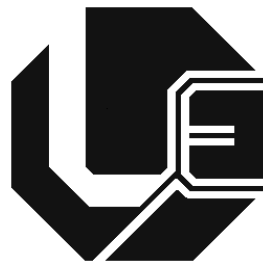


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



UMA CONTRIBUIÇÃO À AVALIAÇÃO DE
DESEMPENHO DOS PRINCIPAIS MÉTODOS
PARA A MODELAGEM DE CARGAS NOS
ESTUDOS DO COMPARTILHAMENTO DAS
RESPONSABILIDADES SOBRE AS
DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Fernanda Hein da Costa

Uberlândia
2009

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

**UMA CONTRIBUIÇÃO À AVALIAÇÃO DE
DESEMPENHO DOS PRINCIPAIS MÉTODOS PARA A
MODELAGEM DE CARGAS NOS ESTUDOS DO
COMPARTILHAMENTO DAS RESPONSABILIDADES
SOBRE AS DISTORÇÕES HARMÔNICAS**

Dissertação apresentada por Fernanda
Hein da Costa à Universidade Federal
de Uberlândia, para a obtenção do
título de Mestre em Ciências.

BANCA EXAMINADORA:

José Carlos de Oliveira, PhD (Orientador) - UFU
Carlos Eduardo Tavares, Dr. – UFU
Gilson Paulillo, Dr. - LACTEC
Milton Itsuo Samesima, Dr. – UFU
Sérgio Ferreira da Paula Silva, Dr. - UFU

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

- C837c Costa, Fernanda Hein da, 1983-
Uma contribuição à avaliação de desempenho dos principais métodos para a modelagem de cargas nos estudos do compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas / Fernanda Hein da Costa. - 2009.
84 f. : il.
Orientador: José Carlos de Oliveira
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.
1. Energia elétrica - Qualidade - Teses. I. Oliveira, José Carlos de, 1947 -. 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
MODELAGEM DE CARGAS NOS ESTUDOS DO
COMPARTILHAMENTO DAS RESPONSABILIDADES
SOBRE AS DISTORÇÕES HARMÔNICAS**

Fernanda Hein da Costa

Dissertação apresentada por Fernanda Hein da Costa 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. Alexandre Cardoso
Coordenador do Curso de Pós- Graduação em
Engenharia Elétrica

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus pais Alex e Cristina, ao Thiago e a toda minha família e amigos que estiveram comigo nos melhores e piores momentos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a **DEUS** pela minha vida, e por todas as bênçãos que Ele tem derramado sobre mim.

Ao professor orientador **José Carlos de Oliveira** pelo incentivo, confiança, orientação, paciência, amizade, e compreensão durante todas as etapas deste trabalho.

Aos **professores e funcionários** dessa instituição, que me acolheram de maneira maravilhosa, e que durante todos os momentos, deram total apoio para a realização deste.

A toda minha família, na pessoa de meus pais, **Alex e Cristina**; avós, **Vó Edith, Vó Celina e Vô Reni**; irmãs, **Paulinha, Fernanda e Pâmela**; a **Carmen** e ao **Paulo**, e **demais familiares** por sempre torcerem por mim e me incentivarem em todos os momentos de minha vida, desde a infância até os dias de hoje.

Ao **Thiago**, que muitas vezes não entendeu meus fins de semana e noites de trabalho, mas apesar disto me apoiou e me ajudou muito durante estes oito anos de namoro.

Aos **colegas e amigos de pós-graduação**, Angélica, Arthur, Camila, Carlos Eduardo “Cadu”, Elise, Fabrício Augusto, Fabrício Parra, Ivan, Ivandro, Isaque, Loana, Marcus Vinícius, Paulo Naves e Sergio, que fizeram parte de meu convívio durante esses anos de mestrado, e que tiveram papel imprescindível para a realização dessa obra.

Aos **demais amigos**, que apesar de não terem sido citados aqui, também estão presentes nos agradecimentos que faço em meu

coração, por todo carinho e apoio, ao longo de minha vida e para realização desse trabalho.

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

RESUMO

Dentre os assuntos contemplados pela área da Qualidade da Energia está a questão das distorções harmônicas. A importância do tema tem motivado órgãos reguladores, concessionárias e consumidores a se preocuparem com a matéria, visto que, na atualidade, observam-se crescentes níveis para 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, com destaque às delimitações junto aos pontos de acoplamento entre os supridores e os consumidores. Estes documentos, a exemplo das orientações oferecidas pelo ONS e ANEEL, de um modo global, primam pela definição de valores de referência para as distorções totais e individuais, sem, todavia, se preocuparem com o 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. Destas questões nasce o conceito do “compartilhamento de responsabilidade sobre as distorções harmônicas”, que consiste no alicerce desta dissertação, a qual, de forma pontual, visa sintetizar o estado da arte sobre o tema, definir como método de análise o princípio da superposição, apresentar as principais dificuldades atreladas com o seu uso e, de modo especial, investigar os principais procedimentos vinculados com a caracterização das impedâncias harmônicas equivalentes de cargas. As investigações conduzidas se fundamentam em propostas existentes na literatura e destinadas a obtenção das impedâncias equivalentes das partes envolvidas no processo, qual seja, a rede de suprimento e o consumidor. À luz destes fatos são então realizados estudos computacionais empregando-se para tanto dois arranjos, um com característica teórica e outra com uma maior identificação com a realidade. Análises de desempenho e avaliações críticas são então conduzidas visando aferir as propriedades e adequação dos procedimentos propostos para os fins aqui almejados.

Palavras-Chave: qualidade da energia elétrica, distorções harmônicas, compartilhamento de responsabilidade, princípio da superposição, modelagem de cargas.

ABSTRACT

Amongst a variety of subjects covered by the area of the Power Quality the harmonic distortion matters emerge as questions of major importance. The relevance of such topic has motivated regulating agencies, concessionaires, consumers and researches to deal with the challenges associated to the area. As a matter of fact, these concerns are growing in relevance as far as the disturbance loads are increasing in number and power. Considering the site effects that voltage distortion may cause in both the utility and consumer, international and national organizations are looking forward to the establishment of standards to limit the level of distortion found in real systems. This is the case of the guide lines provided by the ONS and ANEEL agencies. Although the existence of national and international references, in a general way, they focus the definition of recommended values to the total and individual harmonics, without worrying about their origin. Therefore, for a given situation, if the limits are overcome, the cost of mitigation techniques became a great problem to be sorted out, mainly due to the high cost of investment necessary to the implementation of filters and others. In order to achieve a fairer way to split the responsibility between the agents, methods to indicate the degree of responsibility upon the measured harmonic voltage distortion at a PCC must be investigated. Within this context appears the concept of "total harmonic voltage sharing of responsibility". This is the main target of this dissertation, which aims to summarize the state of the art of the theme, with emphasis to the use of the superposition method. In addition to the basic principles, the work also points out the main difficulties linked with its use of this approach and, in particular, investigates the main procedures related to the characterization of the equivalent harmonic load impedance as well as the supply one. Existing methods are highlighted to deal with the consumer equivalent impedance and computational tests are made and discussed so as to find their advantages and disadvantages in finding the correct harmonic responsibility between the power supply authority and the consumer.

Words-Key: power quality, harmonic distortions, sharing of responsibility, superposition principle, modeling of the equivalent impedance.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 – CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E ESTABELECIMENTO DE DIRETRIZES.....	2
1.3 – CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESTA DISSERTAÇÃO	4
1.4 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	5

CAPÍTULO II

FUNDAMENTAÇÃO DO MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO	8
2.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	8
2.2 – FUNDAMENTAÇÃO	9
2.3 – ETAPAS PARA A APLICAÇÃO DO MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO	13

CAPÍTULO III

ANÁLISE DAS PROPOSTAS DE MODELAGEM PARA A IMPEDÂNCIA HARMÔNICA DE CONSUMIDORES	15
3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	15
3.2 – MÉTODOS.....	16
3.2.1 – MÉTODO I – REFERÊNCIA [12]	17
3.2.2 – MÉTODO II – REFERÊNCIA [16].....	22
3.2.3 – MÉTODO III – REFERÊNCIA [8].....	32
3.3 – AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO DOS MÉTODOS	39
3.3.1 – AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL I – SISTEMA COM CARGA PURAMENTE LINEAR	41

3.3.2 – AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL II – SISTEMA COM CARGAS LINEARES E NÃO-LINEARES	44
3.3.3 – APLICAÇÃO DO MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO	48
3.4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	50

CAPÍTULO IV

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DO COMPARTILHAMENTO

PARA UM SISTEMA REAL.....	52
4.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	52
4.2 - CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA E DAS CONDIÇÕES OPERATIVAS IMPOSTAS	53
4.3 – METODOLOGIAS PARA A DETERMINAÇÃO DE $Z(\omega)$ DA REDE DE SUPRIMENTO.....	60
4.4 – CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA HARMÔNICA EQUIVALENTE DO CONSUMIDOR	64
4.4.1 - IMPEDÂNCIA HARMÔNICA EQUIVALENTE PARA A CARGA - SITUAÇÃO A	65
4.4.2 - IMPEDÂNCIA HARMÔNICA EQUIVALENTE PARA A CARGA - SITUAÇÃO B.....	67
4.5 – APLICAÇÃO DO MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO	68
4.5.1 - RESULTADOS DO COMPARTILHAMENTO DAS RESPONSABILIDADES HARMÔNICAS PARA A SITUAÇÃO A.....	69
4.5.2 - RESULTADOS DO COMPARTILHAMENTO DAS RESPONSABILIDADES HARMÔNICAS PARA A SITUAÇÃO B.....	72
4.6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	75

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES 77

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 81

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Circuito simplificado para a aplicação do Método da Superposição.	9
Figura 2.2 – Circuitos equivalentes utilizados no processo da Superposição.	11
Figura 3.1 – Circuito equivalente associado com a concepção física da proposta do Método I.	18
Figura 3.2 – Circuito equivalente associado com a concepção física da proposta do Método II.	24
Figura 3.3 – Circuito equivalente associado com a concepção física da proposta do Método III.	34
Figura 3.4 – Circuito elétrico equivalente do sistema com cargas puramente lineares – Sistema Teste I.	41
Figura 3.5 – Circuito elétrico equivalente do sistema com cargas lineares e não-lineares – Sistema Teste II.	45
Figura 4. 1 - Diagrama unifilar do sistema elétrico radial.....	55
Figura 4. 2 - Módulo da impedância harmônica do sistema em função da frequência.	63
Figura 4. 3 - Ângulo da impedância harmônica do sistema em função da frequência.....	63
Figura 4. 4 - Resumo das simulações realizadas para aplicação do Método da Superposição.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Tensões harmônicas geradas pela fonte.....	40
Tabela 3.2 – Tensões obtidas no PAC – Sistema Teste I - Simulação	42
Tabela 3.3– Corrente obtidas no PAC – Sistema Teste I - Simulação	42
Tabela 3.4 – Parâmetros RLC reais e calculados para o sistema com cargas puramente lineares	43
Tabela 3.5 – Tensões obtidas no PAC – Sistema Teste II – Simulação	45
Tabela 3.6 – Correntes obtidas no PAC – Sistema Teste II - Simulação	46
Tabela 3.7 – Parâmetros RLC reais e calculados para o sistema com cargas lineares e não-lineares	47
Tabela 3.8 – Resultado do compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções de tensão – Sistema Teste I - Caso 7.....	49
Tabela 3.9 – Resultado do compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções de tensão – Sistema Teste II - Caso 7	49
Tabela 4.1 – Subestação I.....	56
Tabela 4.2 – Hidrelétrica	56
Tabela 4.3 – Linha de transmissão de 230 kV que interliga as subestações I e IV	56
Tabela 4.4 – Transformadores.....	57
Tabela 4.5 – Cargas	58
Tabela 4.6 – Composição da carga do consumidor conectado a subestação VI	58
Tabela 4.7 – Tensões harmônicas advindas da rede básica (Subestação I).....	59
Tabela 4.8 – Valores da Impedância harmônica da concessionária - $Z(\omega)$	64

Tabela 4. 9 – Valores das tensões e correntes obtidas no barramento de 230 kV da	
Subestação VI (PAC) – Situação A	66
Tabela 4.10 – Valores dos parâmetros equivalentes (R, L e C) do consumidor	
– Situação A	66
Tabela 4.11 – Valores das tensões e correntes obtidas no barramento de 230 kV da Subestação	
VI (PAC) – Situação B	67
Tabela 4.12 – Valores dos parâmetros equivalentes (R, L e C) do consumidor	
– Situação B	68
Tabela 4.13 – Resultados para as correntes harmônicas no PAC para a Situação A	70
Tabela 4.14 – Resultados para as tensões harmônicas no PAC para a Situação A	71
Tabela 4.15 – Compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas	
entre a concessionária e o consumidor – Situação A	71
Tabela 4.16 – Resultados para as correntes harmônicas no PAC para a Situação B	73
Tabela 4.17 – Resultados para as tensões harmônicas no PAC para a Situação B	73
Tabela 4.18 – Compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas	
entre a concessionária e o consumidor – Situação B	74

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL

1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O cenário energético nacional e internacional tem dado grande importância ao tema "Qualidade da Energia Elétrica", o qual está pautado em indicadores relacionados às características do suprimento elétrico oferecido aos consumidores. Os distintos fenômenos atrelados à área referida [1] podem acarretar grandes transtornos com conseqüentes prejuízos aos diversos grupos de consumidores conectados na rede, sejam eles, industriais, comerciais ou residenciais. Estes, devido principalmente às questões financeiras decorrentes deste fornecimento não condizente com os padrões esperados de operação e, atualmente, atentos aos direitos inerentes a todos os consumidores, já não ignoram que a energia elétrica ofertada pelas concessionárias deva atender aos requisitos mínimos estabelecidos pela legislação vigente ou mesmo pelo contrato de fornecimento firmado entre as partes. O assunto, todavia, não fica restrito ao mercado consumidor visto que, as concessionárias de eletricidade também têm se preocupado com os problemas relacionados à qualidade da energia. Não obstante às regras e padrões estabelecidos em legislação, atender às expectativas

do consumidor e manter sua confiança é de fundamental importância em um mercado competitivo, exigente e em crescente expansão.

Preocupados com a possibilidade de queda na produção de seus insumos por falha ou operação indevida de seus equipamentos elétricos, os problemas de qualidade da energia tornaram-se abundantes no vocabulário dos consumidores. Associada a esta apreensão está o crescente interesse por normas ou documentos orientativos que estabeleçam, através de legislação própria, os padrões mínimos de suprimento e as sanções aplicáveis quando os valores de referência não forem obedecidos.

Dentro do contexto acima surge a presente dissertação de mestrado, a qual se encontra direcionada para as questões vinculadas com os impactos das distorções harmônicas sobre os padrões de qualidade do produto energia elétrica e à polêmica identificação de suas fontes geradoras, com destaque às questões associadas com a modelagem das cargas para fins da aplicação da metodologia selecionada.

1.2 – CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E ESTABELECIMENTO DE DIRETRIZES

Dentre os distúrbios que caracterizam a qualidade da energia, a subárea “Distorções Harmônicas” encontra-se numa posição de destaque. As tensões de suprimento das instalações consumidoras devem, em tese, ser perfeitamente senoidais. No entanto, esta condição ideal jamais será encontrada na prática, devido ao crescente emprego de dispositivos com características “não-lineares” nos sistemas elétricos de potência. A designação de “não-linear”, sob o ponto de vista de harmônicos em sistemas elétricos de potência, deve ser

entendida como toda e qualquer carga para qual a correlação entre a tensão e a corrente não obedece a formas de onda similares.

De acordo com princípios clássicos da engenharia elétrica, uma onda não-senoidal pode ser representada como uma somatória de ondas puramente senoidais de frequências múltiplas inteiras da onda original. Esta decomposição é realizada por meio da Serie de Fourier [2], resultando em uma componente com a mesma frequência da tensão aplicada, denominada de “componente fundamental”, sendo as demais conhecidas por “componentes harmônicas”, ou simplesmente, harmônicas. Uma das vantagens da utilização desta técnica matemática é que, em sistemas lineares, cada componente harmônica pode ser considerada separadamente e a distorção final determinada pela superposição das várias componentes constituintes do sinal distorcido.

Tendo em vista os efeitos negativos causados pelas componentes harmônicas de tensão e/ou corrente no sistema elétrico, existem normas e recomendações cuja finalidade é definir valores aceitáveis para as distorções harmônicas. No âmbito nacional podem-se citar: Procedimentos de Distribuição (PRODIST) [3] e Procedimento de Rede – Submódulo 2.2 – Padrões de Desempenho da Rede Básica [4]. E no cenário internacional destacam-se a IEC 1000-3-6 [5] e a IEEE 519 [6]. Estes documentos, e outros não destacados no texto, 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”, dentro do qual se encontra o tema central 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. Estudos recentes [7], [8] mostram que metodologias alicerçadas nos princípios da superposição [9]-[12] obtiveram resultados satisfatórios e promissores para se atingir as respostas almejadas quanto às origens das distintas componentes harmônicas.

