

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

# Estimação da Contribuição Harmônica de Tensão em Sistemas Elétricos Trifásicos

**GILVAN VIEIRA DE ANDRADE JUNIOR**

Campina Grande – Paraíba – Brasil  
Março de 2007

©Gilvan Vieira de Andrade Junior, 2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

## Estimação da Contribuição Harmônica de Tensão em Sistemas Elétricos Trifásicos

*Trabalho apresentado à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para aceitação no Programa de Mestrado em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Conhecimento: Qualidade de Energia

Orientando:  
Gilvan Vieira de Andrade Junior

Orientadores:  
Sreeramulu Raghuram Naidu, Ph.D.  
Edson Guedes da Costa, D.Sc.

Campina Grande, Paraíba, Brasil

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Estimação da Contribuição Harmônica de Tensão em Sistemas Elétricos Trifásicos

Estimativa da contribuição harmônica de tensão em sistemas elétricos trifásicos em um sistema de distribuição de energia elétrica. Orientador: Edson Guedes da Costa. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, 2007. 88f. il.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

A553e

2007 Andrade Junior, Gilvan Vieira de.

Estimação da contribuição harmônica de tensão em sistemas elétricos trifásicos / Gilvan Vieira de Andrade Junior. — Campina Grande, 2007.  
88f.: il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

Referências.

Orientadores: Sreeramulu Raghuram Naidu e Edson Guedes da Costa.

1. Distorção (Forma de Onda). 2. Qualidade de Energia. 3. Fontes de Harmônicos. 4. Filtro de Kalman. 5. Mínimos Quadrados Recursivos. I. Título.

CDU 621.3.018.7

UFCG - BIBLIOTECA - CAMPUS I	
2413	25.10.07

**ESTIMAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO EM SISTEMAS  
ELÉTRICOS TRIFÁSICOS**

**GILVAN VIEIRA DE ANDRADE JÚNIOR**

Dissertação Aprovada em 17.04.2007



**SREERAMULU RAGHURAM NAIDU, Ph.D., UFCG**  
Orientador



**EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG**  
Orientador



**WASHINGTON LUIZ ARAUJO NEVES, Ph.D., UFCG**  
Componente da Banca



**MAURÍCIO BELTRÃO DE ROSSITER CORRÊA, D.Sc., UFCG**  
Componente da Banca



**JOSÉ TAVARES DE OLIVEIRA, Dr., UFRN**  
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB  
ABRIL - 2007

*"Nunca ande pelo caminho traçado, pois ele  
conduz somente até onde os outros foram."*

Alexandre Graham Bell

## **Agradecimentos**

À Deus por ter me dado força, coragem, sabedoria e serenidade para que pudesse realizar este trabalho.;

À minha esposa Elis pelo apoio nas horas mais difíceis e por sua compreensão;

À Capes e a Aneel pelo suporte financeiro a esta pesquisa;

À Saelpa que forneceu todo suporte às medições em seu sistema elétrico;

Aos professores Edson Guedes e S. R. Naidu pela orientação, dedicação, ajuda, compreensão, amizade e apoio;

Aos funcionários do Laboratório de Alta Tensão, Chico, Selma e Eduardo pela amizade e pela disposição em ajudar;

Aos funcionários da COPELE: Ângela e Pedro;

A meus pais e parentes que sempre acreditaram na minha dedicação aos trabalhos acadêmicos;

Aos colegas de curso: Darlan, Djane, Fabiano, George, Kleber, Luciano, Max e Tarso;

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

## Resumo

Neste trabalho é proposto um método para ponderar as responsabilidades entre a concessionária e o consumidor, referente à distorção harmônica da onda de tensão de uma rede de distribuição elétrica trifásica. Para a aplicação do método são necessárias medições das ondas de tensão e corrente no ponto de acoplamento comum (PAC) situado entre a concessionária e o consumidor. As frequências das ondas adquiridas são estimadas e o filtro de Kalman é usado para rastrear os fasores de cada componente harmônico. Os fasores determinados pelo filtro de Kalman são utilizados para estimar os parâmetros do sistema elétrico do consumidor utilizando o método dos Mínimos Quadrados Recursivo. Com os parâmetros do sistema elétrico estimado para o consumidor e com as informações da impedância equivalente para o lado da concessionária, um modelo do sistema elétrico composto pela concessionária e pelo consumidor, é construído. A partir da etapa de modelagem do sistema foi desenvolvido um método que utiliza as componentes de seqüência zero, positiva e negativa, denominada Contribuição Percentual Harmônica em Componentes de Seqüência (CPHCS). O método desenvolvido possibilita estimar o percentual da contribuição dos componentes harmônicos de tensão para a concessionária e o consumidor, no PAC. Ainda com este método, é possível ponderar a contribuição dos componentes harmônicos em sistemas desequilibrados e com mais de um consumidor ligado ao mesmo barramento. O método desenvolvido foi aplicado às ondas de tensão e corrente de sistemas simulados e oriundos da rede de distribuição elétrica fornecendo bons resultados.

## **Abstract**

A method has been presented for the allocation of responsibilities between a utility and a customer with reference to the distortion of the voltage waveform of a 3-phase electrical distribution system. The measurements necessary for the applications of this method are the voltage and current waveforms at the point of common coupling (PCC) located between the utility and the consumer. The frequencies in the measured waveforms have been estimated and the Kalman filter has been applied to track the phasors of each harmonic component. The phasors are used to estimate the parameters of the electrical system of the load, using the recursive least-squares technique. With the estimated parameters of the consumer's electrical system and with the information of the equivalent impedance of the utility, a model of the combined electrical system composed of the utility and the consumer is set up. After the modeling of the combined system, a method has been developed that uses the zero, positive and negative sequence components, denominated Percent Harmonic Contribution in Sequence Components (PHCSC). The proposed estimates the percent contribution to the distortion of voltage waveform by the utility and the consumer at the PCC. Furthermore, it is possible to verify the contribution of the harmonic components in unbalanced systems and with more than a consumer connected to the same bus. The proposed method has been applied to waveforms of synthetic systems and also to waveforms measured in an electrical distribution system.

## Sumário

<i>Resumo</i> .....	<i>v</i>
<i>Abstract</i> .....	<i>vi</i>
<i>Lista de Figuras</i> .....	<i>ix</i>
<i>Lista de Tabelas</i> .....	<i>xii</i>
<i>Lista de Símbolos</i> .....	<i>xiii</i>
<b>Capítulo 1</b> .....	<b>1</b>
1.1. <b>Motivação</b> .....	<b>1</b>
1.2. <b>Delimitação do Tema</b> .....	<b>2</b>
1.3. <b>Organização da Dissertação</b> .....	<b>3</b>
<b>Capítulo 2</b> .....	<b>5</b>
2.1. <b>Teoria Sobre os Harmônicos</b> .....	<b>5</b>
2.2. <b>Problemas Causados por Harmônicos</b> .....	<b>8</b>
2.3. <b>Soluções para o Problema de Correntes Harmônicas</b> .....	<b>10</b>
2.4.1. <b>Filtros passivos</b> .....	10
2.4.2. <b>Filtros ativos</b> .....	11
2.4. <b>Harmônicos em Sistemas Trifásicos</b> .....	<b>11</b>
2.5.1. <b>Análise dos sinais em sistemas trifásicos balanceados</b> .....	11
2.5.2. <b>Análise dos sinais em sistemas trifásicos desbalanceados</b> .....	12
2.5. <b>Fontes de Harmônicos</b> .....	<b>13</b>
<b>Capítulo 3</b> .....	<b>15</b>
3.1 <b>Método da Direção de Potência Ativa</b> .....	<b>15</b>
3.1.1. <b>Questionamentos do método da direção de potência ativa</b> .....	16
3.2 <b>Método de Separação das Contribuições Harmônicas</b> .....	<b>20</b>
3.3 <b>Método do Fator de Não-Linearidade da Carga</b> .....	<b>21</b>
3.4 <b>Método de Estimação de Cargas Não-Lineares</b> .....	<b>23</b>
3.5 <b>Método da Impedância Crítica em Nível da Potência Ativa</b> .....	<b>24</b>
3.6 <b>Método da Impedância Crítica em Nível da Carga</b> .....	<b>26</b>

3.7 Método a ser Desenvolvido .....	29
<b>Capítulo 4</b> .....	<b>31</b>
4.1 Método para Estimação da Carga .....	31
4.1.1. Medição dos sinais no PAC.....	32
4.1.2. Estimação das frequências .....	33
4.1.3. Estimação dos fasores dos sinais medidos .....	34
4.1.4. Estimação da carga.....	37
4.2 O Método Desenvolvido para Análise da Contribuição Harmônica .....	40
4.2.1. Método da contribuição percentual harmônica em componentes de seqüência (CPHCS) .....	41
4.2.2. Método CPHCS para mais de um consumidor .....	42
4.3 Estrutura Final do Software.....	44
4.4 Validação do Método Desenvolvido.....	45
4.4.1. Testes aplicados ao estimador de parâmetros da carga .....	45
4.4.2. Testes para o método CPHCS .....	48
<b>Capítulo 5</b> .....	<b>54</b>
5.1 Caso 4 – Consumidor Exclusivo.....	54
5.2 Caso 5 – Dois Consumidores Ligados ao Mesmo Barramento.....	63
<b>Capítulo 6</b> .....	<b>70</b>
 <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	 <b>72</b>
 <b>Apêndice A</b> .....	 <b>75</b>
<b>A.1 Fotografias das Medições para um ou mais Consumidores</b> .....	<b>75</b>
 <b>Apêndice B</b> .....	 <b>78</b>
<b>B.1 Método para Estimação da Carga Não-Linear</b> .....	<b>78</b>
 <b>Apêndice C</b> .....	 <b>84</b>
<b>C.1 Cálculo da Contribuição Harmônica de Dois Consumidores</b> .....	<b>84</b>

## Lista de Figuras

Figura 2.1 - Formas de onda com frequências múltiplas da fundamental.....	5
Figura 2.2 - Forma de onda resultante da soma das três componentes. ....	6
Figura 2.3 - Forma de onda de corrente distorcida num circuito formado por elementos não lineares.....	7
Figura 2.4 - Circuito equivalente de uma carga não linear.....	7
Figura 2.5 - Distorção da forma de onda da tensão causada por uma carga não linear....	8
Figura 2.6 - Modelo equivalente de um sistema elétrico com as correntes harmônicas $I_h$ injetadas.....	13
Figura 2.7 - Modelo equivalente do sistema elétrico com os pontos de acoplamento comum. ....	14
Figura 3.1 - Circuito para o método da potência ativa. ....	16
Figura 3.2 - Circuito do método da potência ativa modificado por Xu et al. (2003). ....	16
Figura 3.3 - Decomposição das contribuições dos harmônicos. ....	17
Figura 3.4 - Variação dos índices escalares e da potência no PAC.....	18
Figura 3.5 - Modelo para o método de separação da contribuição harmônica.....	20
Figura 3.6 - Cargas não-lineares calculadas. ....	22
Figura 3.7 - Equivalente de Thèvenin para a h-ésima ordem da frequência harmônica, referida para o lado da carga.....	24
Figura 3.8 - Representação dos circuitos para a tensão e corrente medida no PCC.....	25
Figura 3.9 - Circuito equivalente simplificado.....	26
Figura 3.10 - Diagrama fasorial para $Z = jX$ .....	27
Figura 3.11 - Diagrama fasorial para $Z = R + jX$ .....	28
Figura 4.1 - Esquema da medição dos sinais de tensão e corrente no PAC.....	32
Figura 4.2 - Esquema de aquisição dos sinais de tensão e corrente .....	33
Figura 4.3 - Modelo da carga a ser estimada pelo o método dos MQR. ....	37
Figura 4.4 - Modelo equivalente de Thèvenin para o sistema elétrico.....	41
Figura 4.5 - Modelo equivalente de Thèvenin para o sistema elétrico com $N$ cargas conectadas.....	43
Figura 4.6 - Esquema da rotina do CPHCS.....	44
Figura 4.7 - Representação no Simulink do circuito equivalente do sistema.....	46
Figura 4.8 - Sinais de tensão e corrente obtidos no Simulink. ....	47
Figura 4.9 - Curvas da impedância estimada pelo MQR no caso 1.....	48

Figura 4.10 - Curvas da impedância estimada pelo MQR no caso 2.....	48
Figura 4.11 - Sinais de tensão e corrente para cada frequência a ser analisada. ....	50
Figura 4.12 - Formas de onda da tensão e da corrente obtidas para o PAC do circuito sintético.....	50
Figura 4.13 - Resultados da estimação dos parâmetros do consumidor para frequência fundamental de 60 Hz.....	51
Figura 4.14 - Resultados da estimação dos parâmetros do consumidor para frequência de 300 Hz (5° harmônico).....	51
Figura 4.15 - Resultados da estimação dos parâmetros do consumidor para frequência de 420 Hz (7° harmônico).....	52
Figura 4.16 - Resultado do módulo da contribuição harmônica do quinto harmônico no PAC para frequência fundamental de 60 Hz..	52
Figura 4.17 - Resultado do módulo da contribuição harmônica no PAC para as frequências de 300 Hz e 420 Hz.....	53
Figura 5.2 - Forma de onda da tensão trifásica medida nos terminais do TP da subestação.....	55
Figura 5.3 - Forma de onda da corrente trifásica medida nos terminais do TC da subestação.....	55
Figura 5.4 - Evolução do módulo dos sinais trifásicos de tensão e corrente medido no PAC.....	57
Figura 5.5 - Evolução da amplitude da fundamental de tensão.....	58
Figura 5.6 - Evolução da amplitude do 5° harmônico da tensão.....	58
Figura 5.7 - Evolução da amplitude do 7° harmônico da tensão.....	59
Figura 5.8 - Evolução da amplitude do 11° harmônico da tensão.....	59
Figura 5.9 - Contribuição da concessionária para a fundamental da tensão.....	60
Figura 5.10 - Contribuição do consumidor para a fundamental da tensão.....	61
Figura 5.11 - Contribuição da seqüência negativa para o quinto harmônico no PAC. ..	61
Figura 5.12 - Contribuição da seqüência positiva para o sétimo harmônico no PAC....	62
Figura 5.13 - Contribuição da seqüência negativa para o décimo primeiro harmônico no PAC.....	62
Figura 5.14 - Esquema de medição dos sinais para os dois consumidores do caso 2. ...	63
Figura 5.15 - Forma de onda de tensão obtida dos TPs do barramento.....	64
Figura 5.16 - Sinais das correntes medidas nos TCs dos disjuntores D1 e D2, com a terceira fase calculada.....	64

Figura 5.17 - Evolução da amplitude da fundamental de tensão.....	65
Figura 5.18 - Evolução da amplitude do quinto harmônico da tensão. ....	65
Figura 5.19 - Evolução da amplitude do sétimo harmônico da tensão.....	66
Figura 5.20 - Evolução da amplitude do décimo primeiro harmônico da tensão.....	66
Figura 5.21 - Contribuição da concessionária para a fundamental da tensão.....	67
Figura 5.22 - Contribuições percentuais para a fundamental de tensão para os consumidores.....	67
Figura 5.23 - Contribuição da seqüência negativa para quinto harmônico. ....	68
Figura 5.24 - Contribuição da seqüência positiva para sétimo harmônico.....	68
Figura 5.25 - Contribuição da seqüência negativa para décimo primeiro harmônico....	69
Figura A.1 - Medição em campo dos sinais trifásicos coletados na saída dos TCs e TPs. .....	75
Figura A.2 - Detalhe das ligações na placa de aquisição do computador. ....	76
Figura A.3 - Detalhe da ligação nos terminais dos TCs (pinças) (a) e TPs (plugs vermelho e preto) (b). ....	76
Figura A.4 - Medição dos sinais de tensão e corrente nos terminais dos relés de disjuntores.....	77
Figura A.5 - Medição com dois computadores sincronizados, para casos que exijam mais canais de aquisição.....	77
Figura B.1 - Circuito equivalente da carga.....	78
Figura C.1 - Circuito equivalente do sistema com dois consumidores. ....	84
Figura C.2 - Circuito equivalente para o cálculo da contribuição da concessionária.....	85
Figura C.3 - Circuito equivalente para o cálculo da contribuição da concessionária.....	86
Figura C.4 - Circuito equivalente para o cálculo da contribuição da concessionária.....	88

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Componentes de seqüência dos harmônicos para sistemas trifásicos balanceados.....	12
Tabela 4.1 - Legenda do circuito montado no Simulink e sua função .....	46
Tabela 4.2 - Dados da Concessionária e do Consumidor para simulação no Matlab®. 49	
Tabela 4.3 - Resultados da simulação do sistema hipotético. ....	53
Tabela 5.1 - Freqüências estimadas nas tensões e correntes da Ambev.....	56

## Lista de Símbolos

- $\delta(t)$  - Função delta de Dirac.
- $y(t)$  - Sinal analisado no domínio do tempo contínuo.
- $y[n]$  - Sinal analisado no domínio do tempo discreto.
- $\hat{y}[n]$  - Sinal estimado obtido através de um modelo discreto.
- $p$  - Ordem do modelo.
- $N$  - Número de amostras do sinal.
- $\omega_i$  - Frequência em radianos, do  $i$ -ésimo componente senoidal do sinal analisado.
- $f_i$  - Frequência em Hz, do  $i$ -ésimo componente senoidal do sinal analisado.
- $A_i$  - Amplitude do  $i$ -ésimo componente senoidal do sinal analisado.
- $\theta_i$  - Fase do  $i$ -ésimo componente de frequência do sinal analisado.
- $K$  - Ganho de Kalman.
- $P$  - Matriz de covariância.
- $E(x)$  - Esperança matemática de uma variável aleatória  $x$ .
- $\Delta T$  - Intervalo de amostragem dos sinais analisados.
- $e^0$  - Erro *a priori* de modelagem do sinal de dados.
- $e$  - Erro *a posteriori* de modelagem do sinal de dados.

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

### ***1.1. Motivação***

Os sinais elétricos dos sistemas de distribuição de energia normalmente apresentam distorções da forma de onda senoidal da tensão, caracterizando assim a presença de harmônicos e inter-harmônicos. As distorções vêm se agravando em parte devido à instalação de um número cada vez maior de cargas não-lineares, piorando a qualidade da energia.

As distorções harmônicas e inter-harmônicas provocam efeitos indesejados no sistema elétrico. Elas podem causar interferências em sistemas de comunicação, provocar perdas adicionais por efeito Joule na rede elétrica e em motores, causar mau funcionamento de dispositivos de estado sólido, tais como *softstarter*, provocar ressonância em bancos de capacitores, aumentar as perdas em transformadores, diminuindo a sua capacidade nominal e reduzindo a sua vida útil, provocar efeito pelicular nos cabos alimentadores. Desse modo, a localização de fontes de harmônicos em sistemas elétricos torna-se relevante tanto para o lado da concessionária como para o lado do consumidor. Também, é imprescindível ponderar as responsabilidades da geração dos harmônicos caso ocorra divergências entre a empresa fornecedora de energia e a unidade consumidora, com relação a origem da fonte geradora das distorções. Diante de tal panorama fica evidente a importância de estudos que objetivem o diagnóstico e a análise das distorções em sinais presentes na rede elétrica, mesmo que ainda não exista legislação ou norma específica que regule os limites de contribuição harmônica entre a concessionária e consumidor. A IEEE 519 sugere limites adequados na ponderação das responsabilidades da geração dos sinais harmônicos.

Existem algumas abordagens para a análise e o diagnóstico das distorções dos sinais presentes na rede elétrica. Uma delas consiste em modelar um sistema sintético para a utilização de simulações que irão determinar qual a contribuição harmônica de corrente no sistema (Girgis et al., 1996; Davis et al., 2000; Xu e Liu, 2000). Outra

abordagem é a utilização de técnicas de fluxo de harmônicos, a partir de sinais medidos no sistema de potência (Cristaldi e Ferrero, 1995). Heydt et al. (1989) desenvolveram também uma abordagem baseada em medições de sinais de tensão e corrente coletada no sistema elétrico com característica monofásica. Algumas técnicas de medições dos sinais, para a determinação das contribuições harmônicas, são mais complexas. Elas necessitam de equipamentos de medição caros (Du et al., 1999). Na literatura são encontrados outros trabalhos que abordam o tema da contribuição harmônica em sistemas de potência, porém não atendem aos objetivos específicos deste trabalho, como os propostos por Farach et al. (1993) e Hartana et al. (1990), que tratam respectivamente no desenvolvimento de sensores e na utilização de redes neurais para ponderar as contribuições harmônicas nos sistemas elétricos.

No presente trabalho, a análise e o diagnóstico das distorções em sinais presentes na rede elétrica serão desenvolvidos a partir de situações reais, porém sem conflitos jurídicos, onde se buscou determinar as contribuições harmônicas em barramento de subestações, ponderando as contribuições da concessionária e da unidade consumidora. Para tanto, foi necessário desenvolver um método que atendesse as exigências mínimas sugeridas na IEEE 519.

No método desenvolvido é imprescindível medições dos sinais de tensão e corrente em campo, além disso, deve-se obter a impedância equivalente em componentes de seqüência da concessionária e do consumidor. Como a impedância do consumidor não é conhecida a priori e apresenta característica não linear, surge então à necessidade de se estimar inicialmente esta impedância. Por fim, o método deve ser capaz de calcular as contribuições harmônicas percentuais, em componentes de seqüência, dos sistemas trifásicos de distribuição, tanto produzidas pela concessionária quanto pela unidade consumidora.

## ***1.2. Delimitação do Tema***

Uma modelagem prévia do sistema elétrico que se pretende analisar geralmente é adotada para a localização de fontes de harmônicos. A modelagem se baseia em uma representação aproximada dos componentes do sistema elétrico de modo a satisfazer as necessidades requeridas. Quanto menos detalhes forem considerados, mais simplificadas serão as equações que regem o sistema e menor será o esforço

computacional para a resolução do problema, contudo a simplificação conduz em reduzir a exatidão dos resultados.

Uma modelagem do sistema elétrico para a localização de fontes de harmônicos foi proposta por Xu e Liu (2003). Eles adotaram o modelo Thèvenin na estimação das contribuições harmônicas advindas da concessionária e do consumidor no ponto de medição. Os autores determinaram as distorções e as fontes harmônicas de tensão tanto em sistemas elétricos simulados computacionalmente, como em sistemas reais, porém com algumas limitações em seus métodos.

No presente trabalho também será adotado o modelo de Thèvenin na estimação de parâmetros tanto nos sistemas simulados computacionalmente como nos sistemas elétricos reais. Para tanto, foi necessário:

1. Desenvolver um método de localização das fontes de harmônicos em sistemas elétricos utilizando a modelagem do sistema. As rotinas desenvolvidas para a localização das fontes de harmônicos foram executadas no ambiente Matlab®.
2. Realizar estudo de caso empregando as rotinas desenvolvidas. A avaliação da precisão e eficiência do método implementado foi feita através da comparação com sistemas sintéticos conhecidos previamente.
3. Realizar estudos de localização de fontes de harmônicos em casos reais, utilizando sinais de tensão e corrente obtidos em campo.

### ***1.3. Organização da Dissertação***

Com o intuito de se obter os objetivos propostos, a dissertação está organizada conforme a seguinte estrutura:

- No Capítulo 2 são fundamentados os conceitos básicos sobre os harmônicos, cargas lineares e não lineares, assim como uma teoria das fontes de harmônicos;
- No Capítulo 3 é descrito o estado da arte, apresentando os trabalhos mais relevantes sobre a identificação de fontes de harmônicos, enfatizando seus aspectos positivos e negativos;
- O Capítulo 4 relata o trabalho proposto, onde são apresentados os métodos implementados e também o método desenvolvido. Neste capítulo são apresentadas

simulações computacionais para a validação do método por meio de comparações com sistemas conhecidos;

- No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos utilizando medições em sistemas elétricos reais. Os resultados são mostrados tanto para um consumidor quanto para dois consumidores, ligados a barramentos;
- As principais conclusões e sugestões extraídas deste trabalho são apresentadas no Capítulo 6.

## Capítulo 2

### FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentada uma breve revisão dos conceitos sobre harmônicos. Serão abordados os conceitos de cargas não lineares e os principais problemas causados pelos harmônicos no sistema. Também será mostrado um panorama da alocação e da ponderação da contribuição harmônica de tensão entre a concessionária e o consumidor.

#### 2.1. Teoria Sobre os Harmônicos

Em sistemas de potência, diversos problemas relacionados à qualidade da energia elétrica podem comprometer o bom funcionamento de equipamentos conectados à mesma fonte de alimentação. Harmônicos podem ser considerados um desses problemas. Eles introduzem no sistema elétrico frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental da fonte de alimentação, isto é, para uma fundamental de 60 Hz o terceiro harmônico corresponde a 180 Hz e o quinto a 300 Hz, e assim por diante. Na Figura 2.1 são mostrados uma onda senoidal fundamental, terceiro e quinto harmônicos.

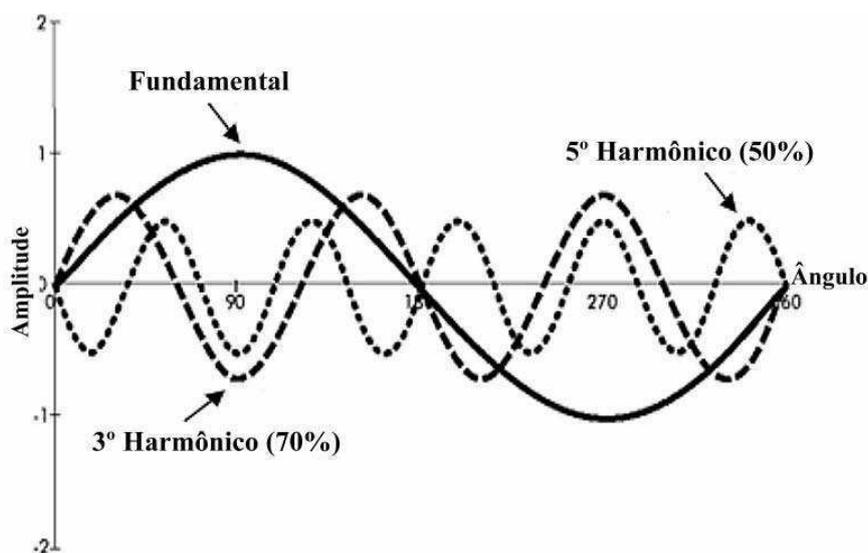


Figura 2.1 – Formas de onda com frequências múltiplas da fundamental.

Na Figura 2.2 são mostradas uma onda fundamental com a adição de uma componente de terceiro harmônico de 70% e uma componente de quinto harmônico de 50%. Na prática, formas de onda distorcidas por harmônicos são muito mais complexas do que neste exemplo.

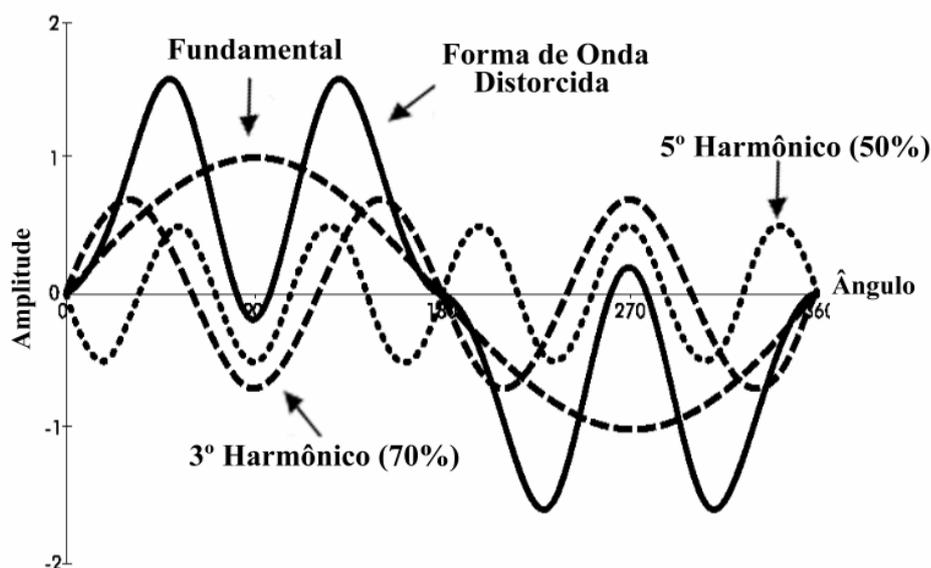
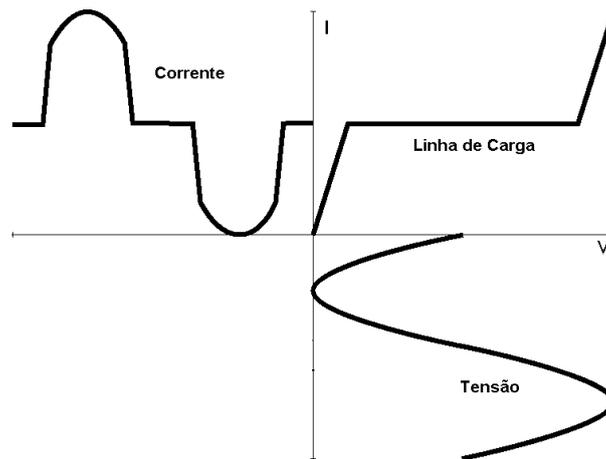


Figura 2.2 – Forma de onda resultante da soma das três componentes.

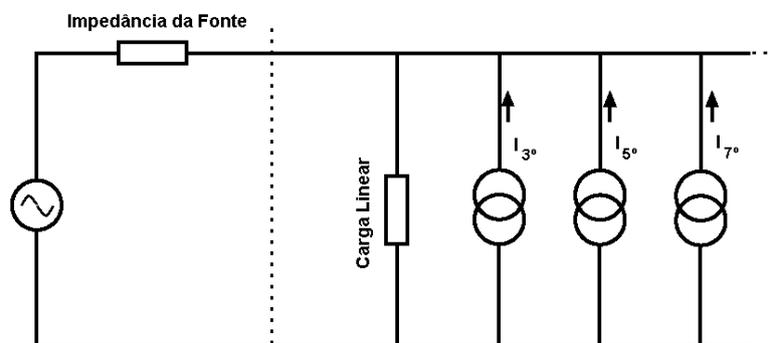
Em um sistema de potência ideal, sem componentes harmônicos, tanto a forma de onda da corrente como a da tensão são puramente senoidais. Na prática, correntes não-senoidais são geradas por cargas que não obedecem a Lei de Ohm, ou seja que não apresentam linearidade na relação tensão e corrente, sendo adotadas como cargas não-lineares. No caso de elementos reativos (capacitor ou indutor) só haverá um defasamento entre a tensão e a corrente, o fator de potência também irá variar, mas o circuito permanecerá linear. Uma ponte retificadora de onda completa e um capacitor (estágio de entrada de uma fonte chaveada típica) é um exemplo básico de uma carga não-linear. Os sinais de tensão, corrente e curva de carga da fonte chaveada estão representados na Figura 2.3. Neste caso, a corrente flui somente quando a tensão suprida ultrapassa a tensão armazenada no capacitor, isto é, próximo ao valor de pico da tensão senoidal, como mostrado pela forma da linha de carga. Nos sistemas reais, a curva de carga é mais complexa do que a mostrada neste exemplo, pois podem existir alguns pontos de assimetria e histerese.



**Figura 2.3 – Forma de onda de corrente distorcida num circuito formado por elementos não-lineares.**

Por outro lado, qualquer onda periódica pode ser decomposta em senóides formadas por uma onda de frequência fundamental acrescida de ondas com valores múltiplos da fundamental, denominadas de componentes harmônicas. Assim, a onda de corrente distorcida na Figura 2.3 pode ser representada pela fundamental, mais uma porcentagem do segundo harmônico, mais uma porcentagem do terceiro harmônico e assim por diante, possivelmente até o trigésimo harmônico. Para uma onda simétrica, onde o ciclo negativo e o positivo têm a mesma forma e amplitude, as harmônicas pares são iguais a zero. Os harmônicos pares são relativamente raros, mas aparecem em situações onde a retificação de meia onda é utilizada.

O circuito equivalente para uma carga não-linear é mostrado na Figura 2.4. Ele pode ser modelado como uma carga linear em paralelo com certo número de fontes de corrente, sendo cada fonte correspondente a uma frequência harmônica.



**Figura 2.4 – Circuito equivalente de uma carga não linear.**

As correntes harmônicas geradas pela carga têm que passar através do circuito pela impedância da fonte e por todos os outros caminhos em paralelo. Como resultado, tensões harmônicas aparecem através da impedância da fonte e ficarão presentes ao longo da instalação elétrica. Geradores de harmônicos também podem ser representados como fontes de tensão em série com uma impedância. A amplitude de tensão destas fontes é proporcional à sua impedância, indicando que o gerador se comporta como uma fonte de corrente. Se as impedâncias da fonte forem muito pequenas, logo a distorção harmônica da tensão resultante de uma corrente harmônica também será baixa.

Ao se suspeitar da presença de componentes harmônicos no sistema elétrico, torna-se necessário medir a corrente e a tensão no sistema, para que se possa realizar o seu estudo.

