

MODELAGEM DE CARGAS NÃO-LINEARES POR FONTES DE CORRENTE
SINCRONIZADAS

Mamour Sop Ndiaye

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por:

Prof. Maurício Aredes, Dr.–Ing.

Prof. José Luiz da Silva Neto, Ph.D.

Prof. Edson Hirokazu Watanabe, D. Eng.

Prof. Carlos Alberto Canesin, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2006

NDIAYE, MAMOUR SOP

Modelagem de Cargas Não-Lineares por
Fontes de Corrente Sincronizadas [Rio de
Janeiro] 2006

XII, 118 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ M.Sc.,
Engenharia Elétrica, 2006)

Dissertação - Universidade Federal do Rio
de Janeiro, COPPE

1. Qualidade de Energia Elétrica
2. Modelagem de Cargas Elétricas

I. COPPE/UFRJ II Título II (série)

*Pour toi père,
Pour toi mère,
Pour vous qui vivez endormis,
Dans l'eau qui coule,
Dans l'enfant qui sourit,
Dans la lumière puisée au foyer saint des
rayons primitifs,...*
Je dedique chaque page de mon livre d'étude.

*Á ma fille Ndeye Fatou et mon épouse Sokhna
A mes frères, neveux et nièces
A todos que lutam contra a injustiça e a opressão*

AGRADECIMENTOS

Neste Trabalho, eu exprimo minha gratidão a todas as pessoas que contribuíram cada uma da sua maneira, para a realização desta dissertação.

Eu gostaria de exprimir em primeiro lugar todo meu reconhecimento ao Professor Maurício Aredes por ter me acolhido no Laboratório de Eletrônica de Potência, e, sobretudo pela sua orientação, e seus conselhos apesar da sua carga bastante intensa.

Meu reconhecimento e gratidão vão igualmente ao amigo Antonio Felipe da Cunha de Aquino pelas contribuições que ele deu para este trabalho.

Aos professores Edson Hirokazu Watanabe e José Luiz da Silva Neto pela ajuda prestada em diversas etapas deste trabalho.

Aos professores do Laboratório de Eletrônica de Potência pelos ensinamentos transmitidos e pela oportunidade concedida como aluno da COPPE.

Ao meu irmão Papa Matar pela proteção que ele sempre nos deu, longe de tudo e de todos.

Aos meus irmãos que, apesar da distância, estão sempre presentes.

Ao amigo, o Professor Ricardo Rhomberg Martins pela disponibilidade de sempre.

Aos amigos e colegas do Laboratório, principalmente João Moor Neto, Gilson dos Santos Jr e Rodrigo Martins Fernandes pelas discussões bastante proveitosas para o cumprimento deste trabalho.

Às secretárias do Laboratório de Eletrônica de Potência e do Programa de Engenharia Elétrica da COPPE.

Agradeço ao CNPQ pelo apoio financeiro concedido ao trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos Requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

MODELAGEM DE CARGAS NÃO-LINEARES POR FONTES DE CORRENTE
SINCRONIZADAS

Mamour Sop Ndiaye

Março/2006

Orientador: Maurício Aredes

Programa: Engenharia Elétrica

Nos sistemas de distribuição de Energia Elétrica, o aumento expressivo de cargas não-lineares, verificado principalmente nas duas últimas décadas, tem preocupado bastante os diversos agentes do setor elétrico. Em particular, as distribuidoras de energia elétrica têm procurado analisar os impactos na qualidade de seu fornecimento que resultam da conexão crescente deste tipo de carga. A disponibilidade de equipamentos de processamento digital de sinais com bastante acurácia e o surgimento de simuladores eletrônicos cada vez mais simples de se manusear, permitindo uma representação das plantas elétricas com os mínimos detalhes têm favorecido as pesquisas sobre a qualidade de energia elétrica.

Neste trabalho, propõe-se uma modelagem de cargas não-lineares. O modelo baseia-se na norma IEEE 519 e pode ser aplicado nos sistemas onde a distorção harmônica total de tensão é inferior a 10%. Adicionalmente, um PLL (*Phase Locked Loop*) será utilizado como circuito de sincronismo. Acrescenta-se também o Modelo ZIP (Impedância, Corrente e Potência constante), permitindo-se a reprodução correta de todos tipos de cargas.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

MODELLING OF NON-LINEAR LOADS BY SYNCHRONIZED CURRENT
SOURCES

Mamour Sop Ndiaye

March/2006

Advisor: Maurício Aredes

Department: Electrical Engineering

In the electrical distribution systems, the significant growth of non-linear loads in electrical systems, mainly observed during the last two decades, has preoccupied several agents of the electrical sector. Especially, the distributors of the electrical energy have tried to analyse the impacts on the quality of its supply which come from the crescent number of connections of this kind of load. The availability of the digital signals processing with enough accuracy and the development of several more user-friendly digital simulators, allowing a more detailed representation of the electrical plants, have been favored the researches on the quality of the electrical energy.

In this work, we propose a model for non-linear loads. The model is based on the pattern IEEE 519 standard, and it can be used in systems where the total voltage harmonic distortion is less than 10%. Additionally, a PLL (Phase Locked Loop) will be used as a synchronizing circuit. Furthermore, this work presents the ZIP model in a form to reproduce correctly any type of load.

Sumário

Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1. Contexto	3
1.1.1. A necessidade econômica	3
1.1.2. Generalização dos equipamentos sensíveis às perturbações da tensão e/ou geradores de perturbações	4
1.1.3. A abertura dos mercados de Energia Elétrica	5
1.2. Objetivos da Medida da Qualidade de Energia Elétrica.....	5
1.2.1. Aplicação contratual.....	5
1.2.2. Otimização do funcionamento das instalações elétricas	5
1.3. Modelagem de Cargas.....	6
1.4. Organização do Trabalho	7
Capítulo 2	9
Perturbações Devidas aos Harmônicos	9
2.1. Caracterização das perturbações	12
2.2. Fontes de Harmônicos.....	14
2.3. Medição de Harmônicos	17
2.4. Métodos de simulação de harmônicos	18
2.5. Conseqüências da distorção harmônica.....	19
2.6. Regulamentações.....	20
2.7. Modelagem Proposta.....	22
Capítulo 3	26
Modelagem de cargas.....	26
3.1. Estado da Arte na Modelagem de Cargas	27
3.2. Exemplos de Cargas.....	29
3.2.1. Modelo Digital da corrente de uma Lâmpada Fluorescente Compacta	29
a. Modelo 1: Circuito detalhado da lâmpada fluorescente compacta	29
b. Modelo 2: Fontes de corrente harmônicas	30
3.2.2. Modelo digital da fonte de alimentação de um Aparelho de Fax.....	32
a. Modelo 1: Circuito detalhado do aparelho de fax.....	32
b. Modelo 2: Fontes de corrente harmônicas	33
3.2.3. Transformador Monofásico em Vazio	35
3.2.4. O Circuito de Sincronismo.....	36
3.2.5. PLL Monofásico.....	39
3.3. Modelo ZIP	42

3.4.	Representação no PSCAD/EMTDC.....	47
	Capítulo 4.....	49
	Estudo de Cargas Típicas.....	49
4.1.	Retificador Trifásico.....	50
4.1.1.	Carga Resistiva.....	50
4.1.2.	Carga Resistiva e Indutiva.....	53
4.2.	Retificador Monofásico.....	55
4.3.	Motor de Indução.....	57
4.4.	Carga Composta.....	60
	Capítulo 5.....	63
	Estudo de Caso: Carga Industrial.....	63
5.1.	Grandezas Coletadas.....	63
5.2.	Modelagem no Programa PSCAD.....	68
5.2.1.	Equivalente da Rede Básica.....	69
5.2.2.	Subestação 138/11,95 kV.....	70
5.2.3.	Alimentadores.....	71
a.	Alimentador SE02.....	72
b.	Alimentador SE03.....	73
c.	Alimentador SE05.....	74
d.	Alimentador SE06.....	74
5.3.	Simulações no PSCAD.....	75
5.3.1.	Condições Normais de Operação.....	75
5.3.2.	Afundamento de Tensão na Fase A (50% por 300 ms).....	77
5.3.3.	Afundamento de tensão nas três fases (50% por 300 ms).....	79
5.3.4.	Rejeição de carga (alimentadores SE03, SE05 e SE06).....	80
5.3.5.	Variação de frequência.....	82
	Capítulo 6.....	84
	Conclusões e Trabalhos Futuros.....	84
6.1.	Conclusões.....	84
6.2.	Trabalhos Futuros.....	87
	Referências Bibliográficas.....	88
	Apêndice A.....	92
	Modelo Desenvolvido no PSCAD/EMTDC.....	92
	Apêndice B.....	97
	Degradação da Qualidade de Energia Elétrica.....	97
B.1.	Qualidade de Energia Elétrica e Compatibilidade Eletromagnética.....	98
B.1.1.	Qualidade de Energia Elétrica.....	98

B.1.2.	Compatibilidade Eletromagnética	98
B.2.	Os Fenômenos perturbadores	99
B.2.1.	Afundamento de tensão	99
a.	Conceitos, Definições e Características	99
b.	Normas	100
c.	Componentes lentos das variações de tensão	102
d.	Origem dos afundamentos	102
e.	Frequência de ocorrência	103
f.	Agregação Temporal	104
g.	Método de caracterização	105
B.2.2.	Elevação de tensão	105
a.	Sobretensão Temporária	107
b.	Sobretensão Atmosférica	112
B.2.3.	Proteção contra Sobretensões	113
a.	Inserção de Resistores	114
b.	Pára-raios	114
B.2.4.	Flutuações de tensão	116
B.2.5.	Variação de Frequência	118

Lista das Figuras

Figura 1: Representação das cargas não-lineares por fontes de corrente harmônicas.....	7
Figura 2: Tensão distorcida por um décimo de terceiro harmônico	10
Figura 3: Tensão distorcida por um décimo de quinto harmônico	11
Figura 4: Corrente drenada por lâmpada fluorescente compacta de alto FP e Espectro harmônico	11
Figura 5: Modelagem da rede e da carga	12
Figura 6 : Tensão e corrente para uma carga não-linear	13
Figura 7: Corrente de entrada de uma fonte de computador de 300 W.....	15
Figura 8: Tensão e corrente originais na carga.....	24
Figura 9: Tensão e corrente, com erro de 10°.....	24
Figura 10: Potência instantânea (W) drenada pela carga nas duas condições.....	24
Figura 11: Representação das cargas não-lineares por fontes de corrente harmônicas.....	29
Figura 12: Circuito completo de uma lâmpada de baixo fator de potência.....	30
Figura 13: Forma de onda da corrente e tensão drenada por lâmpada de baixo fator de potência (Escala 1: 200) (15 W).....	31
Figura 14: Conteúdo harmônico da corrente drenada por lâmpada de baixo fator de potência (15 W).....	31
Figura 15: Circuito detalhado de um aparelho de fax	33
Figura 16: Formas de onda de tensão $v(t)$ (acima) e corrente $i(t)$ (abaixo) do aparelho de fax ..	34
Figura 17: Espectro harmônico da corrente drenada pelo aparelho de fax.	34
Figura 18: Corrente de um transformador em vazio reconstituída através do espectro harmônico.....	36
Figura 19: Esquema do circuito de sincronismo PLL	37
Figura 20: Laço interno da Figura 19 para pequenos sinais.....	39
Figura 21: PLL monofásico.....	40
Figura 22. PLL monofásico simplificado.....	40
Figura 23: Simulação de frequência variável no sistema.	41
Figura 24: Potência ativa com distúrbio na frequência [com PLL].....	41
Figura 25: Potência ativa com distúrbio na frequência [sem PLL].....	41
Figura 26: Modelagem de cargas não-lineares proposta.....	42
Figura 27: Modelo de carga não linear proposto.....	47
Figura 28: Estrutura geral do bloco referente ao modelo de carga não-linear no PSCAD.....	48
Figura 29: Retificador Trifásico	50
Figura 30: Retificador monofásico.....	50
Figura 31: Circuito equivalente de um motor de indução em regime permanente.....	50

Figura 32: Espectro harmônico da corrente de entrada de um retificador trifásico com carga Z constante, admitindo-se $V_{LL}=208$ V	51
Figura 33: Formas de onda do sinal original e do sinal reconstruído, admitindo-se $V_{LL}=208$ V	51
Figura 34 Espectro harmônico da corrente de entrada de um retificador trifásico com carga Z constante, admitindo-se $V_{LL}=117$ V	52
Figura 35: Formas de onda do sinal original e do sinal reconstruído, admitindo-se $V_{LL}=117$ V	52
Figura 36: Espectro harmônico da corrente de entrada de um retificador trifásico com carga Z-I constante, admitindo-se $V_{LL}=160$ V	53
Figura 37: Formas de onda do sinal original e do sinal reconstruído $V_{LL}=160$ V	54
Figura 38 Espectro harmônico da corrente de entrada de um retificador trifásico com carga Z-I constante, admitindo-se $V_{LL}=82$ V	54
Figura 39: Formas de onda do sinal original e do sinal reconstruído, admitindo-se $V_{LL}=82$ V ..	55
Figura 40: Espectro harmônico da corrente de entrada de um retificador monofásico com carga Z-I constante, admitindo-se $V_{an}=120$ V	56
Figura 41: Formas de onda do sinal original e do sinal reconstruído, admitindo-se $V_{an}=120$ V.	56
Figura 42 Espectro harmônico da corrente de entrada de um retificador monofásico com carga Z-I constante, admitindo-se $V_{an}=48$ V	57
Figura 43: Formas de onda do sinal original e do sinal reconstruído, admitindo-se $V_{an}=48$ V...	57
Figura 44: Potência ativa e reativa de um motor de indução quando a tensão do estator está acima de 5% do valor nominal	58
Figura 45: Potências ativa e reativa do motor de indução quando a tensão do estator está 5% abaixo do valor nominal	59
Figura 46: Espectro harmônico de um motor de indução trifásico, admitindo-se $V_{LL}=208$ V....	59
Figura 47: Formas de onda do sinal original e do sinal reconstruído, admitindo-se $V_{LL}=208$ V	60
Figura 48: Espectro harmônico de uma carga ZIP, admitindo $V_{LL}=208$ V	61
Figura 49: Formas de onda do sinal original e do sinal reconstruído, admitindo $V_{LL}=208$ V	61
Figura 50: Histograma de tensões (pu)	64
Figura 51: Distorção harmônica de tensão do consumidor industrial	64
Figura 52: Correntes nas fases A, B e C	65
Figura 53: Potência ativa	66
Figura 54: Fator de Potência Total	66
Figura 55: THD de corrente	67
Figura 56: Formas de onda de corrente nas fases A, B e C – 05/01/2005 11:20h.....	68
Figura 57: Conexão da SE à rede básica	69
Figura 58: Diagrama unifilar da SE	70
Figura 59: Representação do alimentador SE02 (diagrama unifilar).....	72

Figura 60: Potência ativa e reativa no alimentador da SE02 [13 e 20/07/2005]	73
Figura 61: Potência ativa e reativa no alimentador da SE03 [13 e 20/07/2005]	73
Figura 62: Potência ativa e reativa no alimentador da SE05 [13 e 20/07/2005]	74
Figura 63: Potência ativa e reativa no alimentador da SE06 [13 e 20/07/2005]	75
Figura 64: Tensões nas fases A, B e C no consumidor em condições normais	75
Figura 65:: Correntes nas fases A, B e C do consumidor em condições normais	76
Figura 66: Tensão e corrente na fase A do consumidor em condições normais	76
Figura 67: Potência ativa e reativa do consumidor em condições normais.....	77
Figura 68: Tensões nas fases do consumidor para afundamento de 50% - 300 ms	77
Figura 69: Correntes nas fases do consumidor para afundamento de 50% - 300 ms	78
Figura 70: Potência ativa e reativa do consumidor para afundamento de 50% - 300 ms.....	78
Figura 71: Tensões nas fases do consumidor para afundamento trifásico de 50% - 300 ms	79
Figura 72: Correntes nas fases do consumidor para afundamento trifásico de 50% - 300 ms....	80
Figura 73: Potência ativa e reativa do consumidor para afundamento trifásico de 50% - 300 ms	80
Figura 74: Tensões nas fases do consumidor do consumidor após rejeição de SE03, SE05 e SE06	81
Figura 75: Correntes nas fases do TR1 da SE após rejeição de SE03, SE05 e SE06.....	81
Figura 76: Correntes nas fases do consumidor em após rejeição de SE03, SE05 e SE06	82
Figura 77: Potência ativa e reativa do consumidor após rejeição de SE03, SE05 e SE06	82
Figura 78: Tensão e corrente na fase A do consumidor durante a variação da frequência	83
Figura 79: Tensão e corrente na fase A do consumidor após a estabilização da frequência.....	83
Figura A.1: Estrutura do modelo.....	93
Figura A.2: Escolha do tipo de carga (mono ou trifásica).....	93
Figura A.3: Escolha das ordens dos Harmônicos.....	94
Figura A.4: Harmônicos de corrente da fase A	94
Figura A.5: Fase B desabilitada para carga equilibrada ou monofásica.....	95
Figura A.6: Fase C desabilitada para carga equilibrada ou monofásica.....	95
Figura A.7 : Fase B habilitada para carga trifásica	96
Figura A.8: Fase C habilitada para carga trifásica	96
Figura B.1: Tensões nas fases a, b e c de um consumidor para afundamento trifásico de 50% - 300 ms 102.	
Figura B.2: Tensões fase-neutro (pu) de um consumidor residencial	102
Figura B.3: Sobretensão devida à falta de uma fase.....	108
Figura B.4: Variações de tensão e corrente acarretando flutuações de tensão	116

Capítulo 1

Introdução

Entre 1789, data da revolução francesa, e 1989, ano em que caiu o muro de Berlim, o espectro da “luz intelectual” mudou significativamente. Da Liberdade, Igualdade e Fraternidade, trilogia anunciada como os princípios universais, passam à globalização econômica, tecnológica e cultural, apresentada como nova ordem mundial. Os efeitos deste novo consenso são amplamente discutíveis e são constantemente objetos de discussões em fóruns e cúpulas mundiais. O que produzir, como produzir, para quem produzir, tornam-se questões que fazem parte de todo processo de gestação de projetos. Deixamos um ambiente gerido pelo conceito estreito de desenvolvimento econômico para iniciar a exploração do conceito mais amplo de desenvolvimento sustentável. No campo científico, a discussão diz respeito ao uso de tecnologias limpas, condição *sine qua non* para tal desenvolvimento. Dominar e desenvolver estas

tecnologias tornou-se um desafio para pesquisadores do mundo inteiro, principalmente dos países em desenvolvimento.

Por outro lado, no setor elétrico, nessas últimas décadas, as concessionárias de energia elétrica têm dedicado boa parte dos seus recursos para a melhoria da qualidade da energia elétrica entregue aos seus consumidores. Os primeiros esforços limitavam-se à continuidade de serviço, de forma a garantir o fornecimento ininterrupto de energia ao usuário [1].