De um modo geral, a grande dificuldade apontada por tais trabalhos encontra-se na questão dos valores necessários para as impedâncias harmônicas equivalentes e representativas dos consumidores e concessionárias. De fato, como será oportunamente esclarecido, tais parâmetros são essenciais à exatidão dos processos utilizados para a atribuição das responsabilidades sobre as distorções entre as partes envolvidas e, neste contexto, reconhece-se grandes lacunas a serem ainda investigadas. Após o devido trabalho de levantamento bibliográfico sobre este tema específico, constatou-se que o assunto ainda constitui-se em uma subárea de grande escassez de trabalhos. A título de esclarecimento foram encontradas as publicações [8], [13]-[19] associadas com a modelagem da impedância das cargas dos consumidores e as identificadas por [20]-[25] para a questão da impedância do supridor. Justificado pelo fato que tais trabalhos serão oportunamente discutidos em seus princípios, formulações, e mesmo, utilizados para fins desta pesquisa, os mesmos serão detalhados quando das discussões feitas em seus capítulos próprios desta dissertação.

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 à modelagem das impedâncias harmônicas associadas com consumidores:

- 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 de modelagem das impedâncias de cargas, com indicação dos processos mais consistentes.

1.4 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Com o intuito de atender as metas supracitadas, esta dissertação apresenta-se estruturada, além deste capítulo introdutório, pelas seguintes unidades:

Capítulo II – Fundamentação do Método da Superposição

Este capítulo destina-se a sintetizar as informações e requisitos impostos pelo Método da Superposição, o qual, em consonância com trabalhos anteriores ao presente, se mostrou mais adequado aos propósitos desta linha de pesquisa.

Capítulo III – Análise das Propostas de Modelagem para a Impedância Harmônica de Consumidores

Esta unidade tem por foco principal a apresentação das bases físicas, matemáticas, implementação computacional e análise crítica dos processos extraídos da literatura para fins do compartilhamento de responsabilidades

sobre as distorções harmônicas num dado barramento de acoplamento entre a concessionária local e o consumidor. Estudos computacionais são então realizados com vistas a avaliação do desempenho das estratégias para modelagem da impedância de uma dada carga para os fins aqui almejados.

Capítulo IV - Aplicação da Metodologia do Compartilhamento para um Sistema Real

Este capítulo contempla a aplicação das metodologias estudadas no capítulo anterior em um sistema com características reais. Para tanto, o sistema utilizado é caracterizado, os valores das impedâncias harmônicas representativas do consumidor e da impedância harmônica do sistema ($Z(\omega)$) são encontrados, e, o método da superposição é aplicado. Os resultados obtidos são, novamente, empregados para fins avaliativos do desempenho da metodologia estabelecida.

Capítulo V – 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 impedâncias dos consumidores para os Estudos do Compartilhamento das Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas

Referências Bibliográficas

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

CAPÍTULO II

FUNDAMENTAÇÃO DO MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO

2.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo, ainda de caráter introdutório, visa sintetizar os fundamentos do “Método da Superposição” voltado para os objetivos desta dissertação, lembrando que o processo inicial foi idealizado pelo pesquisador Wilsun Xu [9], [10]. O embasamento científico do mesmo está alicerçado em um princípio matemático amplamente conhecido e aplicado à análise de circuitos elétricos. O ponto central deste procedimento considera 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 vários estudos encontrados na literatura e, respeitadas as limitações próprias ao processo, os resultados obtidos tem se mostrado encorajadores à continuidade das investigações.

2.2 – FUNDAMENTAÇÃO

A Figura 2.1 sintetiza o princípio da metodologia da superposição. Como pode ser constatado, o circuito simplificado empregado evidencia a existência de duas partes principais na sua composição, uma atrelada com a fonte de suprimento de energia, e outra, representando a carga alimentada. Naturalmente, há de se reconhecer que tanto uma como outra podem, em campo, corresponder a complexos arranjos, os quais são indicados na presente representação como impedâncias e fontes concentradas e agrupadas num único barramento, o qual, para muitas aplicações recebe a designação de Ponto de Acoplamento Comum ou PAC. Este local corresponde ao ponto físico onde as atenções dos processos de análise de desempenho da rede estão voltados e, de modo particular para os fins desta dissertação, a questão das distorções harmônicas. Lembrando conceitos elementares de circuitos elétricos, poder-se-ia, inclusive, atribuir a tais partes, os tradicionais modelos de Thevenin e Norton.

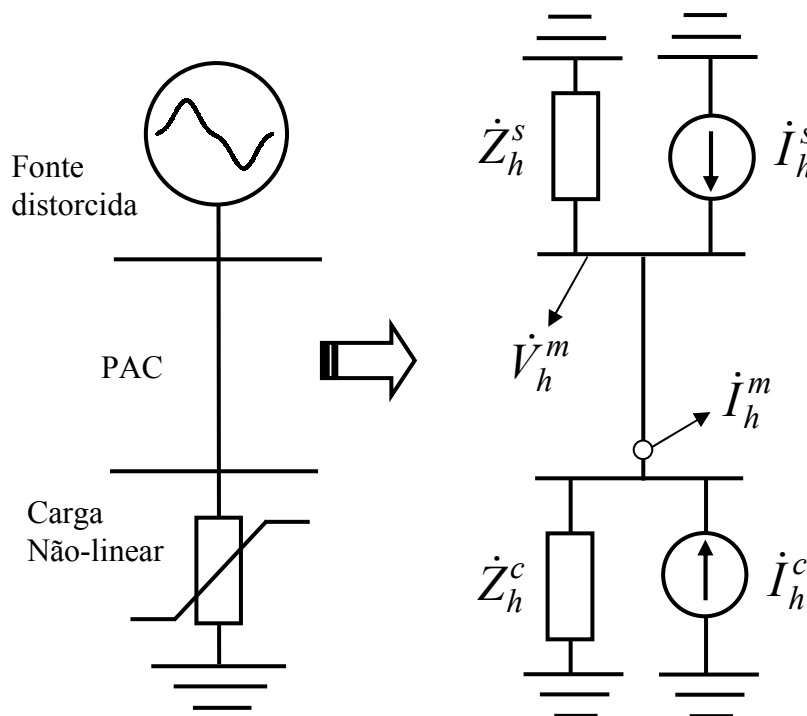


Figura 2.1 – Circuito simplificado para a aplicação do Método da Superposição.

Na Figura 2.1, sendo h uma grandeza representativa de uma ordem harmônica genérica, as demais têm por significado:

$\square^m$
 V_h – tensão medida no PAC;

$\square^m$
 I_h – corrente harmônica medida no PAC;

$\square^c$
 I_h – corrente harmônica resultante das cargas não-lineares do consumidor;

$\square^s$
 I_h – corrente harmônica proveniente do sistema supridor;

$\square^s$
 Z_h – impedância harmônica equivalente da concessionária;

$\square^c$
 Z_h – impedância harmônica equivalente do consumidor.

Do circuito anterior, e de acordo com [8], obtêm-se as equações (2.1) e (2.2), que fornecem as correntes harmônicas advindas da fonte e da carga. Vale lembrar que todas as equações aqui referidas são aplicadas, considerando-se, individualmente, cada uma das componentes harmônicas consideradas no processo.

$$\dot{I}_h^s = \frac{\dot{V}_h^m}{\dot{Z}_h^s} + \dot{I}_h^m \quad (2.1)$$

$$\dot{I}_h^c = \frac{\dot{V}_h^m}{\dot{Z}_h^c} - \dot{I}_h^m \quad (2.2)$$

A formulação acima é válida, de forma independente, para todas as ordens harmônicas presentes nos espectros da tensão e da corrente medidos no PAC. Assim, de acordo com a Figura 2.2, o circuito original é decomposto em dois circuitos distintos que interagem entre si

através dos princípios da superposição. Um dos arranjos é representativo do efeito do supridor e outro associado ao consumidor.

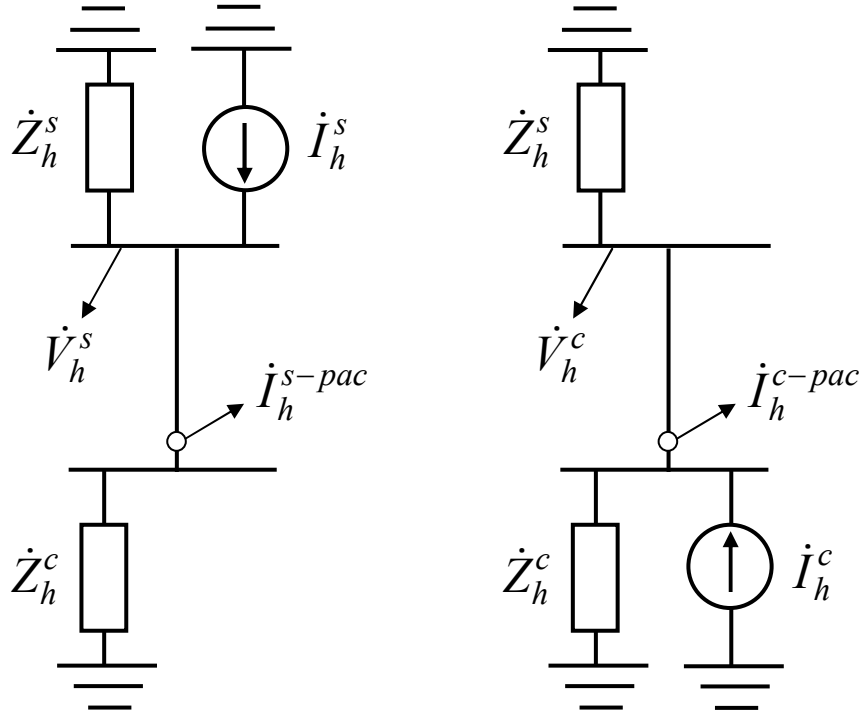


Figura 2.2 – Circuitos equivalentes utilizados no processo da Superposição.

Na figura:

I_h^{s-pac} _ Contribuição da concessionária para a corrente medida no PAC;

I_h^{c-pac} _ Contribuição do consumidor para a corrente medida no PAC.

Após usar o divisor de corrente nos circuitos individuais anteriores, é possível estabelecer as seguintes relações matemáticas:

$$I_h^{s-pac} = \left(\frac{\dot{Z}_h^s}{\dot{Z}_h^s + \dot{Z}_h^c} \right) \dot{I}_h^s \quad (2.3)$$

$$\dot{I}_h^{c-pac} = \left(\frac{\dot{Z}_h^c}{\dot{Z}_h^s + \dot{Z}_h^c} \right) \dot{I}_h^c \quad (2.4)$$

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

$$\dot{I}_h^m = \dot{I}_h^{s-pac} + \dot{I}_h^{c-pac} \quad (2.5)$$

Nas normas e recomendações sobre distorções harmônicas há uma predominância no estabelecimento de limites para as distorções de tensão, pois esta, normalmente, é decorrente das correntes injetadas e das características das impedâncias do local. Assim a avaliação da tensão é mais prática, visto que a limitação das correntes implicaria em verificações da impedância do sistema supridor naquele ponto. Nestes termos, a tensão harmônica associada exclusivamente ao efeito não-linear do consumidor, pode ser determinada por:

$$\dot{V}_h^c = \dot{I}_h^{c-pac} \cdot \dot{Z}_h^s \quad (2.6)$$

Substituído (2.2) em (2.4) e inserindo o resultado em (2.6), tem-se que a tensão harmônica de ordem h , decorrente exclusivamente da atuação das cargas não-lineares do consumidor, pode ser expressa por:

$$\dot{V}_h^c = \left(\frac{\dot{V}_h^m - \dot{I}_h^m \cdot \dot{Z}_h^c}{\dot{Z}_h^c + \dot{Z}_h^s} \right) \dot{Z}_h^s \quad (2.7)$$

De forma análoga, a contribuição referente à concessionária é determinada por:

$$\dot{V}_h^s = \left(\frac{\dot{V}_h^m + \dot{I}_h^m \cdot \dot{Z}_h^s}{\dot{Z}_h^c + \dot{Z}_h^s} \right) \dot{Z}_h^c \quad (2.8)$$

As equações (2.7) e (2.8) representam, pois as distorções harmônicas resultantes da atuação isolada do consumidor e da concessionária, respectivamente. Os valores obtidos podem então ser comparados com os limites impostos pela regulamentação vigente de forma a caracterizar o principal responsável ou promover a divisão das responsabilidades sobre as distorções harmônicas medidas no PAC.

É relevante observar que o procedimento descrito, devido a natureza do banco de dados obtido através dos recursos de medição comercialmente disponíveis, pode ser aplicado sucessivamente, ciclo a ciclo, ou a cada intervalo de tempo. Assim procedendo torna-se viável a utilização de procedimentos adicionais envolvendo recursos estatísticos para a obtenção das respostas finais esperadas.

2.3 – ETAPAS PARA A APLICAÇÃO DO MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO

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

- Determinação das impedâncias $\dot{Z}_h^s$ e $\dot{Z}_h^c$;
- Realização de uma campanha de medições para a determinação de $\dot{V}_h^m$ e $\dot{I}_h^m$;

- Determinação das fontes equivalentes $\dot{I}_h^c$ e $\dot{I}_h^s$ usando, respectivamente, as equações (2.1) e (2.2);
- Determinação das contribuições individuais de corrente $\dot{I}_h^{s-pac}$ e $\dot{I}_h^{c-pac}$ usando, respectivamente, as equações (2.3) e (2.4);
- E por último, cálculo das contribuições individuais de tensão $\dot{V}_h^c$ e $\dot{V}_h^s$ com as equações (2.7) e (2.8).

Portanto, a aplicação do método da superposição para a separação das parcelas de responsabilidade sobre as distorções harmônicas, depende, basicamente, de informações sobre as tensões e as correntes extraídas de medições, assim como do conhecimento das impedâncias envolvidas no processo. Não obstante a simplicidade do princípio do Método da Superposição vale ressaltar, mais uma vez, que um dos pontos mais complexos para a correta utilização do processo está no conhecimento das impedâncias equivalentes da concessionária e do consumidor.

Diante deste reconhecimento, esta dissertação avança, nos capítulos seguintes, com estudos direcionados a investigação da eficácia dos métodos existentes e divulgados para o atendimento à questão das impedâncias harmônicas equivalentes das cargas envolvidas no processo.

CAPÍTULO III

ANÁLISE DAS PROPOSTAS DE MODELAGEM PARA A IMPEDÂNCIA HARMÔNICA DE CONSUMIDORES

3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Diante das exigências impostas pelo método para a atribuição da responsabilidade sobre as distorções harmônicas baseado nos princípios da superposição, reconhece-se a necessidade do conhecimento prévio de várias informações. Destas, os valores de tensão e corrente no PAC são obtidos via medição direta e, por tal motivo, não oferecem maiores dificuldades, a não ser pelo cumprimento das orientações para registros de harmônicos. As outras grandezas requeridas por tal método já não são tão simples. Estas, como pode-se reconhecer através das formulações propostas no capítulo II, são definidas pelas impedâncias harmônicas do supridor e do consumidor.

Diante desta conjuntura encontra-se o cerne deste capítulo, o qual está integralmente direcionado a uma análise do estado da arte sobre os trabalhos nacionais e internacionais atrelados com a obtenção da impedância harmônica equivalente das cargas ou consumidores.

Também, de modo simplificado, são realizados estudos iniciais visando à análise de desempenho dos processos em pauta com vistas a verificar suas eficácias e limitações. Para tanto, é utilizado um arranjo hipotético que consiste no emprego de um circuito bastante simples, para o qual as considerações, constatações, eficácia e conclusões são mais facilmente elaboradas.

3.2 – MÉTODOS

Os métodos para as modelagens de cargas contempladas neste capítulo possuem, em sua essência, características semelhantes. Todos procuram representar cargas lineares e não lineares, na presença, ou ausência, de distorções harmônicas, através dos parâmetros R, L e C e fontes de harmônicos residuais. Não obstante o processo, o grande objetivo está em se encontrar os parâmetros representativos que formam as impedâncias harmônicas do consumidor e havendo necessidade, na inserção de eventuais resíduos de correntes harmônicas, as quais são inseridas nos circuitos equivalentes na forma de fontes de corrente.

A base comum para a utilização dos procedimentos está alicerçada num banco de dados extraídos de informações sobre as tensões e correntes harmônicas, tanto no que tange aos seus módulos como argumentos, o qual é derivado de uma medição direta e contínua junto ao ponto da rede elétrica para o qual se deseja estabelecer o compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas.

Muito embora as semelhanças entre os processos, por questões didáticas considera-se relevante separá-los em 3 (três) princípios, os quais foram devidamente documentados através de publicações próprias, como esclarecido a seguir.

3.2.1 – MÉTODO I - REFERÊNCIA [12]

Este artigo, cujos autores são Srinivas Varadan e Elham B. Makram, foi publicado no Proceedings Twenty-Fifth Southeastern Symposium on System Theory – IEEE, em Março de 1993. Na sua essência, a proposta feita está embasada na modelagem através da representação de um dado consumidor na forma de parâmetros equivalentes R, L e C, e ainda, de fontes harmônicas equivalentes.