## 2.2. Problemas Causados por Harmônicos

As correntes harmônicas resultam em distorção na forma de onda da tensão quando a impedância da fonte de alimentação não é nula. Existem dois elementos que conformam esta impedância: a impedância dos cabos de transmissão da energia desde o barramento infinito até as cargas; e a impedância interna dos geradores ou transformadores da rede de distribuição. A Figura 2.5 ilustra a distorção na forma de onda de tensão, provocada pela presença de uma carga não linear no sistema.

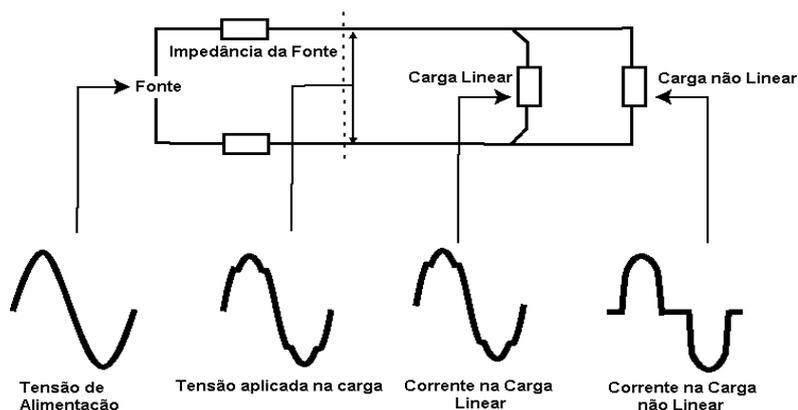


Figura 2.5 – Distorção da forma de onda da tensão causada por uma carga não linear.

Na Figura 2.5 foi considerando que a impedância da fonte não é nula, o que permitiu a distorção da forma de onda da tensão. Esta distorção da tensão foi provocada pela corrente distorcida da carga não-linear. A distorção da forma de onda da tensão implicará diretamente na distorção da forma de onda da corrente da carga linear que está

conectada em paralelo ao circuito. O mesmo ocorreria se existissem outras cargas lineares conectadas, as quais teriam suas correntes distorcidas devido à tensão fornecida pelo sistema. O problema da distorção da forma de onda da tensão é bastante comum nos sistemas elétricos de distribuição. Nestes sistemas as cargas não-lineares são as maiores responsáveis pela distorção da forma de onda da tensão, a qual afeta as demais cargas conectadas ao mesmo barramento.

As correntes harmônicas causam problemas tanto para o sistema de distribuição de energia quanto para as cargas instaladas. Os efeitos e as soluções são distintos para cada caso e podem ser tratados de forma independente. As medidas apropriadas para controlar os efeitos de harmônicos dentro de um sub-sistema podem não necessariamente reduzir a distorção causada no outro, e vice-versa.

Antigamente, não se tinha uma grande preocupação com harmônicos, pois a maior parte das cargas utilizadas possuía características lineares. No entanto, nos últimos anos, com o rápido desenvolvimento da eletrônica de potência, o número de cargas não-lineares tem aumentado, e conseqüentemente, o efeito dos harmônicos presentes nos sistemas tem-se elevado, causando uma série de efeitos indesejáveis em diversos equipamentos, comprometendo a qualidade e o próprio uso racional da energia elétrica.

As correntes harmônicas resultam problemas, inconveniências ou distúrbios elétricos tais como:

- Equipamentos de proteção (Fusíveis e Disjuntores): operação falsa/errônea, e danos aos seus componentes.
- Capacitores: ocorrência de efeitos ressonantes provocando efeitos nocivos ao sistema elétrico, acarretando em seu aquecimento e na redução de sua vida útil.
- Motores: aumento das perdas, redução da vida útil, e impossibilidade de atingir potência máxima.
- Transformadores: aumento de perdas, causando redução de capacidade e da vida útil.
- Medidores: possibilidade de medições errôneas e de faturas maiores.
- Telefones: interferências que provocam ruídos e mau funcionamento dos aparelhos telefônicos.

- Acionamentos de motores e Fontes chaveadas: operações errôneas devido a múltiplas passagens por zero, e falha na comutação de circuitos.
- Carregamento exagerado do circuito de neutro, principalmente em instalações que agregam muitos aparelhos eletrônicos e possuem malhas de terra mal projetadas.
- Sobrecorrente em capacitores para correção de fator de potência resultando em danos aos mesmos.
- Efeito Pelicular: As correntes alternadas tendem a fluir na superfície externa do condutor, causando perdas adicionais e aquecimento dos condutores.

### **2.3. Soluções para o Problema de Correntes Harmônicas**

As medidas disponíveis para o controle na magnitude das correntes harmônicas podem ser classificadas em dois grupos: filtros passivos e filtros ativos. Neste trabalho o método adotado permite identificar as principais fontes geradoras de harmônicos do sistema elétrico, facilitando a implantação dos filtros corretores nos pontos do sistema que realmente necessitam. Como exemplo, o método pode conduzir a economia no projeto de filtros, pois reduz os gastos nos seus componentes, pois serão aplicados a trechos menores e mais específicos do sistema elétrico.

#### **2.4.1. Filtros passivos**

Os filtros passivos são usados para prover um caminho de baixa impedância para correntes harmônicas. Assim estas correntes fluem pelo filtro e não pela fonte de alimentação para a terra. O filtro pode ser projetado para uma única frequência de harmônico ou para uma ampla faixa espectral, dependendo das necessidades.

Em alguns casos é necessário projetar um filtro mais complexo para aumentar a impedância em série nas frequências harmônicas e então reduzir a proporção de corrente que flui de volta para a fonte. Filtro rejeita banda são comumente propostos, instalados no neutro ou na fase. O filtro em série é adicionado geralmente para bloquear as correntes harmônicas, e não para prover um caminho controlado para elas, logo podem ocorrer quedas de tensão altas. A queda de tensão aparece no barramento das cargas, tornando-o impróprio para alimentar os equipamentos conectados a ele. Alguns

equipamentos são bastante insensíveis ao afundamento, mas outros podem ser muito sensíveis.

#### **2.4.2. Filtros ativos**

Os filtros passivos são soluções eficazes somente para frequências particulares de harmônicos. Em algumas instalações o conteúdo (frequência e amplitude) harmônico da corrente varia ao longo do tempo de operação. Uma solução conveniente nestes casos é o emprego de filtros ativos.

Um transformador de corrente mede o conteúdo harmônico da corrente da carga, e controla um gerador que produz uma réplica exata do sinal harmônico, o qual é realimentado no barramento no próximo ciclo. Uma vez que as correntes harmônicas são fornecidas pelo filtro ativo, apenas a corrente fundamental é drenada da fonte de alimentação. Na prática, correntes harmônicas são reduzidas, em até 90% de sua magnitude, e, conseqüentemente a distorção na forma de onda de tensão também.

### **2.4. Harmônicos em Sistemas Trifásicos**

O método de análise dos componentes harmônicos a ser desenvolvido será aplicado aos casos reais e trifásicos. Geralmente, os sistemas elétricos reais apresentam desequilíbrio em suas fases, e por isso, os componentes harmônicos presentes nos sinais de tensão e corrente possuem variações de amplitude entre suas fases. Existem duas abordagens para a análise de harmônicos em sistemas trifásicos, a primeira é análise por fase, onde se verifica a presença de harmônicos em cada uma das fases do sistema. A segunda abordagem se baseia nas componentes de seqüência positiva, negativa e zero. Esta segunda será o enfoque principal utilizado no trabalho, pois os dados de impedância do sistema proveniente da concessionária são fornecidos em componentes de seqüência, adaptando-se assim, ao método desenvolvido.

#### **2.5.1. Análise dos sinais em sistemas trifásicos balanceados**

Em sistemas ideais é possível obter o balanceamento entre as fases da tensão e entre as fases de corrente. Estes sistemas possuem uma defasagem de  $120^\circ$  entre as fases da tensão e também entre as fases da corrente. A seqüência positiva das fases do sistema é ordenada por R, S, T (a, b e c), a seqüência negativa por R, T, S (a, c e b). Na componente de seqüência zero, as três fases têm o mesmo ângulo. Estas seqüências para

os harmônicos são obtidas quando o sistema é balanceado e são expressas pelas equações:

$$Va_h(t) = \sqrt{2} \cdot V_h \cdot \text{sen}(h\omega_1 t + \theta_h) \quad (2.1)$$

$$Vb_h(t) = \sqrt{2} \cdot V_h \cdot \text{sen}(h\omega_1 t - \frac{2h\pi}{3} + \theta_h) \quad (2.2)$$

$$Vc_h(t) = \sqrt{2} \cdot V_h \cdot \text{sen}(h\omega_1 t + \frac{2h\pi}{3} + \theta_h). \quad (2.3)$$

Na comparação das equações (2.1) a (2.3), entre si, é possível perceber que a defasagem entre as fases é de  $120^\circ$  na componente fundamental. Nas equações acima  $h$  é a ordem da componente harmônica,  $\sqrt{2} \cdot V_h$  é a amplitude máxima,  $\omega_1$  é a frequência fundamental e  $\theta_h$  o ângulo da fase da forma de onda. As componentes de seqüência para os harmônicos de tensão e corrente estão descritas na Tabela 2.1, onde a série se repete para as demais ordens harmônicas.

**Tabela 2.1 – Componentes de seqüência dos harmônicos para sistemas trifásicos balanceados.**

Ordem Harmônica	1	2	3	4	5	6	7	8	9...
Componente de Seqüência	Positiva	Negativa	Zero	Positiva	Negativa	Zero	Positiva	Negativa	Zero...

### 2.5.2. Análise dos sinais em sistemas trifásicos desbalanceados

Os sistemas desbalanceados são assim denominados pela distribuição irregular das cargas em cada fase do sistema elétrico, outra causa se atribui à assimetria na configuração dos condutores. Para os sistemas desbalanceados é possível determinar os componentes de seqüência do sistema elétrico pela equação (2.4):

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{0h} \\ \bar{V}_{1h} \\ \bar{V}_{2h} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_{a_h} \\ \bar{V}_{b_h} \\ \bar{V}_{c_h} \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

em que  $a = e^{j120^\circ}$ . Os fasores  $\bar{V}_{0h}$ ,  $\bar{V}_{1h}$  e  $\bar{V}_{2h}$ , representam respectivamente as componentes de seqüência zero, positiva e negativa. A equação (2.4) pode ser utilizada também para conversão dos fasores de corrente dispostos nas fases a, b e c para componentes de seqüência.

Em muitos casos, mesmo com desequilíbrio das tensões a componente de seqüência correspondente para cada harmônica é predominante, ou seja, mesmo com a ocorrência de outras componentes de seqüência para uma mesma ordem harmônica, irá prevalecer a magnitude da seqüência correspondente à harmônica analisada.

## 2.5. Fontes de Harmônicos

Neste trabalho serão estudados sistemas que possuem fontes geradoras de harmônicos as quais são oriundas de cargas não lineares. No modelo do sistema elétrico apresentado na Figura 2.6, estão representadas a concessionária e as cargas lineares e não lineares. A concessionária é composta pela fonte de alimentação, pelo o transformador  $T_U$  e pela impedância equivalente para o lado da concessionária  $Z_{eq}$ . A impedância equivalente é composta pela soma das impedâncias do transformador  $T_U$ , mais a impedância dos cabos e a impedância da fonte de alimentação.

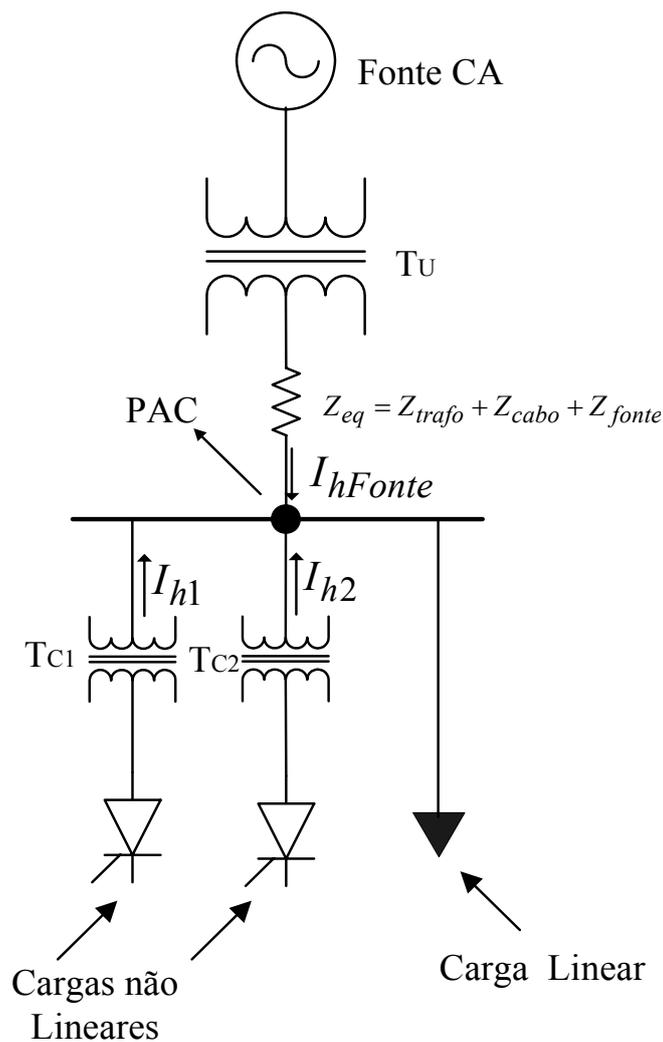
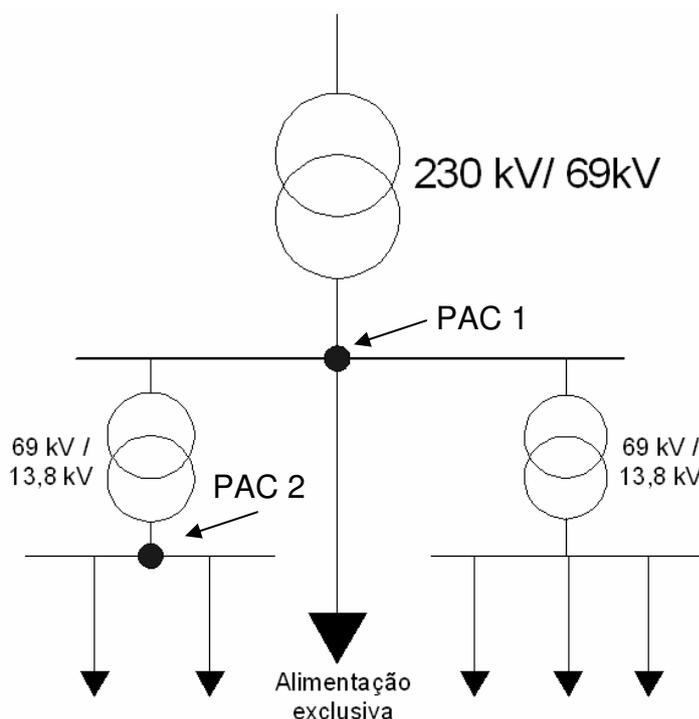


Figura 2.6 – Modelo equivalente de um sistema elétrico com as correntes harmônicas  $I_h$  injetadas.

Os consumidores estão representados pelas cargas lineares e não lineares, onde as correntes harmônicas injetadas no sistema estão representadas por  $I_{h1}$  e  $I_{h2}$ . A corrente harmônica advinda da concessionária é representada por  $I_{hFonte}$ . Ainda na Figura 2.6 é mostrado o ponto de acoplamento comum (PAC), que está situado entre a concessionária e o consumidor, neste caso, está representado pelo barramento do sistema de distribuição. Outro exemplo de PAC é mostrado na Figura 2.7, onde o PAC 1 representa o ponto de acoplamento comum referido pela concessionária que alimenta o sistema de 69 kV. O PAC 2 se refere à concessionária que alimenta o sistema de 13,8 kV.



**Figura 2.7 – Modelo equivalente do sistema elétrico com os pontos de acoplamento comum.**

Neste trabalho o enfoque principal será determinar o percentual da contribuição harmônica no PAC, com relação à concessionária e a unidade consumidora. A partir das medições dos sinais de tensão e corrente no PAC, será analisado o percentual total de  $I_h$  fornecido ao sistema (Figura 2.6) com relação ao consumidor e a concessionária. No Capítulo 4 desta Dissertação, será abordado o método de estimação as contribuições harmônicas de tensão no PAC, advindas da concessionária e da unidade consumidora.

## Capítulo 3

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A localização de fontes de harmônicos em sistemas elétricos de potência é um problema ainda em aberto, isto é, sendo estudado e não elucidado totalmente. Alguns métodos foram propostos visando analisar as contribuições harmônicas no PAC, por meio de medições e de simulações do sistema elétrico,. Neste capítulo será apresentada uma revisão das principais técnicas de detecção de fontes harmônicas e de estimação das cargas, enfatizando as diferenças existentes.

#### **3.1 Método da Direção de Potência Ativa**

Um dos métodos de localização mais comentados na literatura é o método da Direção de Potência Ativa (Cristaldi & Ferrero, 1994). Ele pode ser mais bem entendido com o auxílio da Figura 3.1, onde é mostrado um circuito em que  $Z_u$  e  $I_u$  são respectivamente, a impedância e a fonte de corrente da concessionária. A impedância  $Z_c$  e a fonte de corrente  $I_c$  representam o lado do consumidor. Os autores representaram para cada ordem harmônica de interesse, um circuito equivalente como o mostrado (Figura 3.1), onde os parâmetros da concessionária e do consumidor apresentaram valores distintos para cada uma delas. No ponto de acoplamento comum (PAC) são realizadas as medições de tensão e de corrente no intuito de determinar a direção de potência harmônica. A potência harmônica é fornecida por:

$$P = \Re(V_{pac} \cdot I_{pac}^*), \quad (3.1)$$

em que  $\Re$  é a parte real do complexo resultante da multiplicação dos fasores de corrente  $I_{pac}$  e de tensão  $V_{pac}$ . O sobrescrito (\*) denota o conjugado do número complexo. O método da direção de potência se baseia na forma de onda de  $P$ , considerando-se:

- Se  $P > 0$ , então o lado da concessionária possui maior responsabilidade pela injeção dos componentes harmônicos de ordem  $h$ .
- Se  $P < 0$ , então o consumidor é o maior responsável pela injeção.

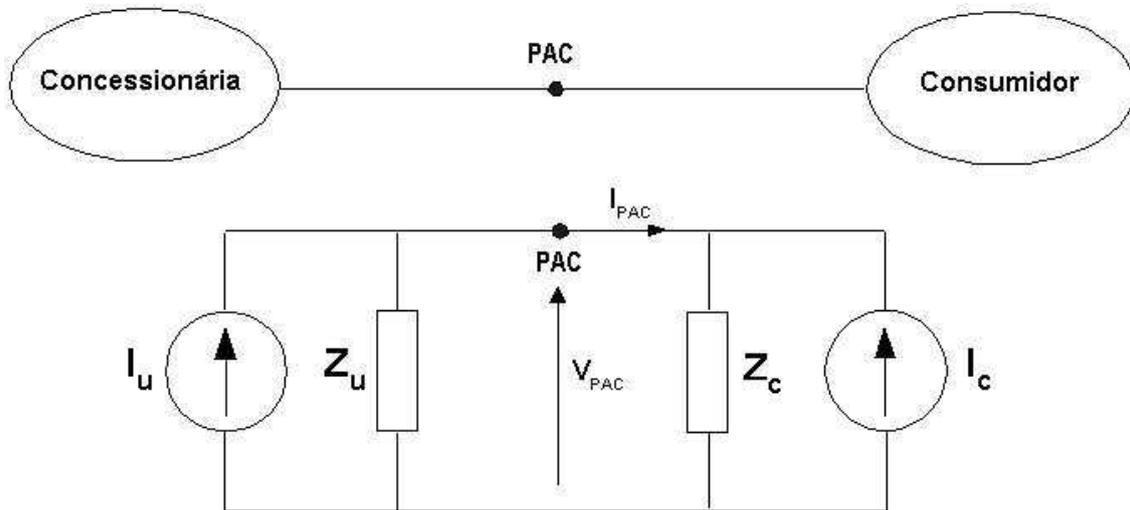


Figura 3.1 – Circuito para o método da potência ativa.

### 3.1.1. Questionamentos do método da direção de potência ativa

Alguns autores como Xu et al. (2003) questionam a validade do método de Direção da Potência Ativa apresentado por Cristaldi & Ferrero (1994). A decomposição da corrente  $I_{pac}$  em dois componentes escalares confirma este questionamento. Xu et al. afirmam que para a decomposição de  $I_{pac}$ , primeiramente, o circuito da Figura 3.1 deve ser decomposto em dois circuitos, como mostra a Figura 3.2.

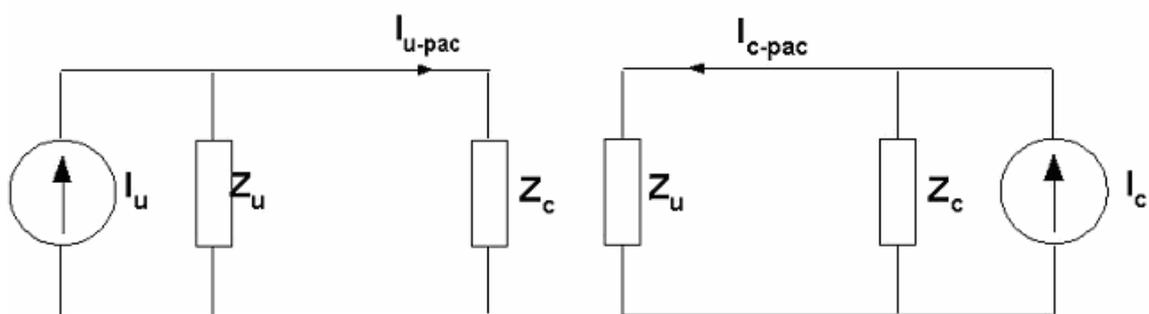


Figura 3.2 – Circuito do método da potência ativa modificado por Xu et al. (2003).

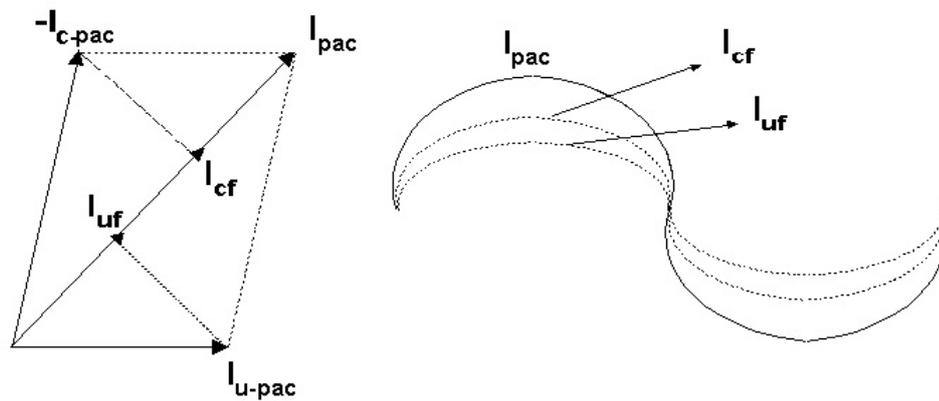
A corrente  $I_{pac}$ , pelo princípio da decomposição, é encontrada por:

$$I_{pac} = I_{u-pac} + (-I_{c-pac}). \tag{3.2}$$

Os fasores de corrente da equação (3.2) podem ser decompostos de acordo com a Figura 3.3. O módulo do fasor de corrente  $I_{pac}$  pode ser descrito pela soma de dois escalares:

$$|I_{pac}| = I_{cf} + I_{uf}, \quad (3.3)$$

em que,  $I_{cf}$  e  $I_{uf}$  representam as projeções em fase dos fasores  $I_{c-pac}$  e  $I_{u-pac}$  sobre  $I_{pac}$ .



(a) Decomposição Fasorial.

(b) Decomposição da forma de onda.

**Figura 3.3 – Decomposição das contribuições dos harmônicos.**

As equações (3.2) e (3.3) podem ser reescritas em função da tensão medida no PAC, assim, para casos que não possuam os valores das fontes de corrente do circuito equivalente, pode-se utilizar a tensão das fontes de tensão equivalente, como mostrado na equação (3.4).

$$I_{pac} = \frac{E_u - E_c}{Z_c + Z_u}, \quad (3.4)$$

em que  $E_u$  representa a fonte de tensão para o lado da concessionária e  $E_c$  a fonte de tensão referido ao lado do consumidor.

Xu et al. argumentam ainda que os escalares  $I_{cf}$  e  $I_{uf}$  são os parâmetros que verdadeiramente caracterizam as contribuições de harmônicos de cada lado (consumidor e concessionária). Assim, para um exemplo monofásico, se a corrente  $I_{pac}$  possuir módulo igual a 10 A e os escalares em fase  $I_{uf}$  e  $I_{cf}$  valerem 3 e 7 ampères, respectivamente, então poderia se afirmar que a contribuição do lado da concessionária

é de 30% e o consumidor contribui com 70%, pelo método de Cristaldi & Ferrero (1994).

Para mostrar que o método da Direção Potência Ativa pode levar a resultados interpretações errôneas, Xu et al. (2003) e o autor deste trabalho simularam o circuito da Figura 3.1 para os seguintes dados:

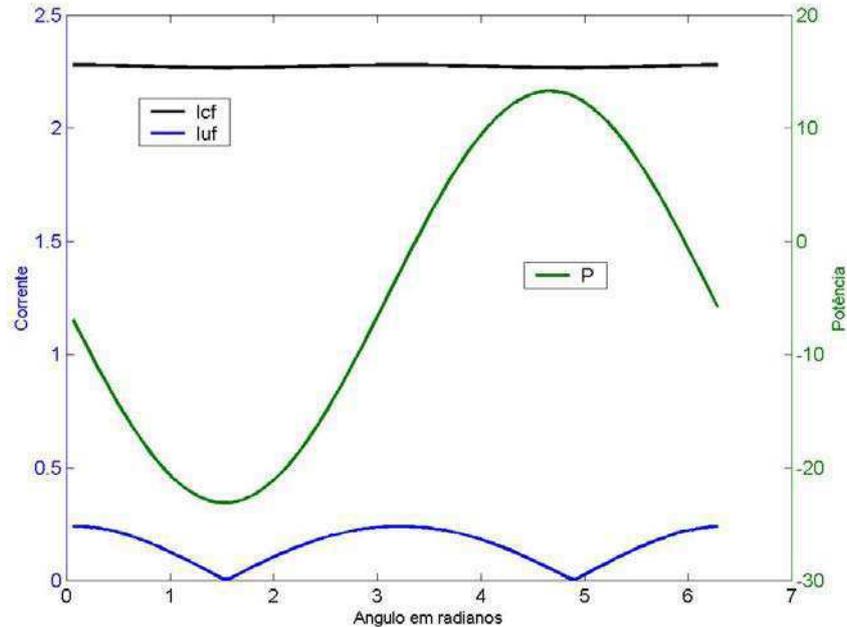
$$\begin{aligned} I_u &= 1 \angle 0^\circ \text{ pu}, & Z_u &= 1 + j \cdot 8 \text{ pu}, \\ I_c &= 3 \angle \theta \text{ pu}, & Z_c &= 5 + j \cdot 25 \text{ pu}, \end{aligned}$$

em que,  $\theta$  varia em um ciclo completo. Na Figura 3.4 são mostrados os gráficos da potência  $P$  e dos escalares  $I_{uf}$  e  $I_{cf}$ , em função da variação de  $\theta$ . Se o método da direção de potência estivesse correto então as seguintes relações lógicas valeriam:

$$\text{Se } P > 0 \text{ então } I_{uf} > I_{cf}$$

$$\text{Se } P < 0 \text{ então } I_{uf} < I_{cf}$$

Observando-se a Figura 3.4, percebe-se que  $I_{cf}$  é sempre maior que  $I_{uf}$ , no entanto, a potência muda de sinal durante a variação de  $\theta$ .



**Figura 3.4 – Variação dos índices escalares e da potência no PAC.**

Xu et al. (2003) também demonstraram que  $Z_u$  e  $Z_c$  podem ser modeladas como reatâncias, pois a potência reativa é uma medida mais relevante do que a ativa na determinação das contribuições harmônicas. A potência ativa é obtida pela equação:

$$P = \frac{E_u \cdot E_c}{X_u + X_c} \cdot \sin \delta, \quad (3.5)$$

e a potência reativa por:

$$Q = \frac{E_u}{X_u + X_c} \cdot (E_u - E_c \cdot \cos \delta), \quad (3.6)$$

em que,  $E_u = X_u \cdot I_u$  e  $E_c = X_c \cdot I_c$ . A variável  $\delta$  é a diferença de fases entre as fontes de corrente harmônicas. De (3.6) pode-se notar que se  $E_u$  for maior que  $E_c$  e ambos positivos, então  $Q$  será sempre maior que zero (sentido: concessionária  $\rightarrow$  carga). Ou seja, a direção de potência reativa pode ser usada para determinar o lado que possui uma fonte de tensão harmônica maior. No entanto, a condição de  $E_u > E_c$  é apenas necessária mais não suficiente, pois para o caso em que  $E_c$  for maior que  $E_u$  e  $E_c \cdot \cos(\delta) < E_u$ , a potência reativa também será positiva.

Dan & Czira (1998) também questionam o método da Direção de Potência Ativa. No seu trabalho, os autores afirmam que o método é efetivo apenas nas seguintes situações:

- Se o ramo, ao qual a carga pertence, consiste de cargas não lineares do mesmo tipo.
- Se a carga não linear investigada for dominante no seu nível de tensão em relação à distorção na tensão.

Dan & Czira (1998) assumem que a carga não linear possui algum tipo de dinâmica e então avaliam os diagramas de tensão eficaz de quinta versus a corrente eficaz da fundamental. Os autores acreditam que o monitoramento da variação destas grandezas auxilia na localização de fontes de harmônicos.

Tanto no método descrito por Cristaldi & Ferrero (1994) como na modificação do método da Direção da Potência Ativa sugerida por Xu et al. (2003), foram simulados sistemas elétricos compostos por um consumidor e uma concessionária. Porém para a aplicação do método da Direção da Potência Ativa são necessários os conhecimentos prévios da impedância equivalente da concessionária e do consumidor. Como a impedância da carga não linear não pode ser determinada de maneira trivial, este método da Direção de Potência Ativa serve apenas para possíveis simulações de sistemas monofásicos.

### 3.2 Método de Separação das Contribuições Harmônicas

No método de Srinivasan & Jutras (1996) foi proposto a Separação das Contribuições Harmônicas entre a unidade consumidora e a concessionária. O método depende de medições dos sinais de corrente e tensão no PAC. Um caso monofásico mostrado na Figura 3.5 é tratado como exemplo. Uma extensão desse conceito para um sistema trifásico desbalanceado pode ser aplicada para este método.

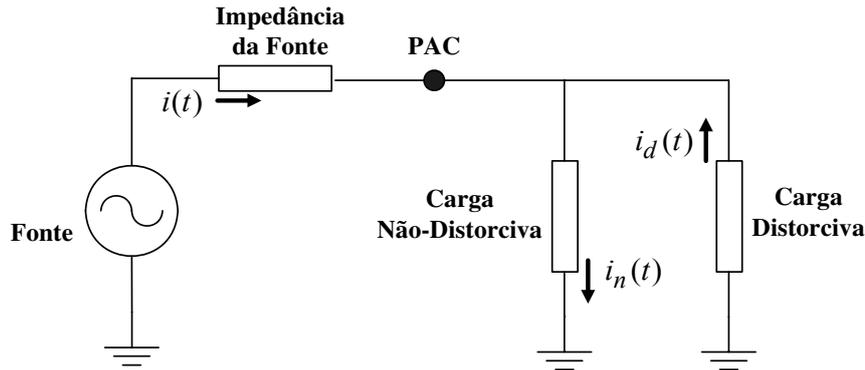


Figura 3.5 - Modelo para o método de separação da contribuição harmônica.