No Brasil, os principais indicadores da continuidade foram o DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), que exprime o intervalo de tempo que, em média, cada unidade consumidora do conjunto considerado sofreu descontinuidade no fornecimento de energia elétrica, no período de observação e o FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) que exprime o número de interrupções que, em média, cada unidade consumidora do conjunto considerado sofreu no período de observação.

Estes dois indicadores consideram interrupções maiores ou iguais a 1 (um) minuto. Há legislação específica que obriga as distribuidoras de energia elétrica a indicar os índices DEC e FEC nas faturas de todos os consumidores.

Atualmente, os critérios de qualidade têm evoluído com o desenvolvimento dos equipamentos onde a eletrônica de potência ocupa um lugar preponderante nos sistemas de acionamento e controle.

Estes dispositivos sensíveis, mas que degradam igualmente a qualidade da tensão, existem em todas as categorias de consumidores:

- no setor industrial pelo uso dos dispositivos de eletrônica de potência para acionamento de motores, dos fornos a arco, das fontes chaveadas, dos retificadores [2],[3],[4],etc. ;
- no setor comercial com o desenvolvimento da informática cuja carga é cada vez mais sensível à qualidade da energia elétrica [5],[6], etc. ;

- no setor residencial com a utilização em grande número das fontes chaveadas (televisores, aparelhos de som, DVDs, aparelhos de fax, etc.) , lâmpadas fluorescentes com reatores eletrônicos, [5],[6], etc..

Uma das particularidades da energia elétrica é que muitas de suas características dependem ao mesmo tempo do produtor/distribuidor de energia, dos fabricantes de equipamentos e do cliente. O número importante de protagonistas e a utilização de uma terminologia e definições aproximativas explicam em parte a complexidade deste assunto [1]. Com a abertura do mercado de energia elétrica, a necessidade das empresas garantirem a produção, faz da qualidade da energia uma estratégia para as companhias de energia elétrica e os fabricantes de equipamentos. Os critérios de qualidade são oriundos da observação das perturbações elétricas das redes.

1.1. Contexto

A Qualidade de Energia Elétrica tornou-se um assunto estratégico para todos os atores presentes no setor elétrico, entre eles geradoras, transmissoras, distribuidoras, setores de exploração, de manutenção, ou de gestão dos setores terciários ou industriais, e os construtores de equipamentos, essencialmente pelos motivos apresentados nas subseções seguintes:

1.1.1. A necessidade econômica

- **A redução dos custos devido à perda de continuidade de serviços e à falta de qualidade**

O custo das perturbações (interrupções, afundamento de tensão, harmônicos, sobretensões atmosféricas, etc...) é elevado. Estes custos devem levar em consideração o lucro cessante, as perdas de matérias primas, a falta de confiabilidade do equipamento de produção, a falta de qualidade na produção, os atrasos na entrega, etc. O mau e/ou não funcionamento dos sistemas importantes tais como computadores, iluminação, entre outros, pode acarretar falhas de segurança nos hospitais, aeroportos, praças públicas, prédios muito altos, etc..

Isto passa também pela detecção dos problemas por antecipação, através uma manutenção preventiva localizada e otimizada.[1].

- **A redução dos custos devido ao super dimensionamento das instalações e às faturas de energia**

Outras conseqüências mais insidiosas da degradação da qualidade de energia elétrica são a redução do rendimento energético da instalação (que pesa no final sobre a fatura de energia) e a sobrecarga da instalação (que acarreta seu envelhecimento precoce com um risco real de pane que, em geral, é resolvido com o sobre-dimensionamento dos equipamentos de distribuição).

1.1.2. Generalização dos equipamentos sensíveis às perturbações da tensão e/ou geradores de perturbações

Devido às suas múltiplas vantagens (versatilidade, excelente rendimento, alto desempenho, etc.), assistimos a um crescimento e generalização dos automatismos, do uso de controladores de velocidade na indústria, dos sistemas de informática, das lâmpadas fluorescentes compactas, tanto na indústria como no uso doméstico. Estes equipamentos têm a particularidade de serem sensíveis às variações de tensão, todavia, drenam correntes distorcidas que resultam em outros problemas outros problemas.

A presença destes equipamentos em grande número em um mesmo local exige um sistema de alimentação elétrico cada vez mais robusto em termos de continuidade e qualidade. A parada temporária de um elemento da cadeia pode provocar a parada da ferramenta de produção (fabricação de semicondutores, cimentaria, tratamento de água, manutenção, siderurgia, etc.) ou de serviços (centro de cálculo, bancos, telecomunicações).

Em conseqüência, os padrões da IEC [7] e IEEE [8] e recomendações [9] sobre a Compatibilidade Eletromagnética (CEM), representam normas e recomendações cada vez mais coercivas (limitações dos níveis de perturbações).

1.1.3. A abertura dos mercados de Energia Elétrica

As regras do setor elétrico evoluíram profundamente nos últimos anos levando à abertura da concorrência da produção de energia, produção descentralizada, possibilidade para grandes consumidores de escolherem seus fornecedores. Na maioria dos países, a energia é considerada como um produto, entretanto há a necessidade de definir suas características essenciais.

No contexto da liberalização do mercado da energia elétrica, a competitividade faz da qualidade de energia um fator diferenciador. A sua garantia pode ser, para um industrial por exemplo um critério de escolha do fornecedor de energia [1].

1.2. Objetivos da Medida da Qualidade de Energia Elétrica

A década passada ficou marcada pela crescente preocupação com a qualidade dos produtos e serviços. Dependendo das aplicações, os parâmetros a serem medidos para a definição da qualidade da energia Elétrica e a precisão da medida podem variar [8].

1.2.1. Aplicação contratual

Relações contratuais podem ser estabelecidas entre produtor de energia elétrica e consumidor final, mas também entre produtor e distribuidor. Uma aplicação contratual necessita que os termos sejam definidos em comum e aceitos pelas partes. Trata-se de definir os parâmetros de medida da qualidade e compará-los aos limites predefinidos.

1.2.2. Otimização do funcionamento das instalações elétricas

Para realizar ganhos de produtividade (economia de funcionamento e/ou redução dos custos de operação), é necessário um bom funcionamento dos processos e uma boa gestão da energia, dois fatores que dependem da qualidade de energia elétrica. Dispor de uma qualidade de energia elétrica adaptada às necessidades é um objetivo do pessoal de operação, manutenção e de gestão dos setores comerciais e industriais.

Ferramentas tais como programas de computadores, garantindo o controle/acionamento e a monitoração permanente da instalação, tornam-se então necessárias.

1.3. Modelagem de Cargas

Na modelagem de cargas não-lineares por fontes de corrente, procura-se reproduzir a corrente drenada pelo equipamento quando submetido a condições nominais de operação. Para tanto, poder-se-ia pensar na reprodução fiel dos circuitos elétricos, eletrônicos e eletromecânicos originais. Esta estratégia, embora dê resultados bastante precisos, leva a um aumento significativo da complexidade do modelo e das análises resultantes, sobretudo quando estão envolvidas simulações digitais. Neste caso, os tempos totais de simulação podem ser severamente afetados. Há ainda grande dificuldade na obtenção dos circuitos correspondentes aos equipamentos, uma vez que não há interesse comercial dos fabricantes na divulgação deste tipo de informação. Adicionalmente, a aplicação desta estratégia para a representação de cargas compostas, tais como escritórios comerciais, residências e pequenas indústrias pode ser demasiadamente trabalhoso.

Alternativamente, pode-se adotar a representação das cargas não-lineares por fontes de corrente harmônicas equivalentes. Esta estratégia pode ser empregada quando se dispõe de informações precisas a respeito do conteúdo harmônico da corrente drenada por determinada carga (magnitude e fase dos harmônicos principais). A norma IEEE 519 (utility version) [10] recomenda a utilização desta metodologia, nos casos onde a distorção máxima de tensão na barra de interesse é igual ou inferior a 10%.

A corrente drenada por um equipamento ao longo do tempo pode ser determinada por simulações digitais, ou ainda, por desenvolvimentos analíticos. Além disso, podem ser utilizados equipamentos de registro que informam diretamente os diversos harmônicos presentes na corrente medida. Outra possibilidade seria a utilização da FFT (Fast Fourier Transform) sobre as próprias formas de onda de corrente registradas. Deve-se ressaltar que esta estratégia pode ser utilizada para um determinado equipamento ou grupo deles.

De qualquer forma, uma vez determinado o espectro harmônico da corrente drenada, pode-se produzir o modelo digital para a carga, através da utilização de fontes de corrente para representação dos harmônicos mais significativos.

A Figura 1 apresenta o esquema para a representação de cargas não-lineares por fontes de corrente harmônicas, descrito anteriormente. Neste caso, o número de fontes de corrente necessárias dependerá da quantidade de harmônicos significativos e da faixa de frequência dos fenômenos estudados.

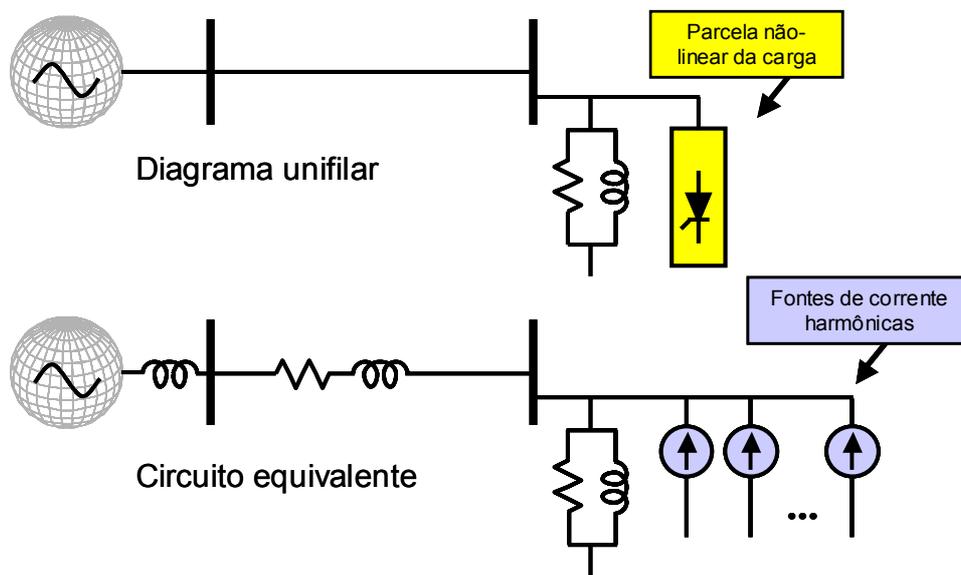


Figura 1: Representação das cargas não-lineares por fontes de corrente harmônicas

O objetivo deste trabalho é a representação de modelo compacto de carga. O modelo deve servir para todos os tipos de carga e será baseado em injeções de harmônicos de corrente, de um circuito de sincronismo e do modelo ZIP modificado.

1.4. Organização do Trabalho

O Capítulo 2 trata dos efeitos nocivos dos harmônicos à qualidade de energia elétrica. Apresentaremos as normas de fiscalização da qualidade de Energia elétrica, particularmente IEEE 519 e IEC 1000, e, as normas e níveis de distorções em vigor no Brasil. O capítulo também trata de uma alternativa de modelo de carga, baseada em fontes de correntes sincronizadas.

O capítulo 3 detalha o estado da arte na modelagem de cargas não-lineares. Mostraremos a necessidade e a estratégia adotada para a representação das cargas não lineares. Serão apresentados modelos digitais de cargas residencial, comercial e industrial. O modelo matemático, assim como o funcionamento do PLL, também são detalhados neste capítulo.

O Capítulo 4 mostra a implementação no laboratório de cargas típicas (Impedância constante, Potência constante e Corrente constante) e uma combinação dessas cargas para a validação do modelo ZIP. Os resultados obtidos serão comparados com os simulados no PSCAD/EMTDC®. Conhecendo-se o conteúdo harmônico das cargas (módulo e ângulo), são reconstruídas essas cargas a partir do modelo proposto. É apresentada uma ferramenta útil para estudar o impacto de algumas cargas sobre a rede elétrica.

No Capítulo 5 apresenta-se o estudo de caso de um consumidor industrial cujo consumo mensal é 2000 kWh. Os resultados obtidos a partir da modelagem proposta serão comparados com os medidos com o medidor de qualidade de energia elétrica, ION 7600 da Power Measurement®. Serão simulados casos de afundamento de tensão, rejeição de cargas e variação na frequência da rede.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho, assim com as sugestões para os trabalhos futuros.

Capítulo 2

Perturbações Devidas aos Harmônicos

Os geradores de energia elétrica são projetados para que a tensão disponível em seus terminais, em condições normais de operação, apresente comportamento essencialmente senoidal. De fato, este resultado é alcançado pelos fabricantes através da distribuição adequada dos condutores e enrolamentos, do minucioso projeto do núcleo magnético, do entreferro, das ranhuras, etc.

Pelo exposto anteriormente, pode-se afirmar que a distorção da forma de onda de tensão é praticamente nula nos barramentos eletricamente próximos de usinas geradoras. Todavia, verificam-se em outros pontos do sistema tensões com diferentes níveis de

distorções harmônicas. Este resultado pode ser explicado pela presença de cargas e equipamentos de comportamento não linear no sistema, cujas correntes drenadas não apresentam comportamento senoidal. Neste caso a corrente é uma composição da componente fundamental e harmônicos.

O fluxo de correntes distorcidas no sistema impõe quedas de tensão com conteúdo harmônico similar. Esta análise simplificada explica a propagação da distorção harmônica pelo sistema.

Para ilustrar o fenômeno da distorção harmônica, foram geradas algumas formas de onda teóricas que incluem além da componente fundamental (60 Hz) alguns harmônicos. A Figura 2 apresenta a composição de uma forma de onda senoidal (60 Hz) com 10% de terceiro harmônico (180 Hz). A Figura 3 apresenta a composição de uma forma de onda senoidal (60 Hz) com 10% de quinto harmônico (300 Hz). Nos dois casos, observa-se claramente a distorção provocada na forma de onda.

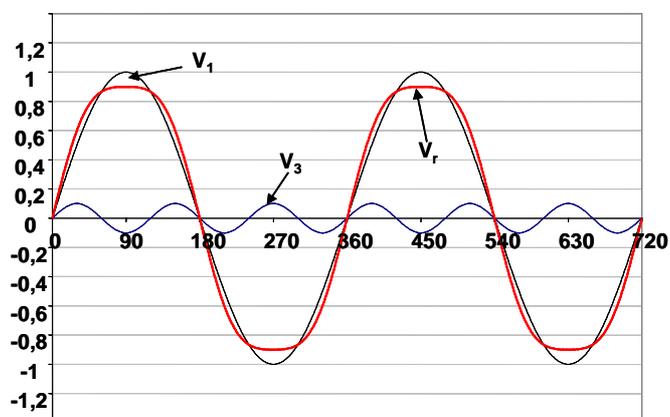


Figura 2: Tensão distorcida por um décimo de terceiro harmônico

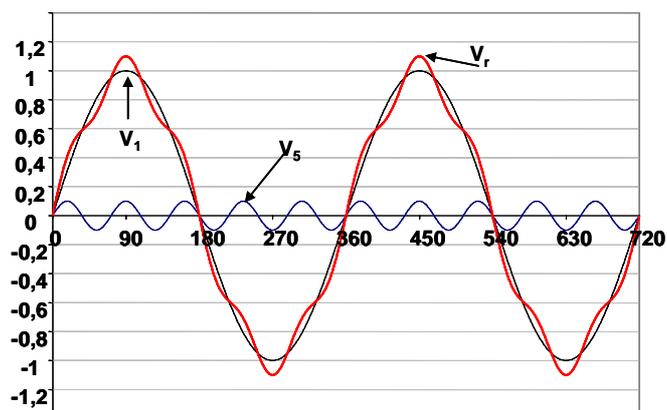


Figura 3: Tensão distorcida por um décimo de quinto harmônico

A Figura 4 [5] apresenta a corrente drenada por uma lâmpada fluorescente compacta de alto fator de potência, registrada por osciloscópio digital. Apresenta também o espectro harmônico obtido pela Transformada Rápida de Fourier. Neste caso, a distorção total de corrente é de cerca de 110%.

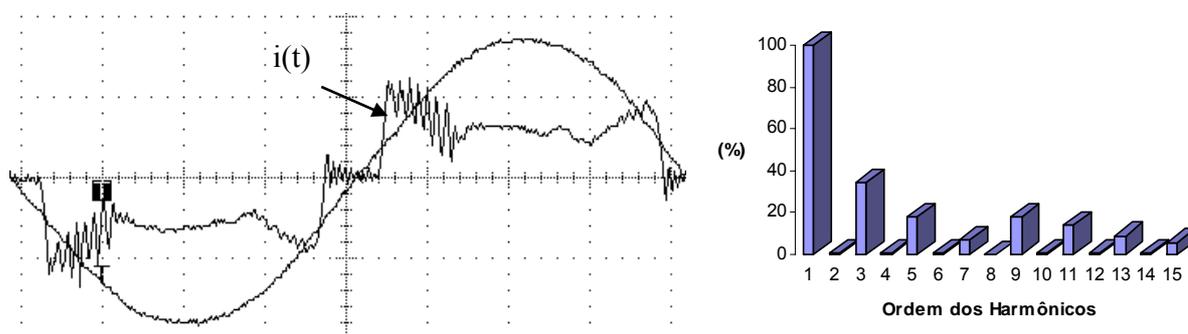


Figura 4: Corrente drenada por lâmpada fluorescente compacta de alto FP e Espectro harmônico

Deve-se destacar que a maior parte das lâmpadas fluorescentes compactas, disponíveis no mercado, é do tipo baixo fator de potência e apresentam distorção harmônica total de corrente elevada.

2.1. Caracterização das perturbações

Considerando-se carga não-linear e tensão de alimentação puramente senoidal, a corrente drenada por uma carga-linear pode ser decomposta em uma série de Fourier, tal como:

$$v_s(t) = V_s \sqrt{2} \text{sen}(2\pi f_0 t) \quad (2.1)$$

$$i_c(t) = i_{cf}(t) + i_{ch}(t) \quad (2.2)$$

$$i_{cf}(t) = I_{cf} \text{sen}(2\pi f_0 t + \varphi_1) \quad (2.3)$$

$$i_{ch}(t) = \sum_{h=2}^{\infty} I_{ch} \text{sen}(2\pi h f_0 t + \varphi_h) \quad (2.4)$$

Onde:

f_0 : frequência da fundamental,

V_s : Valor eficaz da tensão de,

I_{cf} : Valor eficaz da corrente fundamental na carga,

I_{ch} : Valor eficaz da corrente de ordem h na carga

φ_1 : defasagem entre a corrente fundamental de carga e tensão da fonte e,

φ_h : defasagem entre a corrente harmônica de ordem h da carga e tensão da fonte.

A Figura 5 apresenta o circuito elétrico reduzido representando as variáveis admitidas no modelo.