Os desenvolvimentos abaixo esclarecem a estratégia proposta.

➤ FUNDAMENTAÇÃO:

Uma vez conhecida a tensão $v(t)$ num barramento qualquer, assim como também sua respectiva corrente $i_T(t)$ de suprimento da carga, o princípio básico da proposta feita pela referência em pauta consiste em representar o complexo elétrico nos termos indicados na Figura 3.1. Como se constata, o modelo proposto está estruturado na forma de três parâmetros passivos: R, C e L e fontes de corrente associadas com as ordens harmônicas presentes no estudo. O bloco denominado por BB “Black-Box” tem uma correspondência direta com as frequências harmônicas de mesma ordem que as medidas e que não foram absorvidas pelos elementos passivos. A última fonte, por sua vez, está atrelada com as ordens harmônicas encontradas na corrente medida e que não possuem correspondentes tensões. Por tal motivo, o autor entende que tais componentes são de responsabilidade total da carga consumidora.

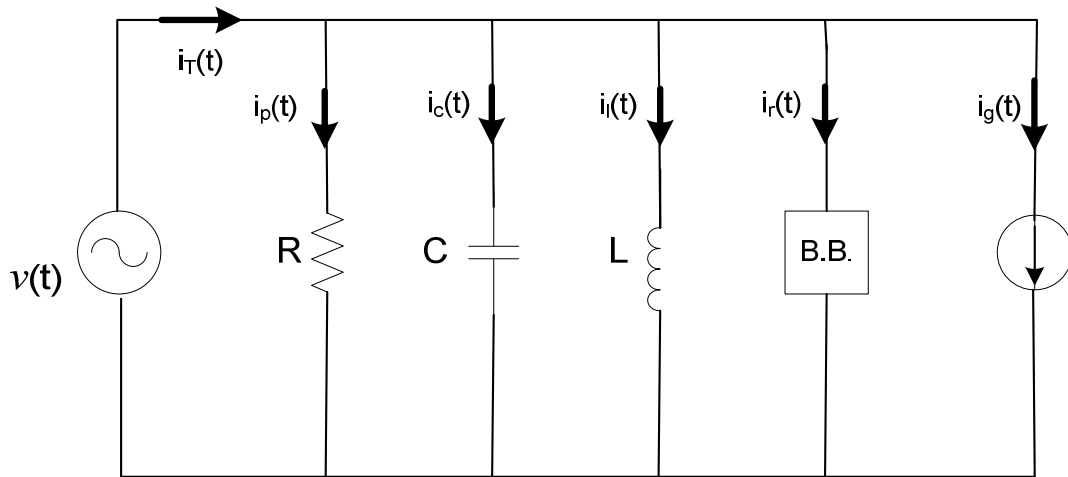


Figura 3.1 – Circuito equivalente associado com a concepção física da proposta do Método I.

Do exposto, segue que a corrente total $i_T(t)$ pode ser dividida nas seguintes componentes:

- Uma primeira, chamada de componente $i_g(t)$, que está vinculada com a fonte de corrente à direita da Figura 3.1, representado, como já dito, as frequências presentes na corrente medida e não encontradas na tensão monitorada;
- Uma vez feita a separação da corrente medida $i_T(t)$ da parcela anterior, pode-se, com facilidade, encontrar aquelas destinadas aos elementos passivos e à fonte residual. Esta parcela, para fins deste trabalho, é representada por $i(t)$;
- Da corrente acima pode-se, sequencialmente, determinar a parcela $i_p(t)$, que é dirigida ao elemento resistivo R, como se verá logo a seguir;
- Subtraindo-se da corrente $i(t)$ aquelas direcionadas ao elemento resistivo, obtém-se, para cada frequência, uma corrente, não indicada na figura, a qual estaria atrelada com a componente reativa indutiva $i_l(t)$, pela componente reativa capacitiva $i_c(t)$ e pela componente residual $i_r(t)$, esta última associada com a caixa identificada por BB. Esta composição origina uma grandeza que é,

para fins desta dissertação, representada por $i_q(t)$. Tal corrente, pela sua natureza, é aqui tratada como em quadratura com a respectiva tensão.

Traduzindo as considerações acima em termos matemáticos, as análises são iniciadas pela caracterização das grandezas obtidas via medição (ou simulação) junto ao ponto de conexão entre a fonte supridora e a carga alimentada. Este ponto elétrico, ao longo do texto que compõe esta dissertação é designado por PAC, ou seja, Ponto de Acoplamento Comum.

Diante do exposto através de registros em campo, ou em laboratório, ou ainda, via simulação computacional, podem ser obtidas as informações básicas ao processo em pauta. Estas consistem nas grandezas abaixo indicadas, que representam, no domínio da frequência, as tensões e correntes determinadas no PAC:

$$v(t) = \sqrt{2} \sum_{n=1}^N V_n \cos(n\omega t + \alpha_n) \quad (3.1)$$

$$i_T(t) = \sqrt{2} \sum_{n=1}^M I_n \cos(n\omega t + \beta_n) \quad (3.2)$$

Onde N e M representam as ordens harmônicas genéricas, que podem possuir as mesmas ordens, e outras não correspondentes e encontradas nos registros das tensões e correntes. Naturalmente, V_n e I_n representam os valores eficazes das tensões e correntes harmônicas, respectivamente.

Reconhecendo que $i_g(t)$ representa as correntes associadas com a fonte de correntes harmônicas de ordens distintas que as das tensões, resta que a composição das demais (resistiva, indutiva, capacitiva e residual) origina uma corrente $i(t)$, a qual pode ser expressa por:

$$i(t) = i_T(t) - i_g(t) \quad (3.3)$$

Utilizando princípios básicos de circuitos e reconhecendo que a potência ativa encontra-se totalmente associada com uma resistência equivalente, esta pode ser calculada pela expressão a seguir:

$$R = \frac{V^2}{P} \quad (3.4)$$

Onde V é o valor eficaz da tensão e P é a potência ativa medida ou calculada através dos resultados das medições.

Também, em sintonia com princípios clássicos da engenharia elétrica, tal potência pode ser determinada pela equação (3.5).

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \times i(t) dt \quad (3.5)$$

Subtraindo-se da corrente $i(t)$ a parcela correspondente aquela atrelada com o elemento resistivo obtém-se uma corrente que pode ser interpretada como em quadratura com a tensão. Esta, associada com os elementos passivos L e C, assim como também a fonte de corrente residual, pode ser expressa por:

$$i_q(t) = i(t) - i_p(t) = i_c(t) + i_l(t) + i_r(t) \quad (3.6)$$

Ainda em consonância com os procedimentos propostos pela referência [12], a capacitância equivalente C é determinada através da seguinte expressão:

$$C = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T i(t) \frac{dv(t)}{dt} dt}{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{dv(t)}{dt} \right)^2 dt} \quad (3.7)$$

Complementarmente, a indutância equivalente L é calculada através da equação:

$$L = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T (w(t))^2 dt}{\frac{1}{T} \int_0^T i(t) w(t) dt} \quad (3.8)$$

Desconsiderando qualquer nível CC da tensão $v(t)$, $w(t)$ é definido por:

$$w(t) = \int_0^t v(t) dt \quad (3.9)$$

Uma vez determinados os elementos C e L , torna-se então factível o calculo, para cada frequência sob consideração, das correntes harmônicas correspondentes a tais elementos.

Finalmente, uma vez conhecidas as correntes resistiva, capacitiva e indutiva, estas, subtraídas de $i(t)$ conduzem a fonte representativa das componentes residuais previstas pelo circuito equivalente da Figura 3.1.

3.2.2 – MÉTODO II – REFERÊNCIA [16]

Baseado na proposta anterior, o autor Mahdi M.M. El Arini publicou no ICHQP'98 – 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, em Outubro de 1998, uma técnica complementar para a modelagem de cargas lineares e não lineares no domínio do tempo. Esta nova estratégia, na concepção feita pelo autor, se propõe a calcular os componentes equivalentes C e L via um processo de subdivisão das correntes, e não através da corrente total anteriormente empregada pelo Método I.

➤ FUNDAMENTAÇÃO:

Tal como no caso anterior, a tensão (medida ou calculada) no ponto de acoplamento comum (PAC) pode ser genericamente representada por:

$$v(t) = \sum_{n=1}^N v_n(t) = \sqrt{2} \sum_{n=1}^N V_n \cos(n\omega t) \quad (3.10)$$

Onde

N – ordem harmônica máxima presente na tensão distorcida;

V_n - valor eficaz da tensão harmônica de ordem n.

Similarmente, a corrente total encontrada junto ao PAC é:

$$i_T(t) = \sum_{k=1}^{NI} i_k(t) = \sqrt{2} \sum_{k=1}^{NI} I_k \cos(n\omega t \pm \phi_k) \quad (3.11)$$

Onde:

NI – Ordem harmônica máxima para a corrente medida ou calculada junto ao PAC;

I_k - valor eficaz da corrente harmônica de ordem n;

ϕ_k - ângulo entre uma dada corrente e tensão de mesma ordem.

Através da correlação entre as expressões acima pode-se, de um modo geral, reconhecer que a corrente total pode ser desmembrada em duas correntes. A primeira, aqui definida por $i(t)$, representa as componentes que possuem as mesmas ordens harmônicas presentes na tensão. A segunda, designada por $i_u(t)$, representa as ordens harmônicas diferentes (incomuns) às harmônicas da tensão. Vale ressaltar que a mudança de simbologia para esta última corrente, quando comparada àquela utilizada para o Método I, está vinculada com o uso da mesma nomenclatura desta nova referência. Assim sendo, a corrente $i_u(t)$ corresponde a mesma já representada por $i_g(t)$.

$$i_T(t) = i(t) + i_u(t) \quad (3.12)$$

A corrente $i(t)$, por sua vez, pode ainda ser subdividida em três componentes, a saber:

- Uma componente ativa ou resistiva $i_R(t)$;
- Outra, representada por $i_q(t)$ e que seria destinada aos elementos C e L, aqui chamada de corrente em quadratura ou reativa. Portanto, esta parcela de corrente engloba a componente capacitiva $i_C(t)$ e a indutiva $i_L(t)$;
- Finalmente, uma componente residual $i_s(t)$, a qual fecha o balanço de correntes.

Assim sendo pode-se escrever:

$$i(t) = i_R(t) + i_q(t) + i_s(t) \quad (3.13)$$

$$i_q(t) = i_L(t) + i_C(t) \quad (3.14)$$

A corrente $i(t)$, em termos de suas componentes de frequência pode ser escrita como:

$$i(t) = \sqrt{2} \sum_{n=1}^N I_n \cos(n\omega t \pm \phi_n) \quad (3.15)$$

À luz das considerações acima, fica evidenciado que o circuito equivalente da Figura 3.2 constitui-se numa representação das considerações físicas anteriores.

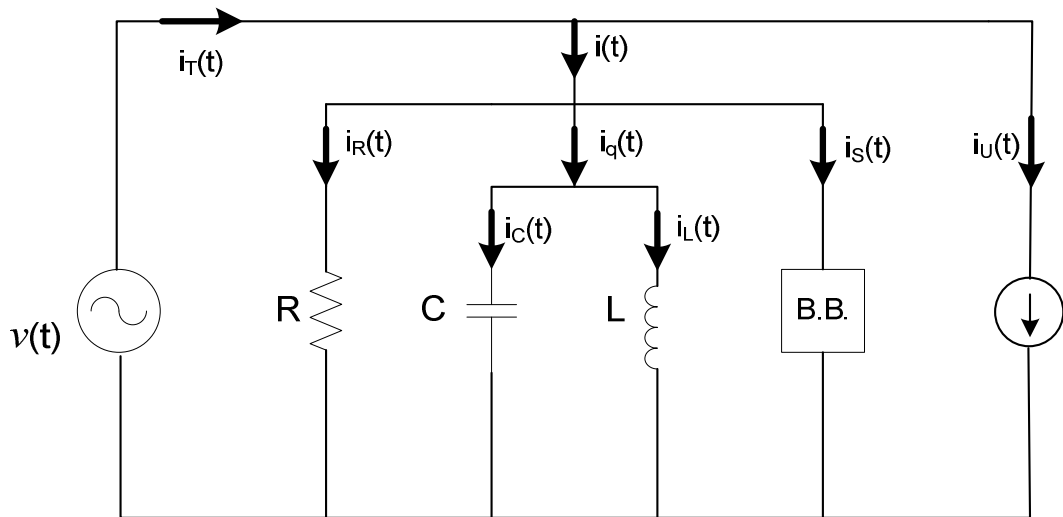


Figura 3.2 – Circuito equivalente associado com a concepção física da proposta do Método II.

A resistência equivalente da carga, novamente, pode ser obtida através de princípios básicos da teoria de circuitos.

Admitindo-se que a potência ativa total consumida seja P_R e que V seja o valor eficaz da tensão total, então:

$$R = \frac{V^2}{P_R} \quad (3.16)$$

Os valores de V e P_R são determinados através de:

$$V = \sqrt{\sum_{n=1}^N V_n^2} \quad (3.17)$$

$$P_R = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \times i(t) dt = \sum_{n=1}^N V_n I_n \cos \phi_n \quad (3.18)$$

Uma vez conhecida a resistência e admitindo-se que a mesma seja invariável com a frequência, para cada tensão harmônica haverá uma correspondente corrente, a qual pode ser calculada pela expressão a seguir.

$$i_R(t) = \sqrt{2} \sum_{n=1}^N \frac{V_n}{R} \cos(n\omega t) \quad (3.19)$$

Considerando, numa primeira hipótese, que a corrente $i(t)$, subtraída da corrente que se estabelece pelo resistor equivalente, seja totalmente direcionada ao capacitor equivalente, isto permite escrever:

$$[i(t) - i_R(t)] \frac{dv}{dt} = C \frac{dv(t)}{dt} \frac{dv}{dt} \quad (3.20)$$

A expressão acima tem por base a clássica relação entre a tensão e corrente num capacitor, isto é:

$$i_C(t) = C \frac{dv(t)}{dt} \quad (3.21)$$

A partir da equação (3.20) pode-se então determinar o valor da capacitância equivalente, como a seguir.

$$C = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T [i(t) - i_R(t)] \frac{dv(t)}{dt} dt}{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{dv(t)}{dt} \right)^2 dt} \quad (3.22)$$

Derivando (3.10) e reescrevendo a equação da corrente que se dirige aos elementos C, L e também à corrente residual, tem-se:

$$\frac{dv}{dt} = -\sqrt{2} \sum_{n=1}^N n\omega V_n \sin(n\omega t) = \sqrt{2} \sum_{n=1}^N n\omega V_n \cos(n\omega t + \pi/2) \quad (3.23)$$

$$i(t) - i_R(t) = \sqrt{2} \sum_{n=1}^N \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \cos(n\omega t \pm \theta_n) \quad (3.24)$$

Onde os coeficientes α_n e β_n , assim como os ângulos θ_n são:

$$\begin{aligned}\alpha_n &= I_n \cos \phi_n - V_n / R_s \\ \beta_n &= I_n \sin \phi_n \\ \theta_n &= \tan^{-1} \left(\beta_n / \alpha_n \right)\end{aligned}$$

De (3.23) é possível extrair a expressão que irá compor o denominador da equação (3.22), a qual é:

$$\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{dv}{dt} \right)^2 dt = \omega \sum_{n=1}^N n^2 V_n^2 \quad (3.25)$$

Trabalhando a expressão (3.24) de modo a adequá-la ao numerador da equação (3.22) chega-se a:

$$\frac{1}{T} \int_0^T [i(t) - i_R(t)] \frac{dv}{dt} dt = \sum_{n=1}^N n I_n V_n \sin(\pm \phi_n) \quad (3.26)$$

Portanto, o valor da capacitância C, utilizando grandezas associadas com a modelagem no domínio da frequência, pode ser expresso por:

$$C = \frac{\sum_{n=1}^N n V_n I_n \sin(\pm \phi_n)}{\omega \sum_{n=1}^N n^2 V_n^2} \quad (3.27)$$

Uma vez conhecido o valor da capacitância (C), pode-se, para cada frequência envolvida no processo, determinar a correspondente corrente que se estabelece por este elemento. Para tanto se utiliza às expressões a seguir.

$$i_C(t) = \omega C \sum_{n=1}^N \sqrt{2} n V_n \cos(n\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad \text{para } C > 0 \quad (3.28)$$

$$i_C(t) = 0 \quad \text{para } C \leq 0 \quad (3.29)$$

Sendo I_C o valor eficaz da componente total que flui pelo elemento capacitivo e sendo V a respectiva tensão total em seu valor eficaz, tem-se a seguinte equação para a potência reativa capacitiva associada com a operação do capacitor:

$$Q_C = VI_C$$

Ainda em consonância com os procedimentos estabelecidos, uma vez conhecidas as correntes que se estabelecem pelo capacitor, pode-se, na sequência, subtrair da corrente $i(t)$ as parcelas de corrente direcionadas ao resistor e ao capacitor. Assim procedendo torna-se possível empregar a expressão (3.30) para a determinação da indutância equivalente L .

$$L = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T \left[\int_0^T v(t) dt \right]^2 dt}{\frac{1}{T} \int_0^T [i(t) - i_R(t) - i_C(t)] \left[\int_0^T v(t) dt \right] dt} \quad (3.30)$$

Vale lembrar que a expressão acima possui como fundamento a relação básica entre a tensão e corrente num indutor, como abaixo.