Seja  $v(t)$  a tensão e  $i(t)$  a corrente medida no PAC. Seja  $i_n(t)$  o fluxo de corrente não-distorcida do fornecedor para o consumidor. Seja  $i_d(t)$  o fluxo de corrente distorcida do consumidor para o fornecedor. Sejam  $V(j\omega)$ ,  $I(j\omega)$ ,  $I_n(j\omega)$ ,  $I_d(j\omega)$  os valores da tensão e das correntes obtidas pela transformada de Fourier correspondente. Com esses valores obtidos para a tensão e as correntes, analisam-se as seguintes equações:

$$i(t) = i_n(t) - i_d(t) \quad (3.7)$$

$$I(j\omega) = I_n(j\omega) - I_d(j\omega). \quad (3.8)$$

A parte não distorcida da corrente gera uma “taxa” constante e complexa “y” para a tensão em todas as frequências, como em (3.9).

$$I_n(j\omega_1) = y \cdot V(j\omega_1), \quad (3.9)$$

onde  $\omega_1$  é a frequência fundamental. Devido ao fato da carga não poder gerar potência na frequência fundamental, a parte da corrente distorcida na frequência fundamental  $\omega_1$ , é zero, como dado em (3.10).

$$I_d(j\omega_1) = 0, \quad (3.10)$$

Somando a equação (3.9) para a frequência  $\omega_1$  com a equação (3.10), resulta em:

$$I_n(j\omega_1) + I_d(j\omega_1) = y \cdot V(j\omega_1). \quad (3.11)$$

A constante complexa desconhecida “y” é obtida usando (3.8) e (3.11).

$$y = \frac{I(j\omega_1)}{V(j\omega_1)}. \quad (3.12)$$

Inserindo a constante “y” de (3.12) em (3.9), a parte não distorcida do fluxo de corrente do fornecedor para o consumidor é dada por (3.13).

$$I_n(j\omega) = \frac{I(j\omega_1)}{V(j\omega_1)} \cdot V(j\omega) \quad \omega = \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n \quad (3.13)$$

O balanço de fluxo de corrente (que é a parte distorcida) da concessionária para o consumidor é dado por:

$$I(j\omega) - I_n(j\omega) = I(j\omega) - \frac{I(j\omega_1)}{V(j\omega_1)} \cdot V(j\omega) \quad \omega = \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n. \quad (3.14)$$

Definindo  $I_d(j\omega)$  como o fluxo de corrente distorcida do consumidor para o fornecedor,  $I_d(j\omega)$  é obtida invertendo o sinal de (3.14), assim:

$$I_d(j\omega) = \frac{I(j\omega_1)}{V(j\omega_1)} \cdot V(j\omega) - I(j\omega) \quad \omega = \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n. \quad (3.15)$$

Pelo exposto desse método, pôde-se notar que a parte não distorcida do fluxo de corrente da concessionária para o consumidor é composta pela fundamental mais os harmônicos. O fluxo da corrente distorcida segue o sentido do consumidor para a concessionária, porém, não contém a componente de frequência fundamental possuindo apenas os componentes harmônicos. No método proposto por Srinivasan & Jutras, a carga do consumidor representado por “y”, mantém-se constante para as demais frequências harmônicas, podendo fornecer resultados não satisfatórios quando for adotado para sistemas reais. Deste modo, o método dos autores poderá ser adotado para simulações em sistemas hipotéticos (frequência constante), sendo feita análises comparativas com outros métodos de detecção de fontes harmônicas.

### 3.3 Método do Fator de Não-Linearidade da Carga

Uma técnica de detecção de fontes de harmônicos foi proposta por Moustafa et al. (2000), a qual focalizou no problema de interação entre a distorção gerada pela

concessionária e a distorção gerada pela unidade consumidora. Os autores assumem que as cargas nos sistemas de potência possuem um comportamento não-linear, podendo ser representado em muitos casos por um circuito do tipo RL (Resistor e Indutor). A justificativa deles se deve ao fato de que as máquinas elétricas possuem um comportamento indutivo.

O trabalho de Moustafa et al. consistiu de duas etapas. Na primeira parte, os sinais de corrente e tensão obtidos do sistema são aplicados na equação de um circuito RL. Todos os termos são variantes no tempo, como mostrado na equação (3.16), sendo a partir daí, determinados os valores da resistência e da indutância com relação aos sinais de entrada.

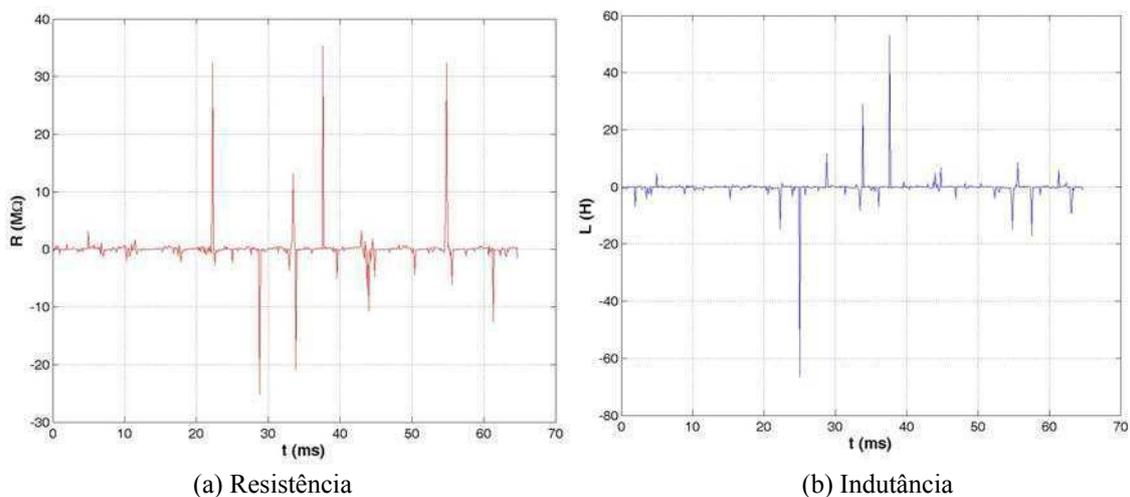
$$V(t) = R(t) \cdot i(t) + \frac{d}{dt}[L(t) \cdot i(t)]. \quad (3.16)$$

Aplicando-se o método da integração trapezoidal na equação anterior com um passo de integração  $\Delta t$ , obtêm-se as equações (3.17) e (3.18), onde serão adquiridos os valores de carga.

$$V(t) + V(t - \Delta t) = R \cdot [i(t) + i(t - \Delta t)] + \frac{2L}{\Delta t} \cdot [i(t) - i(t - \Delta t)] \quad (3.17)$$

$$V(t + \Delta t) + V(t) = R \cdot [i(t + \Delta t) + i(t)] + \frac{2L}{\Delta t} \cdot [i(t + \Delta t) - i(t)], \quad (3.18)$$

sendo (3.18) acrescido de um passo  $\Delta t$  em relação a (3.17). Atribuindo a igualdade  $Z = [i]^{-1} \cdot V$ , as variáveis  $R$  e  $L$  podem ser determinadas. O comportamento da carga pode ser visto na Figura 3.6, onde são mostradas suas características de acordo com as variações da tensão e da corrente do sistema.



**Figura 3.6 - Cargas não-lineares calculadas.**

Para a segunda etapa, os autores consideraram que um fator de não linearidade (FNL) poderá representar o quanto à carga está influenciando a injeção de harmônicos no sistema. Para sua determinação, é usada uma comparação da forma de onda da tensão medida com a calculada em (3.17) e (3.18). Esta forma de onda calculada é obtida fazendo-se a média dos valores da resistência e da indutância obtidos na primeira etapa.

A equação que caracteriza o  $FNL$  é representada em (3.19), onde a função  $S_n$  representa o somatório da diferença entre a forma de onda da tensão medida e a calculada a cada instante  $t$ , como mostrado em (3.20).

$$FNL = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=N} S_n^2} / N \quad (3.19)$$

$$S(t) = \frac{v_1(t) - v_2(t)}{v_1(t)}, \quad (3.20)$$

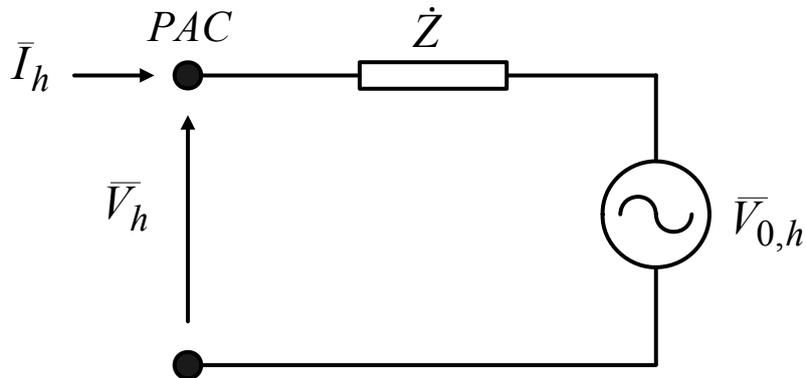
onde  $v_1$  representa a tensão medida e  $v_2$  a calculada. Sendo assim, eles consideraram a carga com maior FNL a principal influenciadora dos harmônicos injetados no sistema.

Em uma análise mais aprofundada do método de Moustafa et al. (2000) pode-se concluir que o método é bastante simples de aplicar em sistemas reais, porém apresenta incoerências quando surgem cargas não-lineares. Existem valores de resistência e indutância ativa que são negativos. No método que os autores desenvolveram, não podem ser considerados casos com cargas predominantemente capacitivas, já que o circuito é apenas RL. Estas características podem induzir erros nos resultados quando for considerado um longo período de tempo, para cargas com FNLs semelhantes. Além disso, eles não consideraram a representação dos harmônicos para cada carga na estimação das fontes de harmônicos.

### 3.4 Método de Estimação de Cargas Não-Lineares

No trabalho de Fusco et al. (2000) foi desenvolvida um método para a estimação da impedância não linear da carga, juntamente com a fonte de harmônicos do lado da carga. No método eles consideraram um modelo de um circuito equivalente para o lado da carga. A técnica consistiu em obter os sinais de tensão e corrente no ponto de acoplamento comum, seguindo a partir daí, dois passos que caracterizam todo o

processo da estimação. Inicialmente, eles representaram o sistema elétrico da carga por um circuito equivalente de Thèvenin, como mostrado na Figura 3.7.



**Figura 3.7 - Equivalente de Thèvenin para a h-ésima ordem da frequência harmônica, referente ao lado da carga.**

No circuito, são representadas a impedância e a tensão a serem estimadas, sendo designadas respectivamente por  $\dot{Z}_h$  e  $\bar{V}_{0,h}$ . Já os valores obtidos na medição são representados por  $\bar{V}_h$  e  $\bar{I}_h$ .

No primeiro passo de seu método, Fusco et al. utilizaram o filtro de Kalman e o espectro de frequências presentes nos sinais medidos, para determinar os fasores dos harmônicos presentes nos sinais. Os sinais de tensão e corrente são compostos de  $n$  amostras discretizadas no tempo. O filtro de Kalman irá atribuir um valor  $\bar{V}_h$  e  $\bar{I}_h$  para cada amostra. O índice  $h$  representa a ordem harmônica que está sendo analisada. No segundo, os valores da impedância e da fonte de tensão harmônica são estimados para o lado do consumidor, para isso eles utilizaram o método dos mínimos quadrados.

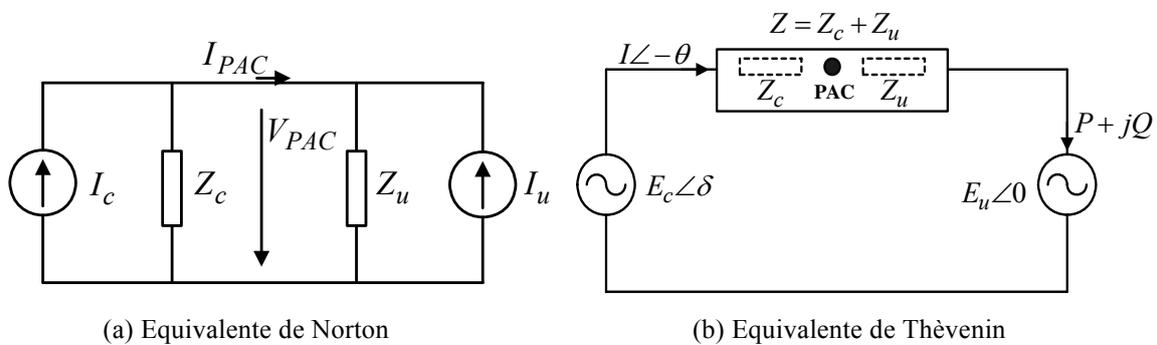
O método de Fusco et al. apresentou resultados adequados para a estimação da carga não linear. Esta técnica servirá de base para formulação do método deste trabalho, com respeito à estimação da contribuição harmônica da tensão no PAC.

### **3.5 Método da Impedância Crítica em Nível da Potência Ativa**

Uma foi proposta por Li et al. (2004). Ela se baseia nos circuitos equivalentes de Thèvenin e Norton, onde se determina a contribuição das correntes harmônicas injetadas no sistema pela concessionária e pela carga. O método adotado por Li et al. se fundamenta e aprimora do método proposto por Xu et al. (2000). O método para ponderar a contribuição da concessionária e do consumidor se baseia na observação do

fluxo de potência reativa da componente harmônica, ao invés da potência ativa como proposto por Cristaldi & Ferrero (1994). O fluxo de potência reativa é um indicador bem mais preciso na localização da fonte de harmônicos. Análises matemáticas e estudos simulados têm mostrado que esse método é bastante difundido para o problema de detecção de fontes de harmônicos (Xu et al., 2003 e Chen et al., 2004).

Analisando-se o método proposto por Li et al. observa-se que ele primeiramente, utiliza a corrente medida no ponto de acoplamento comum. Com este dado, foi modelado o circuito equivalente de Norton, representado pela Figura 3.8a, a qual serviu de base para a estimação da contribuição harmônica de corrente. Para a estimação da contribuição harmônica de tensão, os autores utilizaram o modelo aproximado pelo equivalente de Thèvenin, mostrado na Figura 3.8b.



**Figura 3.8 - Representação dos circuitos para a tensão e corrente medida no PCC.**

Definido os sistemas equivalentes, calcula-se a potência ativa  $P$  e reativa  $Q$ :

$$P = E_u I \cos \theta = \frac{E_u E_c}{Z} \cdot \text{sen} \delta \quad (3.21)$$

$$Q = E_u I \text{sen} \theta = \frac{E_u}{Z} \cdot (E_c \cos \delta - E_u) \quad (3.22)$$

As variáveis  $I_c$  e  $I_u$  da Figura 3.8a representam as correntes harmônicas da concessionária e do usuário, respectivamente. Os mesmos índices  $c$  e  $u$  são usados na impedância  $Z$  e na tensão harmônica  $E$ . As variáveis  $I_{PAC}$  e  $V_{PAC}$  representam as medições de corrente e tensão feitas no PAC.

Fazendo-se algumas simplificações em (3.21) e (3.22), juntamente com os dados já conhecidos previamente da impedância  $Z_u$  e  $Z_c$ , é possível determinar a contribuição harmônica para a concessionária e o consumidor no PAC. Os autores admitem que cargas com predominância indutiva ou capacitiva apresentaram características diferentes e equações distintas.

O método de Li et al. utiliza técnicas bastante aprimoradas, porém necessita do conhecimento prévio das impedâncias do consumidor, sendo feito por uma relação ente as fontes de tensão da concessionária e da carga. Esse método pode ser aplicado facilmente as casos monofásicos, servindo, portanto para a realização de possíveis simulações de sistemas sintéticos. A técnica desenvolvida por Li et al. produz resultados adequados, no entanto limita-se a ponderar a contribuição harmônica apenas pela relação das fontes de tensão da concessionária e consumidor, não considerando as possíveis relações das impedâncias de cada lado.

### 3.6 Método da Impedância Crítica em Nível da Carga

Chen et al. (2004) propuseram um método de localização de fontes de harmônicos chamado Método da Impedância Crítica, CIM – *Critic Impedance Method*. O método CIM compara as duas amplitudes das fontes de tensão utilizando o circuito equivalente de Thèvenin. A fonte de tensão com a maior amplitude é a responsável pela presença de harmônicos PAC. A comparação entre as duas amplitudes se realiza através do cálculo da chamada impedância crítica.

Para o entendimento do método CIM, considera-se primeiramente o circuito equivalente simplificado da Figura 3.9. Pelo circuito, tem-se que:

$$E = V + I \cdot Z, \quad (3.23)$$

onde  $Z = Z_u + Z_c$ . A equação (3.23) é escrita para um determinado harmônico. Deve-se supor que os fasores  $V$  e  $I$  são conhecidos. O ângulo de fase entre  $V$  e  $I$  é chamado de  $\theta$ , em que  $\theta = \theta_V - \theta_I$ . Sendo assim, torna-se necessário examinar três tipos de impedância.

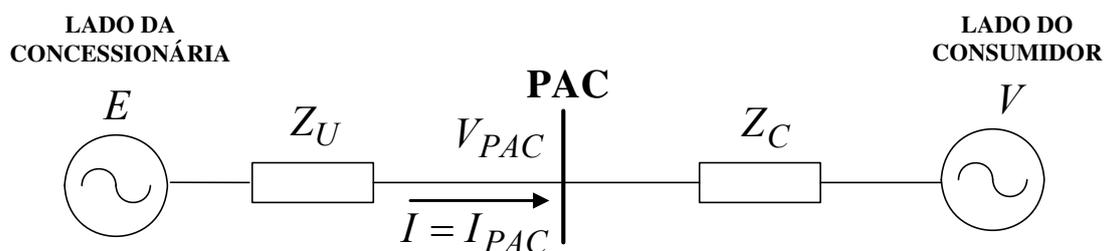


Figura 3.9 – Circuito equivalente simplificado.

**Impedância tipo:  $Z = jX$** 

Neste tipo de impedância, assume-se que  $-180 < \theta < 0^\circ$  e o ângulo de fase da corrente  $I$  é o ângulo de referência.

Na Figura 3.10 se observa que: mantendo-se a tensão  $V$  inalterada e alterando-se o valor de  $X$ , a tensão  $E$  ao longo da linha vertical tende a se elevar. Utiliza-se o módulo de  $V$  para se desenhar a circunferência e assim, os valores de  $E$  e  $V$  podem ser analisados diretamente. Desta forma:

- Se  $E$  estiver na circunferência, que é a chamada situação crítica, então:

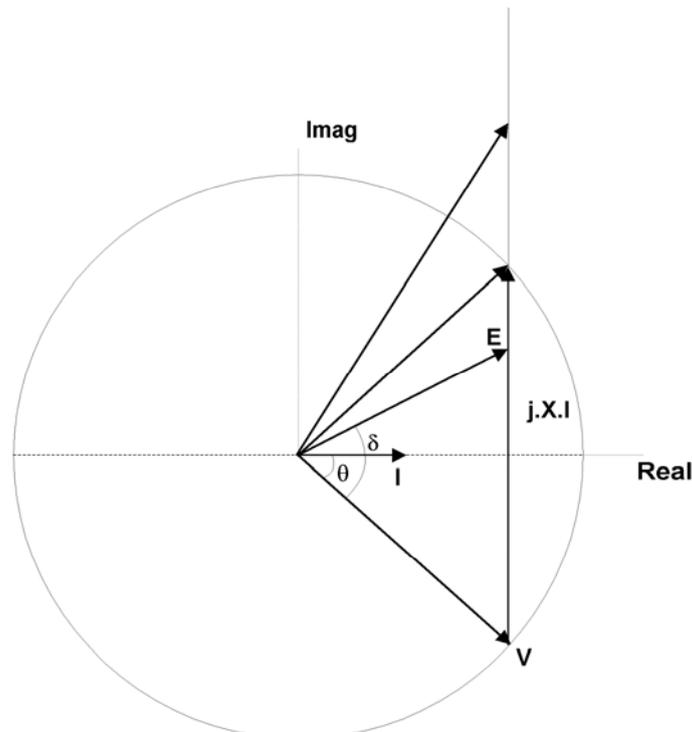
$$|E| = |V|, \text{ e } X = \left| 2 \cdot \frac{V}{I} \cdot \sin \theta \right|. \quad (3.24)$$

- Se  $E$  estiver dentro do círculo, então:

$$|E| < |V|, \text{ e } X < \left| 2 \cdot \frac{V}{I} \cdot \sin \theta \right|. \quad (3.25)$$

- Se  $E$  estiver fora do círculo, então:

$$|E| > |V|, \text{ e } X > \left| 2 \cdot \frac{V}{I} \cdot \sin \theta \right|. \quad (3.26)$$



**Figura 3.10 – Diagrama fasorial para  $Z = j \cdot X$  .**

Para  $0^\circ < \theta < 180^\circ$  a condição  $|E| > |V|$  é sempre válida, não importando o valor de  $Z$ .

**Impedância tipo:**  $Z = R + j \cdot X$

Na Figura 3.11 é mostrado o diagrama fasorial de uma impedância RL. Novamente utilizando-se a corrente  $I = I\angle 0^\circ$  como uma corrente de referência e analisando-se a situação em que  $-90^\circ < \theta < 90^\circ$ , o ângulo de impedância é descrito como:  $\alpha = \text{tg}^{-1}\left(\frac{X}{R}\right)$  e  $\beta = 90^\circ - \alpha$ . Deve-se notar que  $\gamma = \theta + \beta$ , já que  $\theta$  é negativo. Analisando-se o diagrama fasorial, conclui-se:

- Quando  $E$  encontra-se na circunferência, que é a situação crítica, então:

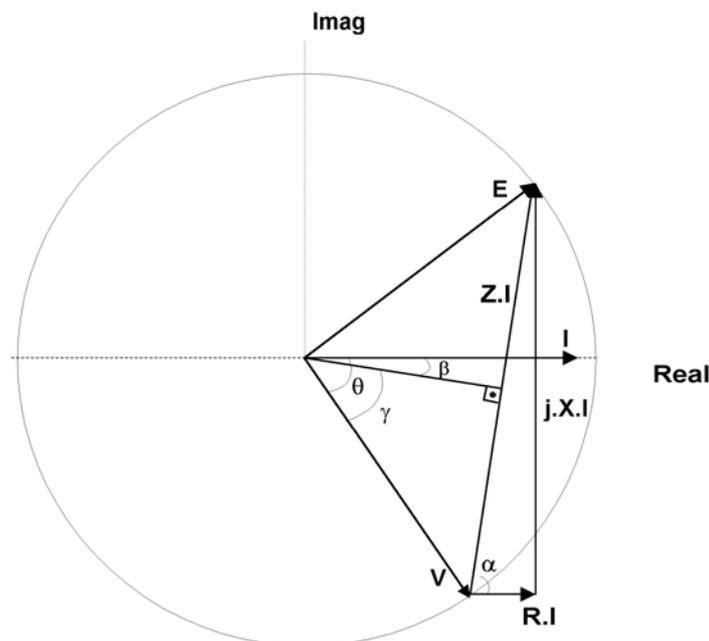
$$|E| = |V|, \text{ e } X = \left| 2 \cdot \frac{V}{I} \cdot \sin(\theta + \beta) \right|. \quad (3.27)$$

- Se  $E$  estiver dentro do círculo, então:

$$|E| < |V|, \text{ e } X < \left| 2 \cdot \frac{V}{I} \cdot \sin(\theta + \beta) \right|. \quad (3.28)$$

- Se  $E$  estiver fora do círculo, então:

$$|E| > |V|, \text{ e } X > \left| 2 \cdot \frac{V}{I} \cdot \sin(\theta + \beta) \right|. \quad (3.29)$$



**Figura 3.11 – Diagrama fasorial para  $Z = R + j \cdot X$ .**

Para  $0^\circ < \theta < 90^\circ$  a condição  $|E| > |V|$  é sempre válida, não importando o valor de  $Z$ . Sem a aplicação dos módulos, a impedância crítica  $Z_{cr}$  pode ser calculada como:

$$Z_{cr} = -2 \cdot \frac{V}{I} \cdot \sin(\theta + \beta), \quad (-180^\circ < \theta < 180^\circ). \quad (3.30)$$

**Impedância tipo:**  $Z = R - j \cdot X$

Para o caso em que a impedância é capacitiva, através de um diagrama de fasores semelhante ao item anterior, obtém-se a seguinte expressão para a impedância crítica:

$$Z_{cr} = 2 \cdot \frac{V}{I} \cdot \sin(\theta - \beta), \quad (-180^\circ < \theta < 180^\circ), \quad (3.31)$$

e valem as seguintes condições:

- Quando  $|Z| < |Z_{cr}|$ , então  $|E| < |V|$ .
- Quando  $|Z| > |Z_{cr}|$ , então  $|E| > |V|$ .

Com base no exposto anteriormente, Chen et al. (2004) propuseram determinar as contribuições harmônicas por meio da comparação entre os valores da impedância crítica e da impedância  $Z$ . Os autores consideraram que a contribuição harmônica obedece apenas à relação entre as fontes de tensão harmônicas de tensão da concessionária e do consumidor. Porém, sabe-se que esta relação entre fontes de tensão não é suficiente para ponderar a contribuição harmônica. Portanto, para uma análise mais precisa também se devem considerar as impedâncias equivalentes da concessionária e do consumidor. No Método da Impedância Crítica, os resultados são bem favoráveis quanto à análise da contribuição harmônica por parte da concessionária e do consumidor no PAC. Porém, o cálculo da impedância para o lado do consumidor é feito baseando-se apenas na relação entre as fontes de tensão. Além disso, sua análise adota que a impedância da carga é fixa e invariante no tempo, não considerando, portanto sua não linearidade.

### 3.7 Método a ser Desenvolvido

Em uma visão geral, o método a ser utilizado neste trabalho apresenta técnicas baseadas nos modelos de Xu & Liu (2000), Xu et al. (2003) e Li et al. (2004). As técnicas já propostas utilizam a modelagem do circuito equivalente de Thèvenin para a representação do sistema de potência. O método a ser proposto neste trabalho deverá ser capaz de analisar a contribuição harmônica advinda da concessionária e do consumidor,

com respeito à distorção harmônica de tensão. A diferença deste trabalho em relação às técnicas citadas acima, é que o equivalente de Thèvenin se refere aos componentes de seqüência (trifásicos) e não apenas a um modelo monofásico, em que é utilizada a análise por fase. O método a ser desenvolvido também deverá ser capaz de analisar sinais de tensão e corrente oriundos de sistemas reais (monofásicos e trifásicos).

Os métodos apresentados por Xu & Liu (2000), Xu et al. (2003) e Li et al. (2004), apresentam a limitação de que as contribuições harmônicas do consumidor e da concessionária são calculadas através da relação das fontes de tensão da concessionária e do consumidor. Essa relação entre as fontes não é suficiente para uma análise precisa da contribuição harmônica, pois as impedâncias do lado da concessionária e do consumidor também podem determinar qual dos lados possui maior contribuição harmônica. Portanto, neste trabalho serão consideradas as relações das fontes de tensão e das impedâncias de ambos os lados para ponderar a contribuição harmônica de tensão no PAC. Como este trabalho visa o estudo aplicado a sistemas reais e não sintéticos, foi necessário estimar a impedância não linear para o lado do consumidor, uma vez que a impedância equivalente para o lado da concessionária é previamente conhecida. Para a estimação da impedância do lado do consumidor, utilizou-se o método desenvolvido por Fusco et al. (2000). No método de Fusco et al. a estimação da impedância é feita juntamente com a fonte de tensão harmônica, o que a torna mais eficiente para a utilização em sistemas de potência reais. O método de Fusco et al. utiliza a técnica dos mínimos quadrados para estimar a os parâmetros do consumidor. Neste trabalho o método de Fusco et al. foi modificado e aprimorado para o uso da técnica dos mínimos quadrados recursivo, que torna a estimação dos parâmetros mais precisa.

A validação deste trabalho deverá ser realizada através de simulações de sistemas sintéticos, comparando-se os valores exatos com os resultados obtidos do sistema. Os resultados das simulações para a validação serão apresentados no Capítulo 4.

## Capítulo 4

### MÉTODO DESENVOLVIDO

As contribuições harmônicas de tensão no PAC são determinadas a partir de duas etapas. Na primeira etapa, estimam-se os parâmetros do sistema elétrico que são a impedância equivalente e a fonte de tensão harmônica referentes à concessionária e também a unidade consumidora. Na segunda etapa, aplicam-se os dados estimados a um modelo equivalente para a realização dos cálculos da contribuição harmônica de tensão no PAC. As etapas do método desenvolvido que irão determinar estas contribuições serão apresentadas neste capítulo, como também, serão apresentados os resultados da simulação para validação do método desenvolvido.

#### *4.1 Método para Estimação da Carga*

O método de Fusco et al. (2000) será adotado para estimar os parâmetros da carga do sistema elétrico, como foi citada no capítulo anterior. O modelo representativo para o lado da carga foi mostrado na Figura 3.7. No modelo da carga é importante ressaltar que o fluxo da corrente possui sentido do PAC para a carga. Este método servirá tanto para o cálculo de cargas lineares como não lineares, o tornando bastante útil para aplicações em sistemas reais, já que a dinâmica da carga varia constantemente.

A formulação do método de estimação da carga é composto por quatro etapas:

1. Medição dos sinais de tensão e corrente no PAC;
2. Estimação das frequências que compõem os sinais medidos;
3. Utilização do filtro de Kalman para estimar os fasores retangulares das frequências harmônicas encontradas na etapa anterior;
4. Aplicação do método dos mínimos quadrados recursivo para estimar os parâmetros da carga, compostos pela impedância  $\dot{Z}_h$  e a fonte de tensão harmônica  $\bar{V}_{0,h}$ , a partir dos fasores estimados.

A seguir serão descritas, em detalhes, as etapas que compõem o método proposto.

#### 4.1.1. Medição dos sinais no PAC

Os sinais de tensão e corrente devem ser adquiridos no PAC do sistema elétrico de potência. Na Figura 4.1 é apresentado um modelo do ponto de acoplamento comum em um sistema composto pela concessionária e pelo consumidor (carga de impedância  $R + jX$ ). Para o método desenvolvido, os sinais devem ser coletados nas três fases tanto para a tensão como para a corrente. Além disso, os sinais devem ser medidos de forma simultânea, para que não haja divergência no comportamento da carga.

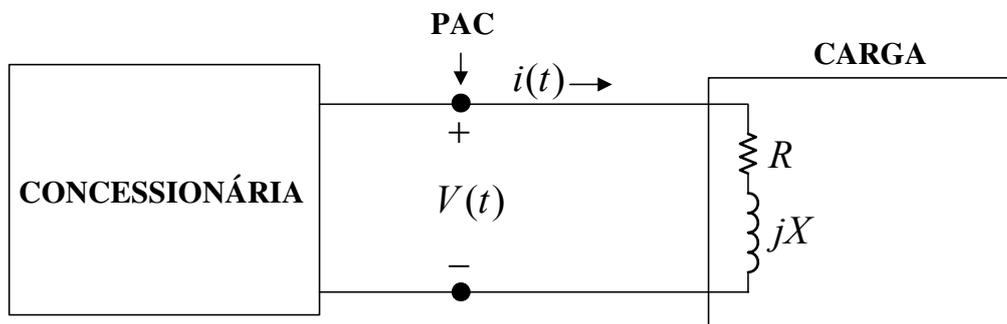


Figura 4.1 – Esquema da medição dos sinais de tensão e corrente no PAC.

Na figura acima os sinais de tensão  $V(t)$  e de corrente  $i(t)$  deverão ser adquiridos de forma discretizada, para que se possa estimar computacionalmente as frequências e também os fasores dos componentes harmônicos presentes. A discretização dos sinais medidos deverá fornecer o tempo de aquisição, o período de amostragem e a quantidade de pontos por amostra. É importante ressaltar que o período de amostragem deve ser no mínimo duas vezes menor que o período do sinal a ser discretizado para que se possa, posteriormente, recompor o sinal medido sem erro de *aliasing*, obedecendo assim o Teorema de Nyquist.

A medição em sistemas elétricos depende de uma instrumentação apropriada, pois geralmente os sinais são coletados diretamente dos TPs (transformadores de potencial) e TCs (transformadores de corrente) da subestação, como mostrado no esquema da Figura 4.2.

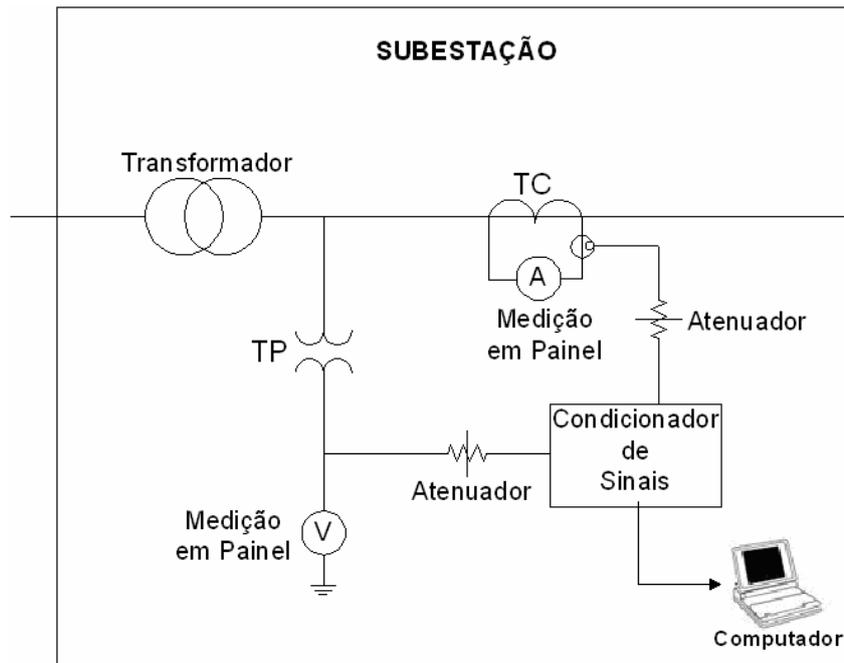


Figura 4.2 - Esquema de aquisição dos sinais de tensão e corrente

Algumas fotografias dos arranjos para as medições dos sinais de tensão e corrente adquiridos em campo estão apresentados no Apêndice A.