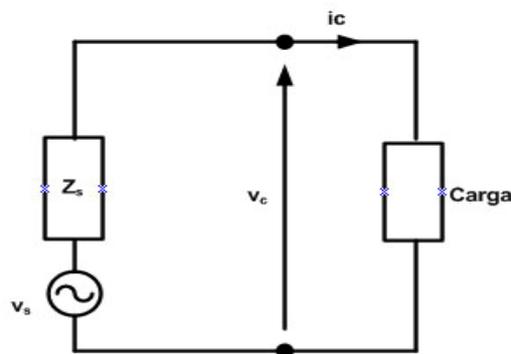


Figura 5: Modelagem exemplo da rede e da carga.

Sendo que:

$$v_c(t) = v_{c1}(t) + \sum_{h=2}^{\infty} v_{ch}(t) \quad (2.5)$$

$$v_{c1}(t) = v_s(t) - |Z_s^1| I_{cf} \text{sen}(2\pi f_0 t + \varphi_1 - \varphi_s^1) \quad (2.6)$$

$$v_{ch}(t) = -|Z_s^h| I_h \text{sen}(2\pi h f_0 t + \varphi_h - \varphi_s^h) \quad (2.7)$$

v_{c1} e v_{ch} são a tensão de acoplamento entre a rede e a carga para a frequência fundamental e harmônica, respectivamente. A figura 6 mostra um exemplo destes fenômenos.

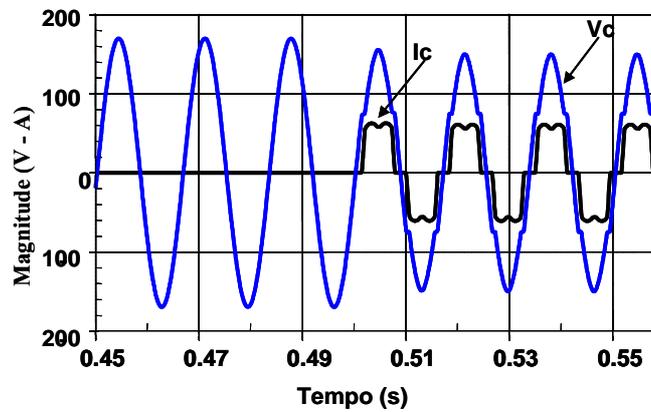


Figura 6 : Tensão e corrente para uma carga não-linear

Os principais indicadores para a quantificação do fenômeno em questão são a Distorção Harmônica Total de Corrente (DHTi) e a Distorção de Harmônica Total de tensão (DHTv). O DHTi é obtido como:

$$DHTi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (I_h)^2}}{I_1}, \quad (2.8)$$

onde:

I_h é o valor eficaz da componente de corrente harmônica de ordem h e,

I_1 é o valor eficaz da componente de corrente fundamental.

O DHTi depende somente dos valores eficazes da corrente da carga. Porém, o DHTv depende tanto das correntes harmônicas, caracterizando a carga, como da impedância de curto-circuito, imposta pela rede [11]:

$$DHT_v = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{V_h}{V_1}\right)^2} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (|Z_s^h| I_h)^2}}{V_1} \quad (2.9)$$

Onde;

V_h : valor eficaz da componente de tensão harmônica de ordem h ,

V_1 : valor eficaz da componente fundamental eficaz tensão fundamental, e

Z_s^h : impedância de curto circuito para o harmônico de ordem h.

O DHT_v é um bom indicador para a caracterização da distorção harmônica. Todavia, freqüentemente são necessárias análises/medições mais abrangentes considerando o registro dos harmônicos individuais. Dizer que a Distorção Total é de 5%, por exemplo, pode não ser suficiente. Um mesmo nível de distorção pode ser obtido para diferentes composições harmônicas.

2.2. Fontes de Harmônicos

A principal fonte de harmônicos em sistemas elétricos são os conversores estáticos de potência, os quais incluem retificadores para processos eletroquímicos, eletrometalúrgicos e conversores estáticos de potência empregados para acionamento de velocidade variável, etc... Adicionalmente, existem outras cargas não-lineares tais como fornos a arco, lâmpadas fluorescentes, fontes de energia para equipamentos eletrônicos (como sistemas interruptivos de energia não - UPS), máquinas com controle numérico e computadores, e qualquer outra carga que quando aplicada ao sistema de potência requeira corrente não-senoidal, será uma carga “produtora” de correntes harmônicas e em consequência, resultam e distorções harmônicas de tensão. A Figura 7 [6] mostra um exemplo de uma fonte de microcomputador de 300 W. A DHT_i para esta fonte medida é da ordem de 120%.

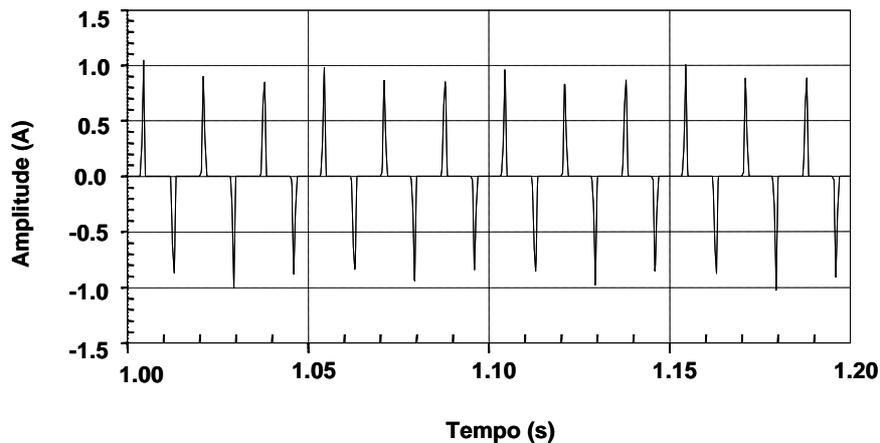


Figura 7: Corrente de entrada de uma fonte de computador de 300 W.

Pela modelagem de impedâncias do sistema elétrico como função da frequência, um estudo pode ser realizado para permitir visualizar os efeitos das contribuições harmônicas produzidas por correntes não lineares no sistema elétrico. A Tabela 2.1 [12] mostra a DHTi de algumas cargas residenciais e comerciais típicas.

Tabela 2.1: Distorção harmônica total da corrente drenada por cargas residenciais e comerciais típicas.

Equipamento	DHTi (%)
Torradeira	2
Cafeteira	2
Lâmpadas fluorescentes (tipo reator)	36
Telefone sem fio	40
Forno de microondas	46
Carregador de bateria	83
Aparelho de som com CD	104
Fonte de computador atx	111
Aparelho de ar condicionado	123
Televisão com vídeo cassete	129

Observa-se que os equipamentos que utilizam resistores para aquecimento, tais como torradeiras e cafeteiras são puramente resistivas e apresentam baixa distorção de corrente devida à distorção de harmônicos da tensão. Por outro lado, correntes altamente

distorcidas são verificadas em equipamentos que utilizam fontes chaveadas (computadores, televisores e vídeos cassete, por exemplo).

Quando um sistema elétrico fica sujeito às injeções de harmônicos, é necessário avaliar o comportamento deste sistema para cada uma das frequências harmônicas presentes no mesmo, uma vez que o aparecimento de harmônicos nos sistemas de potência provoca efeitos indesejáveis tais como perdas adicionais, aquecimentos de máquinas e bancos de capacitores, interferência na operação de equipamentos de controle do próprio sistema de potência e nas comunicações, entre outros. A penetração de harmônicos pode determinar graves problemas em pontos distantes das fontes de frequências harmônicas, isto devido à ocorrência de ressonâncias, que dependem da configuração momentânea do sistema de potência. A Tabela 2.2 [13] apresenta um resumo de todos os efeitos devido às distorções harmônicas.

A análise dos efeitos de ressonância no sistema elétrico necessita do cálculo de vários componentes harmônicos de correntes e os correspondentes componentes harmônicos de tensões que as causam. Em cada frequência, as impedâncias do sistema são diferentes. Para todas as condições, a configuração dos circuitos continua a mesma. Retificadores e outros equipamentos similares produtores de harmônicos são representados por fontes de corrente em cada frequência harmônica de interesse. Fornos a arco e outras fontes geradoras de harmônicos não característicos são representadas por fontes de tensão harmônicas ou empregando o teorema de Norton, são convertidas por uma fonte de corrente harmônica equivalente e impedância equivalente de Norton.

As amplitudes das fontes de corrente harmônicas são também função do número de pulsos do conversor considerado. As amplitudes das tensões harmônicas do sistema são produzidas pelas correntes harmônicas fluindo nas impedâncias harmônicas do sistema de corrente alternada.

Tabela 2.2: Resumo dos efeitos das distorções harmônicas

Equipamento	Natureza do dano devido às tensões harmônicas	Grau de imunidade (nível de tensão admissível)
Máquinas síncronas projetadas para operação senoidal	<ul style="list-style-type: none"> • Maior nível de aquecimento, particularmente nos enrolamentos amortecedores • Torques pulsantes 	$\sqrt{\sum (V_h / h)^2} \leq 1,3$ a $2,4\%$ de acordo com a impedância e tamanho da máquina
Transformadores	<ul style="list-style-type: none"> • Maior nível de perdas • Risco de Saturação na presença de componentes harmônicos pares 	$\sqrt{\sum V_h^2} \leq 5\%$ Carga plena 10% a vazio
Máquinas Assíncronas	<ul style="list-style-type: none"> • Maior nível de aquecimento particularmente nas gaiolas duplas ou nas ranhuras profundas 	$\sqrt{\sum (V_h / h)^2} \leq 1,5$ a $3,5\%$ de acordo com a impedância inversa e tamanho da máquina
Cabos	<ul style="list-style-type: none"> • Maiores perdas ôhmicas 	$\sqrt{\sum V_h^2} \leq 10\%$
Computadores	<ul style="list-style-type: none"> • Problemas operacionais 	$\sqrt{\sum V_h^2} \leq 5\%$
Pontes Retificadoras	<ul style="list-style-type: none"> • Problemas ligados à forma de onda (comutação e sincronismo) 	$\sqrt{\sum V_h^2} \leq 10\%$
Relés de telecomando a 175 Hz	<ul style="list-style-type: none"> • Desarme intempestivo 	$V_3 \leq 7\%$ $V_4 \leq 1.5\%$ $V_5 \leq 8\%$
Capacitores de Potência	<ul style="list-style-type: none"> • Maior nível de aquecimento • Perda de vida útil 	$\sqrt{\sum hV_h^2} \leq 44\%$

2.3. Medição de Harmônicos

As medições são essenciais para a identificação de componentes harmônicos em sistemas elétricos. Mede-se normalmente tensão e corrente em vários pontos do sistema,

que possibilita a análise harmônica, servindo também como ponto de partida para a aferição dos métodos e modelos usados nas simulações.

A realização de medições é necessária mesmo quando as cargas especiais presentes em um sistema elétrico deveriam, teoricamente, apresentar ordens e níveis de harmônicos definidos em projeto.

Observa-se que, em situações reais, as fontes de harmônicos podem funcionar de forma desequilibrada, apresentando níveis e ordens de harmônicos não característicos.

Este desequilíbrio pode ser função da característica da carga especial ou da interação do sistema elétrico poluído de harmônicos, com a própria fonte de harmônicos.

A realização de medições deve ser cuidadosamente efetuada para garantir uma reprodução fiel das grandezas a serem medidas. A medição de tensão e corrente à frequência fundamental não apresenta desafios para os instrumentos utilizados atualmente, mas, quando se deseja medir estas grandezas elétricas para analisar sua composição harmônica (frequência fundamental e harmônicos), tem-se a necessidade de equipamentos especiais, inclusive com elevada banda passante e maiores armazenamento de dados.

2.4. Métodos de simulação de harmônicos

Existem dois métodos para a simulação de penetração de harmônicos: simulação no domínio do tempo e simulação no domínio da frequência.

As simulações no domínio do tempo são conseguidas através da integração numérica de uma série de equações algébrico-diferenciais lineares e não-lineares que descrevem o sistema. Estas simulações permitem analisar o comportamento do sistema em várias condições: instabilidades harmônicas, não-linearidade e regimes transitórios, além das soluções para regime permanente.

No domínio da frequência, os métodos se dividem em métodos lineares e não lineares, ou interativos.

Os métodos não-lineares se caracterizam pela abordagem da carga não-linear junto com o modelo linear do sistema elétrico, através de um processo iterativo que se repete até a convergência, possibilitando também o fluxo de potência harmônico.

O método linear no domínio da frequência, ou como também é chamado método de injeção de correntes, é utilizado sistematicamente em função de sua simplicidade e por ser um método mais largamente utilizado industrialmente e nas concessionárias de energia elétrica.

2.5. Conseqüências da distorção harmônica

As cargas não-lineares podem perturbar o funcionamento de outros dispositivos conectados à rede. As principais conseqüências nocivas a curto prazo são enumeradas nos seguintes itens:

- **Aquecimento:** As perdas por efeito Joule se decompõem em soma das perdas devidas à corrente fundamental e dos harmônicos:

$$P_{joule} = RI_c^2 = RI_{c1}^2 + R \sum_{h=2}^{\infty} I_{ch}^2 \quad (2.10)$$

Estas perdas suplementares ocasionadas pela presença de corrente harmônicas reduzem o rendimento dos equipamentos tais como motores, transformadores, etc.

- **Interferências nos sistemas de comunicações:** a proximidade entre as redes de energia elétrica e de comunicações pode provocar interferências. A corrente que circula na rede provoca um campo magnético que induz uma corrente nos condutores da rede de comunicações. A importância das interferências é função da amplitude e da frequência da corrente elétrica e da existência de acoplamento eletromagnético entre as redes.

- **Excitações das ressonâncias:** Equipamentos capacitivos ou indutivos podem ter frequências de ressonâncias próximas das dos harmônicos. Assim, os harmônicos são amplificados e podem aparecer sobretensões ou limites de ampacidade que ocasionam danos nos cabos, falhas nos disjuntos de fusíveis.

A presença dos harmônicos reduz igualmente o rendimento dos motores e dos transformadores aumentando as perdas de energia por histerese e por corrente de Foucault. Além disso, estes efeitos nocivos instantâneos (aquecimento, sobretensão, etc.) provocam envelhecimento acelerado dos aparelhos elétricos.

2.6. Regulamentações

A crescente utilização de equipamentos tiristorizados, tais como conversores CA/CC, compensadores estáticos e retificadores industriais, bem como outras cargas não-lineares, tais como fornos a arco elétrico, são cada vez mais objetos de discussão sobre a metodologia a ser adotada nos estudos de perturbação causados por tais equipamentos e cargas. A existência comprovada de problemas elétricos associados à circulação de correntes harmônicas e/ ou a ocorrência de distorções de tensões nos diferentes barramentos de uma rede elétrica, tem conduzido nos últimos tempos à necessidade de desenvolvimento de técnicas apropriadas aos estudos do fluxo harmônico. Em nível internacional, as principais normas neste assunto foram definidas pela IEC e IEEE.

As normas 1000 [7] da IEC definem o nível máximo das correntes e tensões harmônicas. A norma IEC-61000-3-2 fixa a limitação das correntes injetadas na rede pública pelos equipamentos cuja corrente por fase é inferior a 16 A. Trata-se dos aparelhos de uso domésticos. As normas IEC-1000-2-2 e IEC-1000-2-4 indicam os níveis dos harmônicos de tensão a respeitar no ponto de acoplamento nas redes de distribuição de baixa tensão, pública e industrial respectivamente.

O IEEE-519 (1992) [10] define as recomendações para controle dos harmônicos nos sistemas elétricos. Os limites de distorção de harmônicos de tensão no ponto de ligação são de responsabilidade da concessionária e os limites da distorção de harmônicos de corrente são de responsabilidade do consumidor. A

Tabela 2.3 mostra os níveis de harmônicos aceitáveis e DHT para tensões de até 69 kV para as normas IEC e IEEE.

No Brasil, os indicadores utilizados para avaliar o estudo harmônico de uma rede são documentados pelo Operador Nacional do sistema Elétrico (ONS) e regulamentado pelo ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Todos os procedimentos referentes à qualidade de energia elétrica estão definidos nos padrões de desempenho da rede básica [14]. A Tabela 2.4 mostra a distorção harmônica total de tensão definida pela ONS.

Tabela 2.3: Níveis de harmônicos de tensão para as normas IEC e IEEE

Ordem do Harmônico	IEC	IEEE
5	5%	3%
7	4%	3%
11	3%	3%
13	2,5%	3%
17	1,6%	3%
19	1,2%	3%
23	1,2%	3%
25	1,2%	3%
DHTv	6.5%	5%

Tabela 2.4: Limites de harmônicos de tensão

V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
Impar		Par		Impar		Par	
Ordem	Limite	Ordem	Limite	Ordem	Limite	Ordem	Limite
3,5,7	5%	2,4,6	2%	3,5,7	2%	2,4,6	1%
9,11,13	3%	≥ 8	1%	9,11,13	1,5%	≥ 8	0,5%
15 a 25	2%			15 a 25	1%		
≥ 27	1%			≥ 27	0,5%		
DHT _v = 6%				DHT _v = 3%			

2.7. Modelagem Proposta

No que se refere exclusivamente à modelagem das cargas, poder-se-ia sugerir dois tipos distintos de representação; através de reprodução dos circuitos originais ou via fontes de corrente de harmônicos em paralelo conforme detalhado na Figura 1 [15]. Neste trabalho, a modelagem por fontes de corrente será utilizado, pelos motivos apresentados nos itens abaixo.

- Trata-se de uma recomendação da norma IEEE 519 [10], nos casos onde a DHT da tensão na barra não ultrapassa 10%. Salvo raríssimas exceções, a distorção de corrente nas barras de distribuição é inferior a este valor.
- O cálculo das contribuições das fontes de corrente harmônicas pode ser feito através de uma única expressão matemática, implementada através de uma rotina de programação. Esta estratégia permite obter melhor desempenho nas simulações, agregando velocidade na obtenção dos resultados.
- O método de representação pelos circuitos originais pode ser demasiadamente demorado (ou até mesmo inviável), em geral requerendo um conhecimento profundo sobre os componentes internos do equipamento.

- Medidores de qualidade de energia têm evoluído gradual e rapidamente e vêm se tornando cada vez mais comuns em empresas distribuidoras de energia elétrica. A medição dos componentes harmônicos de corrente e tensão com estes equipamentos é simples e bastante completa, o que simplifica substancialmente a modelagem.
- A complexidade e dimensão dos sistemas de distribuição simulados podem ser significativas. Nestes casos, cargas não-lineares (circuitos) extremamente complexas podem dificultar a simulação ou a interpretação dos resultados, devido a instabilidades numéricas.
- Para utilizar a modelagem por meio de fontes de corrente é necessário dispor dos módulos e fases dos harmônicos da corrente da carga. Em geral, o módulo dos harmônicos de corrente são expressos como porcentagens do valor da componente fundamental, enquanto as fases são referidas à tensão da barra à qual a carga está conectada.
- Contudo, em um estudo elétrico de um sistema de distribuição, seja em regime permanente ou transitório, não é usual conhecer a tensão na barra da carga antes de se obter a solução do estudo. Este fato deve ser cuidadosamente considerado, pois para obter a reprodução fiel das formas de onda de corrente e das relações que as mesmas guardam com a tensão aplicada na barra de carga, deve-se ter conhecimento da própria forma de onda da tensão. Neste caso, pequenos erros na defasagem entre as formas de onda da tensão aplicada e da corrente drenada pela carga não-linear podem levar a diferenças significativas na potência ativa drenada e no fator de potência global.