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_0^T v(t) dt \quad (3.31)$$

Mais uma vez, objetivando contemplar o numerador e o denominador da equação (3.30), pode-se, a partir das expressões (3.1) escrever:

$$\int_0^T v(t) dt = \sqrt{2} \sum_{n=1}^N \frac{V_n \sin(n\omega t)}{n\omega} \quad (3.32)$$

De onde:

$$\frac{1}{T} \int_0^T \left[\int_0^T v(t) dt \right]^2 dt = \sum_{n=1}^N \frac{V_n^2}{n^2 \omega^3} \quad (3.33)$$

De modo análogo ao procedido para o capacitor, o denominador da expressão para o calculo da indutância é:

$$\frac{1}{T} \int_0^T \left[(i(t) - i_R(t) - i_c(t)) \right] \left[\int_0^T v(t) dt \right] dt = \frac{1}{\omega^2} \sum_{n=1}^N \frac{I_n V_n}{n} \sin(\pm \phi_n) \quad (3.34)$$

Substituindo as expressões (3.33) e (3.34) em (3.30) chega-se a:

$$L = \frac{\sum_{n=1}^N \frac{V_n^2}{n^2}}{\omega \sum_{n=1}^N \frac{V_n I_n}{n} \text{sen}(\pm \phi_n)} \quad (3.35)$$

De posse do valor da indutância, pode-se calcular a corrente total que se estabelece por este elemento, como a seguir.

$$i_L(t) = \sqrt{2} \sum_{n=1}^N \frac{V_n}{n\omega L} \cos(n\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad \text{para } L > 0 \quad (3.36)$$

$$i_L(t) = 0 \quad \text{para } L \leq 0 \quad (3.37)$$

A partir dos valores eficazes da tensão total e corrente total associadas com o funcionamento do indutor é possível calcular a potência reativa indutiva a seguir:

$$Q_L = VI_L$$

De posse dos valores das correntes dos ramos: resistivo, capacitivo e indutivo, pode-se, por fim, calcular a corrente residual $i_s(t)$:

$$i_s(t) = i(t) - i_R(t) - i_C(t) - i_L(t) \quad (3.38)$$

Sendo:

$$i_s(t) = \sqrt{2} \sum_{n=1}^N I_n \cos(n\omega t \pm \phi_n) - \sqrt{2} \sum_{n=1}^N \frac{V_n}{R} \cos(n\omega t) - \sqrt{2} \omega C \sum_{n=1}^N n\omega C V_n \cos(n\omega t + \frac{\pi}{2}) - \sqrt{2} \sum_{n=1}^N \frac{V_n}{n\omega L} \cos(n\omega t - \frac{\pi}{2})$$

$$i_s(t) = \sqrt{2} \sum_{n=1}^N J_n \cos(n\omega t) + K_n \sin(n\omega t) \quad (3.39)$$

$$i_s(t) = \sqrt{2} \sum_{n=1}^N I_m \cos(n\omega t - \gamma_n) \quad (3.40)$$

As grandezas utilizadas para as expressões anteriores são identificadas na sequência:

$$J_n = I_n \cos \phi_n - \frac{V_n}{R}$$

$$K_n = I_n \cos \phi_n - \frac{V_n}{n\omega L} \pm I_n \sin \phi_n \quad \text{se } L \text{ e } C > 0$$

$$K_n = -\frac{V_n}{n\omega L} \pm I_n \sin \phi_n \quad \text{se } L > 0 \text{ e } C \leq 0$$

$$K_n = n\omega C V_n \pm I_n \sin \phi_n \quad \text{se } L < 0 \text{ e } C > 0$$

$$K_n = \pm I_n \sin \phi_n \quad \text{se } L \text{ e } C < 0$$

$$I_m = \sqrt{J_n^2 + K_n^2}$$

$$\gamma_n = \tan^{-1} \frac{K_n}{J_n}$$

Ainda em função das diretrizes estabelecidas pela referência [16], é utilizado um procedimento para se estimar a exatidão do método quanto ao processo de obtenção dos parâmetros do correspondente circuito equivalente. Para tanto, é recomendado avaliar a razão

da potência aparente dos parâmetros RLC e da potencia total da carga, nos termos abaixo apresentados.

$$\varepsilon_1 = \frac{S_T}{S_P} \quad (3.41)$$

Onde a potência aparente S_P é dada por:

$$S_P = \sqrt{P_R^2 + Q_L^2 + Q_C^2}$$

E a potência total S_T :

$$S_T = VI$$

Portanto, a proposta mostra uma boa exatidão quando ε_1 se aproxima da unidade.

3.2.3 –MÉTODO III - REFERÊNCIA [8]

Esta terceira proposta encontra sustentação na tese de doutorado elaborada por Sérgio Ferreira de Paula Silva defendida em 2007, na Universidade Federal de Uberlândia. Os princípios seguidos, de um modo geral, são os mesmos, exceto pelo reconhecimento, à priori, das correntes harmônicas com características capacitivas e indutivas.

➤ FUNDAMENTAÇÃO:

Mais uma vez, o método está alicerçado nas grandezas representativas das tensões e correntes junto ao PAC, as quais são oriundas de medições, ou, alternativamente, advindas de trabalhos de simulação computacional.

Portanto, mais uma vez destacando que a simbologia utilizada está em consonância com o documento original, tem-se as expressões abaixo para a tensão e corrente acima referidas.

$$v(t) = \sqrt{2} \sum_{h=1}^N V_h \cos(\omega t \cdot h) \quad (3.42)$$

$$i(t) = \sqrt{2} \sum_{h=1}^N I_h \cos(\omega t \cdot h \pm \theta_h) \quad (3.43)$$

Onde:

V_h – tensão eficaz de ordem h ;

I_h – corrente eficaz de ordem h ;

θ_h – defasagem angular entre tensão e corrente de ordem h ;

N – ordem harmônica máxima.

O circuito equivalente atrelado com esta última proposta é bastante similar aos anteriores e sua estrutura é indicada na Figura 3.3.

Uma diferença marcante entre a presente proposta e as anteriores está no fato que o circuito não subdivide os resíduos de corrente em dois blocos. Sendo assim, a fonte de corrente indicada na figura contempla tanto as ordens harmônicas de corrente não constantes na tensão, como também, fecha o balanço de correntes.

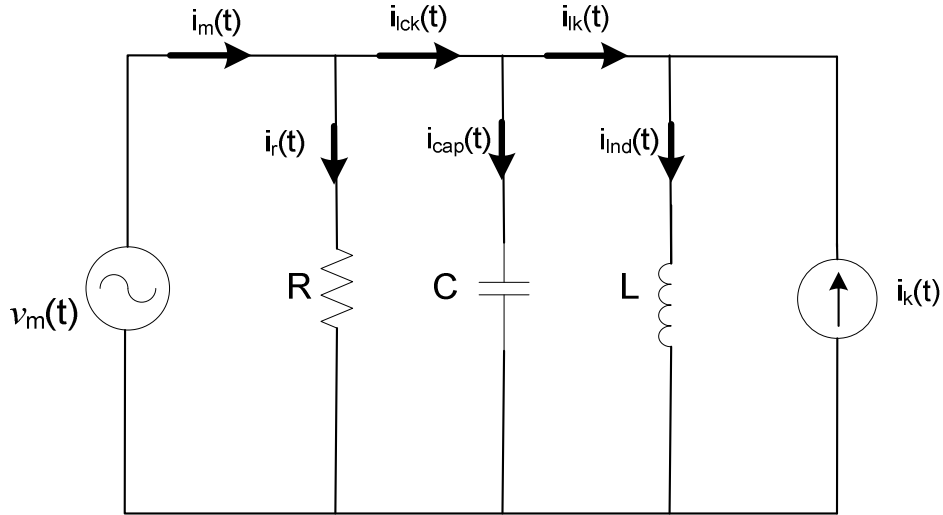


Figura 3.3 – Circuito equivalente associado com a concepção física da proposta do Método III.

Para o cálculo da resistência equivalente da carga, considera-se que este parâmetro é invariável para todas as ordens harmônicas e também que é responsável por toda potência ativa absorvida pelo consumidor. Portanto, a partir da tensão e corrente medida no PAC pode-se determinar a potência ativa total P fornecida à carga.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt \quad (3.44)$$

Portanto a resistência R será:

$$R = \frac{(V^m)^2}{P} \quad (3.45)$$

Sendo V^m a tensão eficaz medida no PAC.

Após o cálculo da resistência R , pode-se calcular as correntes harmônicas individuais que circulam por esse elemento através da equação (3.46).

$$i_r(t) = \frac{v(t)}{R} = \sqrt{2} \sum_{h=1}^N \frac{V_h^m}{R} \cos(\omega t \cdot h) \quad (3.46)$$

Convertendo as equações (3.45) e (3.46) para o domínio da frequência, resulta:

$$R = \frac{(V^m)^2}{\sum_{h=1}^N V_h^m \cdot I_h^m \cos(\theta_h)} \quad (3.47)$$

$$\dot{I}_r(t) = \frac{\dot{V}_h^m}{R} \quad (3.48)$$

Onde:

$\dot{I}_h^r$ - corrente harmônica de ordem h calculada para o resistor;

V_h^m - tensão harmônica eficaz de ordem h medida no PAC;

I_h^m - corrente harmônica eficaz de ordem h medida no PAC, excluída as ordens harmônicas não presentes na tensão.

Analisando a expressão (3.47) observa-se que valores negativos de potência ativa harmônica podem ocorrer devido ao defasamento angular entre a tensão e a corrente harmônica. Portanto, deve-se desconsiderar estas ordens harmônicas para o cálculo da potência ativa harmônica e também para o cálculo da tensão eficaz.

Passando para o cálculo do elemento capacitivo, pode-se observar, na Figura 3.3, que a composição das correntes referente aos elementos reativos com a corrente residual é:

$$i_{lck}(t) = i_m(t) - i_r(t) \quad (3.49)$$

Admitindo, numa primeira instancia, que toda a corrente dada pela expressão acima esteja atrelada com o capacitor, então:

$$i_{lck}(t) = C \frac{dv(t)}{dt} \quad (3.50)$$

A partir da equação (3.50), fazendo-se as necessárias substituições matemáticas contempladas na referência [8], chega-se às expressões abaixo:

$$C = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T i_{lck}(t) \frac{dv(t)}{dt} dt}{\frac{1}{T} \int_0^T \frac{dv(t)^2}{dt} dt} \quad (3.51)$$

$$i_{cap}(t) = \omega \cdot C \cdot \sqrt{2} \sum_{h=1}^N h \cdot V_h^m \cos\left(\omega t \cdot h + \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.52)$$

Passando as equações (3.51) e (3.52) para o domínio da frequência, tem-se:

$$C = \frac{\sum_{h=1}^N h \cdot V_h^m \cdot I_h^{lck} \text{sen}(-\theta_h)}{\omega \sum_{h=1}^N h^2 \cdot (V_h^m)^2} \quad (3.53)$$

Assim sendo, a corrente que se estabelece pelo capacitor equivalente pode ser calculada através de:

$$\dot{I}_h^{cap} = j \cdot \dot{V}_h^m \omega \cdot h \cdot C \quad (3.54)$$

Como a capacitância não pode possuir sinal negativo, devem-se considerar, para fins da composição da equação (3.53), apenas os termos associados a um deslocamento angular harmônico que resulte numa potência harmônica capacitiva associada com uma corrente adiantada da tensão harmônica correspondente.

Com os valores da resistência e do capacitor conhecidos, pode-se, na sequência, determinar as correntes que se estabelecem pelo capacitor, e assim, será obtida a corrente direcionada tão apenas ao elemento indutivo e a fonte representativa das correntes residuais.

$$i_{lk}(t) = i_{lck}(t) - i_{cap}(t) \quad (3.55)$$

Seguindo a mesma estratégia empregada para o cálculo do capacitor equivalente, o processo avança atribuindo a corrente anterior a um indutor equivalente. Nestas condições, a expressão clássica abaixo é aplicável:

$$i_{lk}(t) = \frac{1}{L} \int_0^T v(t) dt \quad (3.56)$$

Novamente, fazendo-se as necessárias modificações matemáticas já realizadas em [8], chega-se a:

$$L = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T [y(t)]^2 dt}{\frac{1}{T} \int_0^T i_{lk}(t) \cdot y(t) dt} \quad (3.57)$$

Por conseguinte, a corrente que flui pelo indutor será:

$$i_l(t) = \sqrt{2} \sum_{h=1}^N \frac{V_h^m}{\omega \cdot h \cdot L} \cos\left(\omega t \cdot h - \pi/2\right) \quad (3.58)$$

Onde:

$$y(t) = \int_0^T v(t) dt$$

Utilizando agora a formulação definida pelas técnicas de análise no domínio da frequência, as equações (3.56) e (3.57) passam a ser representadas por:

$$L = \frac{\sum_{h=1}^N \frac{(V_h^m)^2}{h^2}}{\omega \sum_{h=1}^N \frac{V_h^m \cdot I_h^{lk} \cdot \text{sen}(\theta_h)}{h}} \quad (3.59)$$

$$I_h^{ind} = \frac{\dot{V}_h^m}{j \cdot \omega \cdot h \cdot L} \quad (3.60)$$

Novamente, devido ao defasamento entre a tensão e a corrente de mesma ordem harmônica, existe a possibilidade de se obter valores negativos para alguns termos que

compõem o denominador da equação (3.59). Caso isto venha a ocorrer, tais produtos devem ser ignorados na composição do somatório.

Por fim, subtraindo a corrente do ramo indutivo de i_{lk} , é possível obter-se a corrente residual i_k :

$$i_k(t) = i_{lk}(t) - i_l(t) \quad (3.61)$$

Naturalmente, após calculados os componentes equivalentes R, L e C, a carga equivalente do consumidor, no domínio da frequência, será definida através da seguinte expressão para a impedância equivalente:

$$\dot{Z}_h^c = \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot h \cdot L} - j \cdot \omega \cdot h \cdot C \right)^{-1} \quad (3.62)$$

3.3 – AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO DOS MÉTODOS

Uma vez apresentados os fundamentos que norteiam os procedimentos para a obtenção dos circuitos equivalentes representativos das cargas, esta etapa da dissertação visa aplicá-los a arranjos simples para uma análise preliminar da consistência dos mesmos, e ainda, prover meios para a constatação de eventuais divergências entre os resultados finais. Para tanto, dentre inúmeras possibilidades, adotou-se dois sistemas testes:

- Sistema Teste I: formado por um arranjo tal que as cargas sejam constituídas apenas por elementos lineares;
- Sistema Teste II: caracterizado por uma composição mista para a carga, a qual passa a ser formada por componentes lineares e não-lineares.

Para ambas as situações, a rede de suprimento foi simplificada modelada através de uma fonte alternada monofásica com sua respectiva impedância.

Tendo em mente que o sistema é hipotético, as grandezas relativas às tensões e correntes junto ao PAC não foram obtidas via medições, mas sim, através da simulação computacional dos arranjos. Para tanto foi empregado o simulador ATP-Draw, versão 4.0p2.

No que se refere à fonte de tensão de suprimento, esta possui, originalmente, uma distorção que se apresenta com a composição harmônica indicada na Tabela 3.1. Os valores usados referem-se às distorções harmônicas de um retificar típico de 6 pulsos, equivalente ao da carga, ligado ao PAC. Este mesmo suprimento foi utilizado para os dois sistemas avaliados.

Tabela 3.1 – Tensões harmônicas geradas pela fonte

Ordem Harmônica	Tensão Eficaz		Ângulo
1 ^a	70,71 V	100%	0°
3 ^a	10,61 V	15%	45°
5 ^a	7,07 V	10%	120°
7 ^a	3,54 V	5%	60°

3.3.1 – AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL I – SISTEMA COM CARGA PURAMENTE LINEAR

Como descrito anteriormente, o consumidor considerado neste item possui apenas cargas lineares. Estas são representadas pelos seus respectivos elementos: resistivo, capacitivo e indutivo, os quais ainda apresentam a propriedade de serem invariáveis ao longo do processo. Os valores para tais grandezas, assim como o valor da impedância da rede de suprimento, encontram-se indicados na Figura 3.4.