#### 4.1.2. Estimação das frequências

A partir das formas de ondas de tensão e corrente medidos no PAC, é necessário estimar as frequências dos componentes harmônicos que as compõem. As estimações dos sinais necessitam de técnicas mais robustas e precisas, portanto, a técnica a ser usada não deve ser susceptível aos ruídos provenientes da medição, pois poderiam interferir na análise final do processo.

Para este trabalho foi adotada a técnica de estimação de frequência denominada Prony Modificado, a qual foi desenvolvida e descrita por Costa, F. F. (2005). No método de Prony Modificado as frequências são estimadas em harmônicas e inter-harmônicas, a partir de sinais medidos no PAC.

No processo de estimação de frequências pode ocorrer o aparecimento de inter-harmônicos, que se apresentam como múltiplos diferentes dos harmônicos convencionais, estando, portanto, sua frequência situada entre uma ordem e outra dos harmônicos. Os inter-harmônicos não devem entrar no cálculo da estimação da contribuição harmônica de tensão trifásica, pois não estão presentes ao mesmo instante, nas três fases dos sinais de tensão e corrente. Os inter-harmônicos serão

utilizados apenas na estimação dos fasores, pois para obtenção de resultados mais exatos necessita-se de todo espectro de frequência dos sinais medidos. Por fim, com as frequências estimadas para cada forma de onda medida, segue-se para o próximo passo do método de estimação da carga, que será descrito no próximo subitem.

### 4.1.3. Estimação dos fasores dos sinais medidos

Com os sinais medidos no PAC e com as frequências estimadas para os sinais, estimam-se os fasores dos harmônicos que compõem os sinais. Neste trabalho foi adotado o filtro de Kalman na estimação dos fasores retangulares. A técnica do filtro de Kalman foi descrita em detalhes por Costa, F. F. (2005). Os sinais medidos podem ser representados por  $a(t)$  a qual é composta pelas harmônicas de ordem  $h$ :

$$a(t) = \sum_{h=1}^H [A_{h,r}(t) \cos(h\omega t) - A_{h,i}(t) \text{sen}(h\omega t)]. \quad (4.1)$$

O filtro de Kalman pode ser descrito pelas seguintes equações que se referem aos sinais de entrada  $y[n]$ , onde é possível apresentar a variação de estados, com  $n$  representando o número da amostra do sinal:

$$x_{n+1} = \Phi_n x_n + w_n, \quad (4.2)$$

$$y[n] = h_n x_n + \eta[n], \quad (4.3)$$

sendo (4.2) a equação de estados e (4.3) a de saída. Os termos das equações são descritos a seguir para uma dimensão  $p$ :

$x_n \rightarrow$  vetor de estados ( $p \times 1$ ) que contém os parâmetros a serem determinados;

$\Phi_n \rightarrow$  matriz de transição ( $p \times p$ ) relacionando  $x_n$  a  $x_{n+1}$  na ausência de uma função de entrada.

$w_n \rightarrow$  vetor ( $p \times 1$ ), cujos elementos não são correlacionados em um sentido temporal, ou seja, permite-se que em um dado instante  $k$ , os elementos de  $w_k$  sejam correlacionados entre si. No entanto, os elementos de  $w_k$  não são correlacionados com os elementos de  $w_i$ , quando  $i \neq k$ .

$h_n \rightarrow$  vetor ( $1 \times p$ ) que fornece a conexão ideal entre a medição  $y[n]$  e o vetor de estados no tempo  $t$ .

$\eta[n] \rightarrow$  ruído branco, com matriz de covariância conhecida. Representa o erro de observação do processo  $y[n]$ .

O método do filtro de Kalman busca fazer uma estimativa a partir de uma combinação linear das variáveis de estado e do erro de predição da grandeza  $y$ , como é visto a seguir:

$$e^0[n] = y[n] - \hat{y}^0[n] = y[n] - h_n \hat{x}_n^0. \quad (4.4)$$

Para fazer a atualização recursiva da equação (4.4) é usada a equação (4.5), que irá depender de um ganho  $K_n$  inicial:

$$\hat{x}_n = \hat{x}_n^0 + K_n e^0[n], \quad (4.5)$$

com isso, é necessário determinar a matriz de covariância  $P$  onde seus elementos da diagonal principal devem ser minimizados, para a atualização ser otimizada. Neste contexto, a equação pode ser descrita da seguinte forma:

$$P_n = E[\xi_n \xi_n^0] = E[(x_n - \hat{x}_n)(x_n - \hat{x}_n)^T], \quad (4.6)$$

onde  $\xi_n$  representa o erro referente à estimação, descrito a seguir:

$$\xi_n^0 = x_n - \hat{x}_n^0. \quad (4.7)$$

Substituindo a equação (4.3) em (4.5) obtém-se a equação para  $P$ , relacionado com o erro expresso em (4.7):

$$P_n = (I - K_n h_n) P_n^0 (I - K_n h_n)^T + K_n r[n] K_n^T. \quad (4.8)$$

Sabendo que  $I$  é a matriz identidade e  $P_n^0$  é a matriz de covariância a priori. Manipulando-se a equação (4.8) é possível obter o ganho de Kalman, o qual é descrito a seguir:

$$K_n = P_n^0 h_n^T (h_n P_n^0 h_n^T + r[n])^{-1}, \quad (4.9)$$

em que se tem representado a variância do ruído por  $r[n]$ , sendo ela proveniente da medição ou representado um ruído branco do sistema. Substituindo o ganho de Kalman na equação (4.8) obtém a expressão para atualização ótima de  $P_n$ :

$$P_n = (I - K_n h_n) P_n^0. \quad (4.10)$$

A partir de (4.10) é possível fazer a atualização das estimativas para as variáveis da equação (4.5). A projeção das variáveis para o tempo  $n+1$  é realizada apenas com a utilização da matriz de transição  $\Phi_n$ , com isso se obtém a expressão:

$$\hat{x}_{n+1}^0 = \Phi_n \hat{x}_n. \quad (4.11)$$

Formulando a expressão do erro *a priori*, para se obter a projeção da matriz de covariância  $P$ , têm-se os seguintes termos:

$$\begin{aligned} \xi_{n+1}^0 &= x_{n+1} - \hat{x}_{n+1}^0 \\ &= (\Phi_n x_n + w_n) - \Phi_n \hat{x}_n \\ &= \Phi_n \xi_n + w_n, \end{aligned} \quad (4.12)$$

para a atualização recursiva da expressão,  $P_{n+1}$  pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned} P_{n+1}^0 &= E[\xi_{n+1}^0 (\xi_{n+1}^0)^T] = E[(\Phi_n \xi_n + w_n)(\Phi_n \xi_n + w_n)^T] \\ &= \Phi_n P_n \Phi_n^T + Q_n. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Por fim, pode ser mostrada a seqüência de equações que compõe a montagem do algoritmo como:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_n = P_n^0 h_n^T (h_n P_n^0 h_n^T + r[n])^{-1} \\ e^0[n] = y[n] - \hat{y}^0[n] \\ \hat{x}_n = \hat{x}_n^0 + K_n e^0[n] \\ P_n = (I - K_n h_n) P_n^0 \\ \hat{x}_{n+1}^0 = \Phi_n \hat{x}_n \\ P_{n+1}^0 = \Phi_n P_n \Phi_n^T + Q_n \end{array} \right. \quad (4.14)$$

A técnica do filtro de Kalman considera os ruídos provenientes das medições e do próprio sistema, característica necessária à filtragem da forma de onda a ser analisada. O algoritmo implementado do filtro de Kalman utilizará as frequências detectadas pelo o método de Prony Modificado e os sinais de tensão e corrente medidos no PAC. Ao final do processamento, o filtro de Kalman irá fornecer os fasores para cada onda de tensão e corrente, em todo o espectro de frequências detectado. Os fasores estimados serão fornecidos em coordenadas retangulares, ou seja, compostos de uma parte real ( $R$ ) e imaginária ( $M$ ). Adotou-se a tensão obtida do

filtro como  $V_{R,\omega}^i + jV_{M,\omega}^i$  e a corrente como  $I_{R,\omega}^i + jI_{M,\omega}^i$ , onde  $i$  representa o índice da amostra e  $\omega$  a frequência angular que estão sendo analisados.

#### 4.1.4. Estimação da carga

O método descrito por Fusco et al. (2000) foi aprimorado neste trabalho e utilizado na determinação dos parâmetros da carga não-linear. A técnica aplicada por Fusco et al. utilizava o método dos mínimos quadrados (MQ) para a estimação dos parâmetros da carga, porém utilizou-se a técnica dos mínimos quadrados recursivo (MQR), pois é mais precisa e se adapta melhor a sistemas dinâmicos. Para estimação da carga, o método desenvolvido utiliza a modelagem apresentada na Figura 4.3. Os parâmetros da carga a serem estimados são a impedância equivalente  $R_\omega^i + jX_\omega^i$  e a fonte de tensão harmônica  $V_{R0,\omega}^i + jV_{M0,\omega}^i$ . Para a estimação da carga são necessários os fasores de tensão ( $V_{R,\omega}^i + jV_{M,\omega}^i$ ) e de corrente ( $I_{R,\omega}^i + jI_{M,\omega}^i$ ) estimados pelo filtro de Kalman como mostrado no subitem anterior.

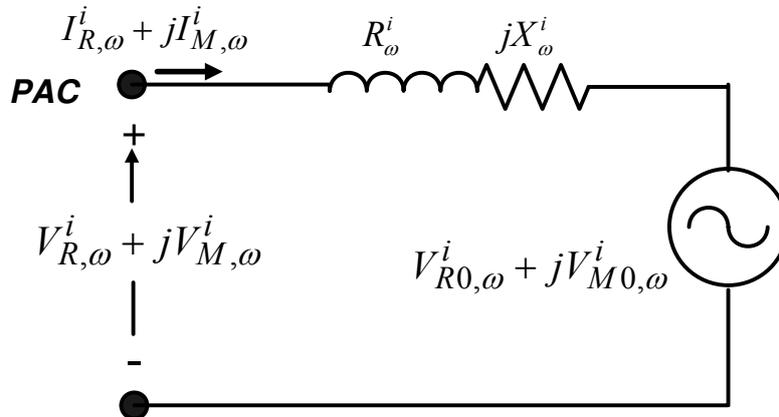


Figura 4.3 – Modelo da carga a ser estimada pelo o método dos MQR.

Para o modelo da carga acima é possível obter a expressão matemática através da Lei de Ohm. Sua representação matemática está descrita pela equação (4.15).

$$V_{R,\omega}^i + jV_{M,\omega}^i = V_{R0,\omega}^i + jV_{M0,\omega}^i + (R_\omega^i + jX_\omega^i) \cdot (I_{R,\omega}^i + jI_{M,\omega}^i). \quad (4.15)$$

A partir de (4.15) é possível separar os termos reais dos imaginários e representá-los como:

$$\begin{aligned} V_{R0,\omega}^i + R_\omega^i \cdot I_{R,\omega}^i - X_\omega^i \cdot I_{M,\omega}^i &= V_{R,\omega}^i \\ V_{M0,\omega}^i + R_\omega^i \cdot I_{M,\omega}^i + X_\omega^i \cdot I_{R,\omega}^i &= V_{M,\omega}^i \end{aligned} \quad (4.16)$$

Separando as variáveis que se deseja estimar e reescrevendo a equação (4.16), obtém-se a seguinte expressão matricial:

$$[V_R^i \quad V_M^i] = [I_{R,\omega}^i \quad I_{M,\omega}^i \quad 1] \cdot \begin{bmatrix} R_1 & X_2 \\ X_1 & R_2 \\ V_{R0,\omega}^i & V_{M0,\omega}^i \end{bmatrix}, \quad (4.17)$$

com as restrições  $R_1 = R_2 = R_\omega^i$  e  $X_2 = -X_1 = X_\omega^i$ . Observe que a equação (4.17) é aplicada a cada amostra  $i$  em uma janela de tempo.

Para a aplicação do MQR a equação (4.17) é considerada como um modelo dinâmico e pode ser reescrita matricialmente pela seguinte equação:

$$y^i = \Phi^i \cdot \Theta. \quad (4.18)$$

Assim, assumindo que os índices  $R$  e  $M$  representam os fasores real e imaginário respectivamente, tem-se desse modo a definição das seguintes matrizes:

$$y^i = [V_{R,\omega}^i \quad V_{M,\omega}^i], \quad (4.19)$$

$$\phi^i = [I_{R,\omega}^i \quad I_{M,\omega}^i \quad 1]. \quad (4.20)$$

Os parâmetros da matriz  $\Theta$  podem ser representados pelo circuito equivalente de Thèvenin. Em particular, para o circuito mostrado na Figura 4.2, é possível montar a seguinte matriz:

$$\Theta = \begin{bmatrix} R_\omega^i & X_\omega^i \\ -X_\omega^i & R_\omega^i \\ V_{R0,\omega}^i & V_{M0,\omega}^i \end{bmatrix}, \quad (4.21)$$

em que estão representadas a impedância e a tensão no modelo da carga e que serão estimadas. Verifica-se que em (4.21) a primeira coluna possui os valores  $R_\omega^i$  e  $-X_\omega^i$ , juntamente com a parte real da tensão  $V_{R0,\omega}^i$ , vista na fonte estimada. Na segunda coluna são representados os valores  $X_\omega^i$  e  $R_\omega^i$ , porém com a tensão  $V_{M0,\omega}^i$  representa a sua parte imaginária.

Na estimação recursiva a matriz  $\Theta$  será atualizada a partir da matriz  $\hat{\Theta}$ . Para obter a estimação da matriz  $\hat{\Theta}$ , usam-se as *is* amostras da tensão e da corrente estimadas, e aplica-se ao método do MQR representado pela expressão do Jacobiano:

$$J(\hat{\Theta}) \equiv \varepsilon_1^T \varepsilon_1 + \varepsilon_2^T \varepsilon_2, \quad (4.22)$$

onde os termos  $R$  e  $X$  da matriz  $\hat{\Theta}$ , são dados por:

$$\hat{v}_{11}^* - \hat{v}_{22}^* = 0, \quad (4.23a)$$

$$\hat{v}_{12}^* + \hat{v}_{21}^* = 0. \quad (4.23b)$$

No caso das representações expressa em (4.23), tem-se  $\hat{v}_{11}^*$  representando  $R_{\omega}^i$  da primeira coluna da matriz, e  $\hat{v}_{22}^*$ , o  $R_{\omega}^i$  da segunda coluna. Com isso, impõe-se que os termos sejam iguais, do mesmo modo, aplica-se à reatância  $X_{\omega}^i$ .

Retornado a análise a partir da equação (4.22), pode-se aplicar o erro mínimo nos termos:

$$[\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2] = Y - \Phi \cdot \hat{\Theta} = [Y_1 - \Phi \cdot \hat{\Theta}_1 \quad Y_2 - \Phi \cdot \hat{\Theta}_2]. \quad (4.24)$$

Após a definição (4.24), têm-se as seguintes representações que serão utilizadas para a matriz covariância  $P$ :

$$P = (\Phi^T \Phi)^{-1}, \quad (4.25)$$

$$\hat{\Theta}^* = P \cdot B, \quad (4.26)$$

sendo a matriz  $P$  não singular e sempre terá dimensão  $(3 \times 3)$ . A definição da matriz  $B$  é apresentada na seguinte equação:

$$B = \Phi^T \cdot Y = [\Phi^T \cdot Y_1 \quad \Phi^T \cdot Y_2]. \quad (4.27)$$

Assim, é possível verificar que todos os termos de (4.27) são conhecidos e, portanto, gera um resultado final para o sistema das equações já descritas por:

$$\hat{\Theta} = \hat{\Theta}^* - \frac{P}{p_{11} + p_{22}} \cdot \begin{bmatrix} \hat{v}_{11}^* - \hat{v}_{22}^* & \hat{v}_{12}^* + \hat{v}_{21}^* \\ \hat{v}_{12}^* + \hat{v}_{21}^* & \hat{v}_{22}^* - \hat{v}_{11}^* \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.28)$$

Os elementos  $p_{11}$  e  $p_{22}$  são os termos da diagonal principal da matriz covariância  $P$ . Com os termos da matriz  $\Theta$  determinados para cada frequência harmônica, é possível chegar aos resultados das cargas, verificando-se seu comportamento no decorrer do tempo. Ao final são obtidos, na matriz  $\Theta$ , os parâmetros da carga, compostos pelas impedância e fonte de tensão harmônica para todo espectro de frequência encontrado nos sinais de tensão e corrente do PAC. Para sistemas trifásicos o método dos MQR será aplicado, a partir do modelo apresentado na Figura 4.3, para cada componente de seqüência que se deseja analisar. Os detalhes do método dos MQR estão dispostos no Apêndice B desta Dissertação.

O método dos MQR estima os parâmetros da carga através de iterações sucessivas, onde a cada iteração é usada uma amostra dos fasores da tensão e da corrente. A cada iteração o método se aproxima mais do valor estimado e por isso sua precisão está associada diretamente a uma quantidade mínima de amostras. Por ser um método recursivo, as variações ocorridas nos sinais medidos podem ser acompanhadas de forma dinâmica, já que a sua matriz de covariância  $P$  é atualizada a cada iteração.

Os parâmetros estimados pelo método dos MQR poderão ser utilizados para o modelo do sistema completo, composto pela concessionária e pelo consumidor. O modelo completo do sistema será adotado no método de análise trifásica das contribuições harmônicas no PAC, a qual será explicada no próximo item.

#### ***4.2 O Método Desenvolvido para Análise da Contribuição Harmônica***

Neste trabalho, foi necessário formular um método para que sejam atendidas as necessidades da ponderação e das responsabilidades da geração dos sinais harmônicos, em pontos de possíveis divergências entre a empresa fornecedora de energia e a unidade consumidora. Diante de tal panorama, fica evidente a importância de estudos que objetivem a análise e o diagnóstico das distorções em sinais presentes na rede elétrica, mesmo que ainda não exista legislação ou norma específica que regule estas situações. O método pode ser aplicado aos sistemas elétricos trifásicos reais, conhecendo-se os dados da impedância equivalente da concessionária em componentes de seqüência, a montante da carga.

#### 4.2.1. Método da contribuição percentual harmônica em componentes de seqüência (CPHCS)

No Subitem 4.1.1, verificou-se que as formas de onda de tensão e corrente podem ser medidas em sistemas trifásicos. O método de Prony Modificado e o filtro de Kalman deverão ser aplicados a todos os sinais medidos (tensão e corrente), ou seja, os resultados das estimações de freqüência e os fasores deverão ser fornecidos para cada fase. Como as impedâncias da concessionária estão representadas por componentes simétricos, torna-se necessário à conversão dos fasores estimados para o mesmo padrão. A conversão se dará nas fases a, b e c, para as componentes de seqüência zero, positiva e negativa, respectivamente. Para a aplicação a conversão dos fasores de tensão e corrente foi utilizada a equação (2.4) descrita no Capítulo 2.

Com os fasores já dispostos em componentes de seqüência, aplica-se o método de estimação dos parâmetros da carga. O método de estimação dos parâmetros da carga foi desenvolvido para se obter seus resultados em componentes de seqüência. Assim, os parâmetros em componentes de seqüência calculados pelo MQR podem ser aplicados ao modelo do sistema elétrico.

Para a aplicação do método CPHCS, o sistema de distribuição é representado pelo modelo descrito na Figura 4.4, o qual corresponde ao equivalente de Thèvenin.

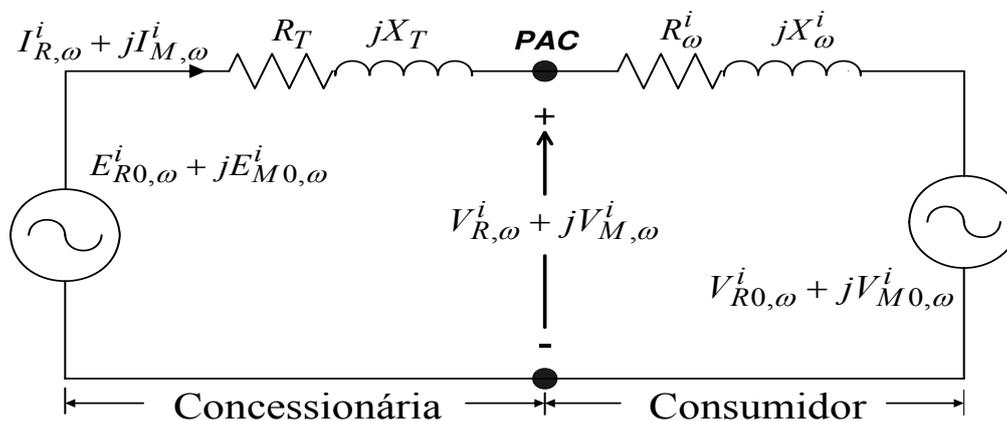


Figura 4.4 – Modelo equivalente de Thèvenin para o sistema elétrico.

Na figura acima, os parâmetros para o lado do consumidor são compostos pela fonte de tensão  $V_{R0,\omega}^i + jV_{M0,\omega}^i$  e pela impedância  $R_\omega^i + jX_\omega^i$ , ambos estimados pelo método dos MQR. O lado da concessionária é composto pela impedância  $R_T + jX_T$ , a qual representa a impedância da subestação acrescida da impedância dos cabos de

alimentação; e pela fonte de alimentação  $E_{R0,\omega}^i + jE_{M0,\omega}^i$ , impedância a montante da carga. A fonte de alimentação da concessionária pode ser determinada a partir da tensão  $V_{R,\omega}^i + jV_{M,\omega}^i$  e da corrente  $I_{R,\omega}^i + jI_{M,\omega}^i$ , medidas no PAC. A partir do equivalente de Thèvenin do sistema elétrico (Figura 4.4), o método CPHCS calcula o percentual da contribuição harmônica no PAC com referência a cada componente de seqüência. Ou seja, para cada componente harmônico que se queira analisar, o modelo do sistema deve ser usado três vezes, um para cada componente de seqüência. As equações da contribuição harmônica no PAC para um consumidor exclusivo ligado a um barramento (sem outros consumidores ao mesmo barramento), estão descritas em (4.29):

$$V_{Concessionária} = \frac{(R_{\omega}^i + jX_{\omega}^i)}{R_{\omega}^i + jX_{\omega}^i + (R_T + jX_T)} \times (E_{R0,\omega}^i + jE_{M0,\omega}^i). \quad (4.29a)$$

$$V_{Consumidor} = \frac{(R_T + jX_T)}{R_{\omega}^i + jX_{\omega}^i + (R_T + jX_T)} \times (V_{R0,\omega}^i + jV_{M0,\omega}^i). \quad (4.29b)$$

A tensão equivalente no PAC pode ser determinada pela soma das equações (4.29a) e (4.29b), obtendo-se a seguinte expressão:

$$V_{PAC} = V_{Concessionária} + V_{Consumidor}. \quad (4.30)$$

O cálculo da percentagem é feito com a razão entre a contribuição da tensão e o valor do módulo da tensão medida no PAC. As equações que regem este cálculo são mostradas a seguir:

$$V_{Concessionária}(\%) = \frac{V_{Concessionária}}{|V_{PAC}|} \times 100. \quad (4.31a)$$

$$V_{Consumidor}(\%) = \frac{V_{Consumidor}}{|V_{PAC}|} \times 100. \quad (4.31b)$$

No próximo subitem será descrito o método CPHCS para sistemas com dois ou mais consumidores ligados a um barramento comum.

#### 4.2.2. Método CPHCS para mais de um consumidor

Nos sistemas elétricos de distribuição é comum encontrar alimentadores que fornecem energia a mais de um consumidor. Para que o método CPHCS seja utilizada

nestes casos, um modelo do equivalente de Thèvenin genérico foi desenvolvido, como mostrado na Figura 4.5.

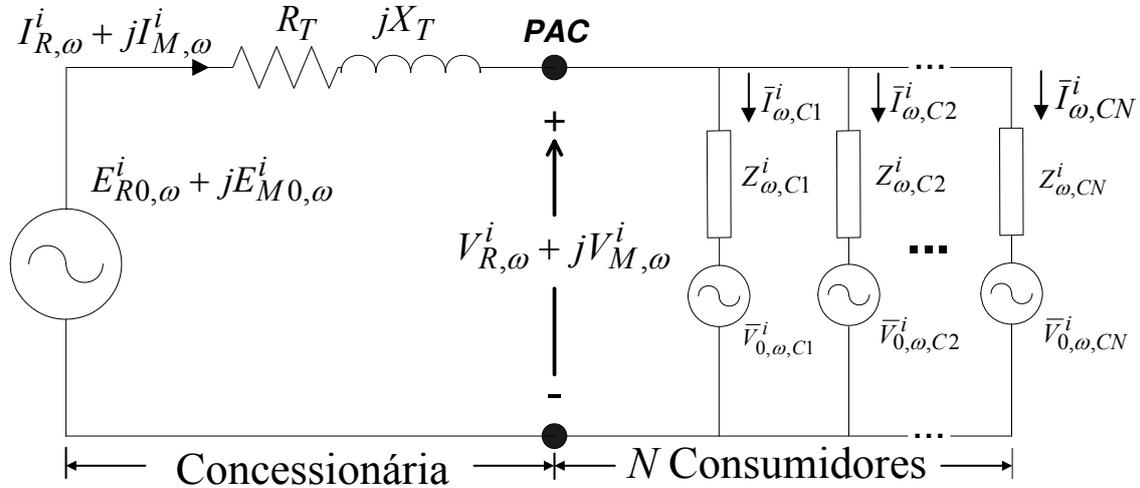


Figura 4.5 – Modelo equivalente de Thèvenin para o sistema elétrico com  $N$  cargas conectadas.

Na figura acima os parâmetros dos consumidores obedecem às relações:

$$\bar{I}_{\omega,Cn}^i = I_{R,\omega,Cn}^i + jI_{M,\omega,Cn}^i, \quad (4.32a)$$

$$Z_{\omega,Cn}^i = R_{\omega,Cn}^i + jX_{\omega,Cn}^i, \quad (4.32b)$$

$$\bar{V}_{0,\omega,Cn}^i = V_{R0,\omega,Cn}^i + jV_{M0,\omega,Cn}^i, \quad (4.32c)$$

onde  $n$  representa o número do usuário.

Na aplicação do novo modelo equivalente (Figura 4.5) para várias unidades consumidoras (cargas), algumas alterações foram feitas ao método original CPHCS. As alterações ocorrem no arranjo das medições, nas quantidades de sinais a serem processados e no cálculo da contribuição. O cálculo da contribuição utilizará as equações referentes ao novo modelo. Para a realização das medições, isto é, aquisição dos sinais, será necessária a aquisição das formas de ondas das correntes trifásicas para todos os usuários do barramento. A medição da tensão será feita no próprio barramento, pois é comum a todos os usuários. Como exemplo, para se estimar a contribuição de dois consumidores torna-se necessário adquirir seis sinais de corrente (três para cada usuário) e três de tensão no barramento. O tempo de processamento será aumentado de acordo com a quantidade de sinais processados. As equações referidas ao modelo da Figura 4.5 estão denominadas de acordo com a quantidade de

usuários. No Apêndice C estão descritas com detalhes as equações de contribuição para um sistema com dois consumidores.

### 4.3 Estrutura Final do Software

A partir dos métodos descritos anteriormente, foi possível formular as etapas do software desenvolvido. A rotina do software foi elaborada de forma a permitir uma melhor eficiência no tempo de processamento dos dados, sendo possível, também, processar os dados para o caso de um ou mais consumidores ligados ao mesmo barramento. Na Figura 4.6 são mostradas, de forma esquematizada, as etapas da rotina desde a captação dos sinais medidos no PAC (tensão e corrente), até os resultados finais do cálculo percentual da contribuição harmônica, referente a concessionária e ao consumidor.

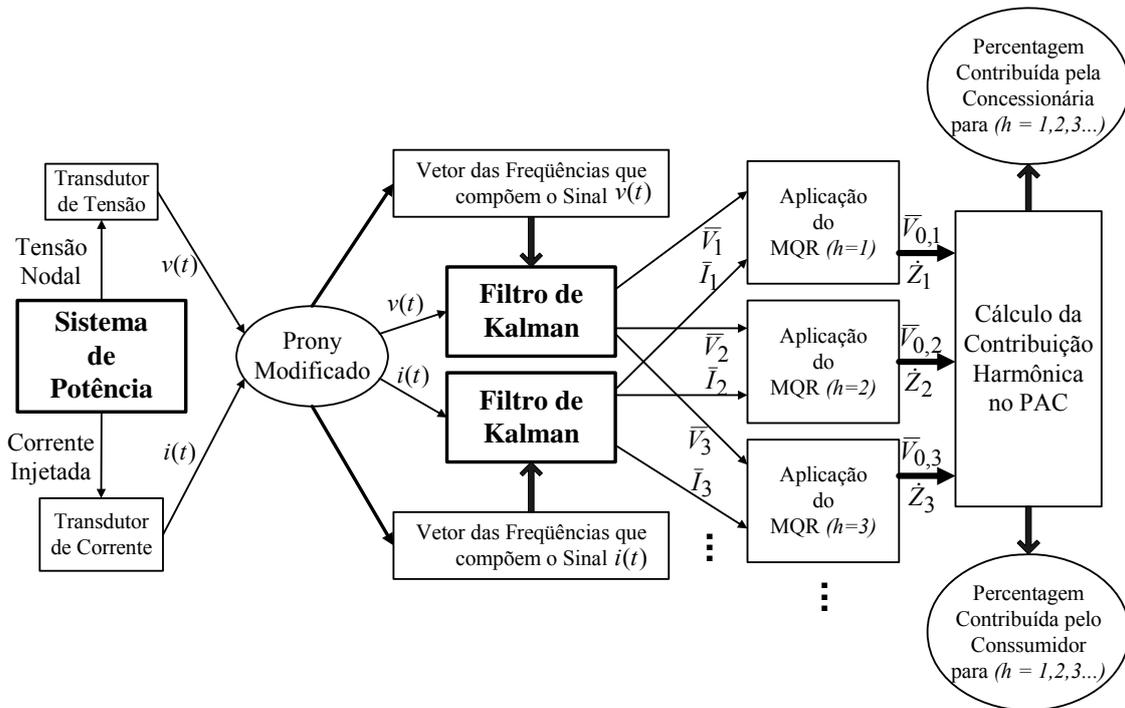


Figura 4.6 – Esquema da rotina do CPHCS.

O software foi desenvolvido com capacidade de realizar as seguintes etapas, utilizando a parte real e imaginária das equações (4.29).

1. Ser alimentado com os sinais trifásicos de tensão  $v(t)$  e de corrente  $i(t)$  medidos no PAC do sistema elétrico de potência.

2. Estimar as frequências presentes nos sinais  $v(t)$  e  $i(t)$  medidos utilizando o método de Prony Modificado, o qual irá fornecer os vetores de frequência de tensão e corrente para a próxima etapa;
3. Estimar os fasores retangulares da tensão e da corrente medidos, onde estes fasores serão fornecidos em componentes de seqüência, utilizando o filtro de Kalman. Para realizar esta estimativa, o filtro de Kalman necessita dos vetores de frequência da etapa anterior;
4. Estimar, utilizando o método dos MQR, os parâmetros da impedância e da fonte de tensão harmônica equivalente da carga. Para esta estimação, devem ser utilizados os fasores da tensão e da corrente para cada frequência harmônica que se deseja analisar. É importante ressaltar que os parâmetros da unidade ou unidades consumidoras serão fornecidos em componentes de seqüência positiva, negativa e zero.
5. Calcular a percentagem de contribuição harmônica de tensão advindas da concessionária e da unidade consumidora. Para isto, utilizam-se as equações correspondentes para uma ou mais unidades consumidoras conectadas ao mesmo barramento, onde os modelos estão representados, respectivamente, nas Figuras 4.4 e 4.5. Os resultados das percentagens serão fornecidos em componentes de seqüência.

#### **4.4 Validação do Método Desenvolvido**

A validação do método CPHCS foi feita através de simulações de sistemas elétricos sintéticos com valores predefinidos. O método foi desenvolvido no ambiente Matlab® e para verificar sua eficácia, foram testadas em separado algumas partes importantes que compõem o programa.