A Figura 8 apresenta as formas de onda de tensão (fator de escala 1:100) e corrente em uma carga não-linear especificada. Neste caso, a corrente foi reconstituída corretamente através das informações do espectro harmônico, tendo sido preservadas as relações entre as formas de onda originais.

A Figura 9 apresenta as formas de onda de tensão (fator de escala 1:100) e corrente para a mesma carga não-linear determinada. Neste caso, a corrente não foi reconstituída corretamente, permanecendo um erro de início de condução entre as formas de onda de aproximadamente 10° (em relação à fundamental da tensão).

Observa-se pela comparação das formas de onda que não há diferença significativa entre os resultados apresentados na Figura 8 e na Figura 9. Todavia, quando se calcula a potência média nos dois casos, observa-se uma redução de 13% no caso em que as defasagens não estão corretas. A potência média passa de 15 W para 13 W.

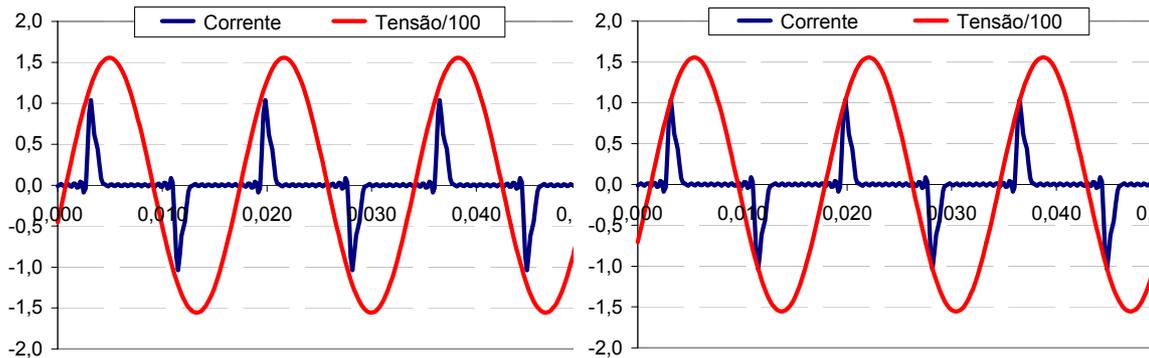


Figura 8: Tensão e corrente originais na carga

Figura 9: Tensão e corrente, com erro de 10°.

A Figura 10 apresenta a potência instantânea calculada através das formas de onda de tensão e corrente apresentadas anteriormente. Observa-se uma redução nos picos de cerca de 20 W, no caso em que as formas de onda não foram corretamente representadas.

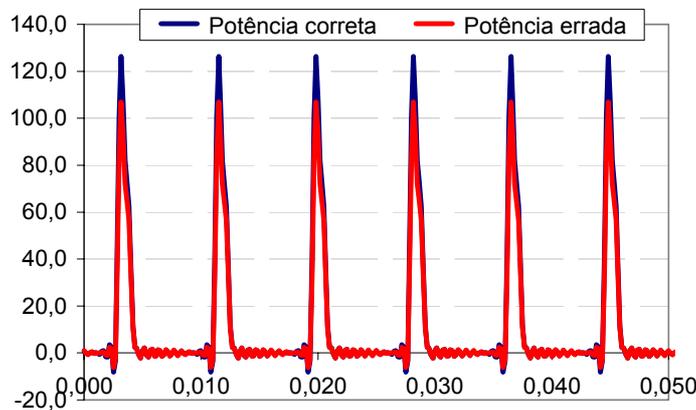


Figura 10: Potência instantânea (W) drenada pela carga nas duas condições.

Será mostrado neste trabalho que o uso de um circuito de sincronismo como um PLL (Phase Locked Loop) em modelos de cargas não-lineares para simulação digital, adicionado ao procedimento convencional da IEEE 519/1992 [10], pode aumentar sua

precisão e desempenho por meio da correta determinação das defasagens angulares entre tensões e correntes. O modelo resultante é imune a distúrbios comuns das redes tais como variações de carga e de frequência, e, rejeição de carga.

Capítulo 3

Modelagem de cargas

Nas últimas duas décadas, cargas não-lineares vêm se tornando um assunto de muito interesse e discussão, já que seu uso em sistemas de distribuição tornou-se bastante comum. Dispositivos eletrônicos, microprocessadores e semicondutores vêm sendo desenvolvidos como resultado de uma busca constante por desempenho, flexibilidade e controlabilidade. De fato, estes dispositivos trouxeram uma série de facilidades à vida humana moderna, mas também são uma importante fonte de poluição harmônica para a rede, normalmente compartilhada com outros consumidores.

Portanto, a qualidade de energia suprida pela rede na qual estes sistemas estão conectados tornou quase uma obrigação o desenvolvimento de novos padrões e regras pelas concessionárias e empresas regulatórias. Empresas transmissoras e distribuidoras estão investindo na modelagem destas cargas, em um processo que envolve a análise

teórica, medições de campo e simulações computacionais. O impacto de cargas não-lineares em sistemas de transmissão e distribuição pode ser assim previsto, dando base a futuras decisões [16], [17].

3.1. Estado da Arte na Modelagem de Cargas

Os sistemas elétricos são concebidos para fazer frente à demanda por energia elétrica de seus consumidores. O conceito de carga elétrica nasce, precisamente, da utilização da eletricidade em suas mais variadas formas. De fato, os consumidores de energia elétrica estão em busca dos benefícios proporcionados por esta forma de energia: uma casa fresca no verão ou quente no inverno, água aquecida, alimentos refrigerados, entretenimento, iluminação, acionamento de cargas mecânicas, etc.

Os diversos tipos de consumidores compram energia elétrica por diferentes razões, e apresentam, por conseqüência, necessidades específicas no que se refere à qualidade do fornecimento [18]. Uma interrupção de energia elétrica de poucos minutos, por exemplo, apresenta conseqüências bastante distintas em consumidores residenciais, comerciais ou industriais.

A Tabela 3.1 apresenta alguns exemplos de utilização final da energia elétrica, considerando quatro classes principais de consumidores: rural, residencial, comercial e industrial. Estes aparelhos e equipamentos constituem as cargas elétricas mais comuns dos sistemas de distribuição típicos.

A Tabela dá uma idéia da enorme variedade de equipamentos e dispositivos disponíveis, baseados em princípios de operação bastante distintos. A representação adequada destas cargas é fundamental na análise de sistemas elétricos, em particular na análise de sistemas de distribuição. Neste caso, dependendo do tipo de avaliação e de seus objetivos, podem ser utilizadas diferentes estratégias para a representação das mesmas.

Tabela 3.1: Utilização final da energia elétrica por classe de consumidores

Rural	Residencial	Comercial	Industrial
Iluminação	Iluminação	Iluminação	Iluminação
Aquecimento	Aquecimento	Aquecimento	Aquecimento
Condicionamento do ar	Condicionamento do ar	Condicionamento do ar	Condicionamento do ar
Computadores	Computadores	Computadores	Computadores
Circuladores de ar	Circuladores de ar	Circuladores de ar	Circuladores de ar
Bombas de água	Bombas de água	Bombas de água	Bombas de água e fluidos
Máquinas diversas	Secadores de roupa	Elevadores	Elevadores
Cercas eletrificadas	Fornos de microondas	Exaustores	Máquinas diversas
Chocadeiras elétricas	Fornos elétricos	Conversores eletrônicos	Conversores eletrônicos

Observa-se na Tabela 2.1 que boa parte dos utensílios domésticos drena corrente não senoidal. Na representação de cargas deste tipo (não-lineares), procura-se reproduzir a corrente drenada pelo equipamento quando submetido a condições nominais de operação. Para tanto, poder-se-ia pensar na reprodução fiel dos circuitos elétricos, eletrônicos e eletromecânicos originais. Esta estratégia, embora dê resultados bastante precisos, leva a um aumento significativo da complexidade do modelo e das análises resultantes, sobretudo quando estão envolvidas simulações digitais. Neste caso, os tempos totais de simulação podem ser severamente afetados. Há ainda grande dificuldade na obtenção dos circuitos correspondentes aos equipamentos, uma vez que não há interesse comercial dos fabricantes na divulgação deste tipo de informação. Adicionalmente, esta estratégia não pode ser diretamente aplicada para a representação de cargas compostas, tais como escritórios comerciais, residências e pequenas indústrias.

Alternativamente, este trabalho propõe o método descrito no item 1.3 que reproduzido na Figura 11 por conveniência.

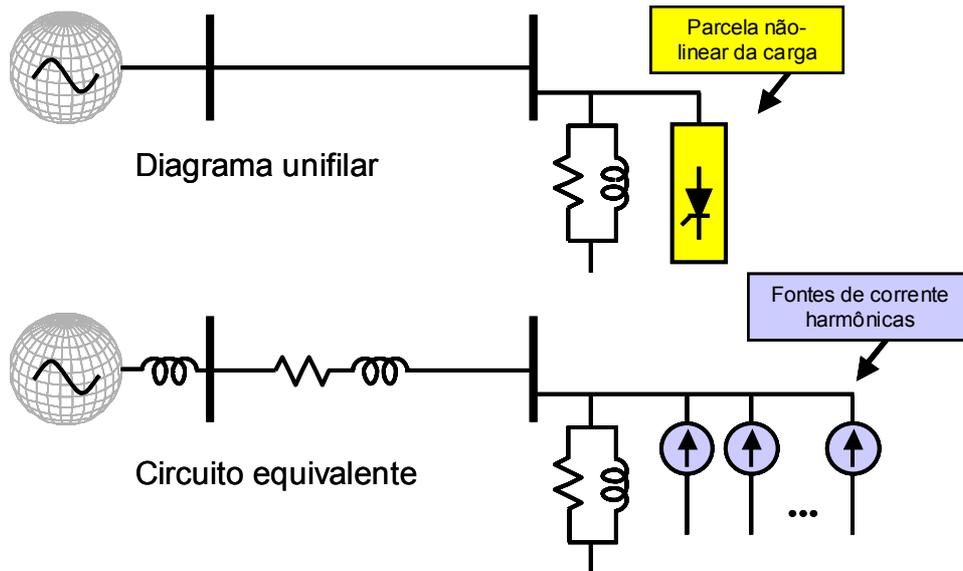


Figura 11: Representação das cargas não-lineares por fontes de corrente harmônicas.

3.2. Exemplos de Cargas

3.2.1. Modelo Digital da corrente de uma Lâmpada Fluorescente

Compacta

As lâmpadas incandescentes convencionais estão, gradativamente, cedendo espaço às lâmpadas fluorescentes compactas. Nesta substituição, as lâmpadas com reatores de baixo fator de potência, por serem de menor custo, levam uma grande vantagem sobre aqueles com reatores de alto fator de potência. Entretanto, alguns inconvenientes acompanham as lâmpadas de baixo fator de potência, tais como alto conteúdo harmônico das correntes drenadas e o baixo fator de potência total.

Os próximos itens apresentam modelos digitais para lâmpadas fluorescentes compactas, baseados nas diferentes estratégias discutidas anteriormente: a partir do circuito detalhado e a partir do conteúdo harmônico da corrente drenada.

a. Modelo 1: Circuito detalhado da lâmpada fluorescente compacta

Foi realizado o levantamento do circuito eletrônico de uma lâmpada de baixo fator de potência disponível no mercado. O circuito obtido está apresentado na Figura

12. Observa-se que a entrada do circuito é formada por uma ponte completa a diodos e que do lado CC, um capacitor de filtro está conectado aos terminais da ponte.

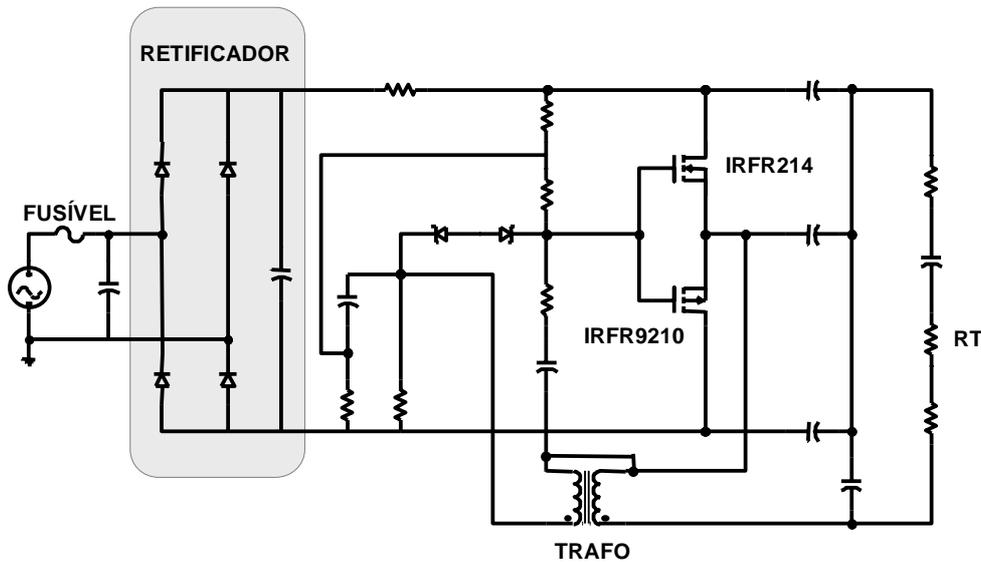


Figura 12: Circuito completo de uma lâmpada de baixo fator de potência.

O circuito é formado por cerca de trinta componentes, entre resistores, capacitores, diodos e chaves semicondutoras ativas. O problema assume maiores proporções quando há interesse em simular redes de distribuição, incluindo centenas de equipamentos de um mesmo tipo.

b. Modelo 2: Fontes de corrente harmônicas

A Figura 13 apresenta as formas de onda de tensão $v(t)$ e corrente $i(t)$ da lâmpada de baixo fator de potência, obtidas por um osciloscópio digital. Observa-se que a corrente drenada é altamente distorcida e que permanece nula durante boa parte do ciclo, atingindo abruptamente o seu valor máximo.

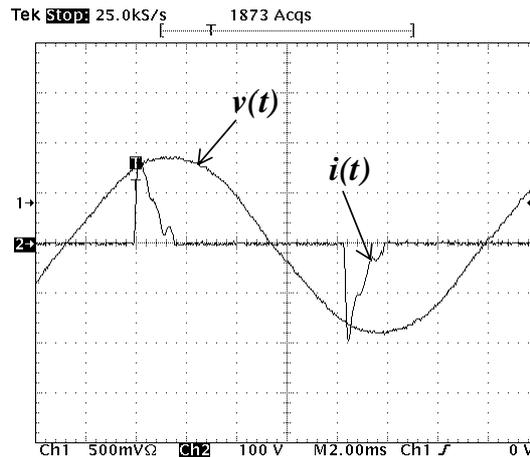


Figura 13: Forma de onda da corrente e tensão drenada por lâmpada de baixo fator de potência (Escala 1: 200) (15 W).

A elevada distorção harmônica da corrente drenada pelo retificador de estágio de entrada do reator que alimenta a lâmpada pode ser comprovada pelo espectro harmônico apresentado na Figura 14, que apresenta os valores dos componentes harmônicos de corrente (módulos e fases) até o de número 25. Observa-se que o vigésimo quinto harmônico ainda apresenta amplitude de 14% da componente fundamental de corrente. A presença destes harmônicos de mais elevadas frequências está relacionada com a variação abrupta da corrente (subida em flanco), verificada na forma de onda apresentada.

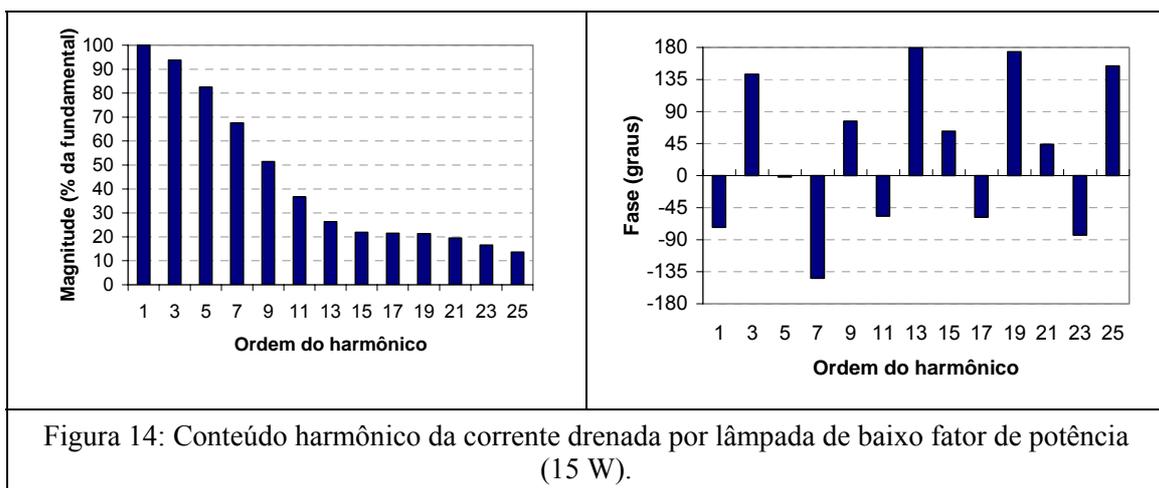


Figura 14: Conteúdo harmônico da corrente drenada por lâmpada de baixo fator de potência (15 W).

Tendo o espectro harmônico da corrente pode-se implementar um modelo para a representação da lâmpada em simulações digitais. Neste caso, para a representação dos 12 primeiros harmônicos ímpares poderiam ser utilizadas fontes de corrente, de

magnitude e fase ajustadas conforme indicado anteriormente. Alternativamente, poder-se-ia produzir uma rotina computacional que contabilizasse a expressão dada por:

$$i(t) = I_1 \left[1 \cdot \text{sen}(2\pi \cdot 60t - 73^\circ) + 0,94 \cdot \text{sen}(3,2\pi \cdot 60t + 142^\circ) + \dots + 0,14 \cdot \text{sen}(25,2\pi \cdot 60t + 154^\circ) \right] \quad (3.1)$$

Deve-se salientar que os ângulos gerados pela FFT, apresentados na Figura 14, devem estar referenciados à própria tensão da barra de conexão da carga. Este ponto é de suma importância e se não for considerado pode levar a resultados de simulação completamente equivocados.

Isto ocorre, pois, em geral, a fonte de tensão utilizada nas simulações não está conectada à barra da carga. Assim, o ângulo da barra de carga, a ser utilizado como referência para o modelo de carga não-linear, só pode ser determinado após a determinação das condições de regime permanente. Esta questão será abordada com maior detalhe no próximo capítulo, que apresenta uma solução interessante para o problema.