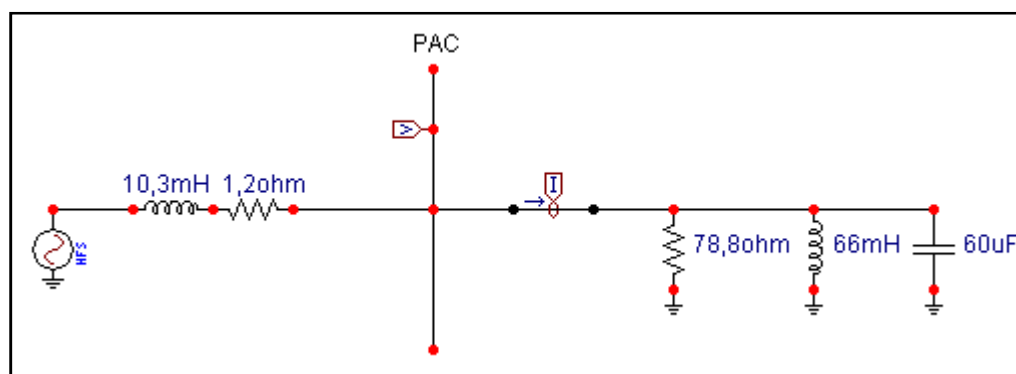


Figura 3.4 – Circuito elétrico equivalente do sistema com cargas puramente lineares - Sistema Teste I

Uma vez processado o sistema, de acordo com as exigências dos métodos, as informações obtidas junto ao PAC constituíram-se nas bases para os estudos de desempenho das propostas de modelagem da carga.

Objetivando obter um conjunto mais esclarecedor de resultados, os quais contemplassem distintas combinações para os elementos passivos adotados, os estudos investigativos formaram, tanto para o Sistema Teste I como para o Sistema Teste II, 7(sete) combinações diferentes quanto a composição do consumidor. Estes sete sub-casos encontram-se devidamente detalhados nas tabelas que sintetizam os resultados obtidos.

Tabela 3.2 – Tensões obtidas no PAC – Sistema Teste I - Simulação

Caso	Composição da Carga Linear	$\vec{V}_1$ [V]	$\vec{V}_3$ [V]	$\vec{V}_5$ [V]	$\vec{V}_7$ [V]
1	R puro	69,564 └ -2,80°	10,335 └ 36,68°	6,771 └ 106,3°	3,293 └ 41,07°
2	L puro	61,108 └ 2,37°	9,171 └ 45,77°	6,119 └ 120,4°	3,056 └ 60,19°
3	C puro	77,484 └ -1,73°	47,176 └ 23,69°	5,869 └ -53,80°	1,073 └ -117,4°
4	RL	60,366 └ -0,07°	8,995 └ 38,55°	5,919 └ 108,5°	2,897 └ 43,74°
5	RC	75,987 └ -4,74°	33,028 └ -0,65°	5,689 └ -42,29°	1,064 └ -111,4°
6	LC	66,179 └ 1,11°	28,553 └ 34,80°	6,748 └ -53,30°	1,124 └ -117,2°
7	RLC	65,240 └ -1,52°	24,296 └ 15,68°	6,480 └ -40,22°	1,115 └ -111,0°

Tabela 3.3– Correntes obtidas no PAC – Sistema Teste I – Simulação

Caso	Composição da Carga Linear	$\vec{I}_1$ [A]	$\vec{I}_3$ [A]	$\vec{I}_5$ [A]	$\vec{I}_7$ [A]
1	R puro	0,8828 └ -2,80°	0,1312 └ 36,68°	0,0859 └ 106,3°	0,0418 └ 41,07°
2	L puro	2,4563 └ -87,63°	0,1229 └ -44,24°	0,0492 └ 30,40°	0,0175 └ -29,84°
3	C puro	1,7538 └ 88,27°	3,2021 └ 113,7°	0,6645 └ 36,30°	0,1693 └ -26,99°
4	RL	2,5445 └ -72,55°	0,1660 └ -8,00°	0,0889 └ 76,14°	0,0403 └ 19,39°
5	RC	1,9716 └ 55,99°	2,2810 └ 78,76°	0,6484 └ 41,39°	0,1684 └ -25,65°
6	LC	1,1625 └ -88,89°	1,5555 └ 124,8°	0,7094 └ 36,76°	0,1711 └ -26,92°
7	RLC	1,4138 └ -55,67°	1,3594 └ 92,56°	0,6863 └ 42,95°	0,1703 └ -25,46°

Utilizando dos procedimentos estabelecidos pelos métodos em pauta e as equações correspondentes para o cálculo dos parâmetros equivalente, procedeu-se, então, a determinação dos valores dos componentes equivalentes da carga.

É importante frisar que os métodos I e II, no que tange aos seus princípios e aplicação, são bastante próximos. A diferença entre os mesmos, como esclarecido, está no fato que o processo II se propõe a calcular os elementos reativos através de correntes subdivididas, porém, durante a formulação matemática tal procedimento não foi efetivamente empregado. Diante disto, os resultados para ambos os processos seriam exatamente iguais, motivo pelo qual considera-se desnecessário apresentar, comparar e discutir os desempenhos diferenciados entre os dois processos em pauta. Portanto, as análises subsequentes terão por foco tão apenas o estabelecimento de termos comparativos entre os desempenhos dos Métodos II e III.

À luz do exposto, a Tabela 3.4 fornece os resultados finais obtidos para os parâmetros equivalentes calculados e suas respectivas correlações com os valores esperados. A designação “valor real” corresponde ao parâmetro utilizado durante a simulação.

Tabela 3.4 – Parâmetros RLC reais e calculados para o sistema com cargas puramente lineares

Caso	Resistor (Ω)			Capacitor (μF)			Indutor (mH)		
	Real	Método II	Método III	Real	Método II	Método III	Real	Método II	Método III
1	78,8	78,80	78,80	-	0	0	-	∞	∞
2	-	-682704,7	-682704,7	-	-70,03	0	66,0	65,99	65,99
3	-	689493,8	689493,8	60,0	60,02	60,02	-	-88,66	131913,53
4	78,8	78,80	78,80	-	-70,99	0	66,0	65,99	65,99
5	78,8	78,81	78,81	60,0	60,03	60,03	-	-100,18	212849,82
6	-	419989,25	419989,25	60,0	16,75	49,25	66,0	194,01	74,77
7	78,8	78,79	78,79	60,0	11,21	49,51	66,0	181,66	74,20

A análise dos resultados da Tabela 3.4 revela que:

- Quando da avaliação dos componentes equivalentes para as situações em que apenas um elemento passivo se faz representativo da carga, como seria esperado, os resultados se mostram bastantes consistentes para os dois métodos em questão;
- Valores extremamente elevados ou negativos para os componentes significam, respectivamente, circuitos abertos ou elementos fisicamente inexistentes;
- Para o método II, fica evidenciado que, quando da presença simultânea dos dois elementos reativos, L e C, mostra fragilidade e os resultados inconsistentes com os valores reais;
- Para o método III, analisando os resultados obtidos, fica evidenciado uma melhoria do processo, muito embora as divergências encontradas indicam a necessidade de maiores desenvolvimentos para se atingir uma qualidade para a modelagem nos termos exigidos pelo método da superposição.

3.3.2 – AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL II – SISTEMA COM CARGAS LINEARES E NÃO-LINEARES

Como informado anteriormente, esta seção encontra-se direcionada a avaliação de desempenho de outro arranjo. Desta feita, a composição de cargas do denominado consumidor se apresenta como possuindo uma parcela linear e outra não-linear. A parte linear é representada pelos mesmos elementos adotados para o Sistema Teste I, enquanto que a não-linear é constituída por um retificador monofásico, como seria o caso de muitos dispositivos eletro-eletrônicos residenciais e comerciais. Os valores para tais grandezas, assim como o valor da impedância da rede de suprimento, encontram-se indicados na Figura 3.5.

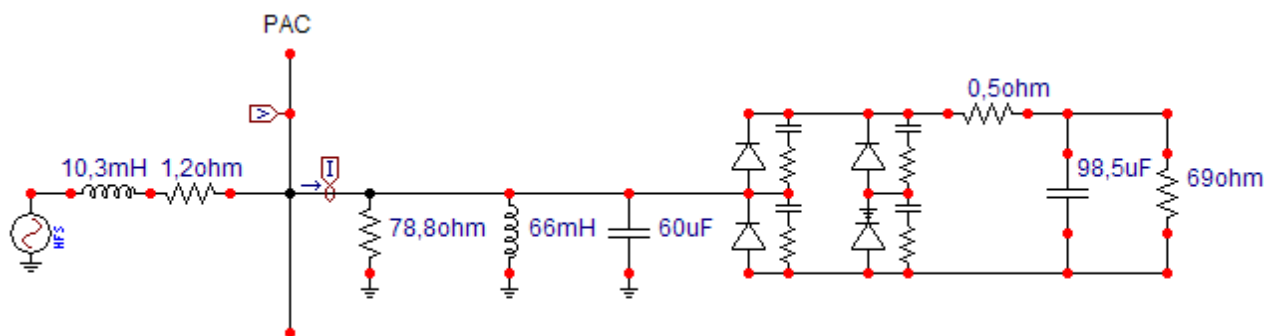


Figura 3.5 – Circuito elétrico equivalente do sistema com cargas lineares e não-lineares – Sistema Teste II.

Novamente, processando o caso em pauta através do simulador ATP foram calculadas as tensões e correntes harmônicas resultantes da combinação do supridor e consumidor. Os resultados obtidos, os quais, como já dito, para um sistema real teriam sido medidos, encontram-se sintetizados na Tabela 3.5 e 3.6.

Tabela 3.5 – Tensões obtidas no PAC – Sistema Teste II – Simulação

Caso	Composição da Carga Linear	V_1 [V]	V_3 [V]	V_5 [V]	V_7 [V]
1	R puro	67,556 ∠ -7,43°	17,119 ∠ 47,29°	5,956 ∠ 76,63°	3,703 ∠ 122,9°
2	L puro	60,323 ∠ -1,96°	14,968 ∠ 71,46°	3,308 ∠ 78,17°	1,690 ∠ 149,1°
3	C puro	78,481 ∠ -5,94°	20,267 ∠ -31,52°	8,232 ∠ -34,80°	3,491 ∠ -56,89°
4	RL	59,502 ∠ -4,25°	14,023 ∠ 61,69°	4,215 ∠ 66,09°	1,921 ∠ 137,6°
5	RC	75,906 ∠ -8,96°	19,869 ∠ -26,19°	7,983 ∠ -34,71°	3,181 ∠ -60,60°
6	LC	67,060 ∠ -2,29°	19,371 ∠ -25,31°	7,726 ∠ -24,19°	3,259 ∠ -38,96°
7	RLC	65,392 ∠ -5,04°	18,434 ∠ -17,19°	7,475 ∠ -21,21°	2,955 ∠ -38,30°

Tabela 3.6 – Correntes obtidas no PAC – Sistema Teste II – Simulação

Caso	Composição da Carga Linear	I_1 [A]	I_3 [A]	I_5 [A]	I_7 [A]
1	R puro	2,3300 └ -7,43°	0,5585 └ 47,29°	0,2528 └ 76,63°	0,1392 └ 122,9°
2	L puro	2,6125 └ -61,76°	0,6181 – └ -151,9°	0,2625 └ 58,99°	0,1432 └ -53,33°
3	C puro	2,6890 └ 59,47°	1,7552 └ 34,29°	0,7676 └ 47,09°	0,2194 └ 3,80°
4	RL	2,9981 └ -51,74°	0,4208 └ -164,2°	0,2936 └ 70,02°	0,1340 └ -58,65°
5	RC	3,0848 └ 37,11°	1,6446 └ 38,32°	0,7549 └ 46,95°	0,2139 └ 0,43°
6	LC	1,1188 └ -37,29°	1,5950 └ 38,29°	0,7237 └ 52,24°	0,1894 └ 11,01°
7	RLC	1,9634 └ -27,08°	1,4019 └ 43,90°	0,7051 └ 53,47°	0,1804 └ 8,90°

Diante dos resultados anteriores e em consonância com os procedimentos estabelecidos pelas metodologias descritas, fundamentando-se nos valores das tensões e correntes junto ao PAC, pode-se então determinar as impedâncias equivalentes da carga. Na Tabela 3.7 encontra-se uma síntese dos resultados dos cálculos.

Tabela 3.7 – Parâmetros RLC reais e calculados para o sistema com cargas lineares e não-lineares

Caso	Resistor (Ω)			Capacitor (μF)			Indutor (mH)		
	Real	Método II	Método III	Real	Método II	Método III	Real	Método II	Método III
1	78,80	31,29	31,29	-	10,88	10,88	-	-1664,7	822,20
2	-	53,00	53,00	-	-51,55	24,22	66,00	72,47	70,84
3	-	64,14	64,14	60,0	71,01	71,01	-	-80,70	132,35
4	78,80	32,01	32,01	-	-52,68	15,10	66,00	72,66	71,41
5	78,80	35,05	35,05	60,0	67,71	67,71	-	-85,72	145,03
6	-	64,27	64,27	60,0	18,91	55,86	66,00	368,83	86,44
7	78,80	35,12	35,12	60,0	13,86	52,16	66,00	289,51	85,69

Os resultados obtidos mostram que:

- Como no item anterior, valores muito elevados ou negativos para os componentes significam elementos fisicamente inexistentes;
- Muito embora as diferenças constatadas entre as resistências, vale lembrar que os métodos utilizados propiciam um agrupamento dos consumos de potência ativa numa única resistência equivalente. Diante disto, fica esclarecido que o valor de R equivalente advindo dos métodos de cálculo, de fato, representa um efeito paralelo entre a resistência física de 78,8 Ω e outra representativa do retificador. Portanto, os valores obtidos se mostram consistentes com o esperado visto que o consumo do retificador, do lado CC, como esclarecido na Tabela 3.7, se apresenta em torno de 60 Ω (valor encontrado quando a exclusão do elemento resistivo de 78,8 Ω). Este valor, em paralelo com o resistor de 78,8 Ω conduz aos valores ressaltados na referida tabela;

- Para o método II, fica evidenciado que, para os casos onde apenas um elemento reativo, L ou C, está presente, os valores encontrados se mostram mais consistentes. Porém, quando da presença simultânea destes dois elementos, L e C, o método se mostra frágil e os resultados inconsistentes com os valores físicos reais.
- Para o método III, analisando os resultados obtidos fica evidenciado uma melhoria do processo quando há presença simultânea dos elementos reativos, L e C. Contudo, igualmente mencionado no caso anterior, as divergências encontradas indicam a necessidade de maiores desenvolvimentos para se atingir uma qualidade para a modelagem nos termos exigidos pelo método da superposição.

3.3.3 – APLICAÇÃO DO MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO

Tendo em mente que o objetivo maior desta dissertação está centrado na questão da atribuição de responsabilidades sobre as distorções harmônicas num dado PAC, julgou-se conveniente, para consolidação das análises, que os estudos prosseguissem na direção de determinar, para os casos investigados, as parcelas de responsabilidade entre os dois agentes envolvidos nos casos testes. Todavia, considerando-se que foram estudadas 14 (quatorze) situações, isto estenderia por demasiado as discussões procedentes. Por tal motivo, foi selecionado para fins da aplicação do compartilhamento de responsabilidades apenas o caso 7 tanto para o Sistema Teste I como para o II, visto ser esta a topologia mais genérica e compatível com a realidade do campo.

Os resultados da aplicação do processo do compartilhamento para o caso 7, para a situação em que o consumidor é formado apenas por cargas lineares, encontram-se destacados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8– Resultado do compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções de tensão – Sistema Teste I - Caso 7

Descrição do Caso	Atribuição de Responsabilidades		
	Ordem	Responsabilidade Atribuída à Concessionária	Responsabilidade Atribuída ao Consumidor
Valores Esperados	3 ^a	100,0%	0%
	5 ^a	100,0%	0%
	7 ^a	100,0%	0%
Valores Calculados com Base no Método II	3 ^a	11,2%	88,8%
	5 ^a	0%	100,0%
	7 ^a	0%	100,0%
Valores Calculados com Base no Método III	3 ^a	66,0%	34,0%
	5 ^a	100,0%	0%
	7 ^a	100,0%	0%

Considerando agora a aplicação da metodologia para o compartilhamento das responsabilidades para o Sistema Teste II – caso 7, obteve-se os resultados apresentados na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Resultado do compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções de tensão – Sistema Teste II - Caso 7

Descrição do Caso	Atribuição de Responsabilidades		
	Ordem	Responsabilidade Atribuída à Concessionária	Responsabilidade Atribuída ao Consumidor
Valores Esperados	3 ^a	63,9%	36,1%
	5 ^a	95,7%	4,3%
	7 ^a	77,8%	22,2%
Valores Calculados com Base no Método II	3 ^a	24,7%	75,3%
	5 ^a	22,5%	77,5%
	7 ^a	100%	0%
Valores Calculados com Base no Método III	3 ^a	65,4%	34,6%
	5 ^a	96,2%	3,8%
	7 ^a	82,7%	17,3%

A análise dos resultados relativos ao compartilhamento mostra que a utilização da proposta feita pelo método II - referência [16], para a determinação da impedância harmônica de consumidores, conduziu a valores bastante distintos daqueles esperados e advindos do ATP.

Todavia, o emprego da proposta feita pelo método III - referência [8], muito embora ainda revele discrepâncias em relação aos valores esperados, notou-se resultados mais pertinentes no que diz respeito à aplicação do método da superposição para atribuição de responsabilidades sobre as distorções harmônicas.