##### **4.4.1. Testes aplicados ao estimador de parâmetros da carga**

Algumas simulações de circuitos no Simulink do Matlab® foram realizadas. As simulações visaram a validação da primeira parte do software composta por Pony Modificado, filtro de Kalman e o MQR. Nas simulações, atribuiu-se valores conhecidos para as impedâncias e fontes de tensão do modelo mostradas da Figura 4.3. Estas simulações serviram para determinar a exatidão do método referente à primeira

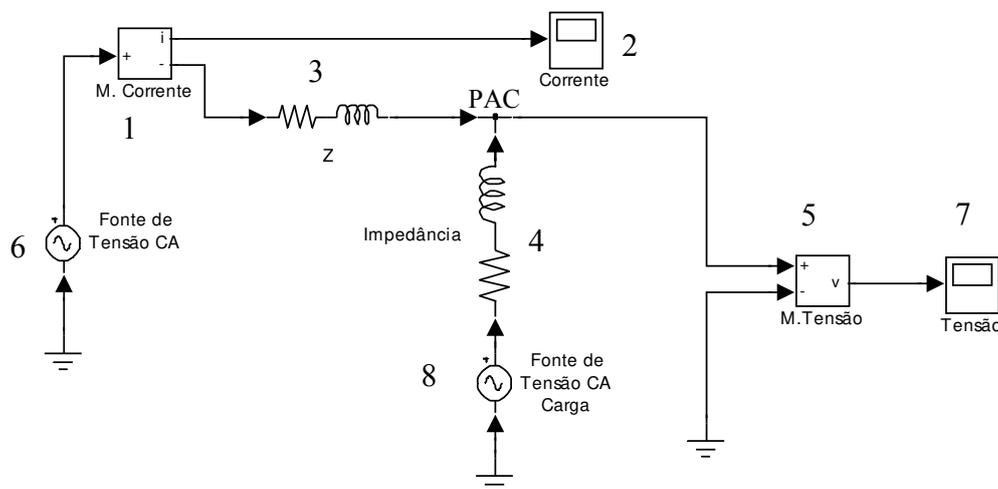
etapa de programas. O Simulink do Matlab® é uma ferramenta computacional que permite obter as formas de onda de tensão e corrente em qualquer parte do circuito simulado, desde que sejam previamente conhecidos os parâmetros referentes ao circuito. Este ambiente de programação facilita, a princípio, a obtenção dos sinais de tensão e corrente. O Simulink também facilita as possíveis modificações do circuito ou mesmo nos pontos onde se deseja realizar as medições. Algumas funções básicas dos componentes do Simulink estão descritas na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 - Legenda do circuito montado no Simulink e sua função**

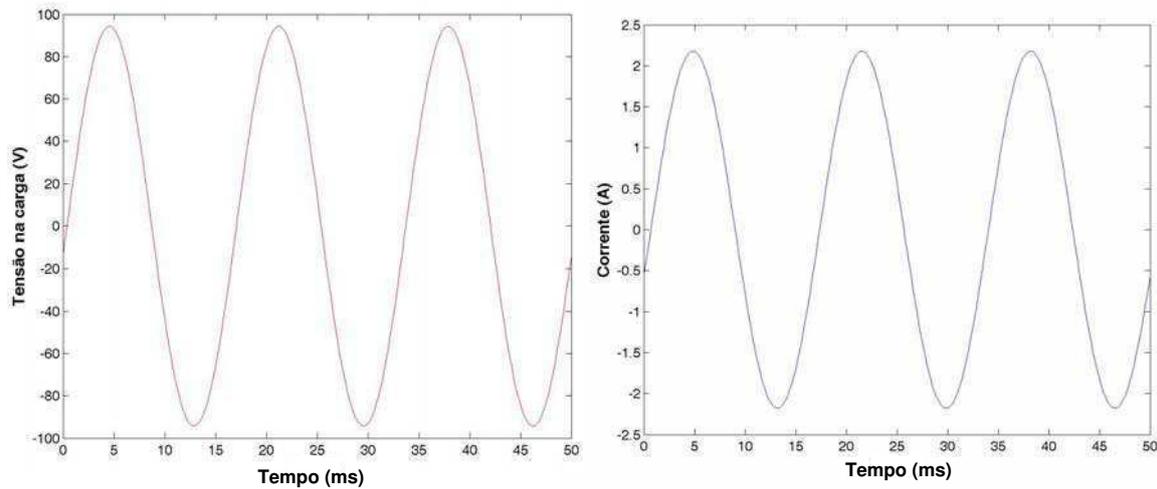
Nº	NOME	FUNÇÃO
1	Medidor de corrente	Medição de corrente entregue pela fonte
2 e 7	Osciloscópio	Mostra a forma de onda e permite armazenar a mesma
3	Z	Impedância equivalente para a concessionária
4	Impedância	Impedância ( $Z=R+jX$ ) que será estimada pelo o método
5	Medidor de tensão	Serve para captar a forma de onda da tensão que será medida
6	Fonte de tensão CA	Fonte do sinal senoidal de 60 Hz e amplitude 100 Volts
8	Fonte de tensão CA	Fonte de tensão harmônica da carga.

#### - Caso 1:

A Figura 4.7 mostra o esquema do circuito construído para a obtenção dos sinais de tensão e corrente. Os significados dos algarismos vizinhos aos componentes estão na Tabela 4.1. O Simulink do Matlab® foi usado para obter as formas de onda de tensão e da corrente. Na Figura 4.8 são mostradas os sinais de tensão e corrente na frequência de 60 Hz, puro. Para uma melhor visualização, os sinais de tensão e corrente são mostrados até 50 ms, o qual não corresponde ao tempo total de simulação, que foi de 600 ms. Os sinais de tensão e correntes gerados são compostos por 3000 pontos e possuem um período de amostragem de 200  $\mu$ s.



**Figura 4.7 - Representação no Simulink do circuito equivalente do sistema.**



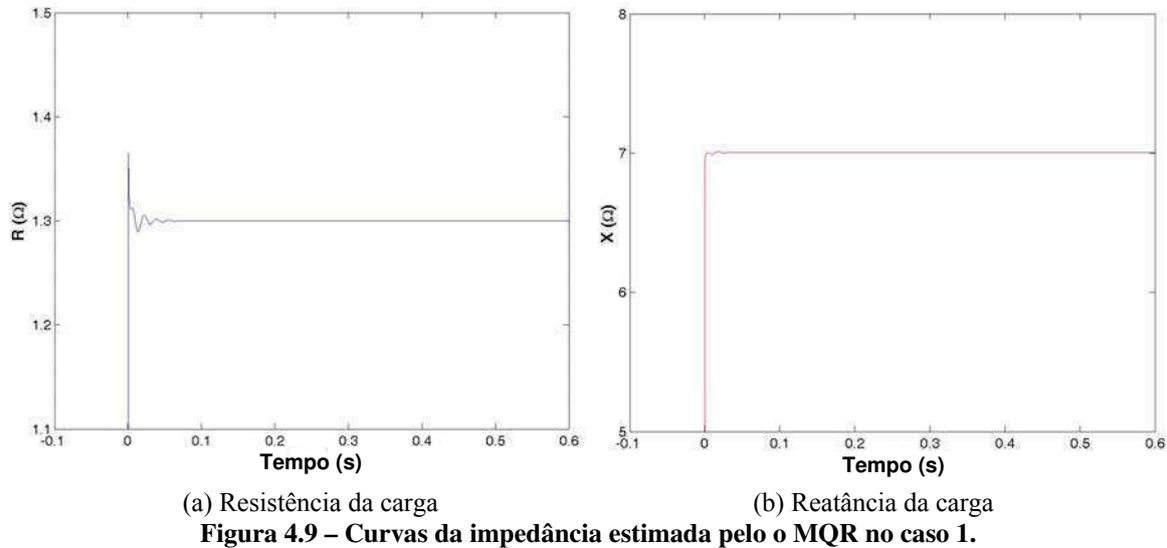
(a) Tensão na carga

(b) Corrente na carga

**Figura 4.8 – Formas de onda de tensão e corrente obtidos no Simulink.**

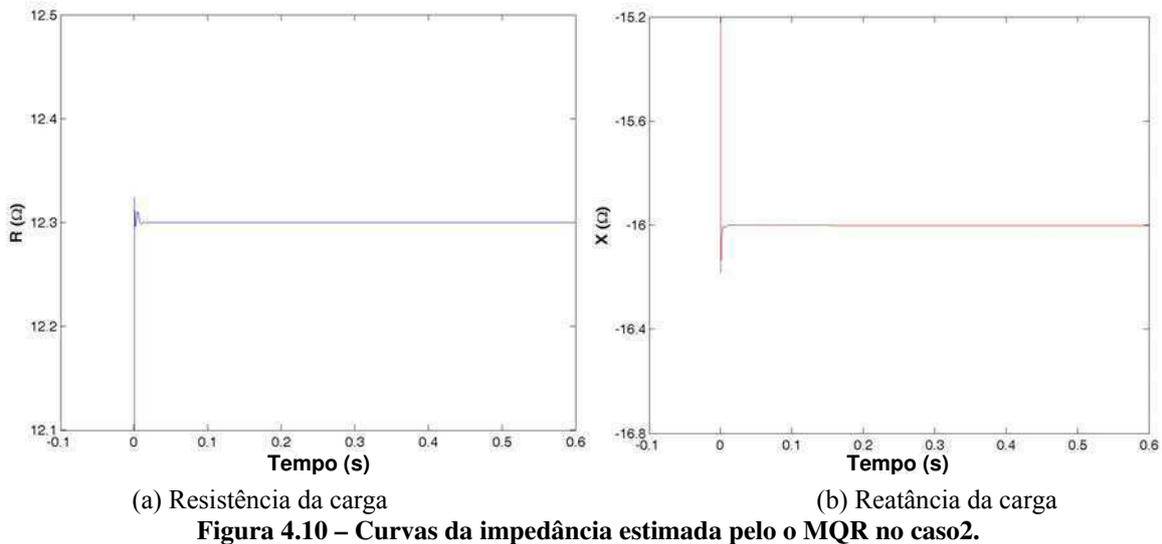
A impedância equivalente para a concessionária é representada no circuito pelo componente 3, e seu valor é  $0,15 + j0,3$ . A impedância equivalente para a unidade consumidora é representada no circuito pelo componente 4, e seu valor é  $1,3 + j7$ . A reatância  $X$  do circuito foi fornecida de acordo com seu aspecto indutivo (positivo) ou capacitivo (negativo). Portanto, para reatância positiva, a indutância do circuito foi fornecida em Henrys, já para o caso de reatância negativa a capacitância foi fornecida em Faradays. Assim, os valores utilizados foram  $18,58 \text{ mH}$  e  $1,3 \Omega$ , para a indutância e resistência, respectivamente. Esses valores foram utilizados na simulação.

Os sinais de tensão e de corrente obtidos foram utilizados como dados de entrada para a rotina do método MQR. As curvas mostradas na Figura 4.9 representam a estimação dos valores de  $R$  e  $X$ , obtidas na saída da rotina dos MQR. O resultado da estimação de  $R$  e  $X$  utilizando o método do MQR evidencia sua exatidão, ( $Z = 1,3 + j7$ ).



### - Caso 2:

No Caso 2 se estima uma carga com característica capacitiva. Ele utiliza o mesmo arranjo do circuito anterior, mas com a impedância de carga igual  $12,3 - j16$ . A análise para este caso também foi realizada para 60 Hz puro. O valor da capacitância calculado e utilizado foi  $165,78 \mu F$ . As curvas mostradas na Figura 4.10 representam a estimação dos valores de  $R$  e  $X$ , pelo o MQR. A rotina implementada utilizando o método MQR também forneceu o resultado correto, para a impedância de carga capacitiva, ( $Z = 12,3 - j16$ ).



#### 4.4.2. Testes para o método CPHCS

Para validação do método CPHCS foram realizadas simulações, adotando-se o modelo das Figuras 3.2 e 4.4. Para a simulação foram consideradas as contribuições harmônicas advindas do consumidor e da concessionária. A seguir serão apresentados

os resultados para uma estimacão referente à contribuico da fundamental e dos componentes harmônicos de quinta e sétima ordens.

### - Caso 3:

O Caso 3 exemplifica um sistema fictício composto pela concessionária e pelo consumidor, em que os valores dos seus parâmetros estão apresentados na Tabela 4.2. Os circuitos para a obteno dos sinais de corrente e tensão no PAC estão mostrados nas Figuras 3.2 e 4.4, respectivamente e as equacões (3.4) e (4.29) foram utilizadas para realizar simulaes no Matlab®. Para a validao do método serão utilizadas impedâncias lineares e fontes não-lineares.

**Tabela 4.2 - Dados da Concessionária e do Consumidor para simulao no Matlab®.**

DADOS DA CONCESSIONÁRIA			
$f$ (Hz)	Impedância	Fonte de tensão	Contribuio no PAC  V
60	$10+j5 \Omega$	$200,00 + j0,00$ Volts	135,282 Volts
300	$10+j25 \Omega$	$0,10 + j0,20$ Volts	0,157 Volts
420	$10+j35 \Omega$	$0,05 + j0,02$ Volts	0,038 Volts
DADOS DA UNIDADE CONSUMIDORA			
$f$ (Hz)	Impedância	Fonte de tensão	Contribuio no PAC  V
60	$20+j12 \Omega$	$0,2 + j0,3$ Volts	0,117 Volts
300	$20+j60 \Omega$	$5,0 + j6,0$ Volts	2,333 Volts
420	$20+j84 \Omega$	$3,0 + j5,0$ Volts	1,729 Volts

Neste caso, como se deseja obter uma forma de onda composta por três freqncias diferentes (60, 300 e 420 Hz), as equacões (3.4) e (4.29) foram adotadas para cada freqncia, obtendo-se assim, três fasores retangulares para tensão e três para corrente. O módulo e o ângulo de fase dos fasores foram aplicados como parâmetros dos sinais senoidais, como expresso na equaco (4.32).

$$A \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot f + \theta), \quad (4.32)$$

onde  $A$  é o módulo dos fasores,  $\theta$  o ângulo de fase e  $f$  a freqncia que está sendo analisada. Ao substituir os fasores e a freqncia em (4.32), foram gerados, no ambiente Matlab®, três sinais de tensão e três de corrente, como mostrado na Figura 4.11.

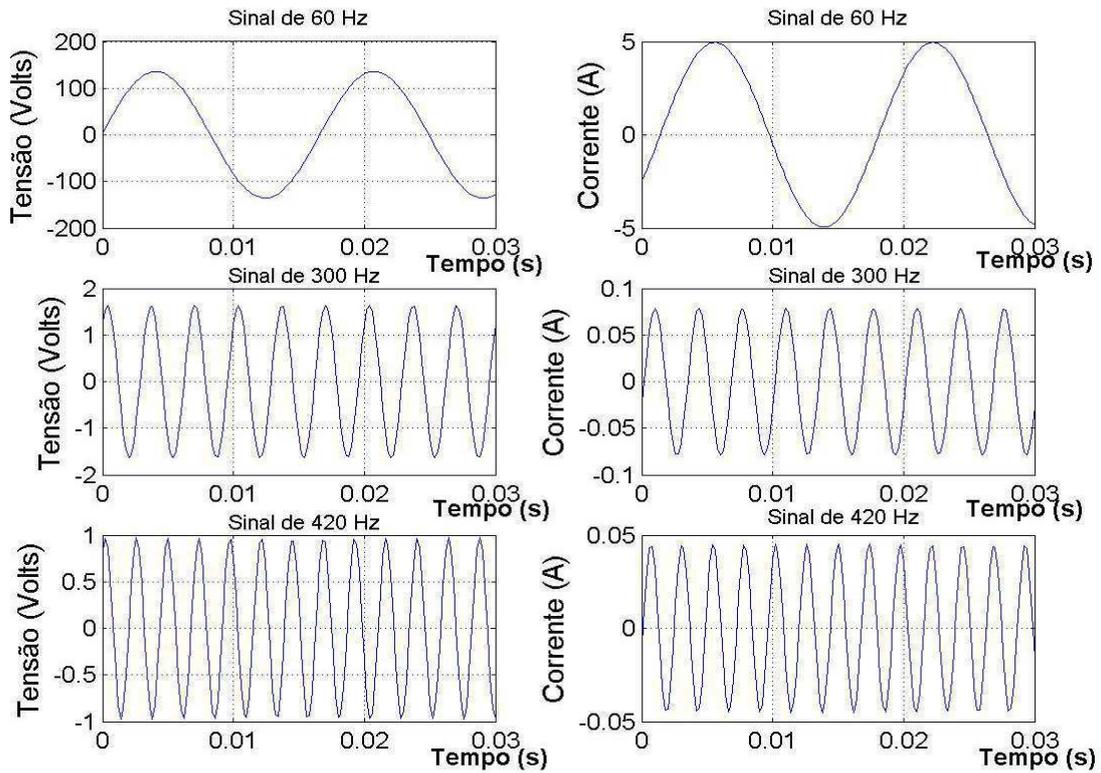


Figura 4.11 – Sinais de tensão e corrente para cada frequência a ser analisada.

As formas de onda da tensão com frequências diferentes são somadas, resultando em uma forma de onda de tensão com uma fundamental e suas duas componentes harmônicas. Do mesmo modo, a forma de onda da corrente foi obtida, sendo composta também pela sua fundamental e suas duas componentes harmônicas. A rotina foi desenvolvida para que as formas de onda da tensão e da corrente geradas sejam compostas por 5000 amostras, com um período de amostragem de  $200 \mu s$ , e estão apresentados até  $40 ms$ , na Figura 4.12.

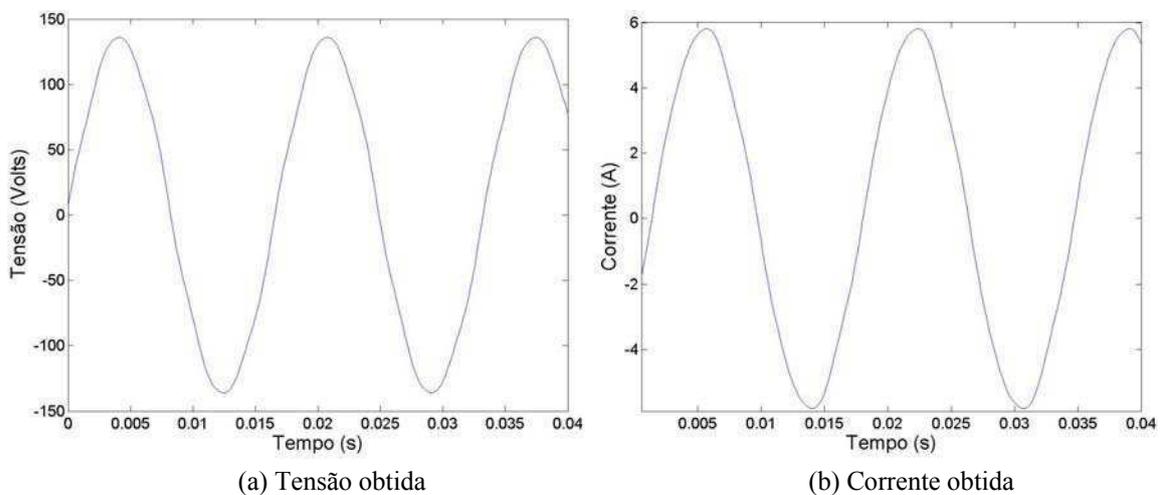
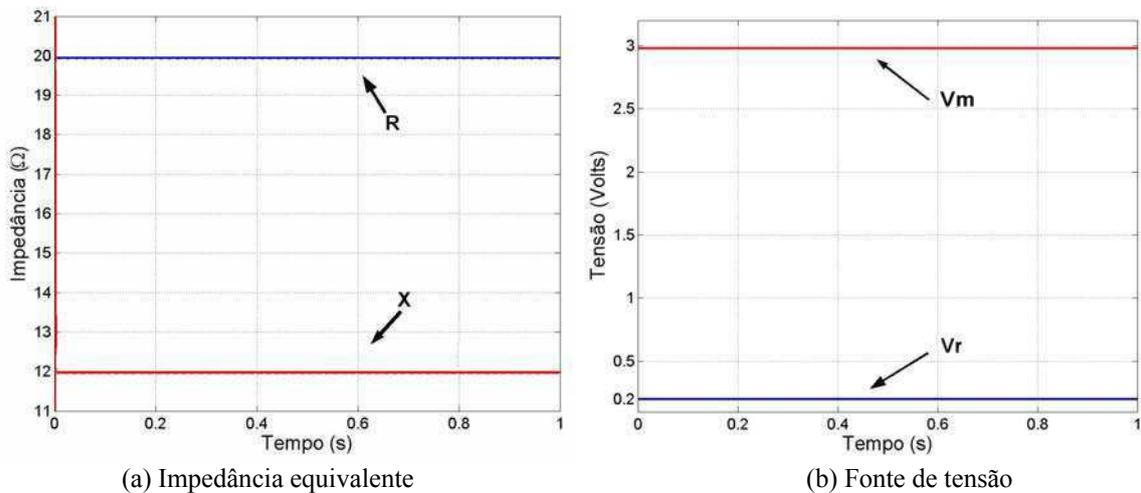
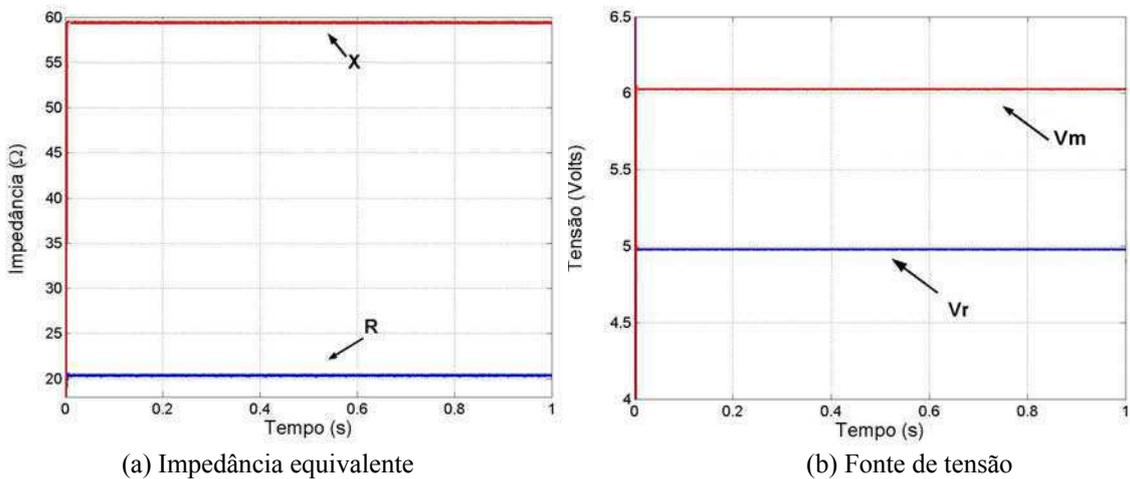


Figura 4.12 – Formas de onda da tensão e da corrente obtidas para o PAC do circuito sintético.

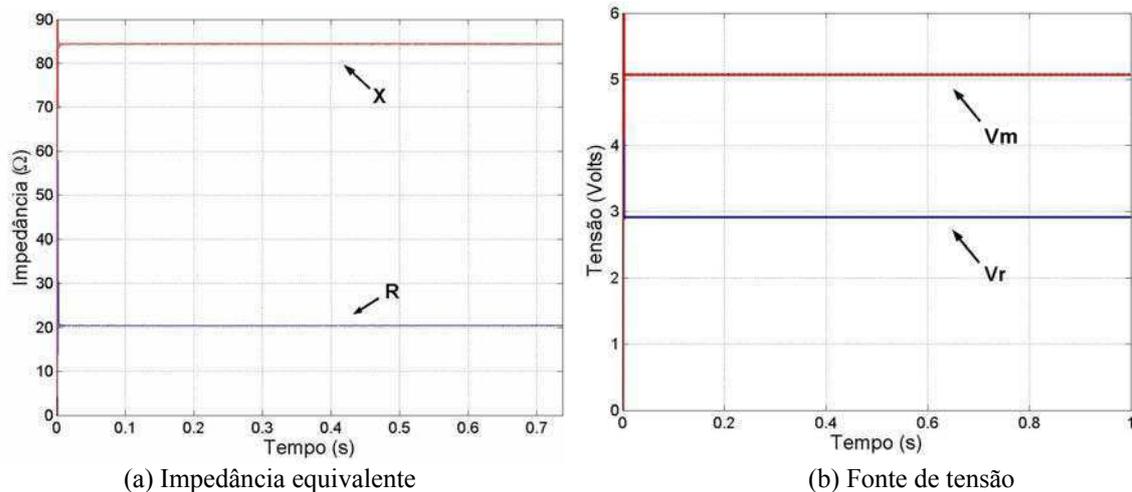
As formas de onda resultantes, Figura 4.12, foram aplicadas ao método do CPHCS para uma fase e para as frequências de 60, 300 e 420 Hz, considerando-se que a fundamental dos sinais era de 60 Hz. A estimação dos parâmetros referentes ao consumidor, para cada frequência analisada, são mostradas nas Figuras 4.13 a 4.15. Os resultados da estimação pelo método CPHCS se mostraram precisos ao se comparar com os valores utilizados inicialmente, Tabela 4.2. Nas figuras,  $R$  e  $X$  representam a resistência e a reatância;  $V_r$  e  $V_m$  representam a parte real e imaginária da fonte de tensão do consumidor.



**Figura 4.13 – Resultados da estimação dos parâmetros do consumidor para frequência fundamental de 60 Hz.**

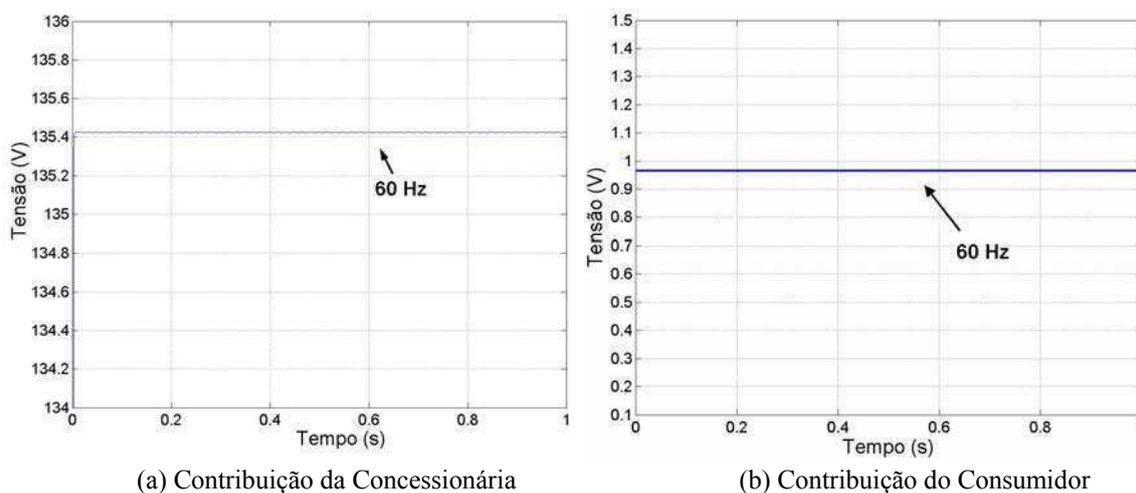


**Figura 4.14 – Resultados da estimação dos parâmetros do consumidor para frequência de 300 Hz (5º harmônico).**

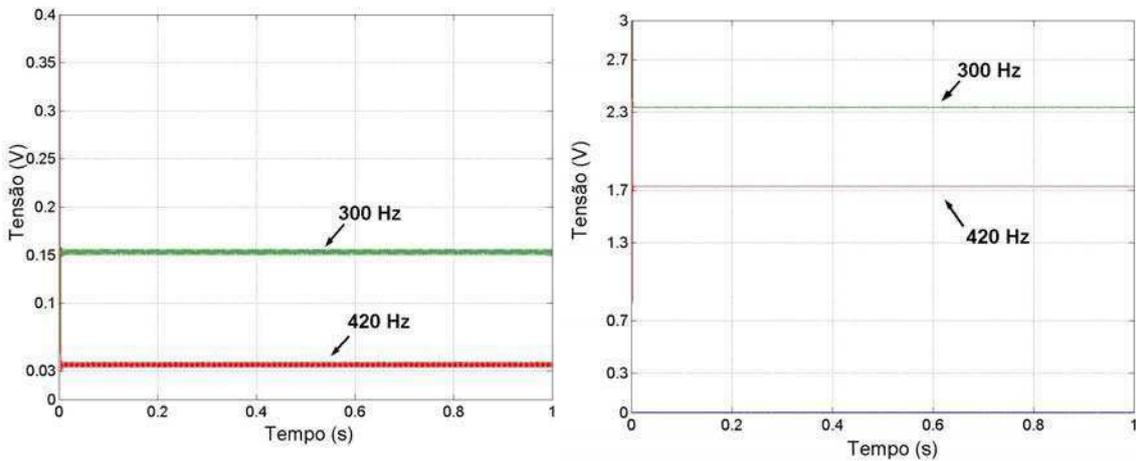


**Figura 4.15 – Resultados da estimação dos parâmetros do consumidor para frequência de 420 Hz (7º harmônico).**

As contribuições harmônicas da tensão no PAC para a concessionária e o consumidor são apresentadas nas Figuras 4.16 e 4.17. Os resultados para a frequência fundamental (60 Hz) se mostraram precisos, pois a contribuição de tensão advinda da concessionária prevaleceu sobre a do consumidor e se aproximou bastante dos valores teóricos, Tabela 4.2. Na análise dos resultados para as frequências de 300 e 420 Hz, prevaleceu a contribuição advinda do consumidor, como também era esperado. Concluindo-se que os resultados validam o método do CPHCS.



**Figura 4.16 – Resultado do módulo da contribuição harmônica no PAC para frequência fundamental de 60 Hz.**



(a) Contribuição da Concessionária

(b) Contribuição do Consumidor

**Figura 4.17 – Resultado do módulo da contribuição harmônica no PAC para as frequências de 300 Hz e 420 Hz.**

Na Tabela 4.3 é apresentado o resumo dos resultados da simulação para o Caso 3. Observa-se na tabela que as impedâncias da concessionária não foram estimadas, já que seus valores absolutos serão utilizados para estimar as contribuições harmônicas pela equação (4.29) e para a estimação da fonte de tensão da concessionária pela equação (4.33).

$$E_{R0,\omega}^i + jE_{M0,\omega}^i = (I_{R,\omega}^i + jI_{M,\omega}^i) \cdot (R_T + jX_T) + (V_{R,\omega}^i + jV_{M,\omega}^i). \quad (4.33)$$

**Tabela 4.3 - Resultados da simulação do sistema hipotético.**

RESULTADOS PARA CONCESSIONÁRIA						
	Impedância (Ω)		Fonte de tensão (Volts)		Contribuição no PAC  V	
f (Hz)	Valor Exato	Estimado	Valor Exato	Estimado	Valor Exato	Estimado
60	10+j5	—	200,00 + j0,00	199,97 + j0,00	135,282 Volts	135,439 Volts
300	10+j25	—	0,10 + j0,20	0,09 + j0,19	0,157 Volts	0,152 Volts
420	10+j35	—	0,05 + j0,02	0,05 + j0,02	0,038 Volts	0,031 Volts
RESULTADOS PARA UNIDADE CONSUMIDORA						
	Impedância (Ω)		Fonte de tensão (Volts)		Contribuição no PAC  V	
f (Hz)	Valor Exato	Estimado	Valor Exato	Estimado	Valor Exato	Estimado
60	20+j12	19,89+j12,18	0,2 + j3	0,19+j2,94	0,975 Volts	0,956 Volts
300	20+j60	20,08+j59,87	5,0 + j6,0	4,92+j6,26	2,333 Volts	2,381 Volts
420	20+j84	20,01+j83,92	3,0 + j5,0	2,90+j5,12	1,729 Volts	1,746 Volts

Após a validação do método CPHCS para diversas simulações, o software desenvolvido foi aplicado às medições realizadas em sistemas elétricos reais. No próximo capítulo serão mostrados os resultados para casos com um e dois consumidores ligados a barramentos comuns.

## Capítulo 5

### ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O método desenvolvido foi aplicado a dois casos reais de sistemas elétricos, onde seus resultados serão apresentados neste capítulo. No primeiro caso, os resultados do percentual da contribuição harmônica de tensão no PAC para uma unidade consumidora, a qual tem alimentação exclusiva foi analisada. Para o segundo caso, o método foi aplicado a um sistema composto por dois consumidores que são alimentados por um mesmo barramento.

#### 5.1 Caso 4 – Consumidor Exclusivo

O Caso 4 é caracterizado pela estimação da contribuição harmônica trifásica da concessionária e de um único consumidor. Os sinais medidos no alimentador que fornece energia a uma planta industrial, responsável pela fabricação de cervejas e refrigerante, foram utilizados para estimação da contribuição harmônica trifásica. O esquema de aquisição dos sinais se encontra na Figura 4.2 e o método adotado no item 4.2 deste trabalho. Para este caso, foram utilizados os dados fornecidos pela concessionária referente à impedância dos cabos de alimentação e do transformador da subestação. A impedância do cabo 336,4 MCM de 1,41 km é de  $R_0 = 0,19315$ ,  $X_0 = 1,08987$  Ohms/km para seqüência zero e  $R_1 = 0,09986$ ,  $X_1 = 0,19448$  Ohms/km para seqüência positiva e negativa. Para os dois transformadores dispostos em paralelo utilizou-se uma impedância de 6,45%. Amostras das formas de onda de tensão e corrente adquiridas na subestação estão apresentadas nas Figuras 5.1 e 5.2.

Na subestação da concessionária, ponto inicial do alimentador da planta industrial, a potência nominal é 25 MVA. Os sinais de tensão e corrente foram adquiridos no lado da baixa tensão de um transformador de 69 kV para 13,8 kV. Para tanto, foram utilizados os instrumentos de medição/proteção. A relação de transformação do TP é de 120, e a relação de transformação do TC é de 160. A

aquisição dos sinais foi realizada por um período de aproximadamente oito dias. Os sinais adquiridos são compostos por 5000 amostras com um período de amostragem de  $200 \mu s$ , as amostras foram coletadas em intervalos de 10 min.

