method cannot be used for harmonic source detection*, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 2, pp. 873-876 Seattle, WA, USA, 2000.
- [9] Srinivasan, K., *On separating customer and supply side harmonic contributions*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, pp 1003-1012, April 1996.
- [10] K. Srinivasan, R. Jutras, *Conforming and non-conforming current for attributing steady state power quality problems*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 1, pp 212-217, January 1998.
- [11] Srinivasan, K., *Attributing harmonics in private power production*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 34, No. 5, pp 887-892, September/October 1998.
- [12] A. Chandra, B. Mbang, K. Srinivasan, B. N. Singh, P. Rastgoufard, *A method of implementation of separating customer and supply side harmonic contributions using an active filter*, IEEE Canadian Conference Electrical and Computer Engineering (CCECE), Vol. 1, pp 553-557, May 2003.
- [13] Wilsun Xu, Yilu Liu, *A method to determine customer harmonic contributions for incentive-based harmonic control applications*, IEEE PES Summer Meeting, pp 361-366, 1999.
- [14] Xiqin Zhang, Emad Ahmed, Wilsun Xu, *Determination of network harmonic impedances using steady-state measurement*, IEEE PES Summer Meeting, pp 390-394, 1999.
- [15] Wilsun Xu, Emad E. Ahmed, Xiqin Zhang, Xian Liu, *Measurement of network harmonic impedances: practical implementation issues and their solutions*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 1, pp 210-216, January 2002.
- [16] Wilsun Xu, Yilu Liu, *A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 2, pp 804-811, April 2000.

- [17] Ahmed A. Moustafa, Abdel M. Moussa, Mahmoud A. El-Gammal, *Separation of customer and supply harmonics in electrical power distribution systems*, Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power IEEE, Vol. 3, pp 1035-1040, October 2000.
- [18] S. A. Soliman, A. M. Al-Kandari, *A simple and novel technique for linear and nonlinear load modeling in the time domain*, IEEE, pp 1616-1619, 1996.
- [19] R. K. Hartana, G. G. Richards, *Harmonic source monitoring and identification using neural networks*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 4, pp 1098-1104, November 1990.
- [20] D. Srinivasan, W. S. Ng, A. C. Liew, *Neural-network-based signature recognition for harmonic source identification*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 1, pp 398-405, January 2006.
- [21] Haili Ma, Adly A. Girgis, *Identification and tracking of harmonic sources in a power system using a Kalman filter*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, pp 1659-1665, July 1996.
- [22] Kent K. C. Yu, N. R. Watson, J. Arrillaga, *An adaptive Kalman filter dynamic harmonic state estimation and harmonic injection tracking*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, pp 1577-1584, April 2005.
- [23] Sérgio F. P. Silva, José Carlos de Oliveira, *Uma contribuição à questão do compartilhamento da responsabilidade sobre as distorções harmônicas em sistemas elétricos*, Anais Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Campina Grande/PB, 2006.
- [24] G. V. Andrade JR., S. R. Naidu, M. G. G. Néri, R. M. Soares, E. G. Costa, *Contribuições da distorção harmônica de tensão entre concessionária e consumidor*, Anais Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Campina Grande/PB, 2006.
- [25] Wilsun Xu, Xian Liu, Yilu Liu, *An investigation on the validity of power-direction method for harmonic source determination*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 1, pp 214-219, January 2003.

[26] Andreia Leiria, M. T. Correia de Barros, *Identification of harmonic content and their origin in power networks*, IEEE Bologna PowerTech Conference, Bologna, Italy, June 23-26, 2003.

[27] Chun Li, Wilsun Xu, Thavatchai Tayjasanat, A “critical impedance” – based method for identifying harmonic sources, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 2, pp 671-678, April 2004.