3.4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou as bases teóricas de três metodologias voltadas para a representação da impedância harmônica de consumidores, nos termos requeridos para aplicação da teoria da superposição. Utilizando um sistema simples e hipotético, em que o consumidor foi caracterizado por uma carga linear e mista, foram então aplicados os procedimentos considerados pelas metodologias, e assim, pode-se avaliar os resultados obtidos por cada método para os valores de impedância harmônica. Os desempenhos obtidos deixaram bastante claro que as proposta feita pela referência [12] e [16] conduziram a resultados idênticos e que, de um modo geral, as 3 metodologias apresentaram grandes divergências entre as grandezas esperadas e calculadas. Através do método III - referência [8], ficou mostrada uma melhoria do processo da obtenção dos parâmetros equivalentes, embora quando da presença de cargas não-lineares esta tenha evidenciado divergências significativas entre os valores esperados e os determinados.

Apesar das ressalvas feitas, os estudos continuaram no sentido de se utilizar os parâmetros calculados para fins do compartilhamento de responsabilidades das partes (fonte e

consumidor) quanto as distorções harmônicas totais e individuais presentes nos respectivos barramentos de acoplamento. Muito embora as divergências numéricas já referidas para os parâmetros equivalentes, há de se destacar que a utilização do princípio da superposição para as configurações mais simples (que não o caso 7), conduziram a um resultado final de compartilhamento bastante apropriado. Quando do emprego do processo para o caso selecionado, o qual compreende uma combinação de dois elementos reativos (L e C), os desempenhos obtidos já não se mostraram tão apropriados. Todavia, a idéia de se mostrar os valores para este caso mais complexo teve por meta esclarecer que os processos até então estabelecidos para a solução dos problemas focados nesta dissertação, ainda são merecedores de maiores investigações.

CAPÍTULO IV

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DO COMPARTILHAMENTO PARA UM SISTEMA REAL

4.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma vez investigadas as questões associadas com as propostas para modelagem das cargas, conforme as exigências impostas pelo Método da Superposição, e constatado, ao final, uma boa consistência entre os valores esperados e encontrados para os níveis de responsabilidade entre as partes, os trabalhos prosseguiram no sentido de estender a metodologia para situações que refletissem, com mais propriedade, uma estrutura mais realística para as redes elétricas.

Assim procedendo, acredita-se que a utilização do método para uma rede com características mais próprias às configurações reais surge como uma medida complementar e elucidativa do processo do compartilhamento.

Dentre os pontos focais contemplados neste capítulo, ressaltam-se:

- Caracterização das condições operativas da rede, inclusive com a pré-definição das distorções de tensão oriundas do supridor;
- Caracterização da distribuição hipotética feita para a carga, no que tange a sua composição linear e não-linear, conforme exigências definidas pela metodologia em uso;
- Discussões sobre as estratégias para a determinação da impedância harmônica equivalente do supridor, com destaque a utilização da técnica de modelagem através do domínio da frequência e sua aplicação para o sistema escolhido e análise dos resultados;
- Determinação dos parâmetros equivalentes da carga;
- Por fim, a aplicação do Método da Superposição visando à determinação das parcelas de responsabilidades entre o supridor e a carga sobre as distorções harmônicas encontradas.

4.2 - CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA E DAS CONDIÇÕES OPERATIVAS IMPOSTAS

O arranjo selecionado para fins dos estudos computacionais considerados nesta seção compreende uma parte de um complexo elétrico envolvendo alimentadores de 230 kV suprindo, ao longo de sua extensão, um conjunto de consumidores alimentados pela concessionária local.

A linha de transmissão de 230 kV que alimenta este sistema está interligada ao Sistema Nacional através da Subestação I. Esta subestação, com barra dupla em 230 e 138 kV e um barramento simples em 13,8 kV, possui uma capacidade de transformação de 3 x 100

MVA + 1 x 70 MVA. Desta, originam-se alimentadores que suprem a rede da concessionária através de 04 linhas em 138 kV. Na região da subestação II, o complexo encontra-se interligado também com uma hidrelétrica, com potência instalada de 220 MW, constituída por 4 geradores de 55 MW cada.

No diagrama unifilar da Figura 4.1, a hidrelétrica foi representada, simplificada, por uma fonte, que representa a potência total produzida por esta usina, e por um único transformador elevador de 13,8/230 kV de 240 MVA de potência. A linha de transmissão entre a geração (subestação hidrelétrica) e o ponto de conexão da subestação II é de aproximadamente 62 km.

Na sua trajetória, o sistema encontra a primeira localidade atendida. Isto ocorre através da subestação de subtransmissão, aqui designada como subestação III, que é constituída por um barramento simples em 230 e 69 kV com capacidade de transformação de 1 x 30 MVA.

Na segunda localidade atendida, encontra-se outra subestação de subtransmissão e distribuição, a subestação IV, com barramento simples em 230 e 13,8 kV e capacidade de transformação de 1 x 30 MVA.

A terceira carga é suprida por uma subestação de subtransmissão, com barramento simples em 230 e 69 kV e capacidade de transformação de 1 x 30 MVA.

Por fim, a linha de transmissão encontra a subestação VI, a qual é constituída por barras simples em 230 e 138 kV, com uma capacidade de transformação de 1 x 100 MVA. Neste ponto, o fornecimento ocorre através de uma linha em 138 kV a qual é responsável pela alimentação da carga total de 70 MVA.

Conforme já evidenciado, o sistema é do tipo radial, constituído por uma linha de transmissão que interliga a Subestação I à Subestação VI, com uma extensão total entre suas extremidades de aproximadamente 451 km.

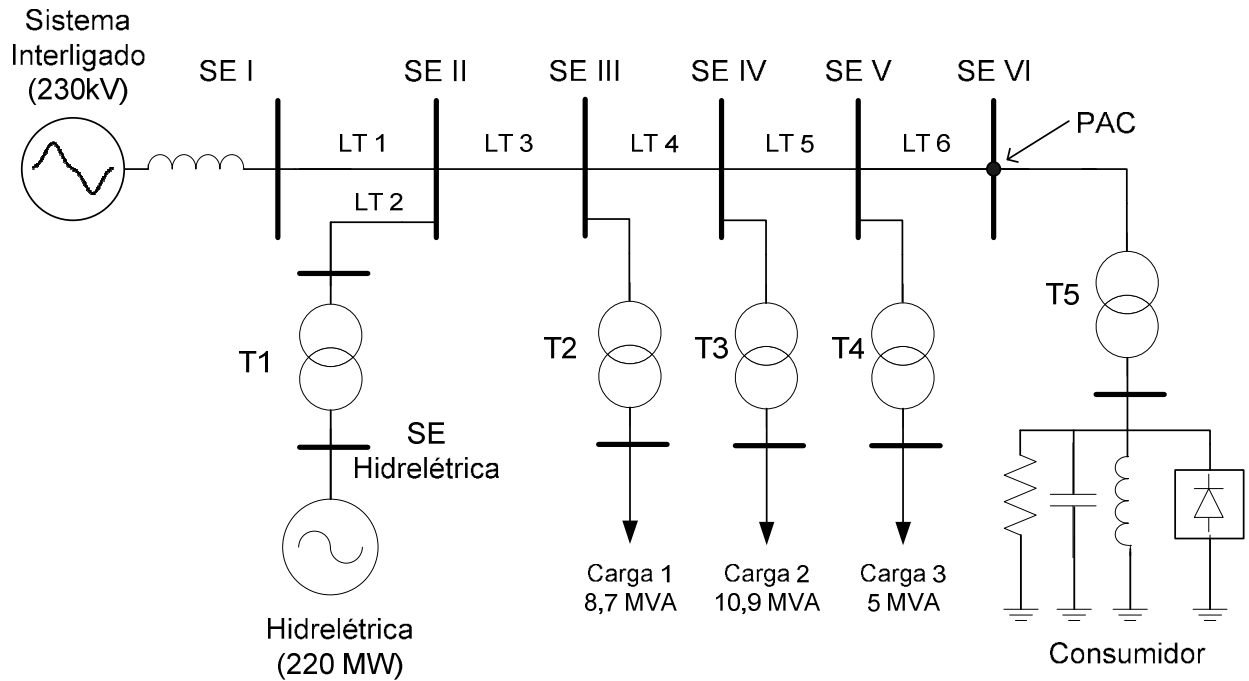


Figura 4. 1 - Diagrama unifilar do sistema elétrico radial

Em consonância com as informações da topologia do sistema elétrico escolhido para os estudos e destacados no diagrama unifilar da Figura 4.1, tem-se que os principais componentes existentes e inseridos no aplicativo computacional encontram-se referenciados nas Tabelas 4.1 a 4.5. Nestas, encontram-se fornecidas às principais características elétricas da Subestação I, da Hidrelétrica, os parâmetros elétricos e os comprimentos das linhas de transmissão de 230 kV que interligam as subestações, as potências, as características dos transformadores e, por fim, informações sobre as cargas.

Tabela 4. 1 – Subestação I

Principais Características Elétricas da Subestação I	
Potência de Curto-Circuito Trifásica (MVA)	4711
Tensão Nominal (kV)	230
Impedância de Curto-Circuito (Ω)	11,23
Frequência [Hz]	60

Tabela 4.2 – Hidrelétrica

Principais Características Elétricas da Hidrelétrica	
Potência de Curto-Circuito Trifásica (MVA)	4000
Tensão Nominal (kV)	13,8
Frequência [Hz]	60

Tabela 4.3 – Linha de transmissão de 230 kV que interliga as subestações I e IV

Principais Características das Linhas de Transmissão de 230 kV				
Linhas de Transmissão	Comprimento (km)	Resistência (Ω/km)	Reatância Indutiva (Ω/km)	Reatância Capacitiva (Ω.km)
LT 1	112	0,0819	0,49574	298382.7654
LT 2	62	0,0819	0,49574	298382.7654
LT 3	105	0,0819	0,49574	298382.7654
LT 4	89	0,0819	0,49574	298382.7654
LT 5	73	0,0819	0,49574	298382.7654
LT 6	72	0,0819	0,49574	298382.7654

Tabela 4.4 – Transformadores

Principais Características dos Transformadores							
Transformadores	VP (kV)	VS (kV)	R (%)	X (%)	C1 (pF)	C2 (pF)	C12 (pF)
Transformador – T1 240 MVA 230/13,8 kV	13,8	230	1	8	1000	1000	1000
Transformador – T2 30 MVA 230/69 kV	230	69	1	3,5	1000	1000	1000
Transformador – T3 30 MVA 230/13,8 kV	230	13,8	1	3,5	1000	1000	1000
Transformador – T4 30 MVA 230/69 kV	230	69	1	3,5	1000	1000	1000
ransformador – T5 100 MVA 230/138 kV	230	138	1	3,5	1000	1000	1000

Onde:

VP - Tensão primária (kV);

VS - Tensão secundária (kV);

R - Resistência (%);

X - Reatância (%);

C1 - Capacitância de fuga do primário (pF);

C2 - Capacitância de fuga do secundário (pF);

C12 - Capacitância de fuga entre o primário e o secundário (pF).

Quanto às cargas alimentadas ao longo da extensão total da linha, à exceção daquela suprida pela subestação VI, as demais, constantes da Tabela 4.5, foram modeladas na forma de impedâncias constantes.

Tabela 4.5 – Cargas

Principais Características das Cargas			
Cargas	Potência Carga (MVA)	Tensão Nominal (kV)	Tipo de Ligação
Carga 1	8,0 MW + j 3,4 MVar	69	Y
Carga 2	10,0 MW + j 4,3 MVar	13,8	Y
Carga 3	4,6 MW + j 1,9 MVar	69	Y

Para fins da presente pesquisa, a composição da carga instalada na subestação VI foi modelada de duas formas. Uma primeira, designada por Situação A, corresponde a uma distribuição de tal forma que a parte linear da mesma (representada por uma impedância constante) foi de 60% e os demais 40% modelados na forma de uma composição retificadora de 6 pulsos (parte não-linear). Uma outra composição para tal carga, aqui designada por Situação B, foi constituída por um arranjo em que apenas 10% do valor total foi modelado na forma de retificadores (parcela não-linear) e os demais 90% seguindo os procedimentos normais, qual seja, via impedância constante. Diante desta exposição, a Tabela 4.6 indica os valores numéricos para os carregamentos associados com as duas situações para a carga do consumidor.

Tabela 4.6 – Composição da carga do consumidor conectado a subestação VI

Principais Características do Consumidor			
Tipo da carga	Potência Carga Situação A	Potência Carga Situação B	Tensão Nominal (kV)
Carga Linear	36 MW + j 17,5 MVar	56,7 MW + j 27,5 MVar	138
Carga Não-linear	30 MVA	7 MVA	138

Vale ressaltar que, no que tange ao suprimento de tensão junto ao barramento de conexão designado por Subestação I (230 kV), visando os objetivos finais deste trabalho, adotou-se uma tensão de suprimento com uma pré-distorção. Esta seria advinda da rede básica aqui modelada apenas por uma fonte de tensão e seu respectivo nível de curto-circuito. Portanto, ao se considerar o sistema como um todo, fica configurada uma situação tal que a subestação VI recebe distorções harmônicas de duas fontes básicas, ou seja, da rede de alimentação principal e do consumidor. As componentes harmônicas adicionadas ao barramento de 230 kV estão associadas com as ordens mostradas na Tabela 4.7. Estas são responsáveis por uma distorção harmônica total (a vazio) da ordem de 1%, o qual corresponde a níveis típicos frequentemente encontrados em instalações correspondentes a aqui adotada.

Tabela 4. 7 – Tensões harmônicas advindas da rede básica (Subestação I)

Ordem harmônica	Tensão Eficaz		Ângulo	Sequência de fase
3^a	1,84 kV	0,8%	0°	zero
5^a	0,92 kV	0,4%	0°	negativa
7^a	0,92 kV	0,4%	0°	positiva
11^a	0,46 kV	0,2%	0°	negativa
13^a	0,46 kV	0,2%	0°	positiva

Quanto a carga não-linear, esta foi modelada através de um retificador de 6 pulsos equivalente, fato este que determina, pela própria natureza do equipamento, que componentes harmônicas de corrente de ordem $6K \pm 1$, ou seja 5^a, 7^a, 11^a, 13^a e assim sucessivamente, sejam produzidas e injetadas na rede. Como já dito, a ação conjunta da pré-distorção presente na linha de 230 kV e das injeções harmônicas aqui discutidas são responsáveis pela distorção

final que será alvo das análises sobre o compartilhamento das responsabilidades entre os dois agentes.

As demais cargas, aqui designadas como lineares, são, ao longo dos estudos, tratadas na forma de impedância constante.

4.3 – METODOLOGIAS PARA A DETERMINAÇÃO DE $Z(\omega)$ DA REDE DE SUPRIMENTO

Como já foi dito, para a investigação das responsabilidades sobre as distorções harmônicas em um sistema de potência é imprescindível o conhecimento das impedâncias dos agentes envolvidos. Apesar das dificuldades próprias à matéria, a impedância equivalente do sistema supridor, diante das questões associadas com a modelagem de consumidores, se apresenta com razoável facilidade de obtenção. Um dos fatores que contribui para tal afirmativa está no fato que a composição do sistema elétrico nas imediações do PAC é de domínio da empresa supridora e, nestas condições, a obtenção da clássica impedância $Z(\omega)$ torna-se, para a maioria dos casos, passível de cálculo.

Dentre as estratégias encontradas na literatura e que tratam da questão da modelagem da rede de suprimento para os fins desta pesquisa ressaltam-se:

- Procedimentos fundamentados na modelagem no domínio da frequência:
neste contexto reconhece-se o programa *HarmZs* desenvolvido pelo Cepel [26] , o simulador de sistemas elétricos de potência trifásicos SSEP 3.0 [27] desenvolvido pela empresa Quality Engenharia e Sistemas, ou outra ferramenta que permita representar os componentes presentes na rede através

de seus modelos no domínio da frequência e, a partir do barramento de interesse, determinar as impedâncias aqui almejadas.

- Procedimentos fundamentados na modelagem no domínio do tempo: de forma similar aos procedimentos acima, para o domínio do tempo, pode-se citar os software SABER, ATP, ou ainda, outra ferramenta que permita representar os componentes presentes na rede através de seus modelos no domínio tempo e, a partir do barramento de interesse, determinar as impedâncias aqui almejadas.
- Métodos práticos de medição de impedância harmônica: neste caso, ao invés de uma modelagem computacional, são feitas medições de campo a fim de determinar a impedância do sistema, como é mostrado em [22].

No que tange aos valores de $Z(\omega)$, vale ainda ressaltar que, muitas vezes, a impedância do supridor encontra-se influenciada por equipamentos terminais de conexão da rede de suprimento com o consumidor. Este é o caso da presença, nos complexos elétricos, dos transformadores específicos para a alimentação das cargas. Nestas circunstâncias, uma vez incorporado tal equipamento terminal como parte da rede, e realizando as medições nos secundários dos transformadores abaixadores, fica evidenciado que estes passam a exercer grande domínio sobre a impedância harmônica equivalente do agente supridor.