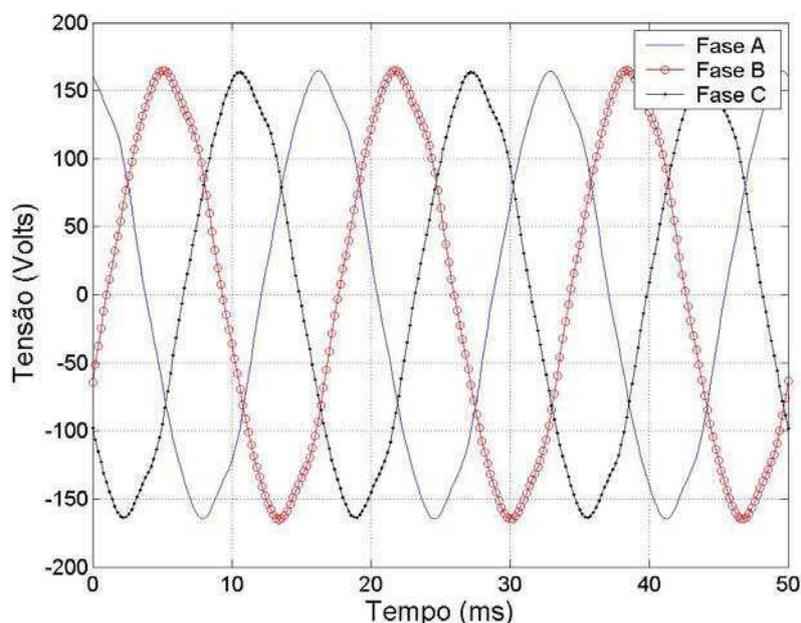


Figura 5.2 – Forma de onda da tensão trifásica medida nos terminais do TP da subestação.

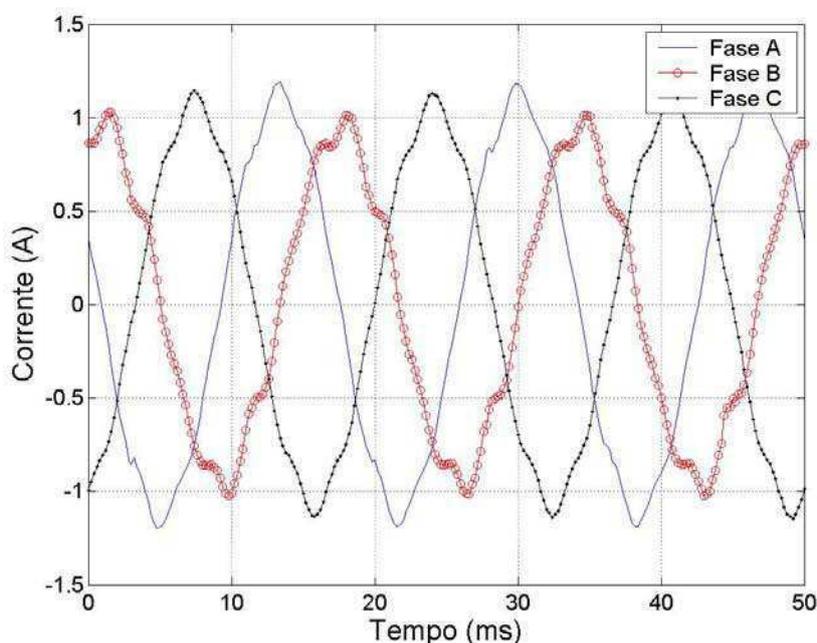


Figura 5.3 – Forma de onda da corrente trifásica medida nos terminais do TC da subestação.

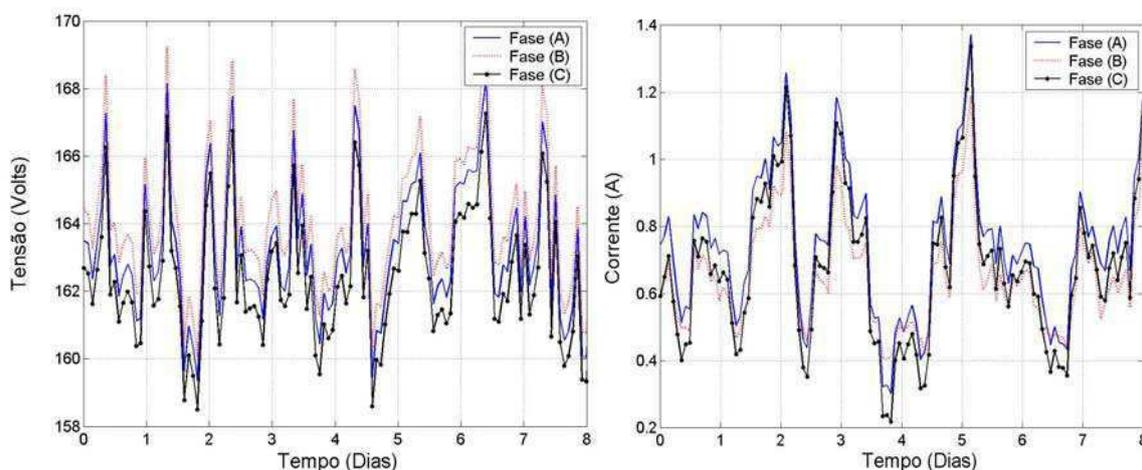
Os sinais adquiridos alimentaram o software CPHCS iniciando-se pelo método de Prony Modificado. Como resultado, na Tabela 5.1 são mostradas, em destaque, as frequências fundamental e seus componentes harmônicos. Também podem ser vistos os valores das frequências dos componentes inter-harmônicos, os quais não foram dados

destaque na tabela. Na tabela as tensões por fase foram representadas por Va, Vb e Vc; e as correntes por Ia, Ib e Ic.

**Tabela 5.1 - Frequências estimadas nas tensões e correntes da unidade consumidora.**

FREQUÊNCIAS EM Hz					
Va	Vb	Vc	Ia	Ib	Ic
60	60	57.488	60	60	43.848
120	120	60	63.023	70.666	46.389
180	180	120	68.989	72.788	58.158
240	240	180	74.673	120	60
297.47	295.58	240	120	180	64.427
300	298.43	294.82	180	181.88	71.019
360	300	298.22	181.53	183.72	120
418.37	304.45	300	185.02	184.26	180
420	305.35	301.6	240	240	181.11
480	360	305.36	298.13	300	183.62
540	420	360	300	302.76	240
600	480	420	302.18	360	297.05
660	540	480	360	415.09	298.58
-	600	540	420	420	300
-	660	600	422.54	480	345.35
-	-	660	480	538.62	360
-	-	-	537.44	539.02	420
-	-	-	539.12	540	421.21
-	-	-	540	600	480
-	-	-	600	660	540
-	-	-	660	-	584.38
-	-	-	-	-	600
-	-	-	-	-	660

Os sinais de tensão e corrente medidos no PAC (Figura 5.2 e 5.3), juntamente com espectro de frequências informados na Tabela 5.1, alimentaram a rotina de filtro de Kalman, dentro do software CPHCS. A saída da rotina de Kalman forneceu os fasores para cada forma de onda medida. Com os fasores determinados, é possível obter as amplitudes dos sinais das tensões e das correntes medidas, assim como, as amplitudes dos componentes harmônicos presentes nos sinais. As amplitudes da fundamental dos sinais de tensão e correntes adquiridos estão mostradas na Figura 5.4. Verifica-se na Figura 5.4 que existe um desbalanceamento entre as amplitudes das fases de corrente e de tensão, isso implica que as amplitudes dos componentes harmônicos também terão um desequilíbrio entre suas fases.



(a) Evolução do módulo da tensão

(b) Evolução do módulo da corrente

**Figura 5.4 – Evolução do módulo dos sinais trifásicos de tensão e corrente medido no PAC.**

Os estudos sobre componentes harmônicos apresentados no Capítulo 2 mostram que para cada frequência harmônica existe uma componente de seqüência correspondente e predominante (Tabela 2.1). Como neste caso ocorreu um desbalanceamento, poderão aparecer componentes de seqüências não predominantes e de baixas amplitudes em cada harmônico, para isso, devem-se considerar para análise apenas as componentes de seqüência predominantes para cada harmônico.

Na análise do percentual das contribuições entre concessionária e consumidor no PAC foram usados apenas os valores da frequência fundamental e dos seus harmônicos, que estão em destaque na Tabela 5.1. Os fasores determinados pelo Filtro de Kalman são utilizados nas próximas etapas do software, que tem a função de estimar os parâmetros do sistema e por fim fornecer os gráficos do percentual das contribuições do consumidor e da concessionária.

Para a análise da contribuição percentual de harmônicos de tensão no PAC, necessitou-se que os sinais de tensão e corrente fossem trifásicos e fornecessem os resultados dos cálculos em componentes de seqüência (zero, positiva e negativa). Isto se deveu porque as impedâncias do lado da concessionária foram fornecidas em componentes de seqüência. Nas Figuras 5.5 a 5.8 são mostrados as amplitudes das componentes de seqüência da tensão na frequência fundamental, quinto harmônico, sétimo harmônico e décimo primeiro harmônico. Em cada figura estão representadas as seqüências zero (Zero), positiva (+VE) e negativa (-VE). Foram selecionados os componentes harmônicos de quinta, sétima e décima primeira ordem por possuírem valores de amplitude de tensão relevantes ao estudo.

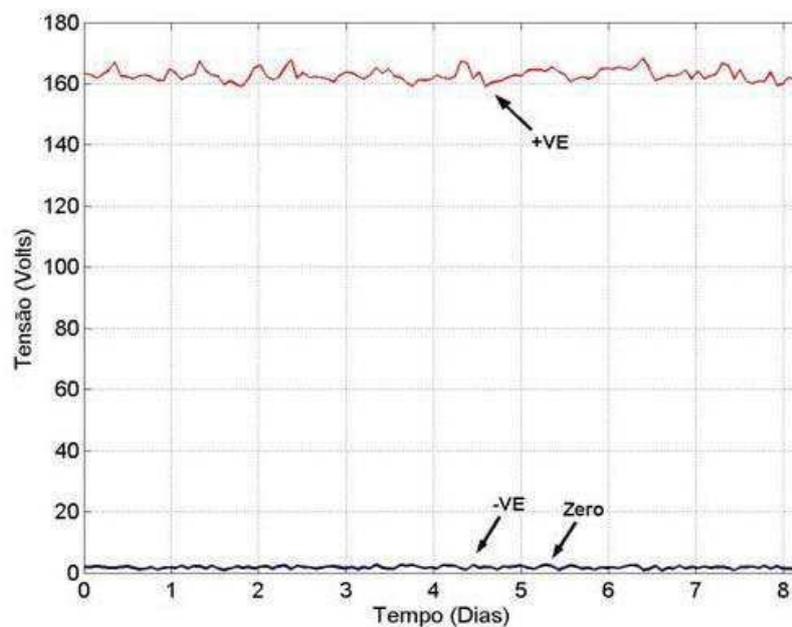


Figura 5.5 - Evolução da amplitude da fundamental de tensão.

Na Figura 5.5 é mostrada a componente de seqüência positiva, que prevalece para a frequência fundamental, sendo assim, esta informação será utilizada na análise do percentual da contribuição harmônica da concessionária e do consumidor no PAC.

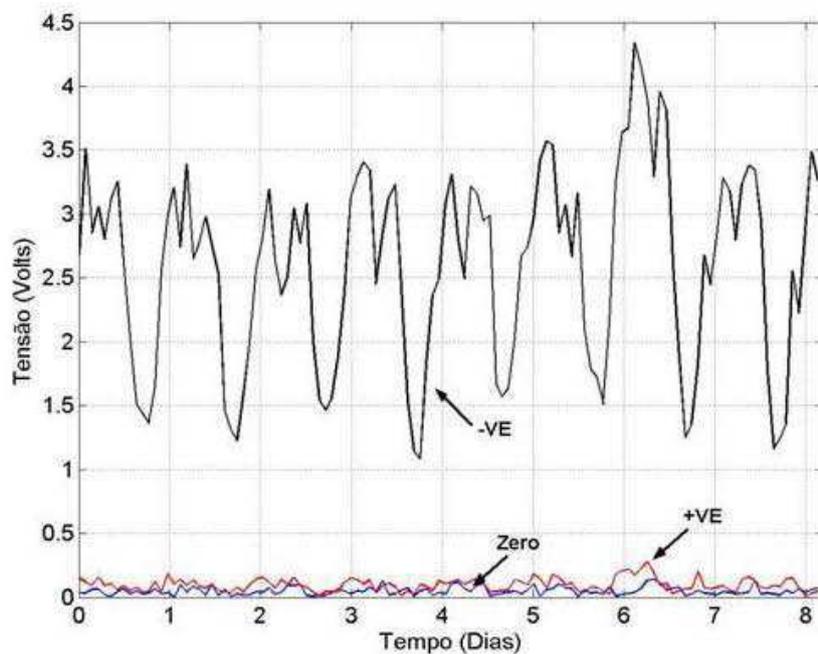


Figura 5.6 - Evolução da amplitude do 5º harmônico da tensão.

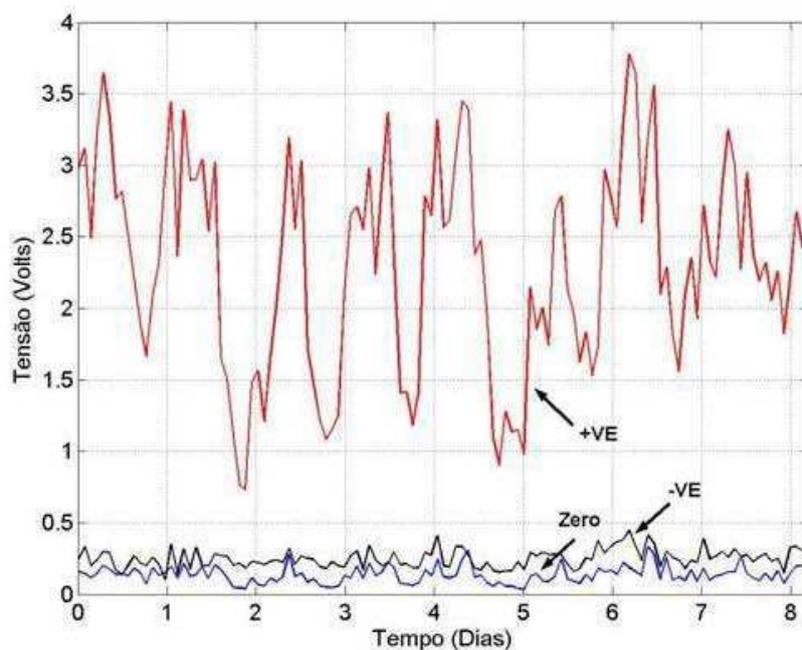


Figura 5.7 - Evolução da amplitude do 7º harmônico da tensão.

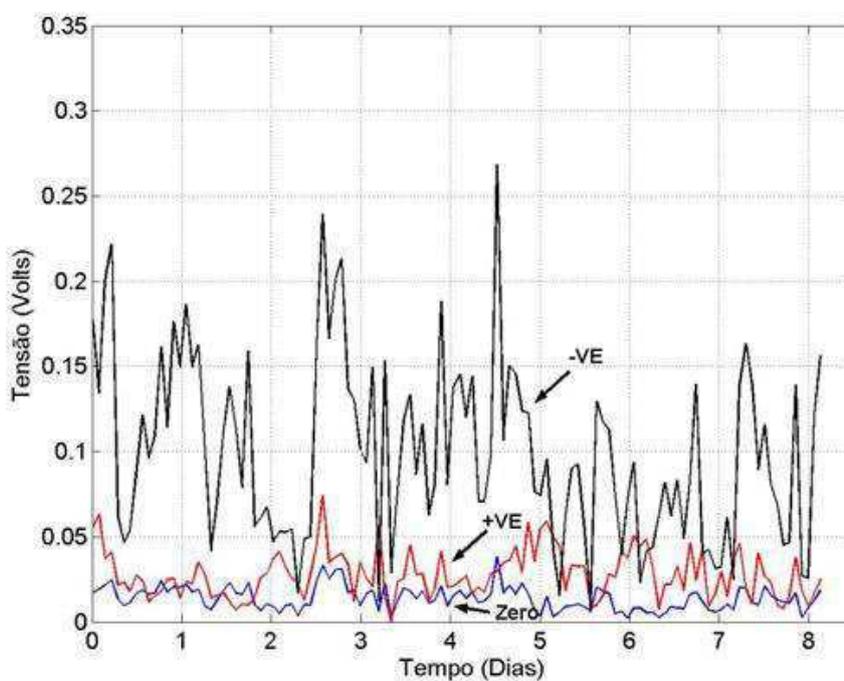


Figura 5.8 - Evolução da amplitude do 11º harmônico da tensão.

Como esperado, as componentes de seqüência correspondentes aos componentes harmônicos de quinta e décima primeira ordem foram de predominância negativa, conforme estão mostradas nas Figuras 5.6 e 5.8, respectivamente. Já para a sétima ordem harmônica, a componente de seqüência positiva foi mais relevante, como se observa na Figura 5.7. Da mesma análise da fundamental, estas informações serão

utilizadas na análise do percentual da contribuição harmônica da concessionária e do consumidor no PAC.

As percentagens da contribuição são fornecidas de acordo com a evolução das componentes de seqüência, para o período de tempo em que as medições foram realizadas. Para cada componente harmônico deve ser considerada a sua componente de seqüência correspondente. A partir dos dados de impedância do sistema e se utilizado das equações 4.29 e 4.31, obteve-se as contribuições percentuais, da concessionária e da unidade consumidora para a fundamental e os componentes harmônicos relevantes. Os resultados das contribuições harmônicas de tensão no PAC são mostrados nas Figuras 5.9 e 5.10, tanto para a concessionária quanto para a unidade consumidora, respectivamente.

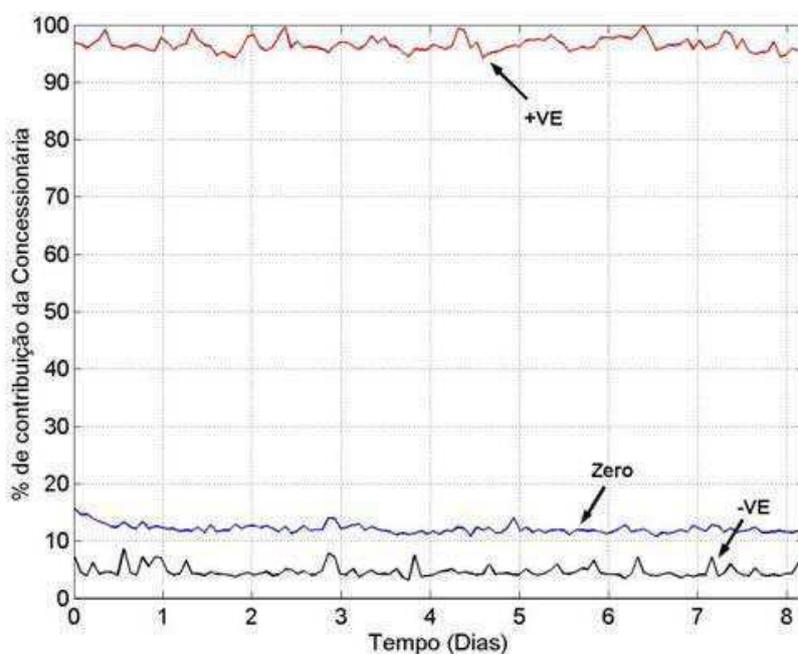


Figura 5.9 - Contribuição da concessionária para a fundamental da tensão.

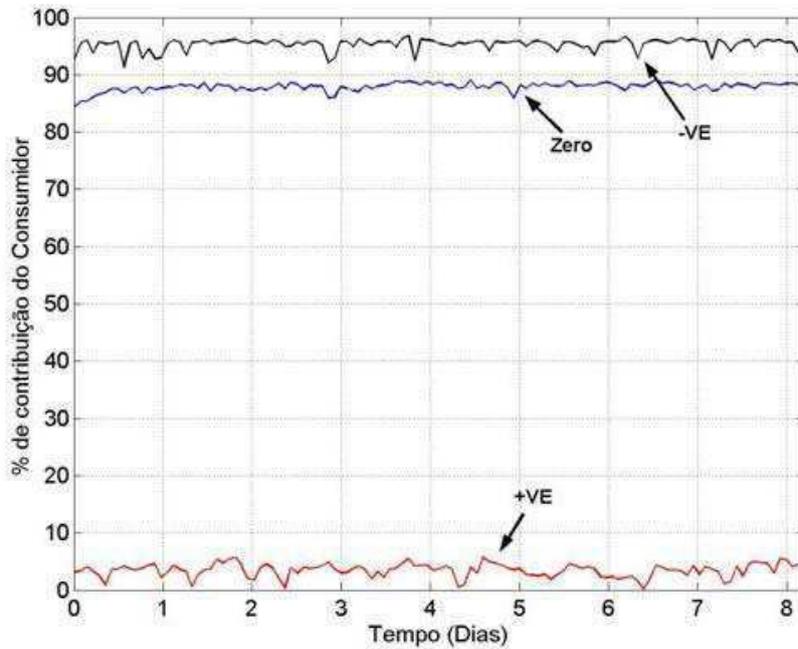


Figura 5.10 - Contribuição do consumidor para a fundamental da tensão.

Com relação à contribuição da concessionária e do consumidor na frequência da fundamental, verifica-se na Figura 5.9 que a contribuição da concessionária é predominante na seqüência positiva. Já o consumidor tem participação quase nula para esta componente, como pode ser visto na Figura 5.10.

A seguir são mostradas as Figuras 5.11 a 5.13, as quais se referem às percentagens de contribuição do consumidor nas frequências de quinta, sétima e décima primeira ordem.

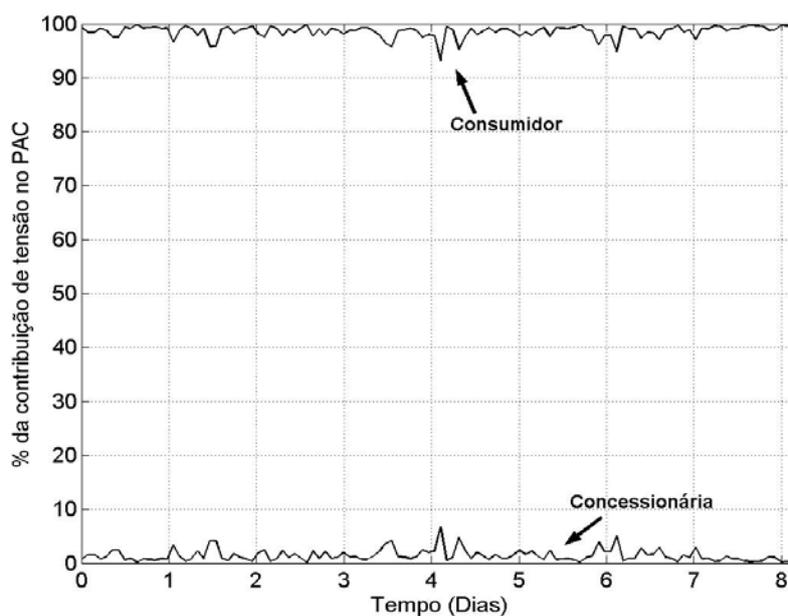


Figura 5.11 - Contribuição da seqüência negativa para o quinto harmônico no PAC.

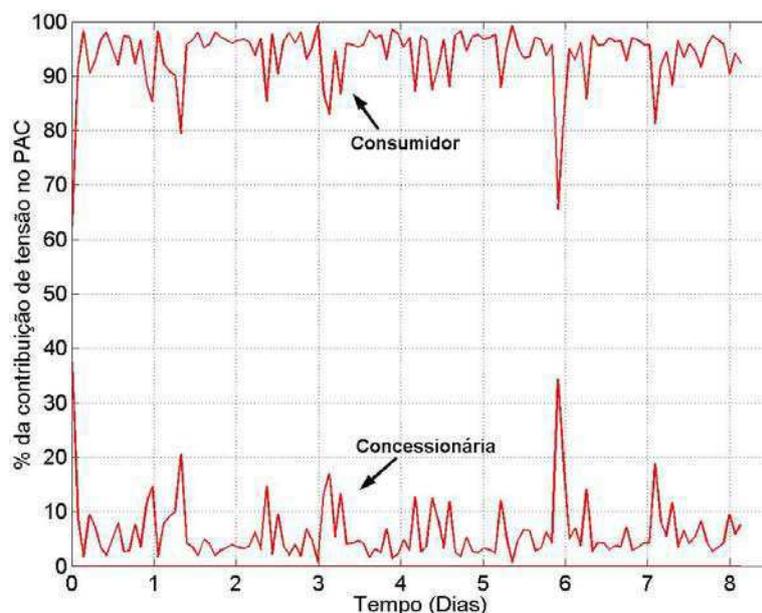


Figura 5.12 - Contribuição da seqüência positiva para o sétimo harmônico no PAC.

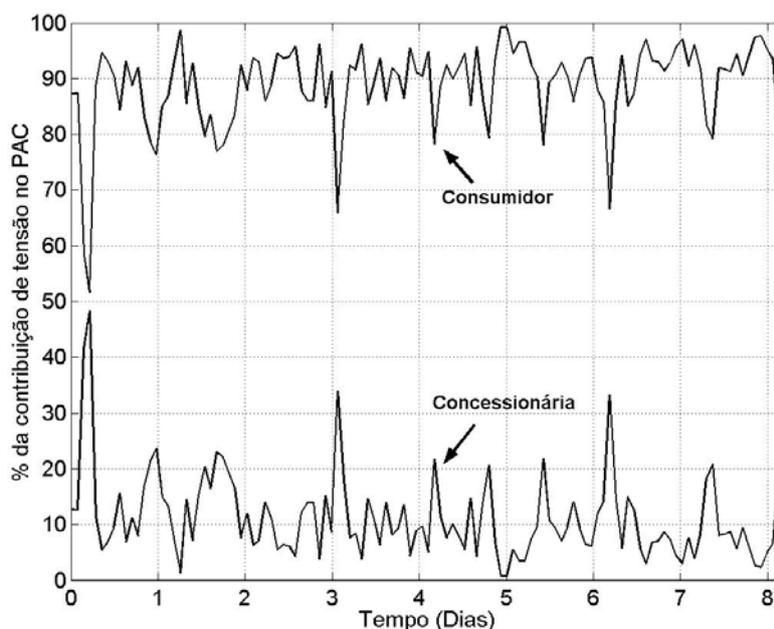


Figura 5.13 - Contribuição da seqüência negativa para o décimo primeiro harmônico no PAC.

Com relação à contribuição para o quinto harmônico, verificou-se um percentual elevado por parte da unidade consumidora na seqüência negativa. A contribuição da unidade consumidora para o sétimo harmônico de tensão é mostrado na Figura 5.12. Da figura pode-se concluir que a unidade consumidora é responsável pela maior parte do componente harmônico de sétima ordem.

Por fim, observa-se na Figura 5.13 que a percentagem de contribuição para a componente de seqüência negativa foi mais elevada para o consumidor do que para a concessionária. Desse modo, pode-se concluir que a planta industrial, responsável pela

fabricação de refrigerantes e cervejas, gera o maior percentual dos componentes harmônicos presentes nos sinais de tensão analisados.

## 5.2 Caso 5 – Dois Consumidores Ligados ao Mesmo Barramento

Os resultados da estimação das contribuições trifásicas da concessionária e de dois consumidores ligados ao mesmo barramento, com relação à distorção harmônica de tensão no PAC, serão apresentados nesta seção. Para se obter os resultados foram utilizados sinais de tensão e corrente medidos na subestação que alimenta as duas empresas.

Os sinais de tensão e corrente foram adquiridos no lado da baixa tensão de um transformador de 138 kV para 69 kV. Para tanto, foram utilizados os instrumentos de medição/proteção. A aquisição dos sinais foi realizada por um período de aproximadamente oito dias. O esquema da medição para este caso específico é mostrado na Figura 5.14. Fotografias da montagem experimental para a medição dos sinais coletados na subestação para o caso de dois consumidores, estão apresentadas no Apêndice A.

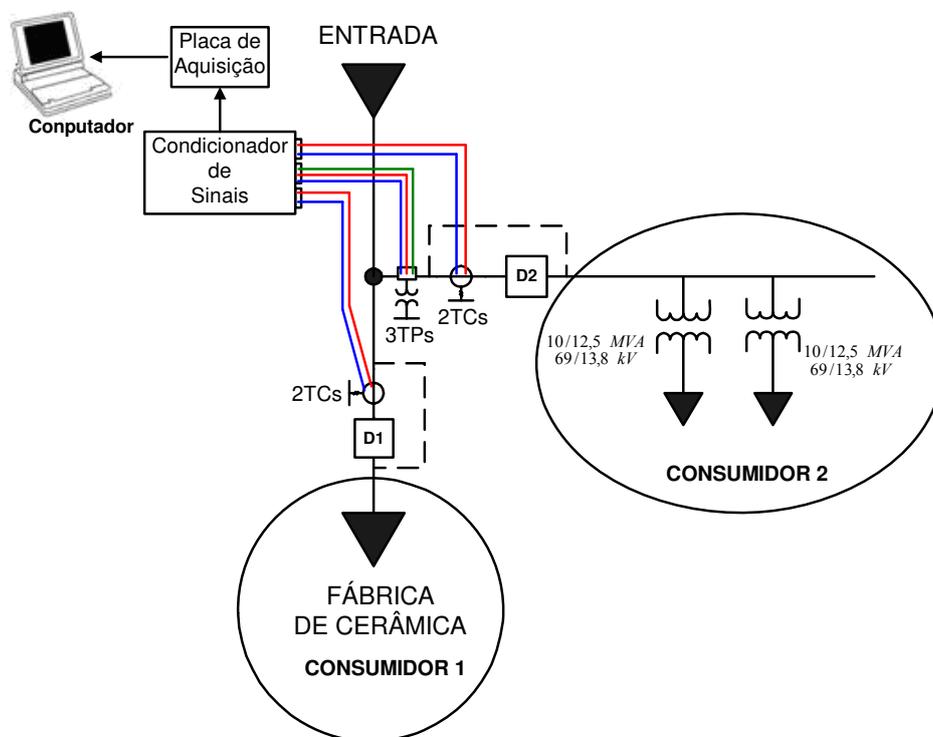


Figura 5.14 - Esquema de medição dos sinais para os dois consumidores do caso 2.

Os sinais da tensão no barramento foram medidos nos três TP's e para cada consumidor os sinais de corrente proveniente dos TC's de proteção foram medidos, os

quais estão ligados aos disjuntores D1 e D2. Para esta medição, foram obtidas apenas duas fases (A e B) de corrente para cada consumidor, devido à limitação de canais do equipamento de aquisição. Para a determinação da terceira fase das correntes foi utilizada a equação (5.1).

$$I_c = -I_a - I_b \tag{5.1}$$

A impedância do sistema na base de 100 MVA e 69 kV foi fornecida pela concessionária de energia, com os valores de  $R_0 = 0,056$ ,  $X_0 = 1,0212$  Ohms/km para seqüência zero e  $R_1 = 0,05106$ ,  $X_1 = 0,1138$  Ohms/km para seqüência positiva e negativa. Os sinais de tensão no barramento e das correntes dos Consumidores 1 e 2 são mostradas nas Figuras 5.15 e 5.16, respectivamente.

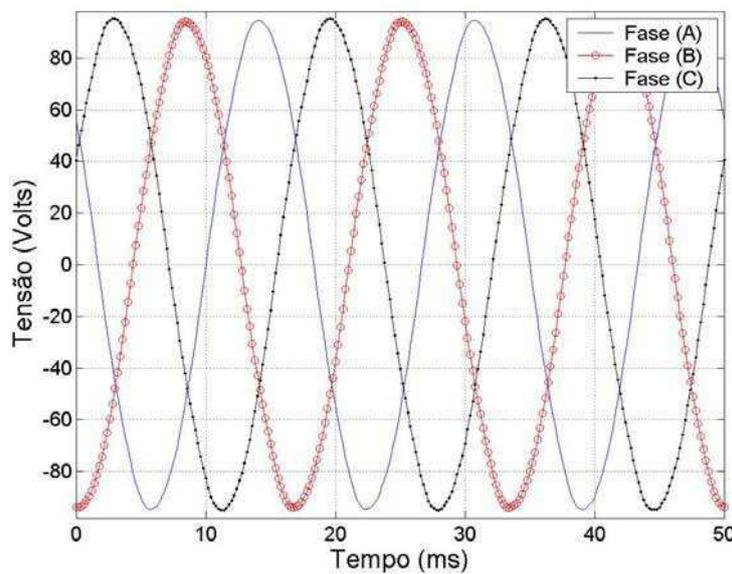
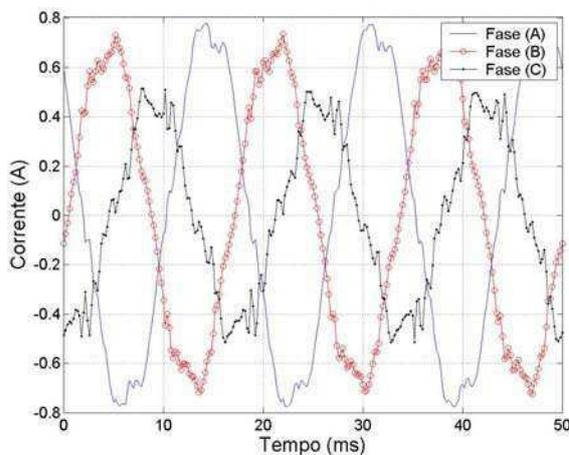
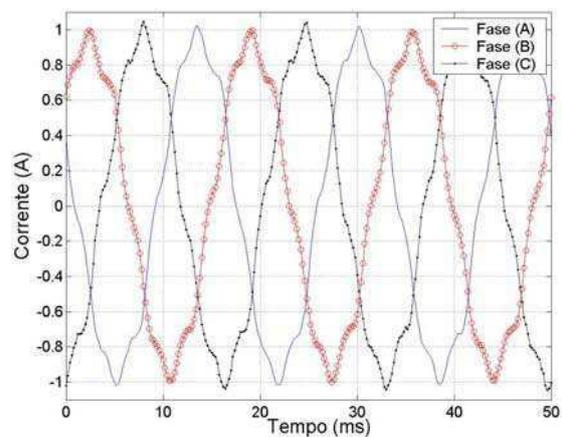


Figura 5.15 - Forma de onda de tensão obtida dos TPs do barramento.