3.2.2. Modelo digital da fonte de alimentação de um Aparelho de Fax

a. Modelo 1: Circuito detalhado do aparelho de fax

A Figura 15 apresenta um circuito equivalente de um aparelho de fax, que pode ser simulado em um programa de transitórios eletromagnéticos, de modo a se obter suas formas de tensão e corrente. Neste circuito, destacam-se a entrada de alimentação pela rede CA, os filtros de linha, a ponte retificadora, as chaves para a geração de ondas de alta frequência e seus dispositivos de controle e as saídas de tensão para a alimentação dos circuitos internos do aparelho.

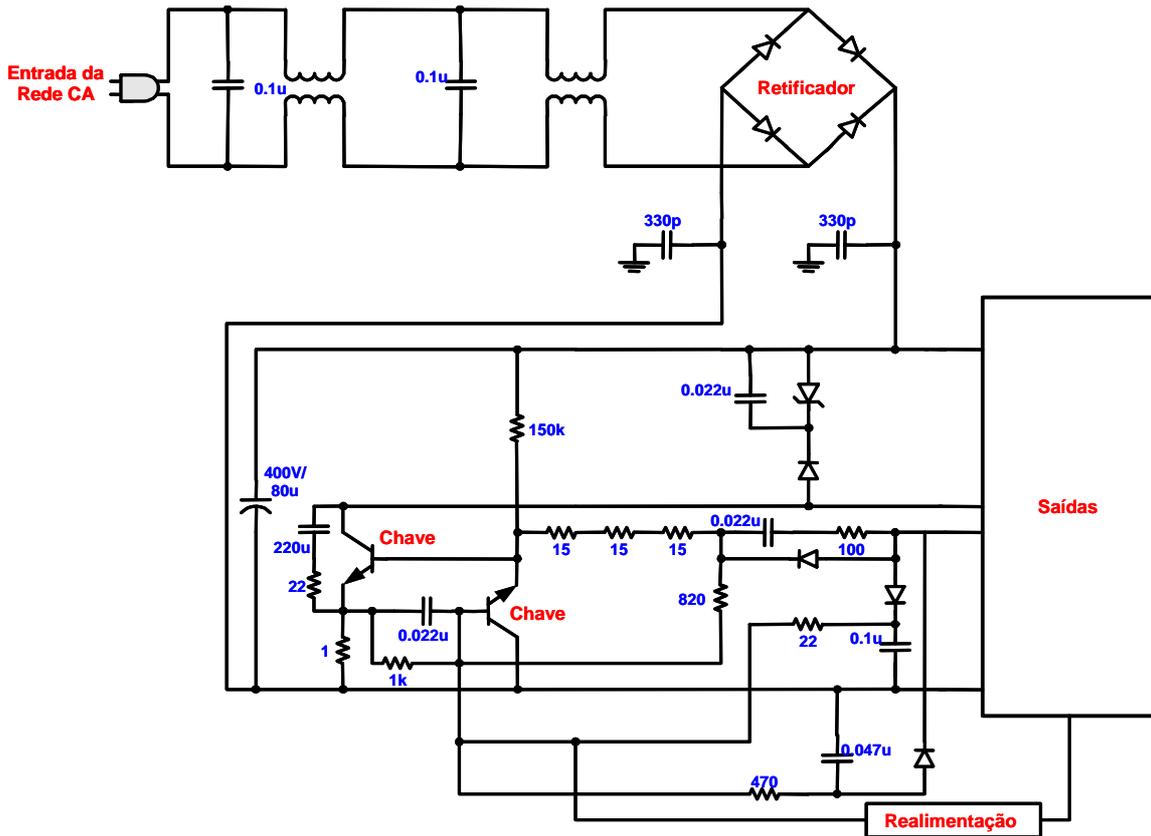


Figura 15: Circuito detalhado de um aparelho de fax

Pode-se concluir a partir da figura que o circuito é bastante complexo, considerando que o aparelho de fax corresponde a apenas uma das cargas de um consumidor comercial típico. Em uma grande rede de distribuição, com uma quantidade substancial de vários tipos de consumidores, esta representação torna-se inviável.

b. Modelo 2: Fontes de corrente harmônicas

A Figura 16 apresenta as formas de onda de tensão $v(t)$ e de corrente $i(t)$ típicas de um aparelho de fax, obtidas por um osciloscópio digital. Observa-se que a corrente é altamente distorcida e reduzida durante boa parte do ciclo, atingindo abruptamente o seu valor máximo. A tensão no ponto de conexão apresenta leve distorção (cerca de 5%), provocada pela circulação de correntes harmônicas diversas na rede monitorada.

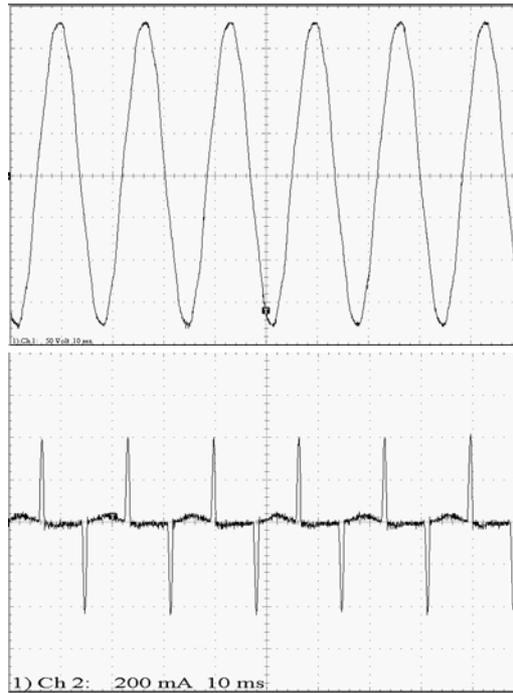


Figura 16: Formas de onda de tensão $v(t)$ (acima) e corrente $i(t)$ (abaixo) do aparelho de fax

A elevada distorção harmônica da corrente drenada pelo aparelho pode ser comprovada pelo espectro de harmônicos apresentado na Figura 17 até a ordem 29. Observa-se que o vigésimo terceiro harmônico apresenta amplitude de cerca de 10% da componente fundamental. A presença destes harmônicos de mais alta frequência está relacionada com a variação abrupta da corrente (subida em flanco) verificada na forma de onda apresentada.

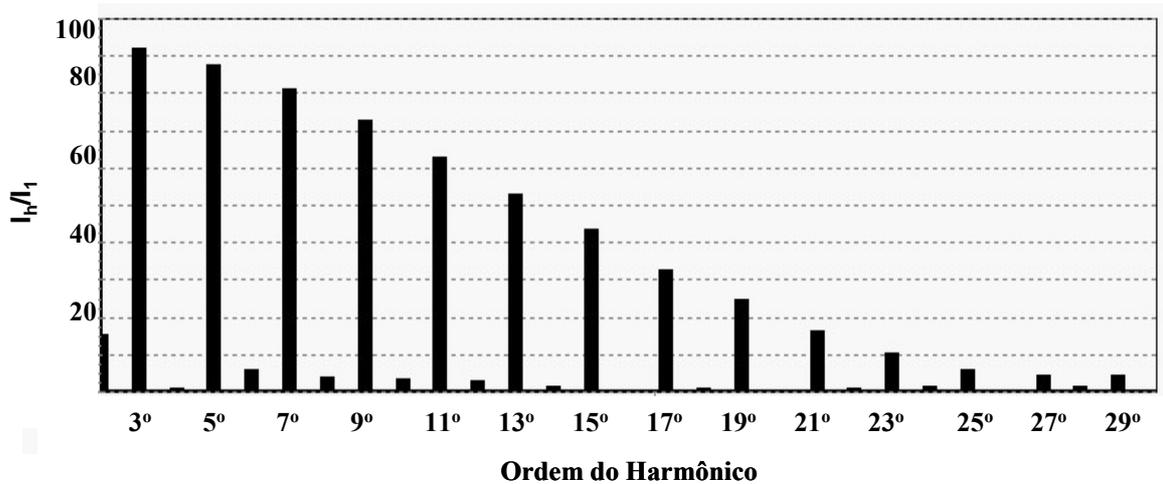


Figura 17: Espectro harmônico da corrente drenada pelo aparelho de fax.

De posse do espectro harmônico da corrente pode-se implementar um modelo para a representação do aparelho de fax em simulações digitais. Neste caso, para a representação dos 15 primeiros harmônicos ímpares poderiam ser utilizadas fontes de corrente, de magnitude e fase ajustadas. Alternativamente, poder-se produzir uma rotina computacional que contabilizasse a expressão:

$$i(t) = I_1 \cdot \left[1 \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot 60t + \theta_1) + \frac{I_3}{I_1} \text{sen}(3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 60t + \theta_3) + \dots + \frac{I_{29}}{I_1} \cdot \text{sen}(29 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 60t + \theta_{29}^\circ) \right]. \quad (3.2)$$

Isto ocorre, pois em geral, a fonte de tensão utilizada nas simulações não está conectada à barra da carga. Assim, o ângulo da tensão na carga, a ser utilizado com referência para o modelo apresentado neste item, só pode ser determinado após a determinação das condições de regime permanente. Esta questão será abordada com maior detalhe no próximo capítulo, que contém ainda uma solução para este problema.

3.2.3. Transformador Monofásico em Vazio

A Tabela 3. 2 apresenta o espectro harmônico (magnitude e fase) da corrente drenada por um transformador monofásico 120/240 V, 2 kVA, à vazio, obtido através do processamento digital de registros de tensão e corrente no equipamento.

Tabela 3. 2: Espectro harmônico da corrente drenada por um transformador monofásico em vazio

Ordem do harmônico	Magnitude		Fase (graus)
	% de I1	A	
Fundamental	100	1,07	-70
3°	40,0	0,428	+101
5°	10,0	0,107	-82
7°	1,00	0,0107	+103
9°	1,00	0,0107	-123
11°	1,00	0,0107	+67

A corrente original drenada pelo equipamento pode ser reconstituída no tempo pelo somatório dos diversos componentes harmônicos indicados no quadro anterior. Este resultado está apresentado na Figura 18.

Observa-se que, neste caso, a amplitude do décimo primeiro harmônico é inferior a 2% da componente fundamental da corrente, o que indica que a representação pelos cinco primeiros harmônicos ímpares é plenamente satisfatória para os objetivos do presente trabalho.

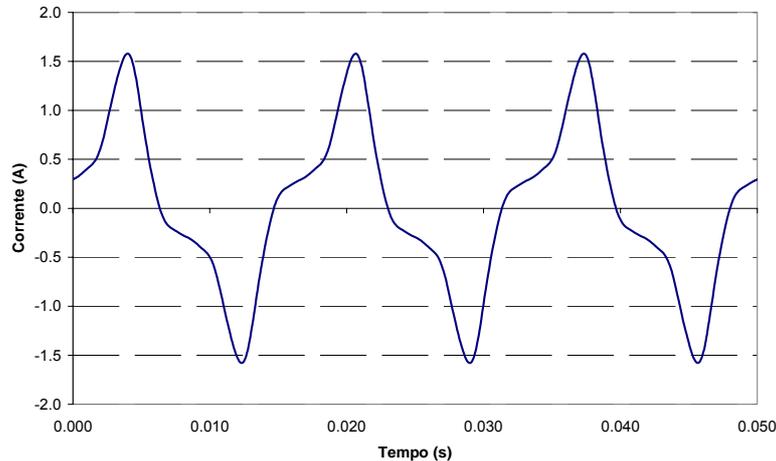


Figura 18: Corrente de um transformador em vazio reconstituída através do espectro harmônico.

3.2.4. O Circuito de Sincronismo

Uma das formas de minimizar este tipo de problema é supor inicialmente que a fase da tensão da barra de carga é nula e referir as fases das correntes harmônicas a ela. Após a obtenção da primeira solução, as fases dos harmônicos da corrente da carga são atualizadas para se referirem ao valor da fase da tensão obtida, e o estudo é realizado novamente, até a convergência final na qual não há mais mudanças nos valores das fases.

Este método não conduz a discrepâncias significativas, mas como se pode deduzir, não está otimizado para simulações de grandes sistemas, nas quais a convergência pode ser lenta e o tempo de simulação pode ser um fator determinante.

Com o objetivo de superar esta dificuldade e otimizar o processo de simulação, propõe-se neste trabalho um componente adicional na modelagem das cargas não-lineares, qual seja, um algoritmo de sincronismo (PLL) para determinação em tempo real da fase da tensão na barra da carga. Trata-se de um componente comum em circuitos de controle de dispositivos de Eletrônica de Potência, nos quais o disparo (e o

bloqueio, se for o caso) das chaves semicondutoras é feito com base em uma determinada fase de tensão ou corrente.

A Figura 19 apresenta o diagrama de blocos de uma possível implementação de um circuito PLL trifásico, destinado à determinação em tempo real da fase da tensão da barra. Neste caso, os sinais de entrada são as tensões fase-neutro $v_a(t)$, $v_b(t)$ e $v_c(t)$.

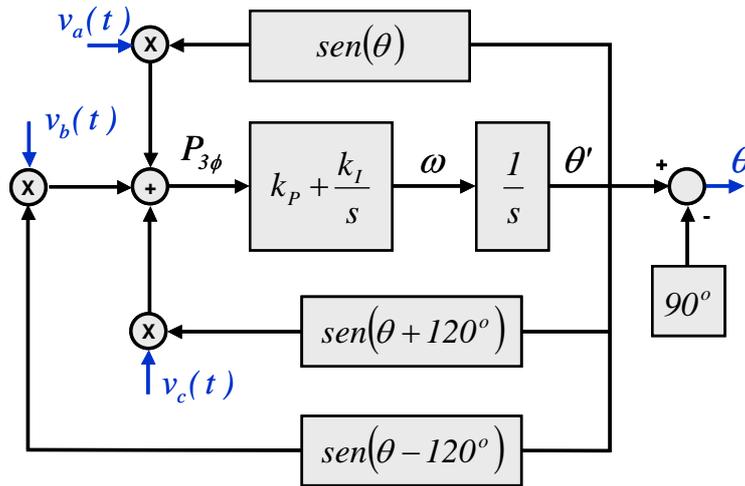


Figura 19: Esquema do circuito de sincronismo PLL

O PLL é baseado num conceito físico simples: o cálculo da potência instantânea (fictícia) trifásica, que é nula quando correntes e tensões estão em quadratura entre si.

$$p_{3\phi}(t) = v_a(t)i_a'(t) + v_b(t)i_b'(t) + v_c(t)i_c'(t) \quad (3.3)$$

Um valor nulo para esta potência pode ser obtido com um controlador PI (onde k_p e k_I são os ganhos proporcional e integral), como mostrado na Figura 19. Em regime permanente, o ângulo θ está 90° adiantado em relação ao ângulo de $v_a(t)$. É interessante notar que mesmo com ambas as quadraturas (em avanço e em atraso) conduzindo a uma situação de potência fictícia nula, o PLL da Figura 19 sempre conduz a um ângulo θ em avanço com relação ao ângulo de $v_a(t)$, como mostrado a seguir.

Ainda que as tensões medidas no sistema de potência possam conter harmônicos (limitado a uma DHT de 10% que permite o uso do modelo da IEEE 519), pelo teorema de Fourier existirá uma componente fundamental dada por:

$$\begin{aligned}v_a(t) &= V_0 \cdot \text{sen}(\theta_1(t)) \\v_b(t) &= V_0 \cdot \text{sen}(\theta_1(t)-2\cdot\pi/3) \\v_c(t) &= V_0 \cdot \text{sen}(\theta_1(t)+2\cdot\pi/3)\end{aligned}\tag{3.4}$$

De posse do ângulo θ da tensão da barra, pode-se ajustar automaticamente os ângulos de fase das diversas fontes de corrente harmônicas, restabelecendo a relação original entre a tensão e corrente na carga não-linear, qualquer que seja a barra do sistema simulado.

Os sinais de corrente construídos internamente são dados por:

$$\begin{aligned}i_a(t) &= I_0 \text{sen}(\theta'(t)) \\i_b(t) &= I_0 \text{sen}(\theta'(t)-2\cdot\pi/3) \\i_c(t) &= I_0 \text{sen}(\theta'(t)+2\cdot\pi/3)\end{aligned}\tag{3.5}$$

Deve-se notar que θ' é diferente de θ_1 até que o regime permanente seja atingido. Adicionalmente, I_0 foi tomado como unitário na Figura 19 por simplicidade. A potência trifásica instantânea é dada por (3.3) e aqui toma a forma particular de:

$$p_{3\phi}(t) = \frac{3}{2} V_0 I_0 \cos(\theta_1(t) - \theta'(t))\tag{3.6}$$

Duas conclusões importantes podem ser retiradas de (3.6): os ângulos $\theta_1(t)$ e $\theta'(t)$ devem não apenas estar em quadratura, mas também devem estar relacionados à mesma frequência angular ω . Entretanto, ainda permanece indefinido se a quadratura é do tipo em atraso ou em avanço. Se uma análise de pequenos sinais for realizada em (3.6), centrando em ambos os pontos $\pi/2$ e $-\pi/2$ e substituindo $\theta_1(t) = \omega t$, o resultado é:

$$\begin{aligned}p_{3\phi+}(t) &\approx \frac{3}{2} V_0 I_0 \left(\frac{\pi}{2} - \theta'(t) + \omega t \right) \\p_{3\phi-}(t) &\approx \frac{3}{2} V_0 I_0 \left(\frac{\pi}{2} + \theta'(t) - \omega t \right)\end{aligned}\tag{3.7}$$

No domínio da frequência, essas equações tomam a forma de:

$$\begin{aligned}P_{3\phi+}(s) &\approx \frac{3}{2} V_0 I_0 \left(\frac{\pi/2 - \Theta'(s) + \omega}{s} \right) \\P_{3\phi-}(s) &\approx \frac{3}{2} V_0 I_0 \left(\frac{\pi/2 + \Theta'(s) - \omega}{s} \right)\end{aligned}\tag{3.8}$$

Denominando $k = (3/2)V_0 I_0$, o laço interno na **Erro! Fonte de referência não**

encontrada. contendo $P_{3\phi}$ e θ' pode ser substituído pelo equivalente para pequenos sinais da Figura 19.

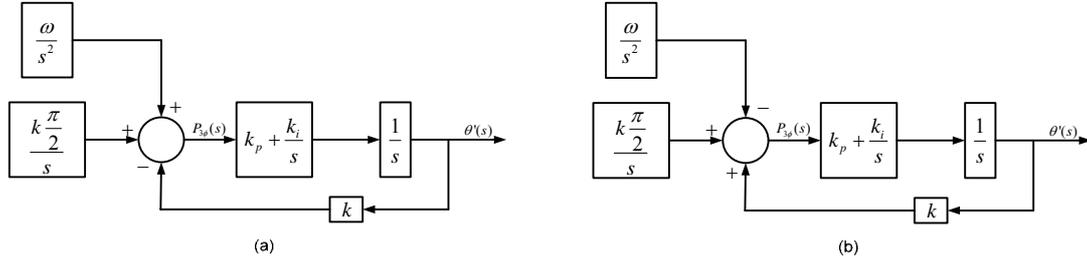


Figura 20: Laço interno da Figura 19 para pequenos sinais.