Para fins deste trabalho, e em consonância com os objetivos traçados, os resultados almejados quanto ao compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas, podem perfeitamente empregar um dos procedimentos mencionados acima quanto à obtenção da desejada impedância $Z(\omega)$. Por questões de maior facilidade e disponibilidade da ferramenta, a escolha recaiu no programa SSEP 3.0, cujas principais propriedades são sintetizadas a seguir.

O simulador SSEP 3.0, como citado, encontra-se baseado em técnicas do domínio da frequência para a solução dos fluxos de carga e harmônico em sistemas elétricos de potência. Sua metodologia de simulação consiste na solução linear da matriz admitância harmônica, onde, para cada frequência, o programa realiza o cálculo do fluxo harmônico, fornecendo como resultados as distorções harmônicas de tensão e corrente nas diversas barras e linhas do sistema em estudo. O programa traz incorporado em sua estrutura, diversos componentes que perfazem um sistema elétrico tais como: transformadores, banco de capacitores, linhas de transmissão, motores de indução, cargas lineares, filtros harmônicos, etc. Quanto às cargas não lineares, estas são modeladas como fontes de correntes harmônicas, cujos dados (ordem harmônica, amplitude e ângulo de fase) podem ser oriundos de medições de campos ou de simulações computacionais.

Utilizando tal recurso, para o complexo elétrico selecionado para os fins investigativos deste capítulo, obteve-se a resposta para $Z(\omega)$ como mostram as Figuras 4.2 e 4.3, associadas, respectivamente, com os módulos e ângulos dos parâmetros representativos. As figuras são auto-esclarecedoras sobre a manifestação de pontos com elevadas impedâncias (não propriamente dito ressonantes), fato este que permite avaliar as frequências que poderão impactar de forma mais significativa nos estudos e constatações.

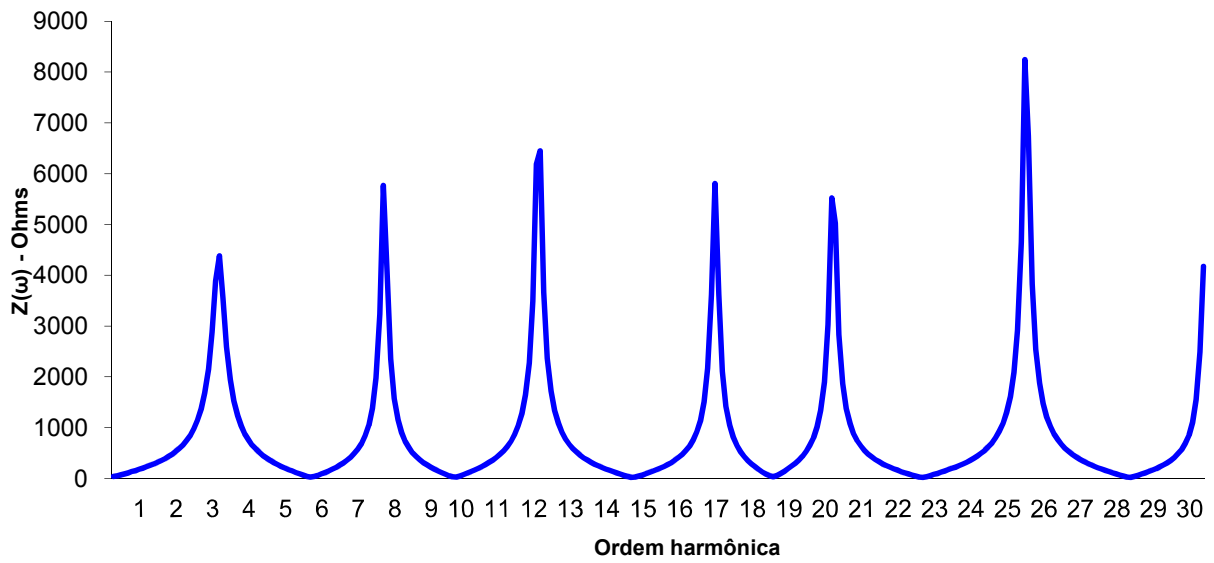


Figura 4. 2 - Módulo da impedância harmônica do sistema em função da frequência.

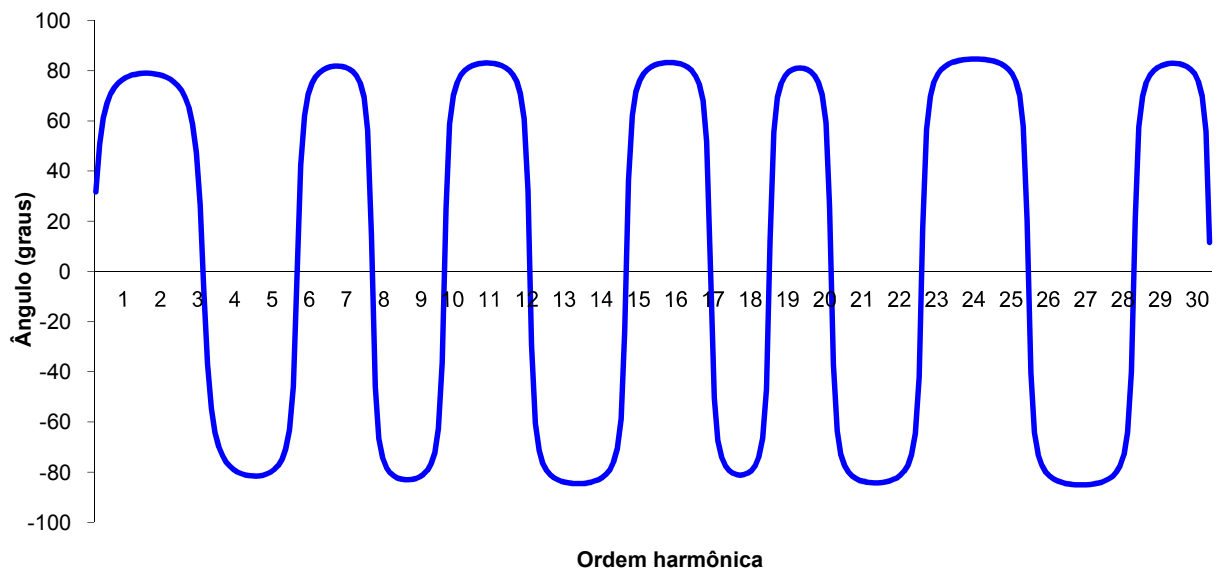


Figura 4. 3 - Ângulo da impedância harmônica do sistema em função da frequência.

A Tabela 4.8 correlaciona os resultados gráficos em valores numéricos para as impedâncias $Z(\omega)$ para as ordens harmônicas em análise.

Tabela 4. 8 – Valores da Impedância harmônica da concessionária - $Z(\omega)$

Ordem harmônica	Módulo (Ω)	Ângulo (°)
1^a	227,50	77,84
3^a	4379,10	-6,82
5^a	143,12	-77,33
7^a	836,14	79,63
11^a	730,48	81,93
13^a	404,22	-84,56

4.4 – CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA HARMÔNICA EQUIVALENTE DO CONSUMIDOR

Tendo em mente que, muito embora a configuração e dados do sistema utilizado no estudo almejem representar um sistema real, é importante reconhecer que o arranjo utilizado corresponde a uma síntese do complexo na sua estrutura mais completa. Desta forma, não foi possível a realização de medições de campo de forma a obter as informações relativas às tensões e correntes harmônicas junto ao denominado PAC, visto que o arranjo se tornou hipotético. À luz desta limitação não restou outra alternativa senão a realização de processamentos computacionais que forneceram as necessárias informações relativas às distorções harmônicas para o ponto de conexão da rede de suprimento com a carga suprida. O ponto focal contemplado corresponde, como já esclarecido, o primário do transformador de 230 kV para 138 kV localizado na subestação VI.

Para atingir a tais propósitos, o complexo elétrico configurado e suas respectivas informações foram inseridas no simulador utilizando técnicas de modelagem no domínio do tempo. Assim procedendo tornou-se viável a obtenção dos resultados finais atrelados com as distorções harmônicas para a tensão e corrente na barra definida por subestação VI, para as duas situações em estudo. Como dito, para um sistema verdadeiramente real, o ideal seria que tais valores fossem extraídos de medições em campo.

4.4.1 - IMPEDÂNCIA HARMÔNICA EQUIVALENTE PARA A CARGA - SITUAÇÃO A

Fundamentando nos procedimentos já esclarecidos anteriormente, a Tabela 4.9 fornece os valores das grandezas obtidas via simulação (que para uma rede real seriam derivados das medições). Tais informações constituem-se nas bases para os cálculos dos parâmetros equivalentes necessários à representação da carga através da técnica do domínio da frequência, fato este em consonância com a metodologia já empregada para a determinação da impedância equivalente da rede de suprimento.

Tabela 4. 9 – Valores das tensões e correntes obtidas no barramento de 230 kV da Subestação VI (PAC) – Situação A

Ordem harmônica	$\vec{V}_h$		$\vec{I}_h$	
	Módulo (kV)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)
1ª	126,01	-18,41	177,78	-30,58
3ª	1,28	260,21	1,06	-89,12
5ª	3,02	196,49	15,50	97,55
7ª	4,07	233,08	5,37	-16,81
11ª	3,00	-45,37	4,00	52,93
13ª	1,42	226,69	3,46	129,59

Empregando-se, então, os valores de tensão e corrente do PAC, no lado da alta tensão (230 kV), nos termos estabelecidos pelas metodologias selecionadas para a determinação dos parâmetros equivalentes da carga, obteve-se os resultados (R, L e C) constantes da Tabela 4.10. As expressões utilizadas para tal fim encontram-se descritas no capítulo III.

Tabela 4. 10 – Valores dos parâmetros equivalentes (R, L e C) do consumidor – Situação A

Parâmetros	Parâmetros representativos do Consumidor	
	Método II	Método III
R (Ω)	727,37	725,12
C (uF)	0	0,38
L (mH)	8908,44	6003,56

4.4.2 - IMPEDÂNCIA HARMÔNICA EQUIVALENTE PARA A CARGA - SITUAÇÃO B

De modo similar ao anterior, porém alterando-se a composição da carga suprida pela subestação VI para configuração intitulada Situação B, têm-se, junto ao PAC, as tensões e correntes harmônicas contidas na Tabela 4.11.

Tabela 4. 11 – Valores das tensões e correntes obtidas no barramento de 230 kV da Subestação VI (PAC) – Situação B

Ordem harmônica	$\vec{V}_h$		$\vec{I}_h$	
	Módulo (kV)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)
1ª	121,43	-17,88°	182,85	-37,25 °
3ª	0,93	268,94 °	1,1	269,72 °
5ª	0,84	200,82 °	3,19	110,61 °
7ª	0,86	184,47 °	0,27	-18 °
11ª	0,66	-55,17 °	0,73	22,2 °
13ª	0,35	219,27 °	0,61	141,2 °

Novamente, empregando-se os valores de tensão e corrente do PAC, nos termos estabelecidos pelas metodologias, chega-se aos parâmetros equivalentes da carga (R, L e C) constantes da Tabela 4.12.

Tabela 4. 12 – Valores dos parâmetros equivalentes (R, L e C) do consumidor – Situação B

Parâmetros	Parâmetros representativos do Consumidor	
	<i>Método II</i>	<i>Método III</i>
R (Ω)	704,05	703,97
C (μF)	0	0,16
L (mH)	5310,83	4736,93

4.5 – APLICAÇÃO DO MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO

Uma vez obtidas todas as informações requeridas para a utilização do Método da Superposição para fins da determinação das parcelas de responsabilidades entre os agentes envolvidos no processo (supridor e consumidor), quais sejam: impedâncias do supridor, impedâncias do consumidor e os níveis de tensões e correntes harmônicas junto ao PAC, pode-se, na sequência, aplicar as formulações descritas no Capítulo II desta dissertação para se atingir os propósitos finais almejados.

Visando obter informações e diretrizes para análise da consistência física dos resultados derivados do processo matemático para a atribuição de responsabilidades sobre as distorções harmônicas, para cada uma das configurações de carga do consumidor anteriores (Situação A e Situação B), foram realizados processamentos computacionais nos termos abaixo caracterizados, os quais tiveram por meta o prévio conhecimento das contribuições isoladas do supridor e do consumidor, assim como também o desempenho global do conjunto (com ambas as fontes de harmônicos concomitantemente presentes).

Os casos contemplados na análise são:

- Caso 01 - sistema teste contendo apenas distorções atreladas com a rede de suprimento, sendo a totalidade da carga representada por componentes lineares;
- Caso 02 – sistema teste com suprimento ideal (sem distorções) e carga da subestação VI possuindo uma grande parcela de carga não linear e modelada através de um retificador de 6 pulsos;
- Caso 03 – sistema teste possuindo distorções advindas da rede de suprimento (nos mesmos níveis do caso 01) e do consumidor final (nos mesmos níveis que o caso 02).

Portanto, foram realizadas um total de seis simulações, três para a Situação A e três para Situação B, como pode ser visualizado na Figura 4.4.

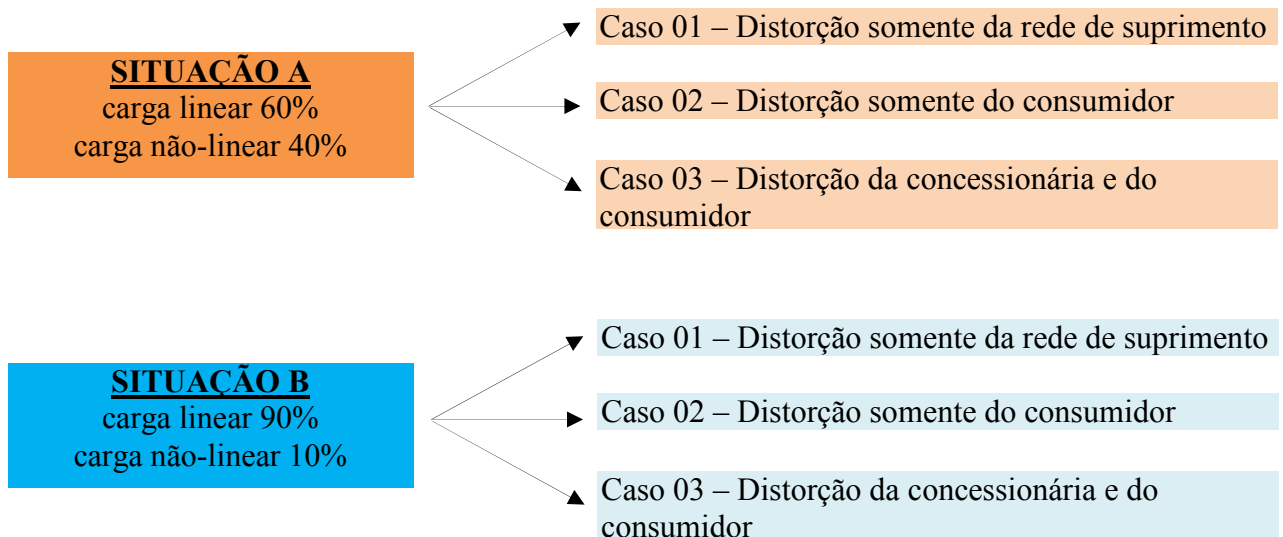


Figura 4. 4 – Resumo das simulações realizadas para aplicação do Método da Superposição.

4.5.1 - RESULTADOS DO COMPARTILHAMENTO DAS RESPONSABILIDADES HARMÔNICAS PARA A SITUAÇÃO A

Os resultados associados com a composição supra identificada para a carga do barramento terminal da rede elétrica, uma vez realizado os processamentos computacionais, conduziu aos seguintes desempenhos mostrados nas Tabelas 4.13, 4.14 e 4.15 a seguir.

Tabela 4. 13 – Resultados para as correntes harmônicas no PAC para a Situação A

Ordem harmônica	Correntes Harmônicas do PAC					
	Distorção somente da concessionária- Caso 01		Distorção somente do consumidor – Caso 02		Distorção concessionária e consumidor – Caso 03	
	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)
3 ^a	1,03	269,64	-	-	1,06	-89,12
5 ^a	0,27	208,82	15,76	95,51	15,50	97,55
7 ^a	0,81	157,07	6,27	-22,1	5,37	-16,81
11 ^a	0,41	-33,59	4,22	56,91	4,00	52,93
13 ^a	0,20	240,91	3,5	122,57	3,46	129,59

Tabela 4. 14 – Resultados para as tensões harmônicas no PAC para a Situação A

Ordem harmônica	Tensões Harmônicas do PAC					
	Distorção somente da concessionária- Caso 01		Distorção somente do consumidor – Caso 02		Distorção concessionária e consumidor – Caso 03	
	Módulo (kV)	Ângulo (°)	Módulo (kV)	Ângulo (°)	Módulo (kV)	Ângulo (°)
3 ^a	1,38	267,13	-	-	1,28	260,21
5 ^a	0,28	189,12	2,78	196,1	3,02	196,49
7 ^a	0,74	128,75	4,37	238,15	4,07	233,08
11 ^a	0,25	-70,67	2,92	-45,01	3,00	-45,37
13 ^a	0,10	203,23	1,32	224,47	1,42	226,69

De posse dos valores das impedâncias harmônicas da concessionária e do consumidor, aplicando-se o método da superposição para atribuição de responsabilidade sobre as distorções harmônicas do sistema em estudo, para a Situação A, obteve-se os resultados indicados na Tabela 4.15.