(a) Corrente do Consumidor 1



(b) Corrente do Consumidor 2

Figura 5.16 – Sinais das correntes medidas nos TCs dos disjuntores D1 e D2, com a terceira fase calculada.

Nas Figuras 5.17 a 5.20 são mostrados as amplitudes dos componentes de seqüência da tensão na frequência fundamental, quinto harmônico, sétimo harmônico e décimo primeiro harmônico. Nas figuras estão representadas as seqüências zero (Zero), positiva (+VE) e negativa (-VE). Foram selecionados os componentes harmônicos de quinta a décima primeira ordem por possuírem valores de amplitude de tensão relevantes ao estudo.

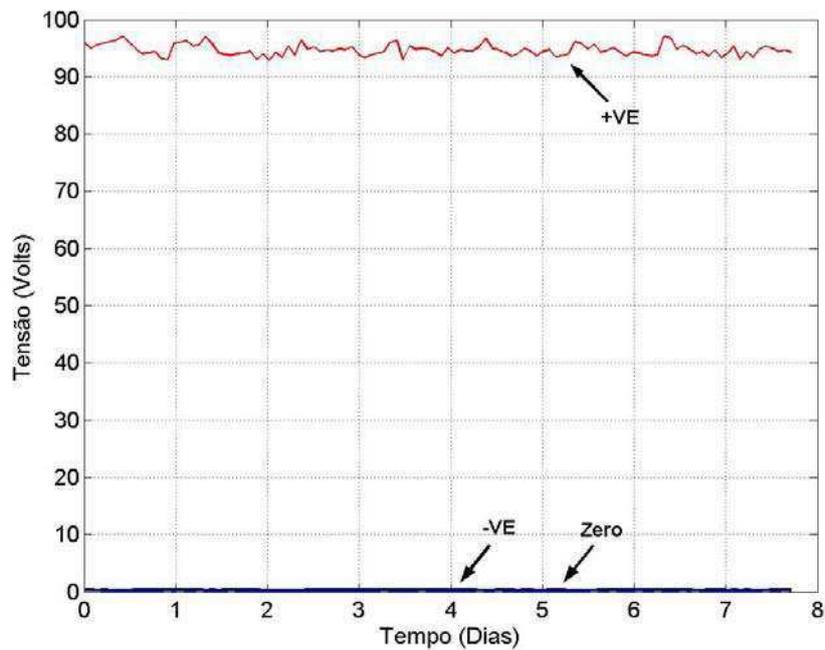


Figura 5.17 - Evolução da amplitude da fundamental de tensão.

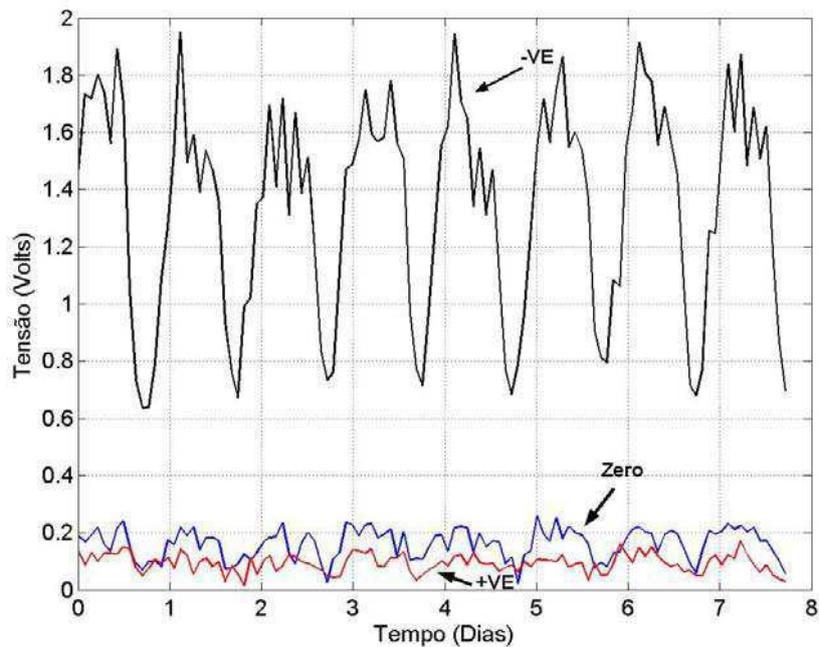


Figura 5.18 - Evolução da amplitude do quinto harmônico da tensão.

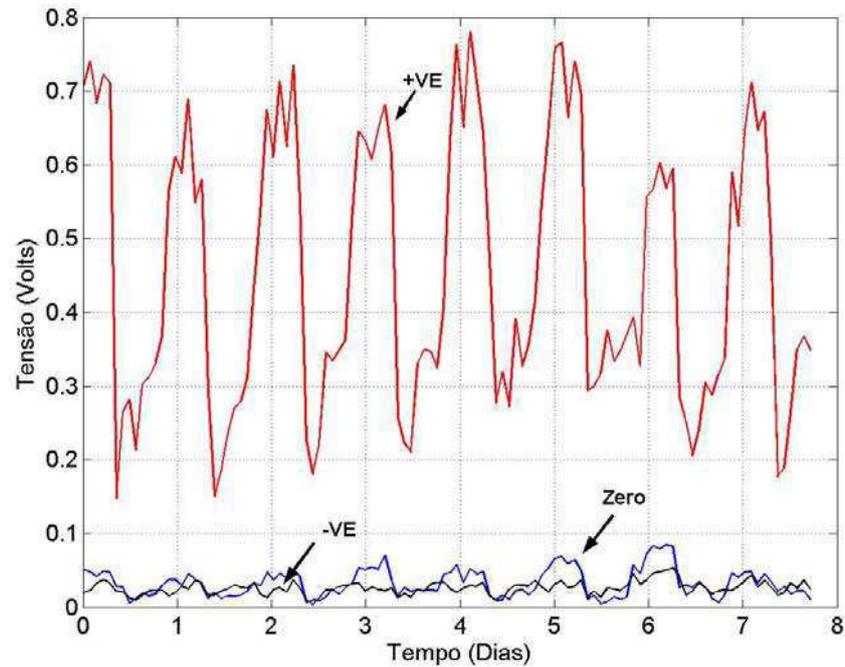


Figura 5.19 - Evolução da amplitude do sétimo harmônico da tensão.

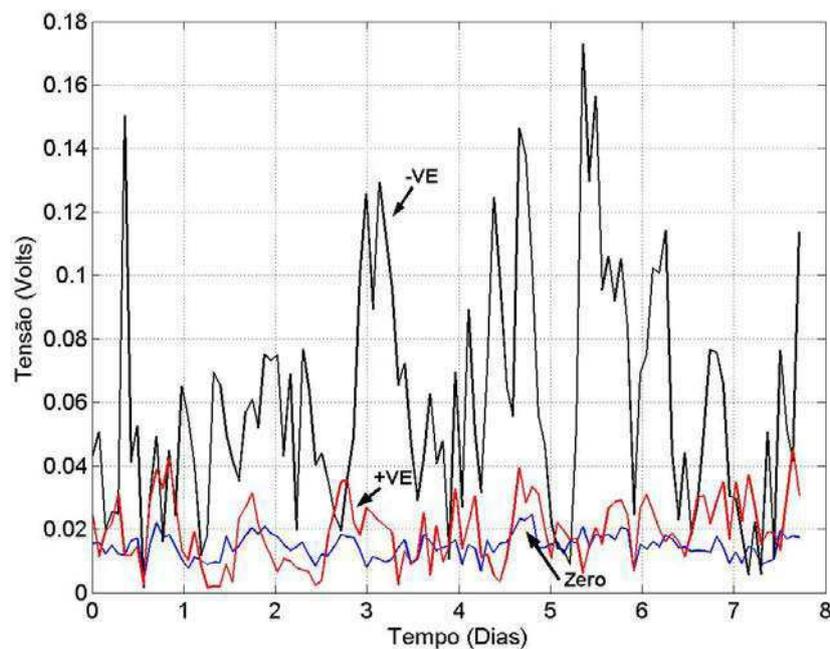


Figura 5.20 - Evolução da amplitude do décimo primeiro harmônico da tensão.

Para a frequência fundamental e para a sétima ordem harmônica, podem ser verificado que os componentes de seqüência positiva possuem maior relevância, Figuras 5.17 e 5.19. Nas Figuras 5.18 e 5.20 pode ser visto que o componente de seqüência negativa tem maior relevância para a quinta e décima primeira ordem harmônica, respectivamente.

As contribuições na frequência fundamental da Concessionária, do Consumidor 1 e do Consumidor 2 são mostradas nas Figuras 5.21 e 5.22.

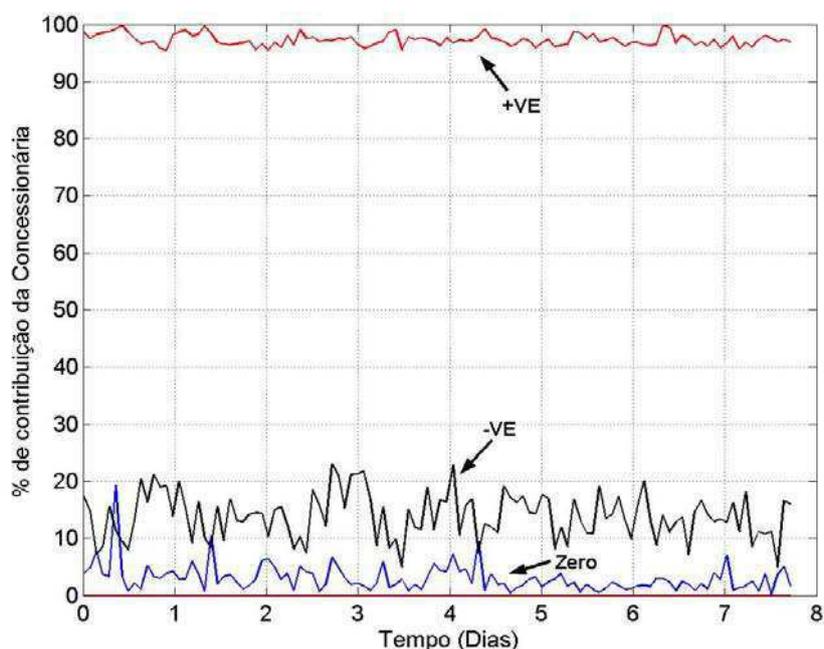
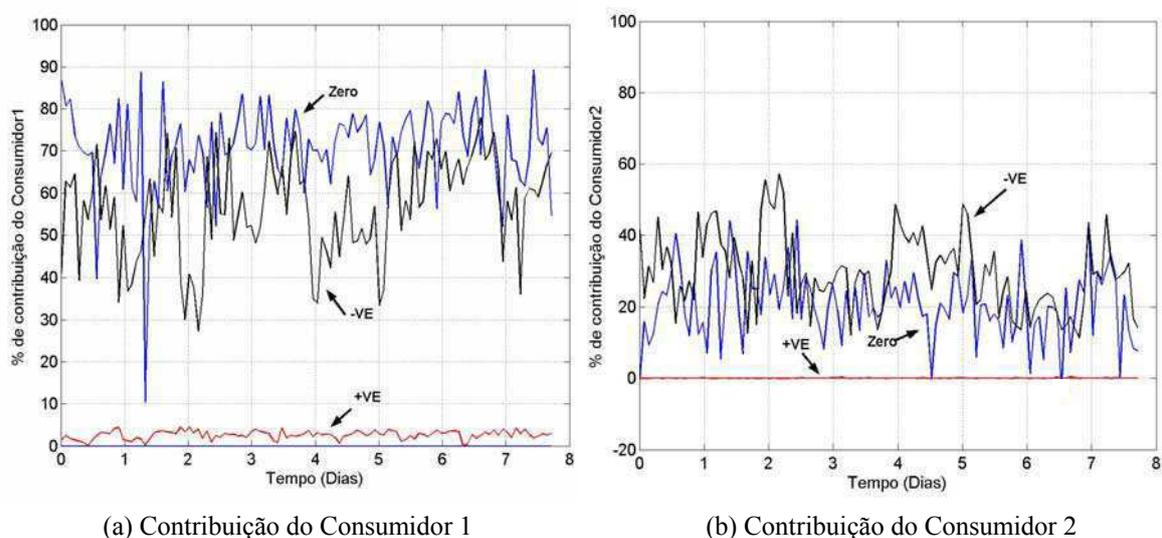


Figura 5.21 - Contribuição da concessionária para a fundamental da tensão.



(a) Contribuição do Consumidor 1

(b) Contribuição do Consumidor 2

Figura 5.22 – Contribuições percentuais para a fundamental de tensão para os consumidores.

Analisando a Figura 5.21, verifica-se que para a contribuição da concessionária na componente de seqüência positiva é praticamente absoluta. Observa-se, nas Figuras 5.22a e 5.22b que a contribuição dos consumidores 1 e 2, na seqüência positiva, é praticamente nula.

Os percentuais da contribuição dos componentes harmônicos da concessionária e dos consumidores, referentes aos componentes harmônicos de quinta, sétima e décima

primeira ordem, são mostrados nas Figuras 5.23 a 5.25, respectivamente. Nestas figuras estão representadas as componentes de seqüência mais relevantes correspondente ao harmônico a ser analisado.

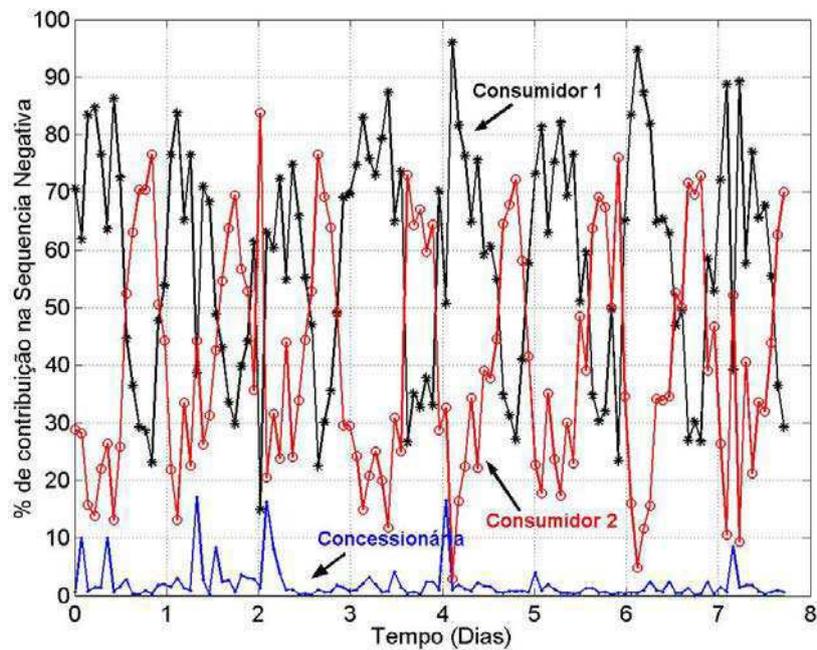


Figura 5.23 - Contribuição da seqüência negativa para quinto harmônico.

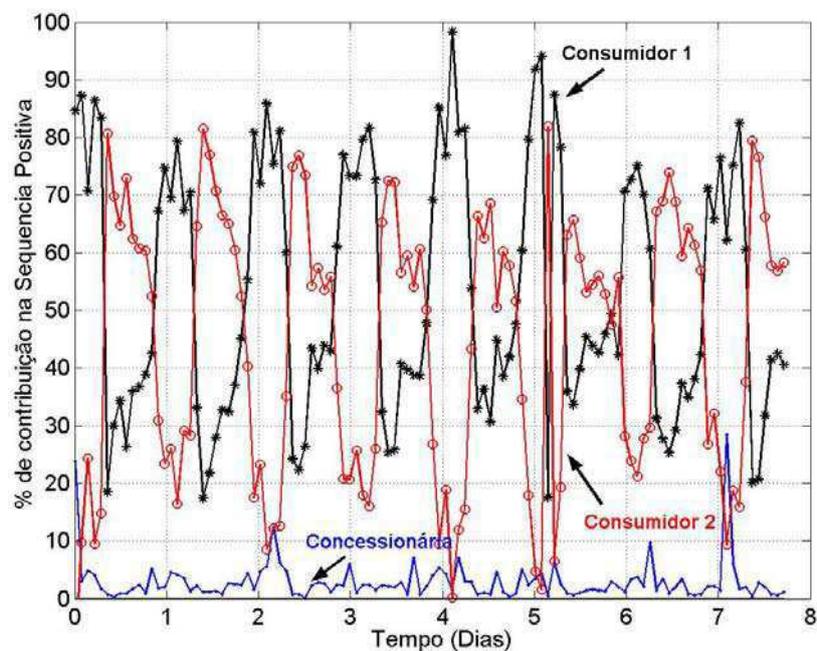


Figura 5.24 - Contribuição da seqüência positiva para sétimo harmônico.

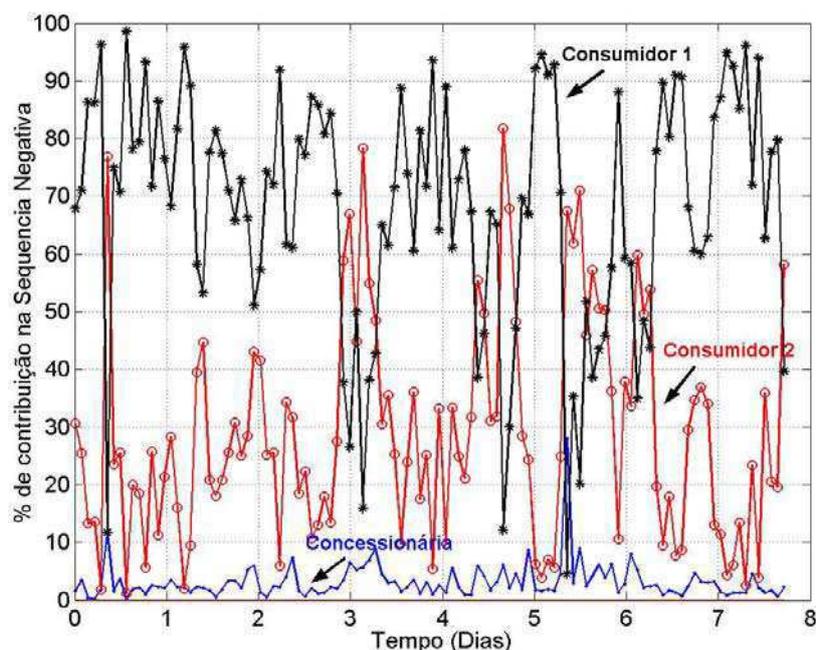


Figura 5.25 - Contribuição da seqüência negativa para décimo primeiro harmônico.

Nas contribuições percentuais apresentadas nas Figuras 5.23 a 5.25, observa-se que boa parte da contribuição, para os componentes harmônicos, é de responsabilidade do Consumidor 1, em segundo lugar do Consumidor 2. A concessionária de energia possui um baixo percentual de contribuição, para os componentes harmônicos mostrados.

Neste tipo de análise da contribuição harmônica com mais de um consumidor ligado a um mesmo barramento, são necessárias técnicas de medição mais aprimoradas. O aprimoramento, caracteriza-se por obter os sinais de corrente dos consumidores de forma instantânea, não importando o quão distantes estejam os equipamentos de proteção/medição (TPs e TCs) para estes consumidores. Quanto mais consumidores estiverem ligados ao mesmo barramento, maior será o número de canais necessários para a aquisição dos sinais do sistema elétrico.

## Capítulo 6

### CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto um método para ponderar as responsabilidades entre a concessionária e o consumidor, referente à distorção harmônica da forma de onda de tensão na rede elétrica trifásica.

Um método denominado de CPHCS foi desenvolvido com a capacidade de determinar o percentual, em componentes de seqüência, da contribuição harmônica de tensão para um ou mais consumidores, ligados ao mesmo barramento. O método desenvolvido se baseia na aplicação de um modelo monofásico para cada componente de seqüência positiva, negativa e zero, obtendo-se, como resultados, os valores estimados da contribuição harmônica de tensão para as três componentes de seqüência. Os resultados obtidos para os valores da tensão no PAC, corroboram o fato que para cada ordem harmônica existe uma componente de seqüência que é predominante.

A validação para o método desenvolvido foi feito aplicando-o em casos sintéticos simulados com valores definidos. Observou-se concordância entre os valores dos parâmetros estimados e dos utilizados nos circuitos sintéticos. Baseado nesta concordância, o método foi aplicado a duas cargas industriais ligadas a um sistema de distribuição de energia elétrica. Para ambos, realizaram-se aquisições das formas de onda da tensão e da corrente em subestações.

Pelo exposto, pode-se afirmar que o método CPHCS é uma ferramenta apropriada e confiável para ponderar as responsabilidades entre a concessionária e o consumidor, referente à distorção harmônica.

Como sugestões para trabalhos futuros:

- Um método poderá ser desenvolvido para estimar os parâmetros referentes ao lado da concessionária, já que o método CPHCS só estima os parâmetros da carga e necessita previamente da impedância equivalente da concessionária. Os cálculos matemáticos para o

desenvolvimento deste método não são triviais e deverão ser estudado mais profundamente. Os cálculos para esta estimação deverão obedecer ao comportamento não-linear destas cargas, os quais possuem valores variantes no decorrer do tempo. Estes cálculos poderão ser feitos a partir das medições das formas de ondas da tensão e da corrente no PAC, os quais acompanham as variações do sistema elétrico;

- A técnica proposta poderá ser utilizada para estimar os parâmetros de cargas industriais, tais como um retificador trifásico controlado para cada frequência harmônica. Para a estimação dos parâmetros, deverá ser descrito um modelo matemático do equipamento, ao qual se quer analisar, podendo ser adotado para a estimação o método dos MQR;
- O método desenvolvido poderá ser aplicado à sistemas de distribuição que possuam mais de duas unidades consumidoras ligadas ao mesmo barramento. Para esta aplicação, deverão ser reformulados os cálculos matemáticos da contribuição harmônica, para a quantidade de unidades consumidoras desejadas e também será necessário utilizar equipamentos de aquisição com um número de canais adequado;
- Na aplicação deste método poderão ser impostas algumas restrições aos parâmetros estimados da unidade consumidora. Estas limitações serão aplicadas a casos em que possam aparecer resistências negativas, fontes de tensão com valores não coerentes, impedâncias nulas, entre outras.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

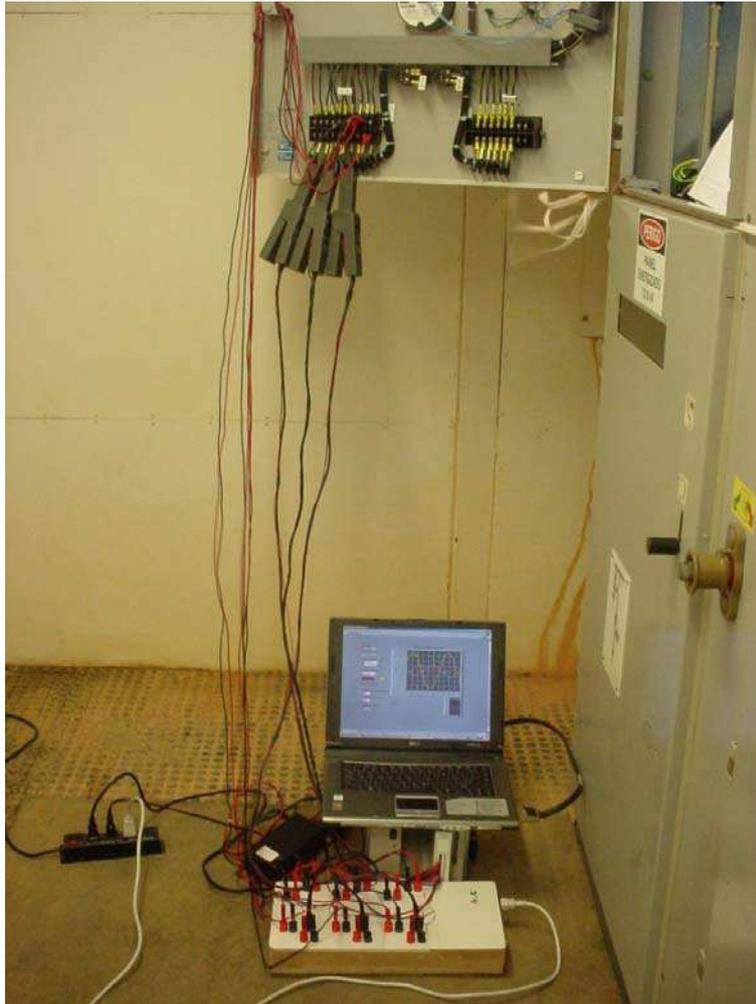
- AGUIRRE, L. A., *Introdução a Identificações de Sistemas - Técnicas Lineares e Não Lineares*. Belo Horizonte, Brasil: Editora UFMG, 2000.
- COSTA, F. F., *Estimação de Harmônicos e Inter-harmônicos em Sistemas Elétricos*. Tese de Doutorado em Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Campina Grande, 2005.
- CHEN, C., LIU, X., KOVAL, D., XU, W. and TAYJASANANT, T., *Critical Impedance Method – A new detecting harmonic sources method in distribution systems*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 1, pp. 288 – 296, January, 2004.
- CRISTALDI, L. and FERRERO, A., *A digital method for the identification of the source of distortion in electrical power systems*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, pp. 14 – 18, Vol. 44, No. 1, February 1994.
- CRISTALDI, L. and FERRERO, A., *Harmonic power flow analysis for the measurement of the electric power quality*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, pp. 683 – 685, Vol. 44, No. 3, June 1995.
- DAN, A., M. and CZIRA, Z., *Identification of harmonic sources*, 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power ICHQP, Athens, Greece, pp. 831-836, October, 1998.
- DAVIS, E. J. D., EMANUEL, A.E. and PILEGGI, D. J., *Evaluation of single-point measurements method for harmonic pollution cost allocation*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 1, pp. 14 – 18, January, 2000.
- DE LA ROSA, F., *Harmonics and power systems*. Missouri, USA: Editora Taylor & Francis, 2006.
- DE ANDRADE JR., G. V., NAIDU, S. R., NERI, M. G. G., DA COSTA, E. G., *Estimation of the Utility's and Consumer's Contribution to Harmonic Distortion*, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference IEEE, ID-7052, Warsaw, Poland, May 1-3, 2007.

- DE ANDRADE JR., G. V., NAIDU, S. R., NERI, M. G. G., DA COSTA, E. G., SOARES, R. M., *Estimação das Contribuições da Concessionária e do Consumidor à Distorção Harmônica de Tensão no Ponto de Acoplamento Comum*, XVI Congresso Brasileiro de Automática, Salvador-BA, Brasil, 3-6 Out, 2007.
- DE OLIVEIRA, J.C., DE OLIVEIRA, J. W., RESENDE and MISKULIN, M. S., *Practical approaches for AC system harmonic impedance measurements*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 4, pp. 1721 – 1726, Oct, 1991.
- DU, Z. P., ARRILAGA, J., WATSON, N. R. and CHEN, S. *Identification of harmonic sources of power systems using state estimation*, IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, Vol. 146, No. 1, pp. 7 – 12, Jan, 1999.
- FARACH, J. E., GRADY, W. M. And ARAPOSTATHIS, A., *An optimal procedure for placing sensors and estimating the locations of harmonic sources in power systems*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8. No. 3, pp. 1303-1303, July 1993.
- FUSCO, G., LOSI, A. and RUSSO, M. *Constrained least squares methods for parameter tracking of power system steady-state equivalent circuits*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 3, pp. 1073 – 1080, July, 2000.
- GIRGIS, A. A., QUAINANCE III, W. H., QIU, J. and MAKRAM, E. B. *A time domain three-phase power system impedance modeling approach for harmonic filter analysis*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 2, pp. 504 – 510, April, 1993.
- HARTANA, R. K AND RICHARDS, G. G., *Harmonic source monitoring and identification using neural networks*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 4, pp.1098-1104, November 1990.
- HEYDT, G. T. *Identification of harmonic sources by a state estimation technique*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, pp. 569 – 576, Jan, 1989.
- IEC 1000-2-1. [S.I.], 1990. Electromagnetic Compatibility, Part 2: Environment, Sect.1: Description of the Environment - Electromagnetic environment for

- low-frequency conducted disturbances and signaling in public power supply systems.
- IEC 61000-3-2. [S.l.], 1998. Limits for harmonic current emissions.
- IEEE 519. [S.l.], 1992. Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems.
- ISLAM, K, M I. and SAMRA, A., H, *Identification of harmonics sources in power distribution systems*, Proceedings Southeastcon on '97. 'Engineering New Century', pp. 301 – 303. IEEE, Blacksburg, VA, 12-14, April, 1997.
- LI, CHUN, XU, W. and TAYJASANANT, T., “*A Critical Impedance*” - *Based Method for Identifying Harmonic Sources*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 2, pp. 671 – 678, April, 2004.
- MA, H. and GIRGIS, A. A., *Identification and tracking of harmonic sources in a power system using a Kalman filter*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, pp. 1659 – 1665, July, 1996.
- MOUSTAFA, A. A., MOUSSA, A. M. and EL-GAMMAL, M. A., *Separation of Customer and Supply Harmonics In Electrical Power Distribution Systems*, Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, Vol. 3, pp. 1035 – 1040, 1 – 4 Oct, 2000.
- SRINIVASAN, K. and JUTRAS, R., *Conforming and non-conforming current for attributing steady state power quality problems*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 1, pp. 212 – 217, 1998.
- XU, W. and LIU, Y., *A method for determining customer and utilities harmonic contributions at the point of common coupling*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, pp. 804 – 811, April, 2000.
- XU, W., LIU, X. and LIU, Y., *An Investigation on the validity of power-direction method for harmonic source determination*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, pp. 214 – 219, January, 2003.

# *Apêndice A*

## *A.1 Fotografias das Medições para um ou mais Consumidores*



**Figura A.1 – Fotografia do arranjo da medição dos sinais trifásicos coletados na saída dos TCs e TPs em uma Subestação.**

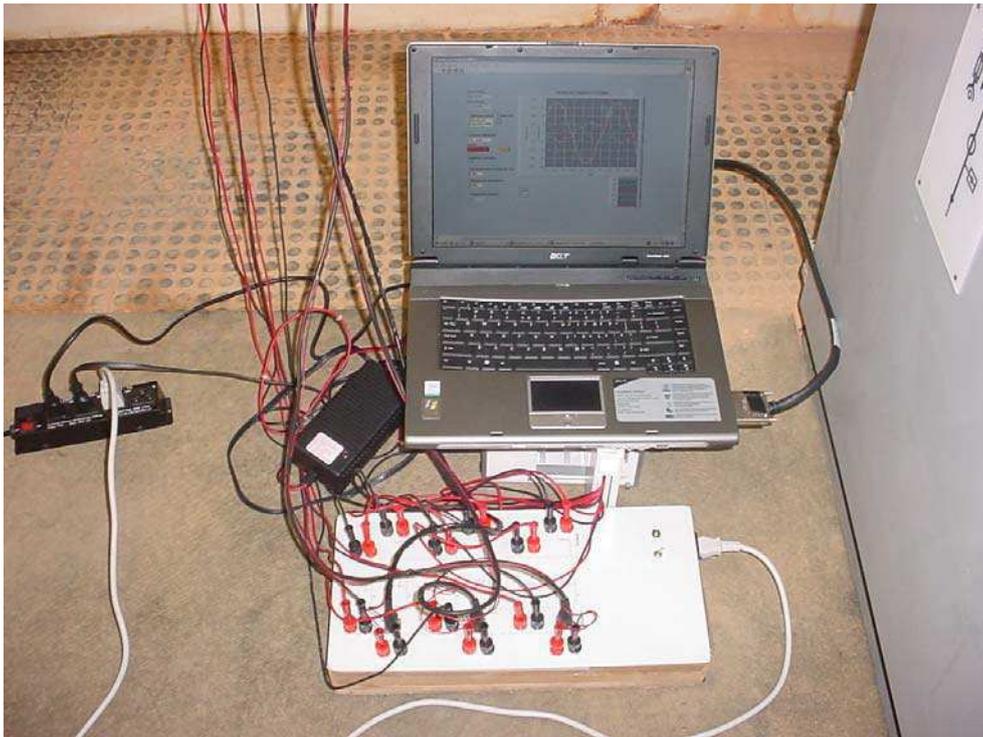


Figura A.2 – Fotografia com os detalhes das ligações na placa de aquisição do computador.