Estes laços fechados podem ser resolvidos analiticamente, resultando em:

$$\begin{aligned} \theta'_+(t) &= \omega t + \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} e^{-k_1 t} \left[-\pi \cosh(k_2 t) - \frac{k_3}{k_2} \sinh(k_2 t) \right] \\ \theta'_-(t) &= \omega t - \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} e^{k_1 t} \left[\pi \cosh(k_2 t) - \frac{k_3}{k_2} \sinh(k_2 t) \right] \end{aligned} \quad (3.9)$$

Em (3.9) definiu-se:

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \frac{kk_p}{2} \\ k_2 &= \frac{1}{2} \sqrt{(kk_p)^2 + 4kk_i} \\ k_3 &= 4\omega - kk_p\pi \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

Pode ser observado que o termo exponencial de $\theta'_+(t)$ é negativo, resultando um valor de regime permanente de $\omega t + \pi/2$. Por outro lado, $\theta'_-(t)$ diverge. Este é o motivo pelo qual há quadraturas em avanço, já que $-\pi/2$ não é um ponto estável.

Na Figura 19, pode-se identificar algumas simplificações. A mais usada é a utilização de duas tensões de linha ao invés de três tensões de fase, já que (3.3) pode ser reescrita como:

$$P_{3\phi}(t) = v_{ac}(t)i_a'(t) + v_{bc}(t)i_b'(t) \quad (3.11)$$

3.2.5. PLL Monofásico

Algumas aplicações podem requerer que o circuito PLL seja monofásico, particularmente quando há especial interesse no controle independente de cada fase. Neste caso, o circuito recebe como entrada apenas um sinal monofásico. Neste trabalho,

foi utilizado o PLL monofásico Na Figura 19 pode-se substituir $v_b(t)$ e $v_c(t)$, medidas até então no sistema de potência, pelo laço fechado mostrado na Figura 21.

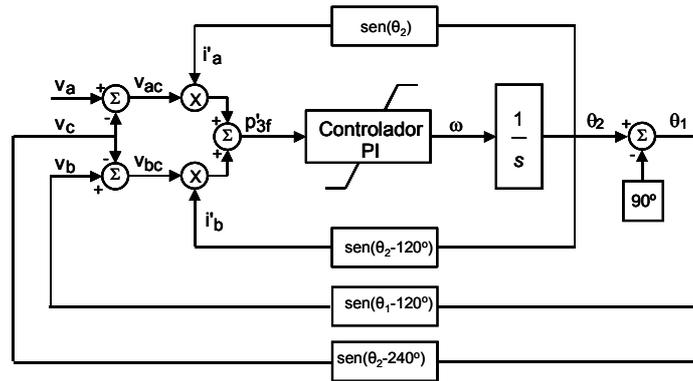


Figura 21: PLL monofásico

A Figura 21 pode também ser simplificada utilizando propriedades de álgebra e trigonometria, conforme mostrado na Figura 22.

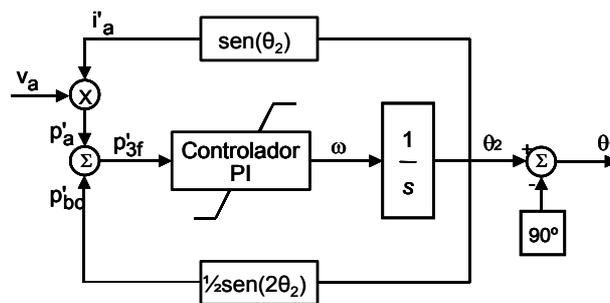


Figura 22. PLL monofásico simplificado

A Figura 23 e a Figura 24 ilustram o funcionamento de um sistema quando ocorre um distúrbio severo (variação de 4 Hz) de frequência. Apesar de a frequência do sistema ser reduzida de 60 para 58 Hz em 5 segundos, a potência ativa consumida pelo sistema não é significativamente alterada, devido ao uso do circuito de sincronismo.

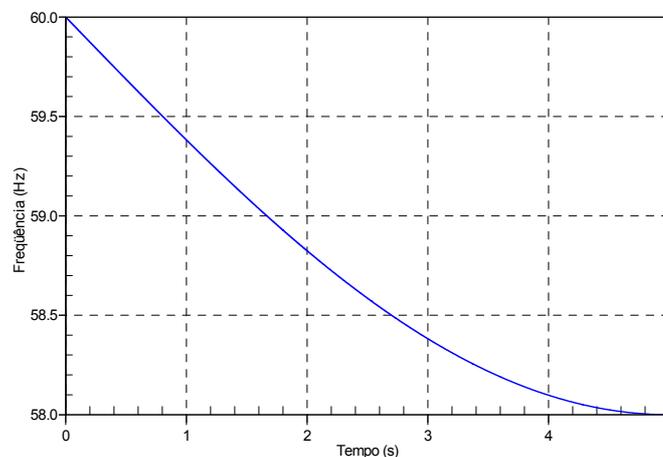


Figura 23: Simulação de frequência variável no sistema.

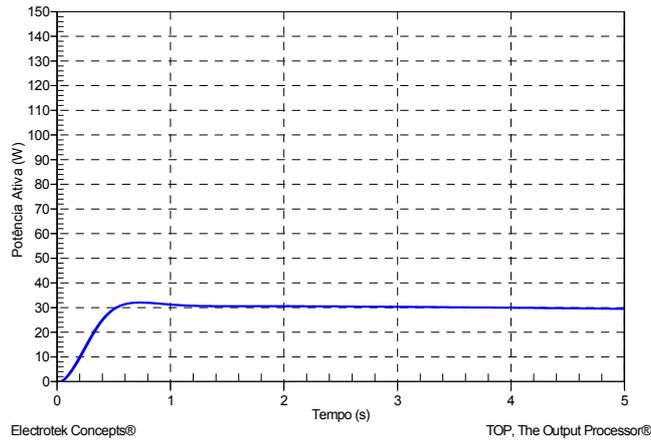


Figura 24: Potência ativa com distúrbio na frequência [com PLL].

A Figura 25 mostra o que ocorreria com a potência na ausência do circuito de sincronismo – um comportamento longe da realidade, incluindo até mesmo inversão do fluxo de potência.

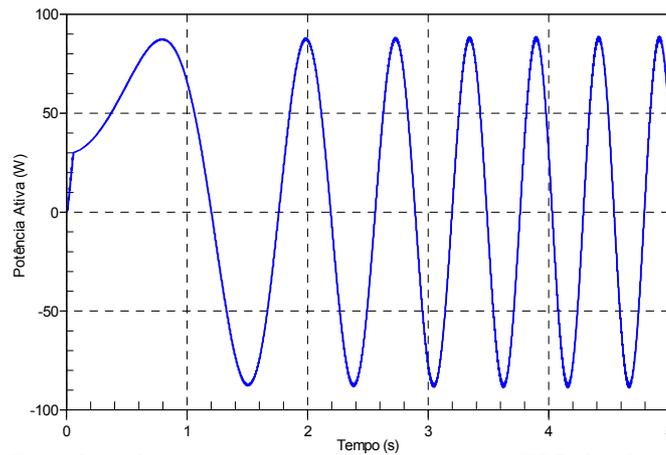


Figura 25: Potência ativa com distúrbio na frequência [sem PLL].

A estratégia de modelagem de cargas residenciais não-lineares proposta neste trabalho está apresentada na Figura 26. Neste caso, deve-se observar que os ângulos das fontes de corrente harmônicas dependem do ângulo θ que resulta da convergência do circuito PLL apresentado anteriormente.

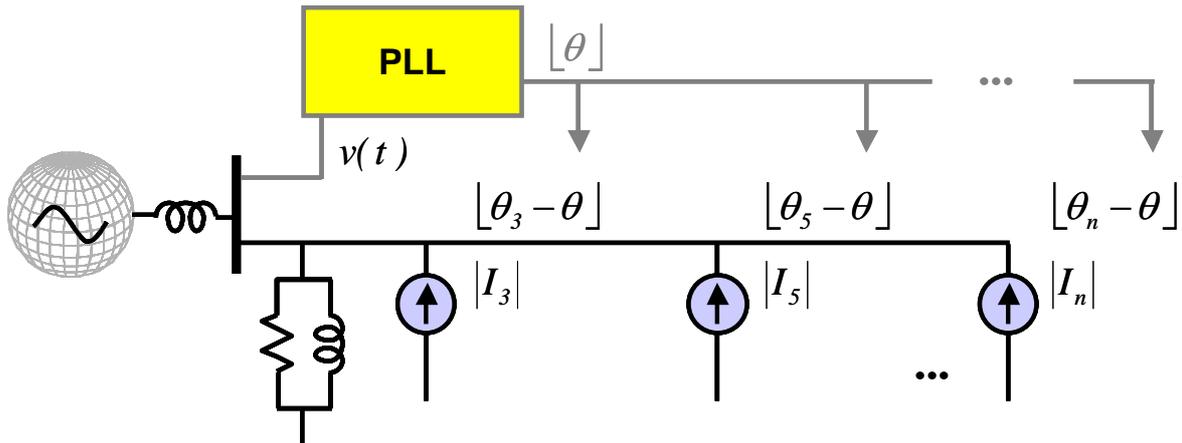


Figura 26: Modelagem de cargas não-lineares proposta

A correção do ângulo θ é feita em tempo de simulação, tornando o modelo de carga não-linear desenvolvido imune a variações transitórias de carregamento. Outra vantagem é que uma vez ajustados os valores de magnitude e fase dos harmônicos mais significativos, o modelo obtido pode ser conectado em qualquer barra do sistema simulado.

3.3. Modelo ZIP

Este tipo de representação, denominada ZIP, procura reproduzir as variações da carga frente às oscilações de tensão na rede. Na maioria das situações, este refinamento é suficiente para a representação das cargas em estudos à frequência fundamental.

Em estudos de fluxo de carga e transitórios eletromecânicos, por exemplo, são utilizados equivalentes para a representação de um determinado grupo de consumidores. Em geral, são utilizados modelos simplificados baseados no montante de potência ativa e reativa drenado da rede por consumidores de um bairro ou município. Neste caso, as cargas ativa e reativa podem ainda ser divididas em três parcelas: Z constante, I constante ou P e Q constantes.

A potência na parcela de carga tipo Z varia com o quadrado da tensão. Quando a tensão aumenta (em relação ao valor nominal), a corrente também aumenta, e quando

a tensão diminui, a corrente diminui da mesma maneira, mantendo sempre a impedância constante. O coeficiente desta variação é calculado como:

$$K_z = \frac{V_{eficaz}}{V_{NOMINAL}} \quad (3.12)$$

Na parcela de carga tipo I, a potência varia diretamente com a tensão. Neste caso, a corrente permanece constante mesmo variando a tensão (respeitando os limites de 5%, conforme descrito na norma IEEE 1159). O coeficiente desta variação é unitário e é dado como:

$$K_i = 1 \quad (3.13)$$

As parcelas de carga tipo P e Q são invariantes. Neste caso, a corrente varia inversamente com a tensão, mantendo sempre a potência constante. O coeficiente desta variação é calculado como:

$$K_p = \frac{V_{NOMINAL}}{V_{eficaz}} = \frac{1}{K_z} \quad (3.14)$$

Considerando a corrente na carga como:

$$i(t) = K [I_1 \text{sen}(\omega t - \theta_1) + I_3 \text{sen}(3\omega t - \theta_3) + \dots + I_n \text{sen}(n\omega t - \theta_n)], \quad (3.15)$$

onde K representa K_z , K_i ou K_p em função do tipo de carga.

O modelo proposto considera os componentes harmônicos até de ordem 25. Também pode ser utilizado para cargas lineares. A parcela linear da carga é modelada a partir de um circuito RL série. Para o caso de uma carga linear, é informado apenas o componente harmônico fundamental da corrente. A corrente resultante tem as mesmas características da tensão de entrada (DHT igual). Caso contrário, são informados também os outros componentes harmônicos a. A equação (3.15) pode então ser reescrita como sendo a soma de duas correntes como:

$$i(t) = K_l i_l(t) + K_n i_n(t), \quad (3.16)$$

sendo $i_l(t)$ e $i_n(t)$ representando as parcelas linear e não-linear da corrente, respectivamente. O valor de K_l é calculado em função de a carga ser do tipo Z, I, ou P e Q de forma a deixar a potência constante.

$$K_1 = \begin{cases} 1 & \text{para cargas do tipo Z,} \\ \frac{1}{K_z} & \text{para cargas do tipo I,} \\ \frac{1}{K_z^2} & \text{para cargas do tipo P.} \end{cases} \quad (3.17)$$

Para uma carga RL série, a tensão é dada como:

$$v(t) = Ri_l(t) + L \frac{di_l(t)}{dt} \quad (3.18)$$

A transformada de Laplace de calculado como:

$$\frac{I_l(s)}{V(s)} = \frac{1/L}{s + R/L} \quad (3.19)$$

No domínio discreto, utilizou-se a transformada bilinear para o mapeamento da equação (3.19). A transformação do domínio s para o z é feito mediante a integração trapezoidal como:

$$s \longrightarrow \frac{2}{T} \left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right). \quad (3.20)$$

Esta transformada garante a conservação da estabilidade no domínio Z (os pólos estão sempre dentro do círculo unitário).

A equação (3.19) discretizada torna-se:

$$\begin{aligned} \frac{I_l(z)}{V(z)} &= \frac{1/L}{\frac{2}{T} \left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right) + R/L} \\ &= \frac{T(1+z^{-1})}{(2L+TL) - (2L-TR)z^{-1}} \end{aligned} \quad (3.21)$$

A transformada inversa de (3.21) é calculada como:

$$i_l(n) = c_1 (v(n) + v(n-1)) + c_2 i_l(n-1) \quad (3.22)$$

Em (3.22), as constantes c_1 e c_2 são calculados como:

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= \frac{T}{2L + RT} \\ c_2 &= \frac{2L - RT}{2L + RT} \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

T é o período de amostragem.

De um modo geral, os sistemas de distribuição e de transmissão apresentam um comportamento notadamente indutivo à frequência fundamental da rede. Porém, vale a pena salientar que outros tipos de carga (RC, R, RLC) podem ser encontradas. Estudos para uma representação futura destes tipos de carga estão em andamento.

Para o cálculo de R e L, pode-se substituir s por $j\omega$ na equação (3.19) e calcular a tensão como:

$$V(j\omega) = (R + j\omega L)I(j\omega) \quad (3.24)$$

Considerando o ângulo da tensão como referência, os módulo e ângulo de (3.23) são dados como:

$$\left. \begin{aligned} \left| \frac{V_{NOMINAL}}{I_1} \right|^2 &= R^2 + (\omega L)^2 \\ \frac{(\omega L)^2}{R^2} &= \tan^2(\theta_1) \end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

I_1 e θ_1 são o módulo e ângulo do componente fundamental da corrente.

Os valores de R e L a partir da resolução de (3.24) são dados por:

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{V_{NOMINAL}}{I_1 \sqrt{1 + \tan^2(\theta_1)}} \\ L &= \frac{R \tan(\theta_1)}{\omega} \end{aligned} \right\} \quad (3.26)$$

Todavia, vale a pena ressaltar que na maioria das vezes, esses três tipos de cargas são encontrados funcionando em um mesmo ambiente. Neste Caso, o modelo ZIP sofrerá algumas modificações. Os valores de K e K_1 são calculados como sendo a soma das três parcelas conforme:

$$\left. \begin{aligned} K &= (C_z K_z + C_i K_i + C_p K_p) \\ K_1 &= \left(C_z + \frac{C_i}{K_z} + \frac{C_p}{K_z^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3.27)$$

Onde C_z , C_i e C_p são coeficientes que representam os pesos de cada parcela de carga. A soma destes coeficientes é unitária.

Todavia, a estratégia descrita no Modelo só pode ser utilizada quando há razoável equilíbrio da rede a ser estudada. Esta consideração permite que sejam utilizadas representações monofásicas para a rede, que poderá ser modelada apenas por seus parâmetros de seqüência positiva. No caso das cargas, assume-se que as correntes drenadas são equilibradas e que as mesmas não contém harmônicos. Em geral, os sistemas de transmissão podem ser bem representados por redes de seqüência positiva, sendo as cargas alocadas nas barras de fronteira com a rede de distribuição. Em sistemas industriais também se verifica, freqüentemente, equilíbrio das cargas e da rede. Todavia, neste último caso pode haver forte presença de distorção harmônica de corrente.

Na presença de sistemas com desbalanço significativo, este tipo de modelagem pode não ser suficiente. Nestes casos, a representação adequada deste tipo de carga é fundamental para a obtenção de resultados precisos. Da mesma forma, a modelagem trifásica detalhada destes sistemas torna-se imprescindível. A Figura 27 mostra o diagrama resumido de modelo de carga implementado.

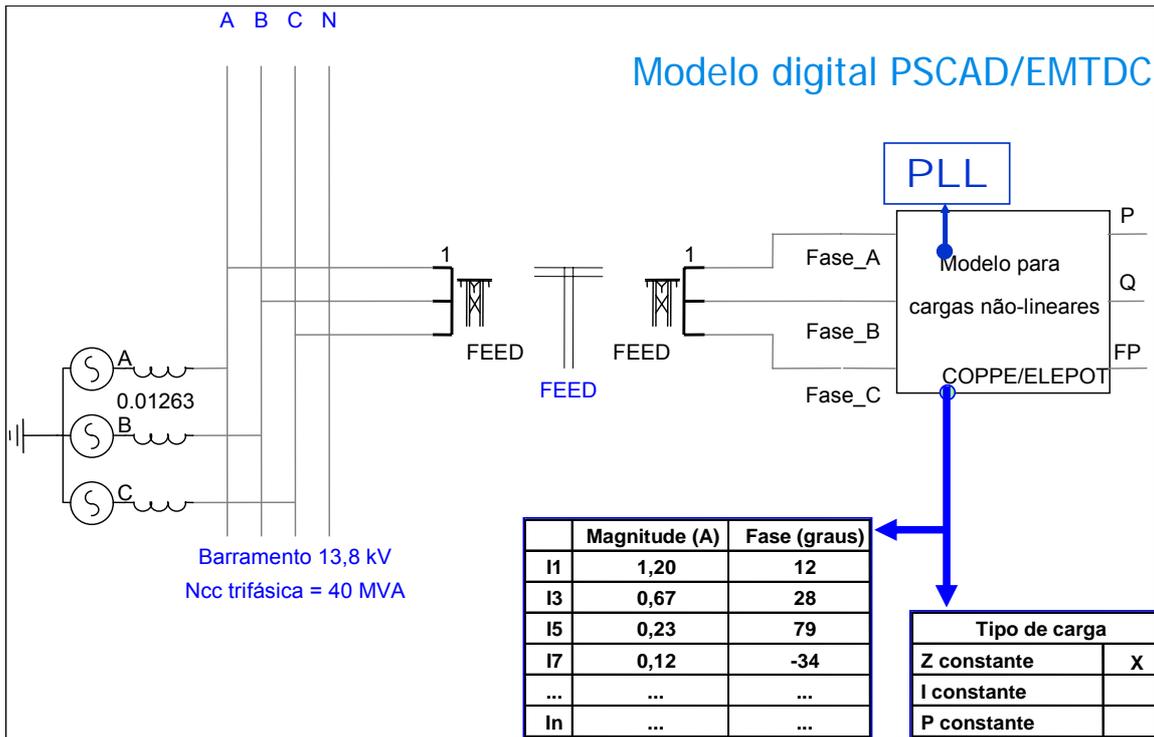


Figura 27: Modelo de carga não linear proposto

3.4. Representação no PSCAD/EMTDC

O EMTDC (Electromagnetic Transients Program) foi desenvolvido originalmente para a análise de sistemas HVDC (High Voltage Transients in DC systems). É um programa que tem passo de integração fixa, o que facilita ao usuário os problemas de erros numéricos encontrados nos programas de simulações de passos variáveis. Ao longo dos anos, diversos modelos e recursos foram sendo implementados e incluídos no código original do programa. Atualmente, o PSCAD/EMTDC constitui uma poderosa ferramenta para a análise de sistemas elétricos de corrente alternada, assim como de sistemas de corrente contínua.