Tabela 4. 15 – Compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas entre a concessionária e o consumidor – Situação A

Ordem harmônica	Método II		Método III	
	Responsabilidade Atribuída à Concessionária	Responsabilidade Atribuída ao Consumidor	Responsabilidade Atribuída à Concessionária	Responsabilidade Atribuída ao Consumidor
3 ^a	100%	0%	100%	0%
5 ^a	0%	100%	0%	100%
7 ^a	0%	100%	0%	100%
11 ^a	0%	100%	0%	100%
13 ^a	0%	100%	0%	100%

De acordo com os resultados acima fica evidenciado que o processo do compartilhamento conduziu aos seguintes pontos:

- Não foi obtido nenhum indicador porcentual que compartilhasse as responsabilidades entre as partes, isto é, ao supridor foi atribuída total responsabilidade sobre a ordem harmônica 3, enquanto que as demais ficaram integralmente à cargo do consumidor;
- Muito embora os indicativos numéricos tenham sido de 100%, é importante observar que, à luz dos resultados esperados e mostrados nas Tabelas 4.13 e 4.14, de fato, houve total domínio de uma ou outra parte no processo da composição da distorção total;
- Apesar dos resultados não terem evidenciado uma situação de partilha entre os agentes, é de compreensão geral que a adoção de outras condições operativas para a rede de suprimento estaria implicando em uma situação de funcionamento bastante distinta daquelas encontradas em sistemas reais.

4.5.2 - RESULTADOS DO COMPARTILHAMENTO DAS RESPONSABILIDADES HARMÔNICAS PARA A SITUAÇÃO B

De modo correspondente a situação anterior, as Tabelas 4.16, 4.17 e 4.18, expressam, respectivamente, as contribuições individuais do supridor e consumidor para as correntes e tensões harmônicas no PAC, assim como também os resultados finais dos estudos de compartilhamento obtidos pelo método em pauta.

Tabela 4. 16 — Resultados para as correntes harmônicas no PAC para a Situação B

Ordem harmônica	Correntes Harmônicas do PAC					
	Distorção somente da concessionária- Caso 01		Distorção somente do consumidor – Caso 02		Distorção concessionária e consumidor – Caso 03	
	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)
3 ^a	1,09	269,50	-	-	1,10	269,72
5 ^a	0,41	210,25	3,37	102,88	3,19	110,61
7 ^a	0,99	136,40	1,35	-44,74	0,27	-18,00
11 ^a	0,42	-56,46	0,85	52,42	0,73	22,20
13 ^a	0,29	240,85	0,75	113,94	0,61	141,20

Tabela 4.17 — Resultados para as tensões harmônicas no PAC para a Situação B

Ordem harmônica	Comparativo das Tensões Harmônicas do PAC					
	Distorção somente da concessionária- Caso 01		Distorção somente do consumidor – Caso 02		Distorção concessionária e consumidor – Caso 03	
	Módulo (kV)	Ângulo (°)	Módulo (kV)	Ângulo (°)	Módulo (kV)	Ângulo (°)
3 ^a	0,95	-89,25	-	-	0,93	268,94
5 ^a	0,28	193,44	0,59	203,5	0,84	200,82
7 ^a	0,55	112,55	0,94	215,55	0,86	184,47
11 ^a	0,15	-83,45	0,59	-49,47	0,66	-55,17
13 ^a	0,08	218,7	0,28	215,64	0,35	219,27

Tabela 4.18 – Compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas entre a concessionária e o consumidor – Situação B

Ordem harmônica	Método II		Método III	
	Responsabilidade Atribuída à Concessionária	Responsabilidade Atribuída ao Consumidor	Responsabilidade Atribuída à Concessionária	Responsabilidade Atribuída ao Consumidor
3ª	100%	0%	100%	0%
5ª	2,1%	97,9%	0%	100%
7ª	100%	0%	0%	100%
11ª	10,4%	89,6%	19,3%	80,7%
13ª	7,9%	92,1%	0%	100%

De acordo com os resultados acima fica evidenciado que o processo do compartilhamento, para a presente situação, conduziu aos seguintes pontos focais:

- No que tange ao 3º harmônico, a atribuição de 100% da responsabilidade ao sistema supridor está em total consonância com a realidade física esperada;
- No que tange as demais distorções, de fato, o método distribuiu as responsabilidades entre as partes, todavia, os valores encontrados não se mostram condizentes com as expectativas;
- Observando-se, por exemplo, a componente de ordem 5, o supridor injeta cerca de 10% da corrente correspondente no PAC, enquanto que a carga ficaria responsável pelos demais 90%. Quando se observa as tensões, as discrepâncias evidenciam discordâncias ainda maiores. Disto se conclui que o método não indicou uma divisão de responsabilidades da forma esperada;
- Ao se avaliar, por exemplo, a ordem harmônica 7, a situação se complica ainda mais, visto que o processo de compartilhamento indicou total responsabilidade

para o supridor ou para o consumidor, conforme o processo utilizado para a modelagem da carga;

- Portanto, o caso estudado, propositalmente selecionado, é um forte indicativo que os procedimentos ainda são embrionários e que maiores desenvolvimentos são ainda requeridos até a proposição de um mecanismo confiável para os fins aqui almejados.

4.6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo, em complementação ao anterior, foi dedicado a aplicação da metodologia da superposição e procedimentos para a determinação das impedâncias equivalentes de supridores e consumidores, conforme exigências impostas pela metodologia selecionada e fundamentada em técnicas de análise no domínio da frequência.

Não obstante os resultados encorajadores obtidos quando da utilização dos procedimentos para um arranjo simples, como estabelecido no Capítulo III, foi de compreensão geral que a confiabilidade dos resultados deveria ser objeto de maiores investigações e, neste sentido, a pesquisa avançou no intuito de se estudar um complexo elétrico com maior identidade com a realidade.

Dentro deste enfoque, foi selecionado um complexo elétrico existente, ao qual foram impostas algumas simplificações, e ainda, adotadas hipóteses não condizentes com o funcionamento real do sistema. Não obstante tais medidas, os resultados obtidos foram elucidativos sobre o uso da estratégia para redes de maior porte e complexidades.

De um modo geral constatou-se que, muito embora algumas constatações possuissem boa correlação com as expectativas físicas, outras se mostraram bastante divergentes dos resultados esperados. Apesar das frustrações, é importante reconhecer que o presente trabalho,

pela primeira vez, explorou aspectos mais profundos sobre o tema e, diante dos problemas encontrados, fica fortalecida a tese da identificação dos motivos das inconsistências e necessidades de maiores desenvolvimentos até se atingir um método e produto final para aplicação pelo setor elétrico.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Não obstante as considerações e comentários próprios feitos ao longo de cada capítulo considera-se essencial neste momento, destacar as principais constatações e resultados obtidos dos estudos realizados ao longo desta dissertação proporcionando uma visão ampla e sucinta da atual pesquisa.

O Capítulo I foi direcionado a uma contextualização do tema central desta pesquisa, com destaque a apresentação de uma síntese dos principais documentos bibliográficos encontrados, e ainda, a identificação das áreas ainda merecedoras de atenção sobre a questão do compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas. Uma vez realizadas tais tarefas, foi também estabelecido o planejamento do projeto que culminou na presente dissertação,

O capítulo II, ainda de caráter introdutório, sintetizou os fundamentos do “Método da Superposição”, idealizado por Wilsun Xu e focado nos objetivos desta dissertação. O embasamento científico do mesmo está alicerçado em um princípio matemático amplamente conhecido e aplicado à análise de circuitos elétricos lineares e não-lineares. Como já mostrado em trabalhos anteriores, este método obteve os melhores resultados para o compartilhamento das distorções harmônicas. Contudo, esta metodologia, depende, basicamente, de informações extraídas de medições das tensões e das correntes, assim como do conhecimento das

impedâncias envolvidas no processo. Não obstante a simplicidade do princípio do Método da Superposição vale ressaltar, mais uma vez, sua forte dependência com relação às impedâncias equivalentes harmônicas dos agentes envolvidos no estudo (concessionária e consumidor).

O capítulo III, já ciente das informações exigidas para a aplicação do método para a atribuição da responsabilidade sobre as distorções harmônicas, foi dedicado ao estudo, análise e síntese dos trabalhos nacionais e internacionais atrelados com a obtenção da impedância harmônica equivalente das cargas ou consumidores. Deste modo, apresentaram-se as bases teóricas de três metodologias voltadas para a representação da impedância harmônica de consumidores nos termos requeridos para aplicação da teoria da superposição. Resumindo, as propostas existentes podem ser sintetizadas em: Método I, proposto pela referência [12]; Método II proposto pela referência [16] e; Método III proposto pela referência [8]. Utilizando um sistema simples e hipotético, em que o consumidor foi caracterizado por uma carga linear e mista, foram então aplicados os procedimentos considerados pelas metodologias e assim pode-se avaliar os resultados obtidos por cada método para os valores de impedância harmônica. Os valores encontrados deixaram bastante claro que as propostas feitas pelos dois principais métodos (I e II) conduziram a resultados idênticos e que os parâmetros equivalentes encontrados se mostraram substancialmente divergentes das grandezas esperadas. Através do método III, estudos adicionais enfatizaram uma melhoria do processo da obtenção dos parâmetros equivalentes, embora, mais uma vez, quando da presença de cargas não-lineares, o procedimento, na forma descrita, tenha apresentado aumento das discrepâncias. Apesar destes aspectos, o capítulo avançou no sentido de aplicar os circuitos equivalentes calculados para fins do compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas junto ao PAC. Para o caso mais problemático, qual seja: Caso 7 constatou-se que os indicadores

apontam para uma direção promissora, muito embora os valores numéricos ainda não ofereçam a devida e necessária segurança para os propósitos desta pesquisa.

O capítulo IV teve como objetivo complementar os estudos realizados através de um circuito hipotético e simplificado. Para tanto foi selecionado um complexo elétrico com características mais reais, muito embora informações associadas com medições de campo não tenham sido possíveis de obtenção. Não obstante tais questões, como visto, a aplicação dos métodos para obtenção dos parâmetros equivalentes à carga, assim como o emprego da superposição para fins do compartilhamento das responsabilidades foram explorados e, novamente, foram bastante esclarecedores sobre as perspectivas e limitações das propostas investigadas.

Feitas as devidas e necessárias simplificações e adoções para caracterizar a configuração e carregamentos atribuídos à rede, foram então impostas condições operativas da rede, com destaque a pontos como: pré-definição das distorções de tensão oriundas do supridor; caracterização da distribuição hipotética feita para a carga, no que tange a sua composição linear e não-linear; discussão sobre as estratégias para a determinação da impedância harmônica equivalente do supridor;; determinação dos parâmetros equivalentes da carga; e , por fim, a aplicação do Método da Superposição visando a determinação das parcelas de responsabilidades entre o supridor e a carga sobre as distorções harmônicas encontradas. De um modo geral constatou-se que, muito embora alguns resultados possuissem boa correlação com as expectativas físicas, outras se mostraram bastante divergentes dos resultados esperados.

Apesar de esta pesquisa ter apontado para grandes perspectivas do emprego do Método da Superposição para os fins aqui almejados, é importante reconhecer que o presente trabalho, pela primeira vez, explorou aspectos mais profundos sobre o tema e, diante dos problemas encontrados, fica fortalecida a tese de que esforços adicionais devem ser realizados

no sentido de identificar os motivos das inconsistências e necessidades de maiores desenvolvimentos até se atingir um método e produto final para aplicação pelo setor elétrico. Neste contexto, dentre outros, sugere-se o desenvolvimento de temas de pesquisa que irão contribuir para o avanço do assunto em pauta, conforme abaixo esclarecido:

- Maiores estudos sobre a impedância harmônica equivalente do consumidor através de métodos alternativos via impedâncias pré-definidas ou filtros a serem chaveados, técnicas estatísticas e algoritmos de otimização visando, acima de tudo, maiores exatidões para a representação do consumidor;
- Aplicação do Método da Superposição em sistemas reais visando uma avaliação do desempenho do complexo, à luz do foco desta dissertação, em que pese a dinâmica operacional dos arranjos físicos encontrados na prática.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DUGAN, R. C., MCGRANAGHAN, M. F., SANTOSO, S., BEATY, H. W., **Electrical power systems quality**, 2^a ed., McGraw-Hill, New York, 2003.
- [2] KERCHNER, R. M., CORCORAN, G. F., **Circuitos de corrente alternada**, Tradução: Reynaldo Resende e Ruy Pinto da Silva Sieczkowski, 3^a ed., Porto Alegre-RS, 1977.
- [3] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, **“Módulo 8 – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional”**, Dezembro de 2008.
- [4] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, **“Submódulo 2.2 – Padrões de Desempenho da Rede Básica”**, Dezembro 2002.
- [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] SANTOS, I. N., **Uma contribuição à Avaliação de Desempenho dos Principais Métodos para a Atribuição de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas**, Uberlândia, 2007. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Elétrica) Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia.

- [8] SILVA, S. F. P., **Uma Proposta para o Compartilhamento das Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas**, Uberlândia, 2007. (Tese, Doutorado em Engenharia Elétrica) Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia.
- [9] XU, W, LIU, Y, **A method to determine customer harmonic contributions for incentive-based harmonic control applications**, IEEE PES Summer Meeting, pp 361-366, 1999.
- [10] XU, W., LIU, Y., **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.
- [11] SOLIMAN, S. A., AL-KANDARI, A. M., **A simple and noval technique for linear and nonlinear load modeling in the time domain**, 8th Mediterranean Electrotechnical Conference, Volume 3, pp. 1616-1619, May 1996.
- [12] MAKRAM, E. B., VARADAN, S., **A Generalized Load Modeling in Presence of Harmonics and Distortion**, Proceedings Twenty-Fifth Southeastern Symposium on System Theory, pp. 124-128, March 1993.
- [13] MA, H., GIRGIS, A. A., **Identification and Tracking of Harmonic Sources in a Power System Using a Kalman Filter**, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 11, Issue 3, pp. 1659-1665, July 1996.
- [14] YU , K. K. C., WATSON, N. R., ARRILLAGA, J., **An Adaptive Kalman Filter Dynamic Harmonic State Estimation and Harmonic Injection Tracking**, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 20, Issue 2, pp. 1577-1584, April 2005.
- [15] ANDRADE JR., G. V., NAIDU, S. R., NÉRI, M. G. G., SOARES, R. M., COSTA, E. G., **Contribuições da Distorção Harmônica de Tensão Entre Concessionária e Consumidor**, Anais Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Campina Grande/PB, Julho 2006.

- [16] EL ARINI, M. M. M., **A Time Domain Load Modeling Technique and Harmonics Analysis**, 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Proceedings Volume II, pp. 930-938, October 1998.
- [17] GALHARDO, M. A. B., PINTO, J. T., **Modelagem de cargas não-lineares em sistemas elétricos de potência**, Anais V SBQEE – Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica, Aracaju – Sergipe, Agosto de 2003.
- [18] GUL, O., **Identification of three phase generic load model parameters using field measurements**, IEEE MELECON, pp 1087-1090, Dubrovnik – Croatia, 2004.
- [19] ANDRADE JR., G. V., NAIDU, S. R., NÉRI, M. G. G., COSTA, E. G., **Proposal to Estimation of the Utility's and Consumer's Contribution to Harmonic Distortion**, Anais Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Belo Horizonte - MG, Abril de 2008.
- [20] GIRGIS, A. A., MCMANIS, R. B., **Frequency domain techniques for modeling distribution or transmission networks using capacitor switching induced transients**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No 3, pp 1882-1890, July 1989.
- [21] ZHANG , X., AHMED, E. E., XU, W., **Determination of network harmonic impedances using steady-state measurement**, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Volume 1, pp. 390-394, 1999
- [22] OLIVEIRA, A., OLIVEIRA, J. C., RESENDE, J. W., MISKULIN, M.,S., **Practical approaches for AC system harmonic impedance measurements** , IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 6, No. 4, pp 1721-1726, October 2001.
- [23] XU, W., **Component modeling issues for power quality**, IEEE Power Engineering Review, pp 12-17, November de 2001.

- [24] XU, W., AHMED, E. E., ZHANG, X., LIU, X, **Measurement of network harmonic impedances: practical implementation issues and their solutions**, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 17, No. 1, pp 210-216, January 2002.

- [25] TAYJASANANT, T., **A graphic user interface-based program for harmonic impedance calculation**, The 7th International conference on Power Electronics and Drives systems IEEE PEDS 2007, Bangkok, Thailand.

- [26] HARMZS, **Estudo do Comportamento Harmônico e Análise Modal de Redes Elétricas**, CEPEL, <http://www.harmzs.cepel.br/>.

- [27] SSEP 3.0, **Simulador de Sistemas Elétricos de Potência - Manual do Usuário**, Versão 3.0, QUALITY Engenharia e Sistemas Ltda, www.qes.com.br.