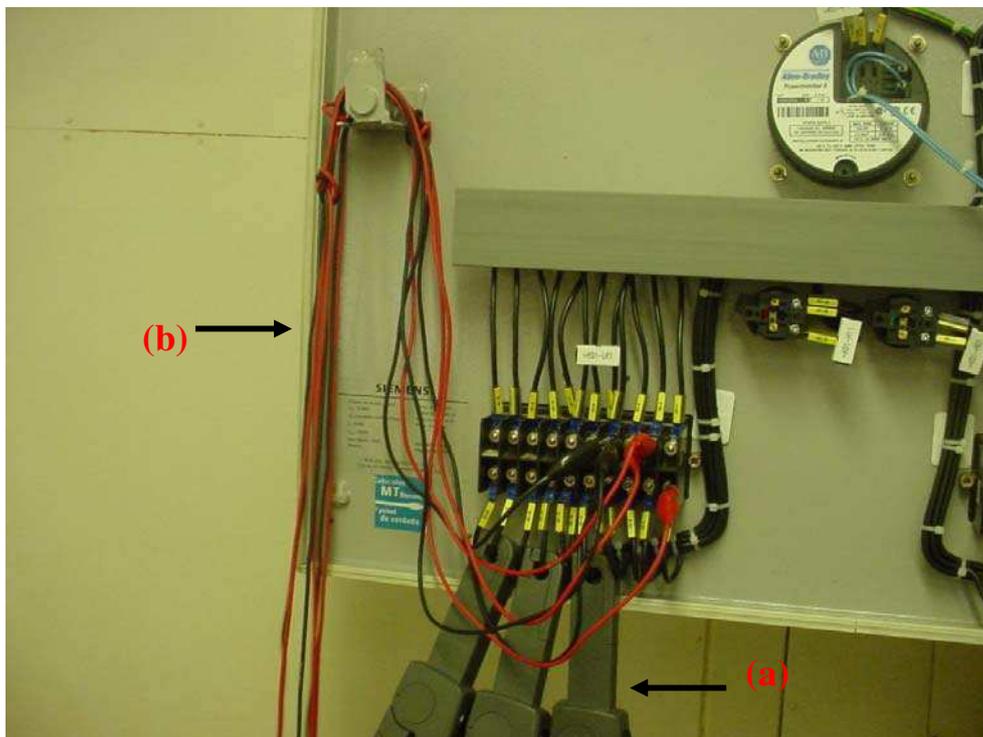


Figura A.3 – Fotografia com os detalhes da ligação nos terminais dos TCs (pinças) (a) e TPs (plugs vermelho e preto) (b).



Figura A.4 – Fotografia do arranjo da medição dos sinais de tensão e corrente nos terminais dos relés de disjuntores.



Figura A.5 – Fotografia do arranjo da medição para duas unidades consumidoras, com dois computadores sincronizados.

# Apêndice B

## B.1 Método para Estimação da Carga Não-Linear

Os cálculos matemáticos para a estimação dos parâmetros da carga não-linear serão descritos neste apêndice. Os cálculos se baseiam na estimação pelo método dos mínimos quadrados proposto por Fusco et al. (2000).

Considere o modelo equivalente da carga da Figura B.1:

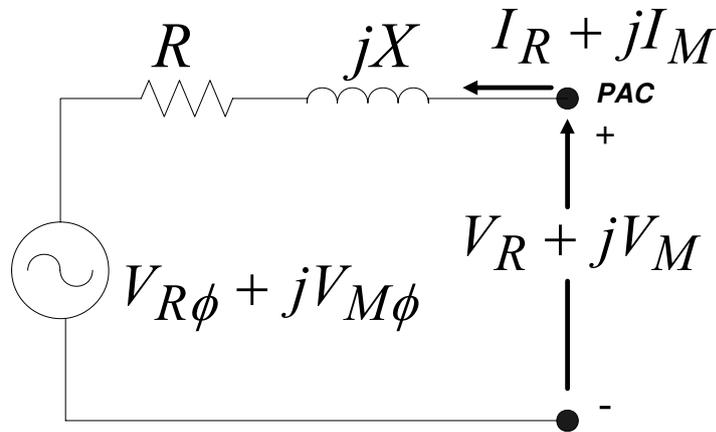


Figura B.1 - Circuito equivalente da carga.

A equação matemática que compõe o circuito da Figura B.1, pode ser expressa por:

$$V_R + jV_M = (V_{R\phi} + jV_{M\phi}) + (R + jX).(I_R + jI_M). \quad (B.1)$$

Multiplicando os termos de (B.1), têm-se:

$$V_R + jV_M = (V_{R\phi} + R.I_R - X.I_M) + j(V_{M\phi} + R.I_M + X.I_R), \quad (B.2)$$

em que, os seus termos reais e imaginários podem ser separados, formando o seguinte sistema:

$$\begin{cases} V_{R\phi} + R.I_R - X.I_M = V_R \\ V_{M\phi} + R.I_M + X.I_R = V_M \end{cases} \quad (B.3)$$

A partir de (B.3) é possível formular um sistema matricial, como:

$$[V_R \quad V_M] = [I_R \quad I_M \quad c] \begin{bmatrix} R & X \\ -X & R \\ V_{R\phi}/c & V_{M\phi}/c \end{bmatrix} \quad (\text{B.4})$$

Considerando-se  $N$  amostras dos sinais de tensão e de corrente medidos no PAC, para  $t = 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, (N-1)\Delta t$ , formulam-se os três sistemas matriciais:

$$Y = [Y_1 \quad Y_2] = \begin{bmatrix} V_{R1} & V_{M1} \\ V_{R2} & V_{M2} \\ \vdots & \vdots \\ V_{Rn} & V_{Mn} \end{bmatrix}, \quad (\text{B.5})$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} I_{R1} & I_{M1} & c \\ I_{R2} & I_{M2} & c \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{Rn} & I_{Mn} & c \end{bmatrix}, \quad (\text{B.6})$$

$$\Theta = [\Theta_1 \quad \Theta_2] = \begin{bmatrix} R & X \\ -X & R \\ V_{R\phi}/c & V_{M\phi}/c \end{bmatrix}, \quad (\text{B.7})$$

em que serão representas por  $N$  amostras para cada matriz. Para não haver variação na relação das tensões, considera-se  $c$  igual a 1. Com as equações (B.5), (B.6) e (B.7), formula-se a seguinte matriz:

$$Y - \Phi \cdot \Theta = \begin{bmatrix} (V_{R1} - R.I_{R1} + X.I_{M1} - V_{R\phi}) & (V_{M1} - R.I_{M1} - X.I_{R1} - V_{M\phi}) \\ (V_{R2} - R.I_{R2} + X.I_{M2} - V_{R\phi}) & (V_{M1} - R.I_{M1} - X.I_{R1} - V_{M\phi}) \\ \vdots & \vdots \\ (V_{Rn} - R.I_{Rn} + X.I_{Mn} - V_{R\phi}) & (V_{Mn} - R.I_{Mn} - X.I_{Rn} - V_{M\phi}) \end{bmatrix}. \quad (\text{B.8})$$

De (B.8), é possível obter a seguinte relação:

$$Y - \Phi \cdot \Theta = [(Y_1 - \Phi \cdot \Theta_1) \quad (Y_2 - \Phi \cdot \Theta_2)]. \quad (\text{B.9})$$

Escrevendo-se a estrutura de  $\Theta$ , têm-se:

$$[1 \quad 0 \quad 0] \cdot \Theta_1 = [0 \quad 1 \quad 0] \cdot \Theta_2, \quad (\text{B.10a})$$

$$[0 \quad 1 \quad 0] \cdot \Theta_1 = -[1 \quad 0 \quad 0] \cdot \Theta_2. \quad (\text{B.10b})$$

Adotando as equações anteriores para otimização de um Laplaciano, obtêm-se a seguinte equação:

$$L = (Y_1 - \Phi \cdot \Theta_1)^t \cdot (Y_1 - \Phi \cdot \Theta_1) + (Y_2 - \Phi \cdot \Theta_2)^t \cdot (Y_2 - \Phi \cdot \Theta_2) + \lambda_1 \cdot \left\{ [1 \ 0 \ 0] \Theta_1 - [0 \ 1 \ 0] \Theta_2 \right\} + \lambda_2 \cdot \left\{ [0 \ 1 \ 0] \Theta_1 + [1 \ 0 \ 0] \Theta_2 \right\}, \quad (\text{B.11})$$

simplificando,

$$L = Y_1^t \cdot Y_1 + \Theta_1^t \cdot \Phi^t \cdot \Phi \cdot \Theta_1 - Y_1^t \cdot \Phi \cdot \Theta_1 - \Theta_1^t \cdot \Phi^t \cdot Y_1 + Y_2^t \cdot Y_2 + \Theta_2^t \cdot \Phi^t \cdot \Phi \cdot \Theta_2 - Y_2^t \cdot \Phi \cdot \Theta_1 - \Theta_1^t \cdot \Phi^t \cdot Y_1 + \Theta_1^t \cdot \left\{ \lambda_1 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \lambda_2 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \right\} + \Theta_2^t \cdot \left\{ -\lambda_1 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \lambda_2 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right\}, \quad (\text{B.12})$$

Por fim, têm-se o Laplaciano como:

$$L = Y_1^t \cdot Y + \Theta_1^t \cdot \Phi^t \cdot \Phi \cdot \Theta_1 - 2 \cdot \Theta_1^t \cdot \Phi^t \cdot Y_1 + Y_2^t \cdot Y_2 + \Theta_2^t \cdot \Phi^t \cdot \Phi \cdot \Theta_2 - 2 \cdot \Theta_2^t \cdot \Phi^t \cdot Y_2 + \Theta_1^t \cdot \left\{ \lambda_1 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \lambda_2 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \right\} + \Theta_2^t \cdot \left\{ -\lambda_1 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \lambda_2 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right\}. \quad (\text{B.13})$$

Aplicando-se a derivada de  $L$  com respeito à  $\Theta_1$  e igualando a derivada a zero, têm-se:

$$\delta \Theta_1^t \cdot \Phi^t \cdot \Phi \cdot \Theta_1 + \Theta_1^t \cdot \Phi^t \cdot \Phi \cdot \delta \Theta_1 - 2 \cdot \delta \Theta_1 \cdot \Phi^t \cdot Y_1 + \delta \Theta_1 \cdot \left\{ \lambda_1 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \lambda_2 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \right\} = 0. \quad (\text{B.14})$$

Têm-se, então, para a derivada em função de  $\Theta_1$ :

$$\delta \Theta_1^t \cdot \left\{ 2 \cdot \Phi^t \cdot \Phi \cdot \Theta_1 - 2 \cdot \Phi^t \cdot Y_1 + \lambda_1 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \lambda_2 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \right\} = 0, \quad (\text{B.15})$$

que, em função de  $\Theta_2$ , obtêm-se:

$$\delta \Theta_2^t \cdot \left\{ 2 \cdot \Phi^t \cdot \Phi \cdot \Theta_2 - 2 \cdot \Phi^t \cdot Y_2 - \lambda_1 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \lambda_2 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right\} = 0. \quad (\text{B.16})$$

Considerando  $\delta \Theta_1^t = 0$  e  $\delta \Theta_2^t = 0$ , obtêm-se:

$$2 \cdot \Phi^t \cdot \Phi \cdot \Theta_1 = 2 \cdot \Phi^t \cdot Y_1 - \lambda_1 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \lambda_2 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (\text{B.17a})$$

$$2 \cdot \Phi^t \cdot \Phi \cdot \Theta_2 = 2 \cdot \Phi^t \cdot Y_2 + \lambda_1 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} - \lambda_2 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{B.17b})$$

Com isso, as equações (B.17a) e (B.17a) podem ser reescritas colocando-se  $\Theta_1$  e  $\Theta_2$  em evidência, obtendo-se:

$$\Theta_1 = [\Phi^t \cdot \Phi]^{-1} \cdot \Phi^t \cdot Y_1 - \frac{1}{2} \cdot \lambda_1 \cdot [\Phi^t \cdot \Phi]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \frac{1}{2} \cdot \lambda_2 \cdot [\Phi^t \cdot \Phi]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (\text{B.18.a})$$

$$\Theta_2 = [\Phi^t \cdot \Phi]^{-1} \cdot \Phi^t \cdot Y_2 + \frac{1}{2} \cdot \lambda_1 \cdot [\Phi^t \cdot \Phi]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} - \frac{1}{2} \cdot \lambda_2 \cdot [\Phi^t \cdot \Phi]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{B.18.b})$$

O produto de  $\Phi^t \cdot \Phi$  produz como resultado uma matriz  $3 \times 3$ , escrita como:

$$\Phi^t \cdot \Phi = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N I_{Rn}^2 & \sum_{n=1}^N I_{Rn} \cdot I_{Mn} & c \cdot \sum_{n=1}^N I_{Rn} \\ \sum_{n=1}^N I_{Rn} \cdot I_{Mn} & \sum_{n=1}^N I_{Mn}^2 & c \cdot \sum_{n=1}^N I_{Mn} \\ c \cdot \sum_{n=1}^N I_{Rn} & c \cdot \sum_{n=1}^N I_{Mn} & N \cdot c^2 \end{bmatrix} \quad (\text{B.19})$$

E considerando a igualdade  $P = [\Phi^t \cdot \Phi]^{-1}$ , a matriz  $P$  foi escrita como:

$$[\Phi^t \cdot \Phi]^{-1} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix}. \quad (\text{B.20})$$

Admitindo-se que  $B_1 = \Phi^t \cdot Y_1$  e  $B_2 = \Phi^t \cdot Y_2$ , equações (B.18a) e equações (B.18b), podem ser reescritas como:

$$\Theta_1 = P \cdot B_1 - \frac{\lambda_1}{2} \cdot \begin{bmatrix} P_{11} \\ P_{12} \\ P_{13} \end{bmatrix} - \frac{\lambda_2}{2} \cdot \begin{bmatrix} P_{12} \\ P_{22} \\ P_{23} \end{bmatrix}, \quad (\text{B.19a})$$

$$\Theta_2 = P \cdot B_2 + \frac{\lambda_1}{2} \cdot \begin{bmatrix} P_{12} \\ P_{22} \\ P_{23} \end{bmatrix} - \frac{\lambda_2}{2} \cdot \begin{bmatrix} P_{11} \\ P_{12} \\ P_{13} \end{bmatrix}. \quad (\text{B.19b})$$

Considerando  $P \cdot B_1 = \begin{bmatrix} \nu_{11} \\ \nu_{21} \\ \nu_{31} \end{bmatrix}$  e  $P \cdot B_2 = \begin{bmatrix} \nu_{12} \\ \nu_{22} \\ \nu_{32} \end{bmatrix}$ , substituem-se as equações (B.19a) e (B.19b), em (B.10a) e (B.10b), obtêm-se:

$$\nu_{11} - \frac{\lambda_1}{2} \cdot P_{11} - \frac{\lambda_2}{2} \cdot P_{12} = \nu_{22} + \frac{\lambda_1}{2} \cdot P_{22} - \frac{\lambda_2}{2} \cdot P_{12}, \quad (\text{B.20a})$$

$$\nu_{21} - \frac{\lambda_1}{2} \cdot P_{12} - \frac{\lambda_2}{2} \cdot P_{22} = - \left\{ \nu_{12} + \frac{\lambda_1}{2} \cdot P_{12} - \frac{\lambda_2}{2} \cdot P_{11} \right\}, \quad (\text{B.20b})$$

simplificando as equações (B.20a) e (B.20b) agora, têm-se:

$$(p_{11} + p_{22}) \cdot \frac{\lambda_1}{2} = \nu_{11} - \nu_{22}, \quad (\text{B.21a})$$

$$(p_{11} + p_{22}) \cdot \frac{\lambda_1}{2} = \nu_{12} + \nu_{21}. \quad (\text{B.21a})$$

As equações (B.21a) e (B.21a) podem ser reescritas como:

$$\begin{bmatrix} \frac{\lambda_1}{2} \\ \frac{\lambda_2}{2} \end{bmatrix} = \frac{1}{(p_{11} + p_{22})} \cdot \begin{bmatrix} (\nu_{11} - \nu_{22}) \\ (\nu_{12} + \nu_{21}) \end{bmatrix}. \quad (\text{B.22})$$

Substituindo (B.22) em (B.19a), obtêm-se:

$$\Theta_1 = P \cdot B_1 - \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{22} \\ p_{13} & p_{23} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\lambda_1}{2} \\ \frac{\lambda_2}{2} \end{bmatrix}, \quad (\text{B.23})$$

que pode ser reescrita como,

$$\Theta_1 = P \cdot B_1 - \frac{1}{(p_{11} + p_{22})} \cdot \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} (v_{11} - v_{22}) \\ (v_{12} + v_{21}) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{B.24})$$

Simplificando-se a equação (B.24), obtém-se a expressão para  $\Theta_1$ :

$$\Theta_1 = P \cdot B_1 - \frac{1}{(p_{11} + p_{22})} \cdot P \cdot \begin{bmatrix} (v_{11} - v_{22}) \\ (v_{12} + v_{21}) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{B.25})$$

De forma similar ao feito para  $\Theta_1$ , calcula-se a expressão para  $\Theta_2$ :

$$\Theta_2 = P \cdot B_2 - \frac{1}{(p_{11} + p_{22})} \cdot P \cdot \begin{bmatrix} (v_{12} + v_{21}) \\ (v_{22} - v_{11}) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{B.26})$$

Por fim, sabendo-se que  $\Theta = [\Theta_1 \quad \Theta_2]$ , as equações (B.25) e (B.26), podem ser reescritas como:

$$\Theta = \Theta^* - \frac{P}{p_{11} + p_{22}} \cdot \begin{bmatrix} \hat{v}_{11}^* - \hat{v}_{22}^* & \hat{v}_{12}^* + \hat{v}_{21}^* \\ \hat{v}_{12}^* + \hat{v}_{21}^* & \hat{v}_{22}^* - \hat{v}_{11}^* \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (\text{B.27})$$

em que  $\Theta^*$  é a matriz que irá atualizar  $\Theta$  a cada iteração.

# Apêndice C

## C.1 Cálculo da Contribuição Harmônica de Dois Consumidores

As equações que estima a contribuição harmônica de tensão no PAC quando dois consumidores estão ligados ao mesmo barramento, serão demonstradas aqui. O circuito equivalente para um sistema com dois consumidores é mostrado na Figura C.1.

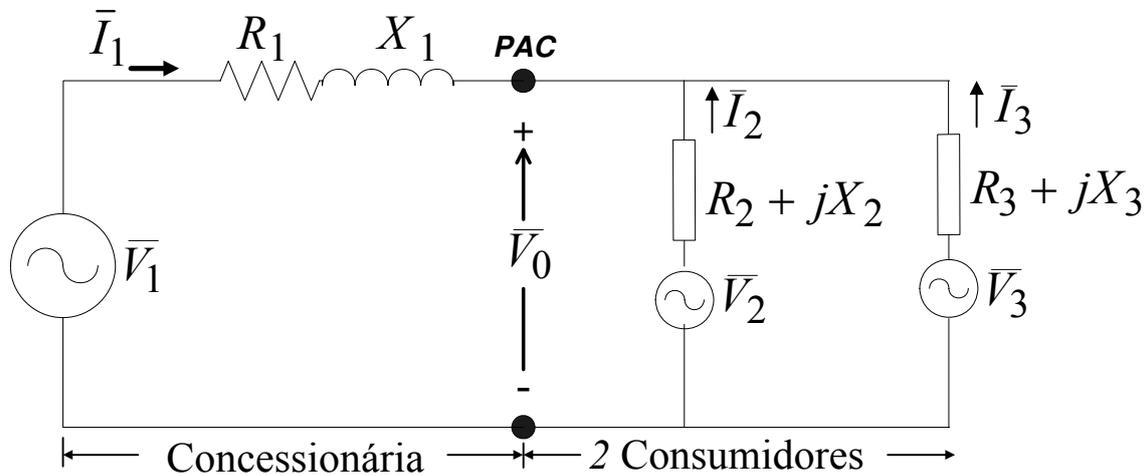


Figura C.1 - Circuito equivalente do sistema com dois consumidores.

Para a determinação das expressões matemáticas da contribuição harmônica, admite-se que as variáveis  $\bar{V}_0$ ,  $\bar{I}_0$ ,  $\bar{V}_1$ ,  $\bar{V}_2$ ,  $\bar{I}_2$ ,  $\bar{V}_3$  e  $\bar{I}_3$ , são complexas e estão dispostas em coordenadas retangulares.

### - Expressão 1 – Contribuição da Concessionária no PAC:

No cálculo da contribuição da concessionária no PAC, foi adotado o circuito da Figura C.2.

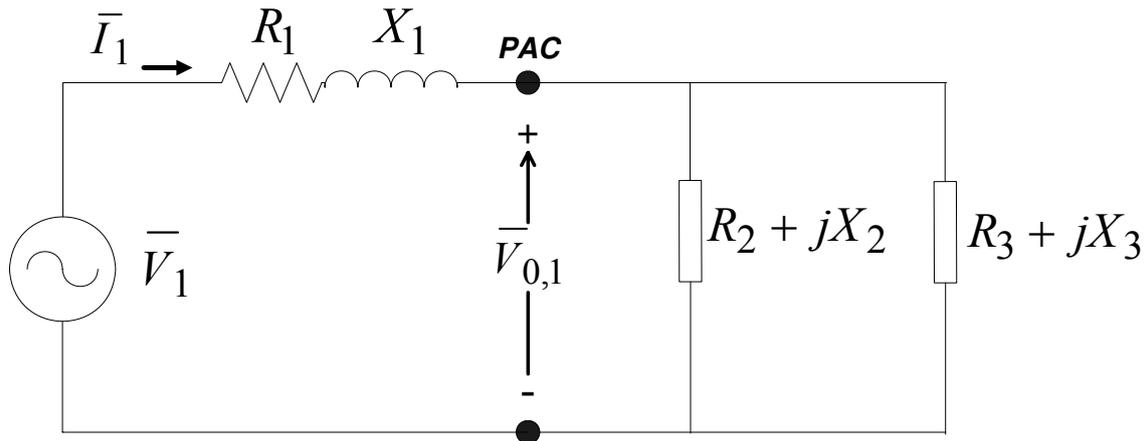


Figura C.2 - Circuito equivalente para o cálculo da contribuição da concessionária.

Inicialmente, admitem-se as seguintes igualdades para  $\bar{I}_1$  :

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{V}_1}{Z_{eq}} = \bar{V}_1 \cdot Y_{eq} . \quad (C.1)$$

A impedância  $Z_{eq}$  pode ser expressa por:

$$Z_{eq} = (R_1 + j.X_1) + Z_c , \quad (C.2)$$

em que,  $Z_c = Y_c^{-1}$ . A impedância  $Z_c$  é expressa por:

$$Z_c = \frac{(R_2 + j.X_2) \cdot (R_3 + j.X_3)}{(R_2 + R_3) + j.(X_2 + X_3)} . \quad (C.3)$$

Multiplicando os termos da equação (C.3), têm-se:

$$Z_c = \frac{(R_2 \cdot R_3 - X_2 \cdot X_3) + j.(R_2 \cdot X_3 + R_3 \cdot X_2)}{(R_2 + R_3) + j.(X_2 + X_3)} . \quad (C.4)$$

A equação de  $Y_{eq}$  é representada por:

$$Y_{eq} = \left( \frac{1}{R_1 + j.X_1} + Y_c \right)^{-1} . \quad (C.5)$$

Substituindo-se a equação (C.3) em (C.2) e simplificando, têm-se:

$$Z_{eq} = \frac{(R_2 \cdot R_3 - X_2 \cdot X_3) + j \cdot (R_2 \cdot X_3 + R_3 \cdot X_2)}{(R_2 + R_3) + j \cdot (X_2 + X_3)} + \frac{(R_1 \cdot (R_2 + R_3) - X_1 \cdot (X_2 + X_3) + j \cdot (R_1 \cdot (X_2 + X_3) + X_1 \cdot (R_2 + R_3)))}{(R_2 + R_3) + j \cdot (X_2 + X_3)} \quad (C.6)$$

A partir da Figura C.2 é possível determinar a contribuição da fonte  $\bar{V}_1$  no PAC, expressa por  $\bar{V}_{0,1}$  na equação abaixo:

$$\bar{V}_{0,1} = \frac{\bar{V}_1}{Z_{eq}} \cdot Z_c, \quad (C.7)$$

Ao substituir as equações (C.4) e (C.6) em (C.7), e simplificando a divisão  $Z_c/Z_{eq}$ , obtém-se a expressão da contribuição da concessionária no PAC:

$$\bar{V}_{0,1} = \frac{A_1}{B_1 + j \cdot C_1}, \quad (C.8)$$

em que,

$$\begin{aligned} A_1 &= \bar{V}_1 \cdot (R_2 \cdot R_3 - X_2 \cdot X_3) + j \cdot (R_2 \cdot X_3 + R_3 \cdot X_2); \\ B_1 &= [(R_2 \cdot R_3 - X_2 \cdot X_3) + (R_1 \cdot (R_2 + R_3) - X_1 \cdot (X_2 + X_3))]; \\ C_1 &= [(R_2 \cdot X_3 + R_3 \cdot X_2) + (R_1 \cdot (X_2 + X_3) + X_1 \cdot (R_2 + R_3))]. \end{aligned}$$

### - Expressão 2 – Contribuição do Consumidor 1 no PAC:

No cálculo da contribuição do Consumidor 1 no PAC, foi adotado o circuito da Figura C.3.

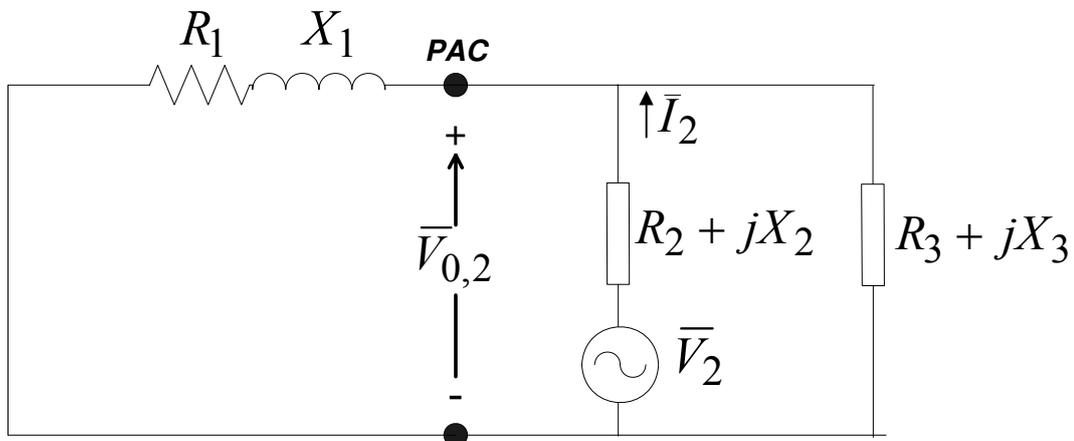


Figura C.3 - Circuito equivalente para o cálculo da contribuição da concessionária.

O processo de cálculo é semelhante ao mostrado para concessionária. Sendo a contribuição para o Consumidor 1 expressa por:

$$\bar{V}_{0,2} = \frac{\bar{V}_2}{Z_{eq2}} \cdot Z_{c2}. \quad (C.9)$$

A impedância  $Z_{eq2}$  é expressa por:

$$Z_{eq2} = Z_{c2} + (R_2 + j.X_2), \quad (C.10)$$

em que,  $Z_{c2}$  é dado por:

$$Z_{c2} = \frac{(R_1.R_3 - X_1.X_3) + j.(R_1.X_3 + R_3.X_1)}{[(R_1 + R_3) + j.(X_1 + X_3)]}. \quad (C.11)$$

A impedância  $Z_{eq2}$  é representada pela seguinte expressão:

$$Z_{eq2} = \frac{(R_1.R_3 - X_1.X_3) + j.(R_1.X_3 + R_3.X_1)}{[(R_1 + R_3) + j.(X_1 + X_3)]} + \frac{[R_2.(R_1 + R_3) - X_2.(X_1 + X_3)] + j.[R_2.(X_1 + X_3) + X_2.(R_1 + R_3)]}{[(R_1 + R_3) + j.(X_1 + X_3)]}. \quad (C.12)$$

Portanto, ao substituir as equações (C.11) e (C.12) em (C.9), obtém-se a expressão da contribuição do Consumidor 1 no PAC, dada por:

$$\bar{V}_{0,2} = \frac{A_2}{B_2 + j.C_2}, \quad (C.13)$$

em que,

$$\begin{aligned} A_2 &= \bar{V}_2 \cdot (R_1.R_3 - X_1.X_3) + j.(R_1.X_3 - R_3.X_1); \\ B_2 &= [(R_1.R_3 - X_1.X_3) + R_2.(R_1 + R_3) - X_2.(X_1 + X_3)]; \\ C_2 &= [(R_1.X_3 + R_3.X_1) + R_2.(X_1 + X_3) + X_2.(R_1 + R_3)]. \end{aligned}$$

### - Expressão 3 – Contribuição do Consumidor 2 no PAC:

No cálculo da contribuição do Consumidor 2 no PAC, o circuito da Figura C.4 foi adotado.

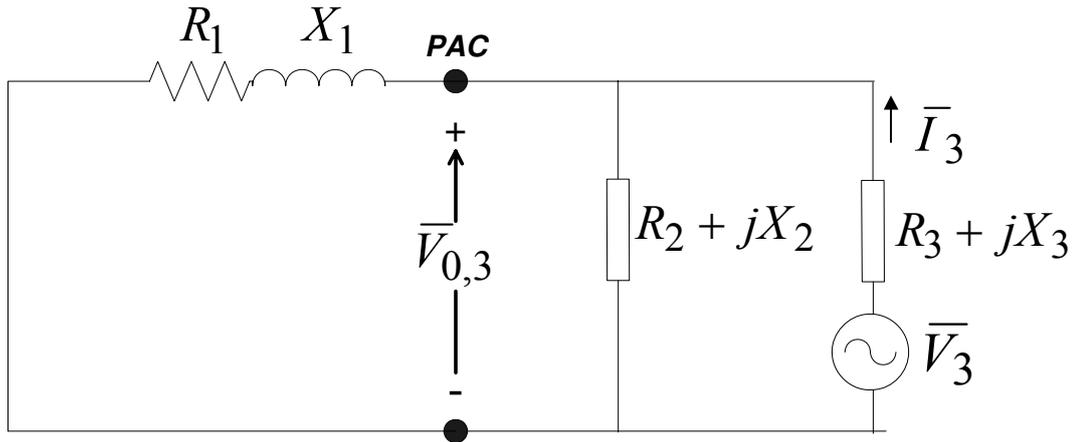


Figura C.4 - Circuito equivalente para o cálculo da contribuição da concessionária.

A contribuição para o Consumidor 2 pode ser expressa por:

$$\bar{V}_{0,3} = \frac{\bar{V}_3}{Z_{eq3}} \cdot Z_{c3}. \quad (C.14)$$

A impedância  $Z_{eq3}$  é dada por:

$$Z_{eq3} = Z_{c3} + (R_3 + j.X_3), \quad (C.15)$$

onde, têm-se:

$$Z_{eq3} = \frac{(R_1.R_2 - X_1.X_2) + j.(R_1.X_2 + R_2.X_1)}{[(R_1 + R_2) + j.(X_1 + X_2)]} + \frac{[R_3.(R_1 + R_2) - X_3.(X_1 + X_2)] + j.[R_3.(X_1 + X_2) + X_3.(R_1 + R_2)]}{[(R_1 + R_2) + j.(X_1 + X_2)]}. \quad (C.16)$$

Portanto, ao substituir a equação (C.9) pode ser reescrita representado assim a contribuição da tensão para o Consumidor 3, como mostrado na equação (C.17):

$$\bar{V}_{0,3} = \frac{A_3}{B_3 + j.C_3}, \quad (C.17)$$

em que,

$$\begin{aligned} A_3 &= \bar{V}_3 \cdot (R_1.R_2 - X_1.X_2) + j.(R_1.X_2 + R_2.X_1), \\ B_3 &= [(R_1.R_2 - X_1.X_2) + R_3.(R_1 + R_2) - X_3.(X_1 + X_2)], \\ C_3 &= [(R_1.X_2 + R_2.X_1) + R_3.(X_1 + X_2) + X_3.(R_1 + R_2)]. \end{aligned}$$