A Figura 28 apresenta a estrutura geral do bloco referente ao modelo de carga não-linear desenvolvido no PSCAD. O bloco conecta-se à rede através de três ou quatro terminais, que representam as três fases e o neutro (quando for o caso). Utilizou-se a linguagem de programação FORTRAN.

As correntes são calculadas de acordo com o modelo ZIP apresentado anteriormente, tendo em vista os valores de harmônicos de correntes informados no

conjunto de dados que resultam das medições. As funções assim como os recursos do modelo estão apresentados no apêndice A.

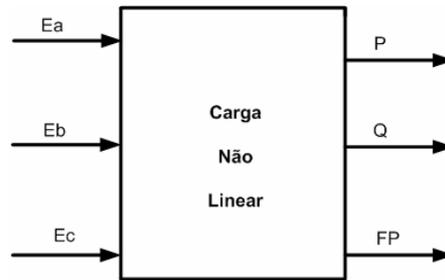


Figura 28: Estrutura geral do bloco referente ao modelo de carga não-linear no PSCAD

Capítulo 4

Estudo de Cargas Típicas

Neste capítulo, serão mostrados os resultados obtidos a partir da implementação do modelo ZIP descrito no capítulo anterior. São implementados experimentalmente três tipos de cargas: um retificador trifásico com uma carga resistiva e uma carga resistiva e indutiva, um retificador monofásico com uma carga resistiva e indutiva, e, um motor de indução com um freio de Foucault. Uma combinação destas três cargas também é implementada. O diagrama de cada uma destas cargas é ilustrada nas Figura 29, Figura 30 e Figura 31.

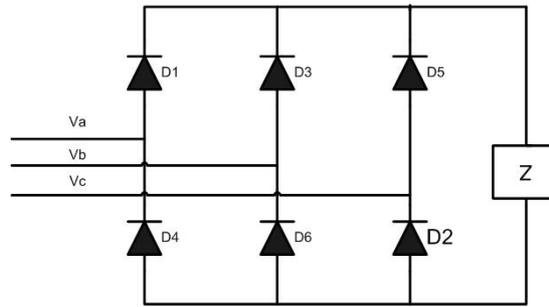


Figura 29: Retificador Trifásico

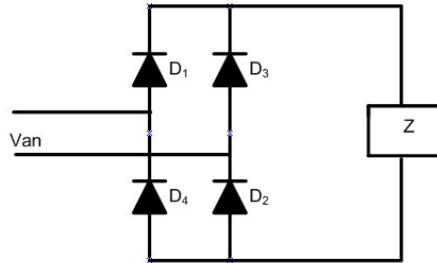


Figura 30: Retificador monofásico

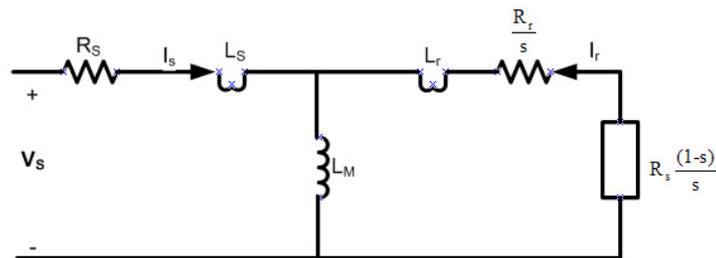


Figura 31: Circuito equivalente de um motor de indução em regime permanente

4.1. Retificador Trifásico

4.1.1. Carga Resistiva

O retificador trifásico com carga resistiva é modelado como sendo uma carga tipo impedância constante. A corrente varia linearmente com a tensão. O modelo foi verificado pra dois níveis diferentes de tensões. No primeiro caso, foram escolhidos os seguintes dados:

$$V_{LL} = 208 \text{ V}, R = 18,0 \, \Omega, DHTv = 2,12\% \text{ e } DHTi = 29,88\%.$$

Onde V_{LL} é o valor eficaz da tensão de linha.

A Figura 32 mostra os componentes de harmônicos de corrente da fase a (em módulo e fase) na entrada do retificador, enquanto a Figura 33 mostra a forma de onda da corrente do sinal medido e do sinal reconstruído a partir do modelo proposto.

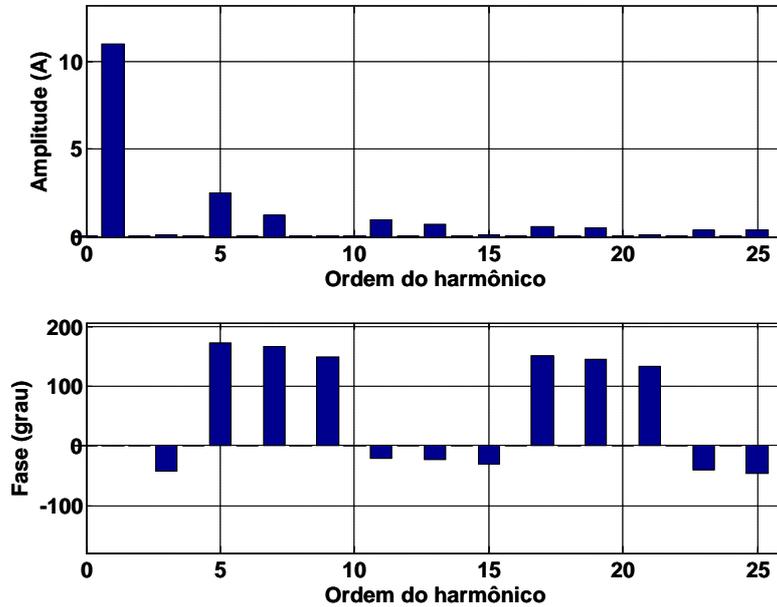


Figura 32: Espectro harmônico da corrente de entrada de um retificador trifásico com carga Z constante, admitindo-se $V_{LL}=208$ V

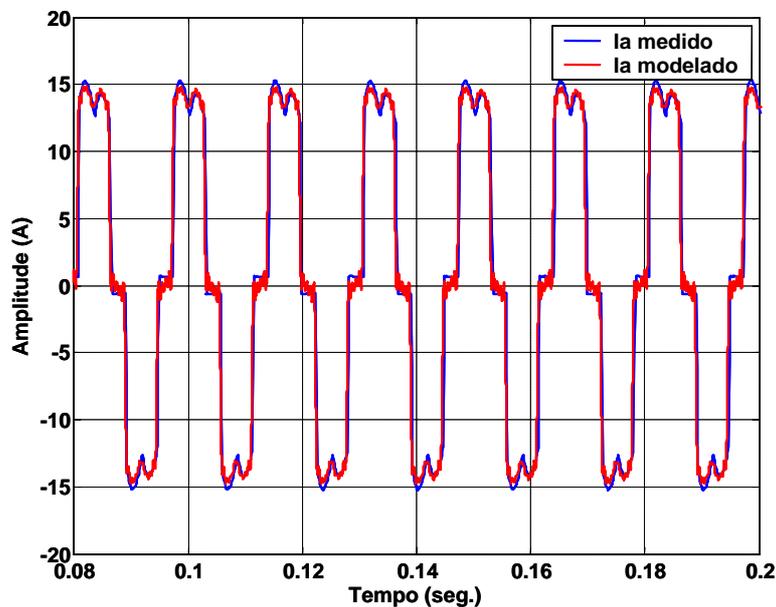


Figura 33: Formas de onda do sinal original e do sinal reconstruído, admitindo-se $V_{LL}=208$ V

No segundo caso, a tensão da fonte foi abaixada até um valor de cerca de 56% do caso anterior, resultando nos seguintes dados:

$$V_{LL} = 117,03 \text{ V}, R = 18,0 \Omega, DHT_v = 2.22\%, DHT_i = 28,95\%$$

A Figura 34 mostra os componentes harmônicos da corrente em módulo e fase e a Figura 35 mostra a forma de onda do sinal medido e do sinal reconstruído a partir do modelo proposto.

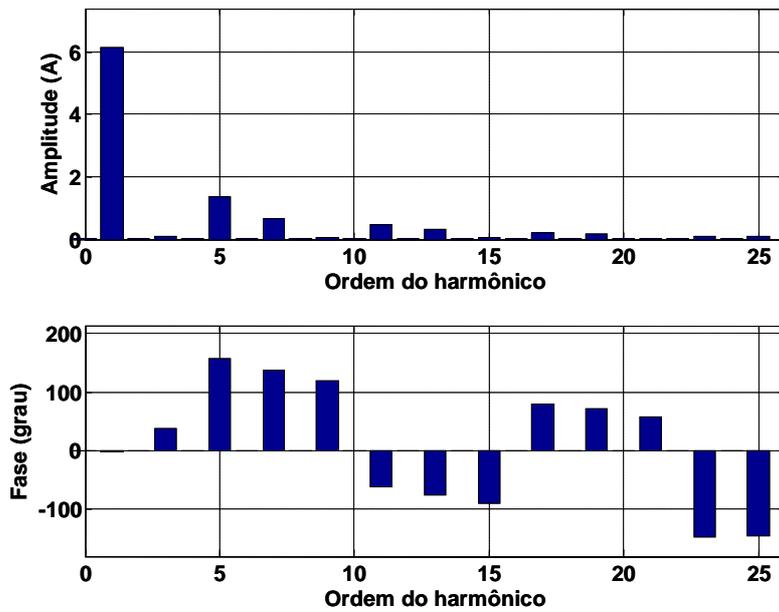


Figura 34 Espectro harmônico da corrente de entrada de um retificador trifásico com carga Z constante, admitindo-se $V_{LL}=117 \text{ V}$

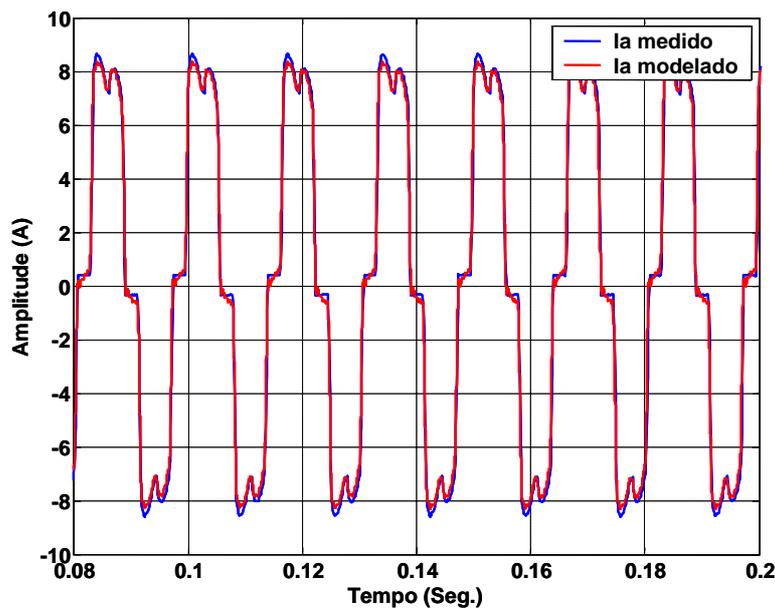


Figura 35: Formas de onda do sinal original e do sinal reconstruído, admitindo-se $V_{LL}=117 \text{ V}$

O erro máximo obtido no caso de uma carga tipicamente resistiva é de 3%. O que bastante razoável para estes tipos de estudo.

4.1.2. Carga Resistiva e Indutiva

O mesmo retificador trifásico foi modelado como uma carga composta de um resistor é de um indutor. Foi verificado que este tipo de carga poderia ser modelado como sendo do tipo impedância constante. Só que neste caso, o erro cometido foi cerca de 8%. Mas quando foi incluída uma parcela de 20% de corrente constante, o erro caiu para 3%. Por este motivo, a carga RL foi modelado como sendo 80% de impedância constante e 20% de corrente constante. O peso de cada uma destas duas parcelas foi definido empiricamente.

Como foi no caso da carga puramente resistiva, também foram estudados dois casos. No primeiro caso, considerou-se os valores dados em:

$$V_{LL} = 160 \text{ V}, R = 18,0 \Omega, L = 44,0 \text{ mH}, DHTv = 4,11\% \text{ e } DHTi = 26,18\%$$

A Figura 36 mostra o espectro de harmônicos em modulo e fase e a Figura 37 a forma de onda original e reconstruída a partir do modelo proposto para uma tensão de entrada de 160 V.

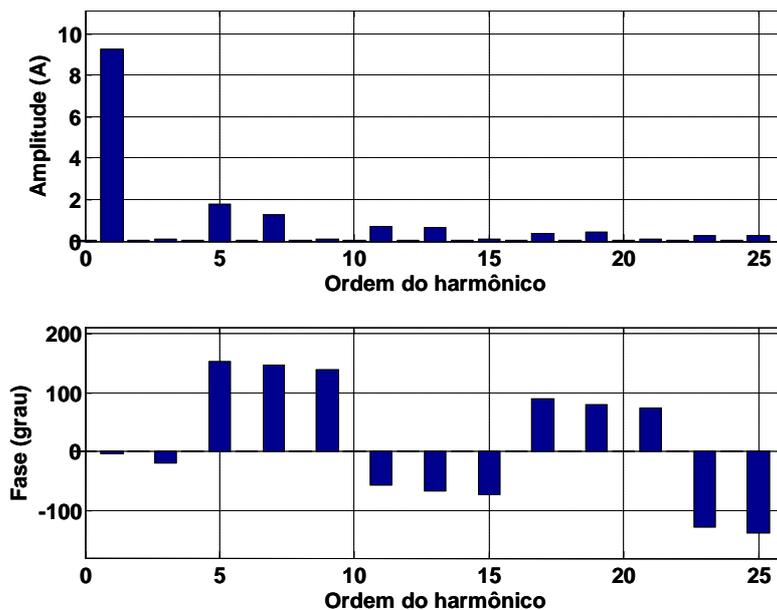


Figura 36: Espectro harmônico da corrente de entrada de um retificador trifásico com carga Z-I constante, admitindo-se $V_{LL}=160 \text{ V}$

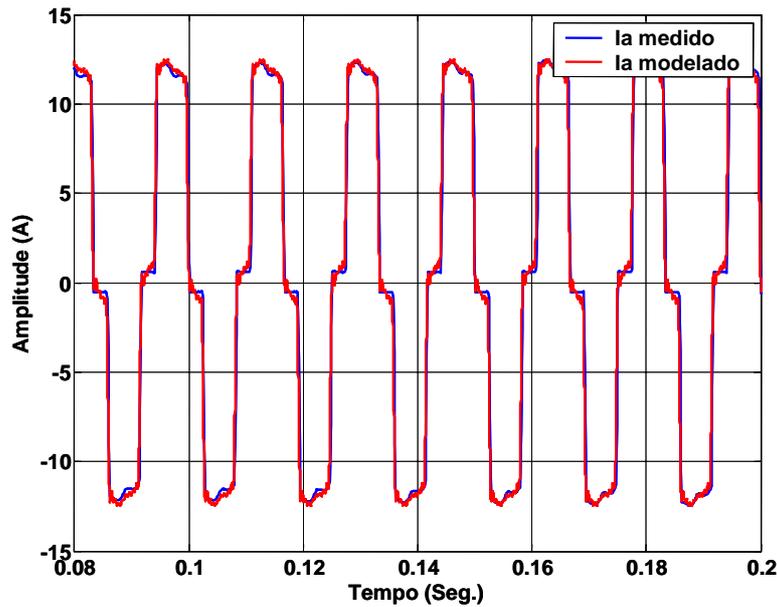


Figura 37: Formas de onda do sinal original e do sinal reconstruído $V_{LL}=160\text{ V}$

Conservando o peso das parcelas de impedância e corrente constante, a tensão da entrada foi reduzida até 82 V, uma diminuição de cerca de 50%, ou seja:

$$V_{LL} = 82,0\text{ V}, R = 18,0\ \Omega, L = 44,0\text{ mH}, DHT_v = 4,45\% \text{ e } DHT_i = 25,72\%$$

O espectro harmônico em modulo e fase assim como a forma de onda da corrente original e modelado estão apresentados nas Figura 38 e Figura 39.

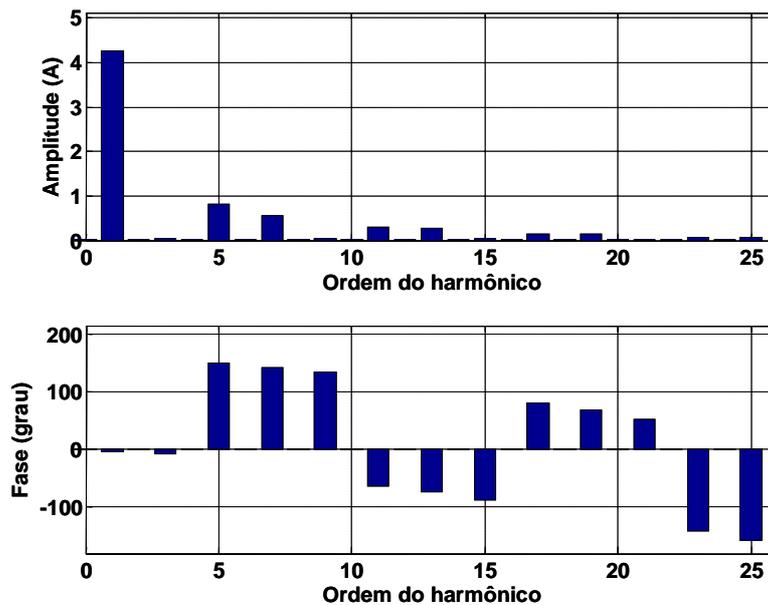


Figura 38 Espectro harmônico da corrente de entrada de um retificador trifásico com carga Z-I constante, admitindo-se $V_{LL}=82\text{ V}$

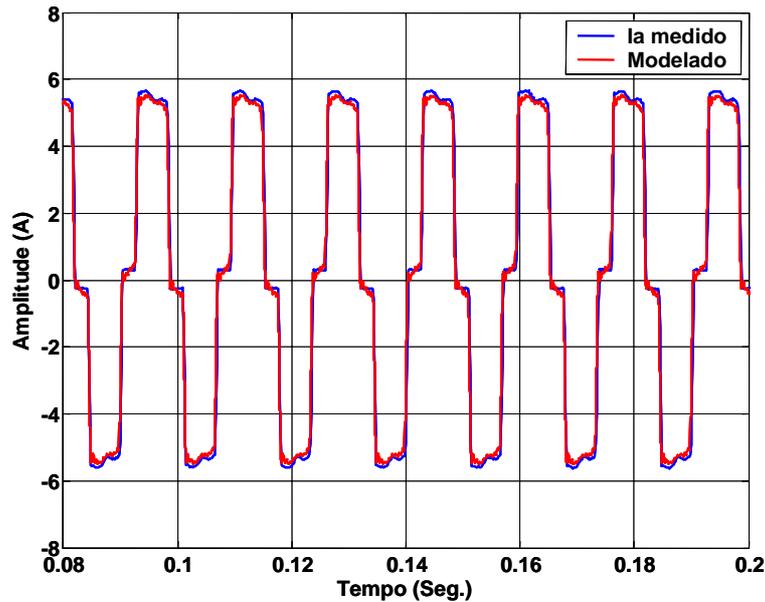


Figura 39: Formas de onda do sinal original e do sinal reconstruído, admitindo-se $V_{LL}=82$ V

4.2. Retificador Monofásico

A modelagem do retificador monofásico é bastante similar a do trifásico com carga RL. Poderia ser modelado como sendo uma carga do tipo impedância constante, mas novamente, a inclusão de uma parcela de 20% de corrente constante diminui o erro para 3%. O estudo desta carga também foi feito para dois níveis de tensão. Os dados utilizados:

$$V_{an} = 120,0 \text{ V}, R = 18,0 \Omega, L = 44,0 \text{ mH}, DHT_v = 2,21\% \text{ e } DHT_i = 32,44\%$$

O espectro harmônico do módulo e fase da corrente original e a forma de onda das correntes originais e modelados então mostrados na Figura 40 e na Figura 41 para o caso onde a tensão $V_{an}=120$ V.

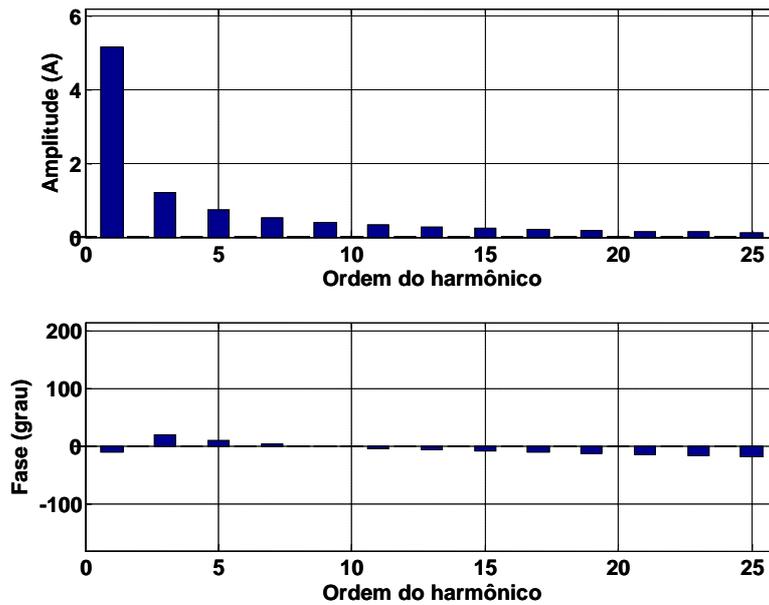


Figura 40: Espectro harmônico da corrente de entrada de um retificador monofásico com carga Z-I constante, admitindo-se $V_{an}=120V$

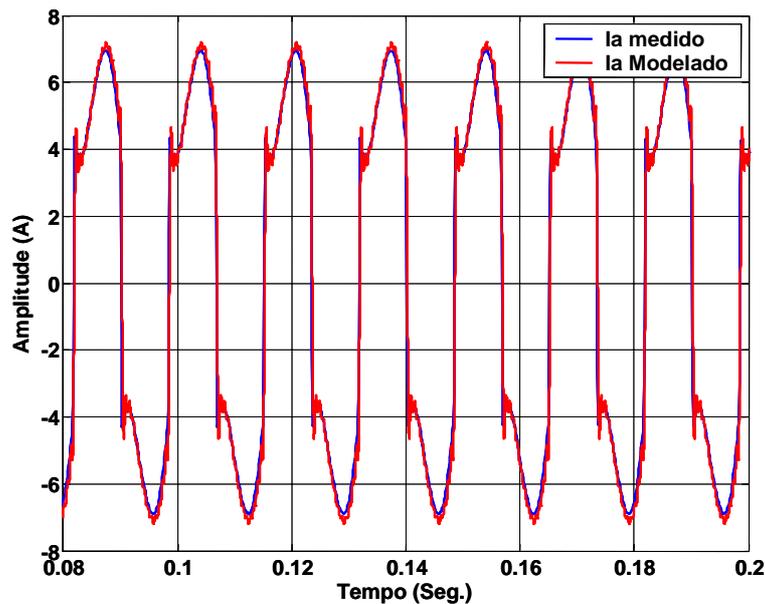


Figura 41: Formas de onda do sinal original e do sinal reconstruído, admitindo-se $V_{an}=120 V$

O outro caso é mostrado para os seguintes dados

$$V_{an} = 48,0 V, R = 18,0 \Omega, L = 44.0 mH, DHTv = 2,66\% \text{ e } DHTi = 29,22\%$$

O espectro harmônico do modulo e fase da corrente original e a forma de onda das correntes originais e modelados então mostrados nas Figuras Figura 40 Figura 41 para o caso onde a tensão $V_{an}=48 V$.

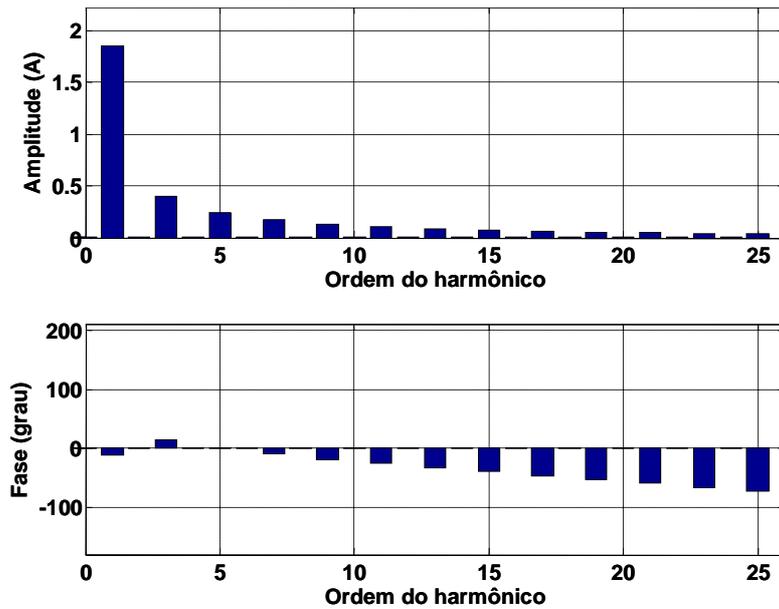


Figura 42 Espectro harmônico da corrente de entrada de um retificador monofásico com carga Z-I constante, admitindo-se $V_{an}=48$ V

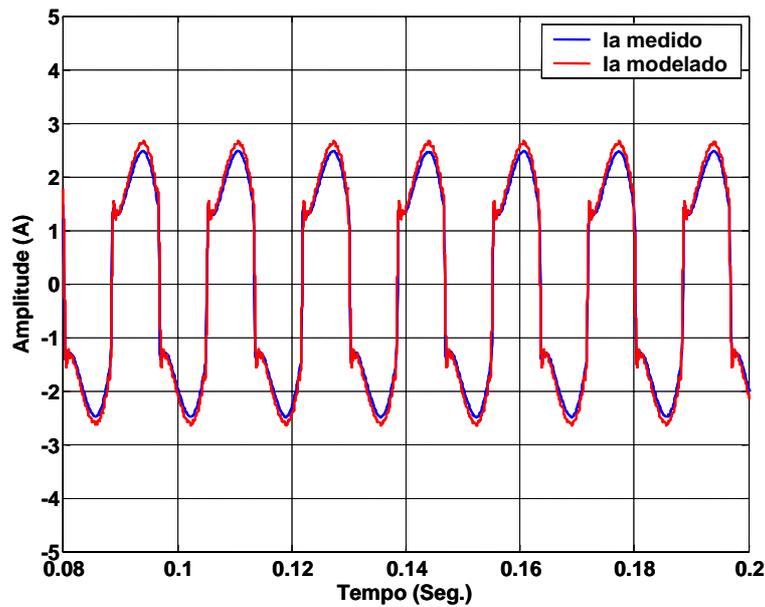


Figura 43: Formas de onda do sinal original e do sinal reconstruído, admitindo-se $V_{an}=48$ V

4.3. Motor de Indução

O modelo do motor de indução em regime permanente é mostrado na Figura 31. É um motor de gaiola e foi utilizado com as seguintes características:

$$V_{LL} = 208,0 \text{ V}, I_{nom} = 1,5 \text{ A}, DHTv = 2,04\%, DHTi = 1,97\%.$$

Foi aplicado freio de Foucault como carga.

A relação entre tensão e corrente do estator e a corrente do rotor é dada como (sendo que a tensão do rotor é nula):

$$\begin{cases} \vec{V}_s = (R_s \vec{I}_s + j\omega_e L_s) \vec{I}_s + j\omega_e L_M (\vec{I}_s + \vec{I}_r), \\ 0 = \left(\frac{R_r}{s} \vec{I}_r + j\omega_e L_r \right) \vec{I}_r + j\omega_e X_M (\vec{I}_s + \vec{I}_r), \end{cases}$$

onde:

V_s é a tensão na entrada do estator,

R_s e L_s e resistência e reatância do estator,

R_r e L_r a resistência e reatância do rotor,

L_M a reatância mútua entre o fluxo do rotor e o do estator

ω_e a velocidade do estator,

s e o fator de escorregamento e é dado como:

$$s = \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_e}$$

ω_r sendo a velocidade do rotor

A potência elétrica fornecida pelo motor é dado como:

$$P = 3I_r^2 R_r \frac{1-s}{s}$$

Para pequenas variações da tensão do estator (variações de 5% acima ou abaixo do valor nominal), a potência ativa não se altera conforme comprovado na Figura 44 e na Figura 45.

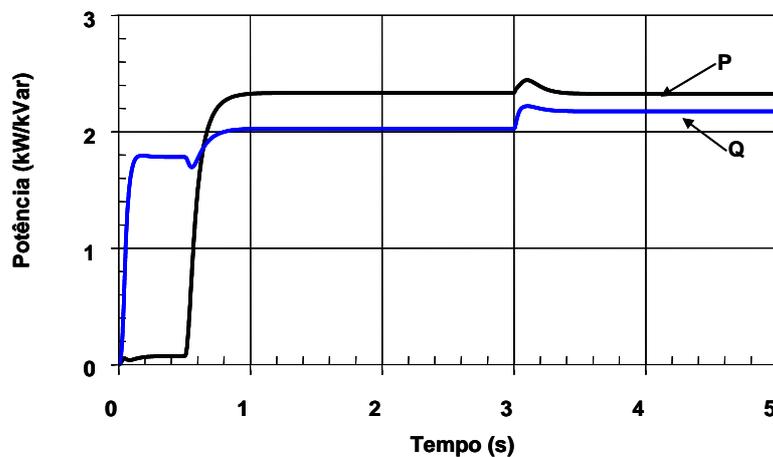


Figura 44: Potência ativa e reativa de um motor de indução quando a tensão do estator está acima de 5% do valor nominal

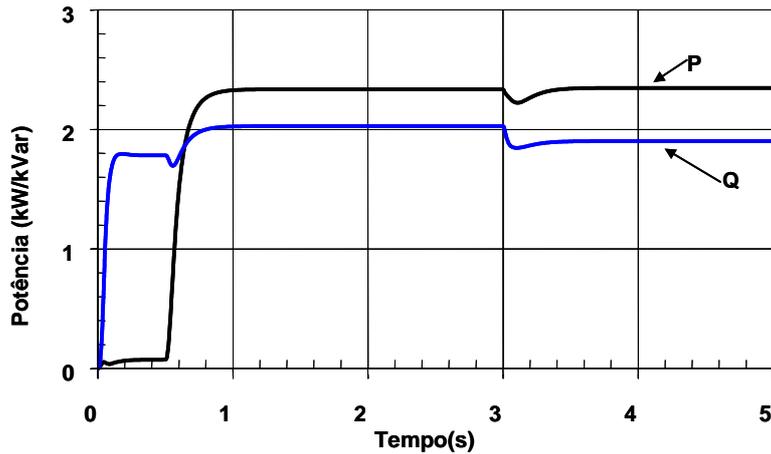


Figura 45: Potências ativa e reativa do motor de indução quando a tensão do estator está 5% abaixo do valor nominal

Por este motivo, o motor estudado foi modelado como sendo uma carga potência constante.

A Figura 46 mostra o espectro de harmônico em módulo e fase da corrente e a Figura 47 a forma de onda da corrente original reproduzido a partir do modelo.

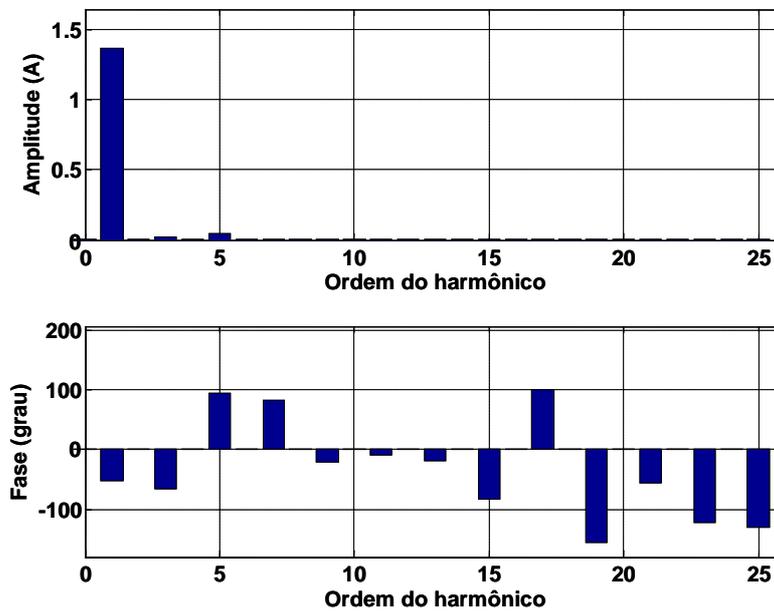


Figura 46: Espectro harmônico de um motor de indução trifásico, admitindo-se $V_{LL}=208\text{ V}$

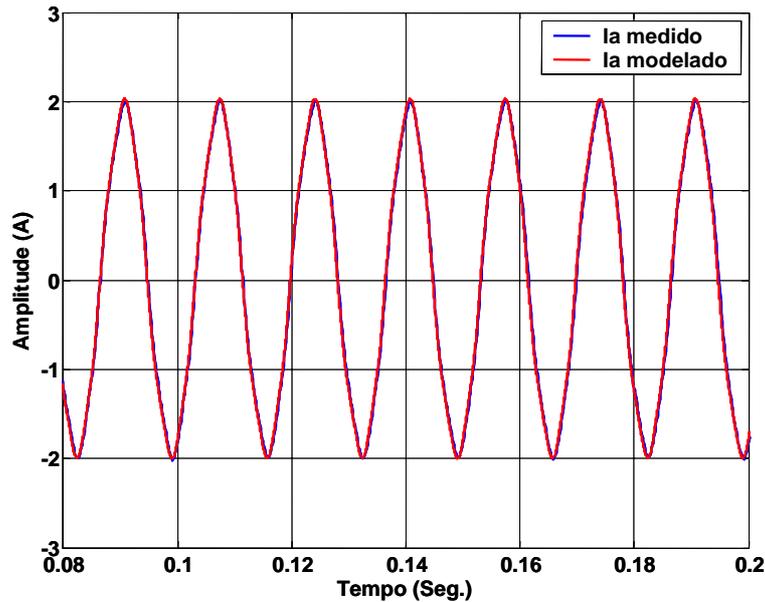


Figura 47: Formas de onda do sinal original e do sinal reconstruído, admitindo-se $V_{LL}=208\text{ V}$. O erro máximo cometido neste caso é cerca de 1%.

4.4. Carga Composta

Os resultados obtidos até aqui foram obtidos a partir dos estudos isolados de cada carga. Mas como foi ressaltada no capítulo anterior, na maioria das vezes, a carga a ser estudada aparece como um conjunto de cargas onde se encontram as características Z , I e P ao mesmo tempo. Daí a necessidade de testar o modelo proposto para o conjunto de todas as cargas apresentadas.

A Figura 48 mostra o espectro de harmônico da corrente e a Figura 49 mostra a forma de onda original e reconstruído. Neste estudo, a parcela Z constante representa 75%, a parcela I constante 15% e a parcela P constante representa 10% da carga

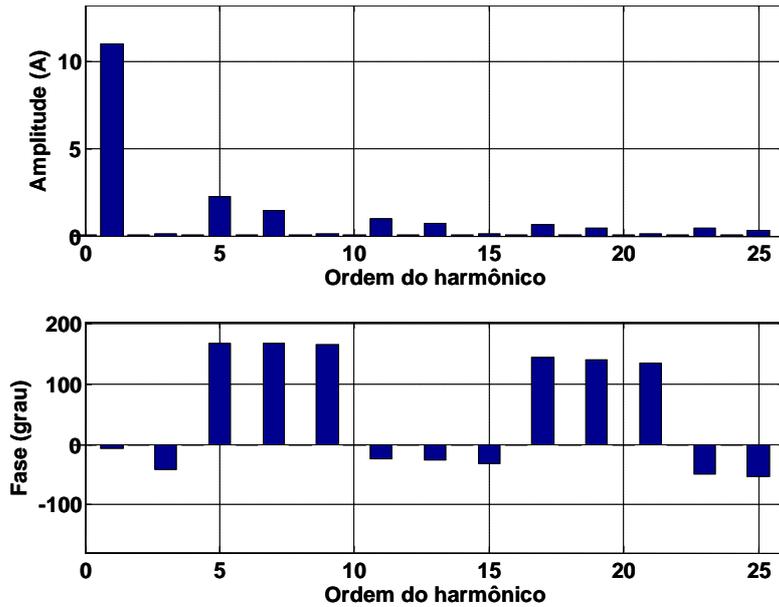


Figura 48: Espectro harmônico de uma carga ZIP, admitindo $V_{LL}=208$ V

Como pode ser visto na Figura 49, a representação de cargas não-linear por fontes de correntes sincronizadas também pode ser aplicada quando se tem todos os componentes do modelo ZIP presentes na carga.

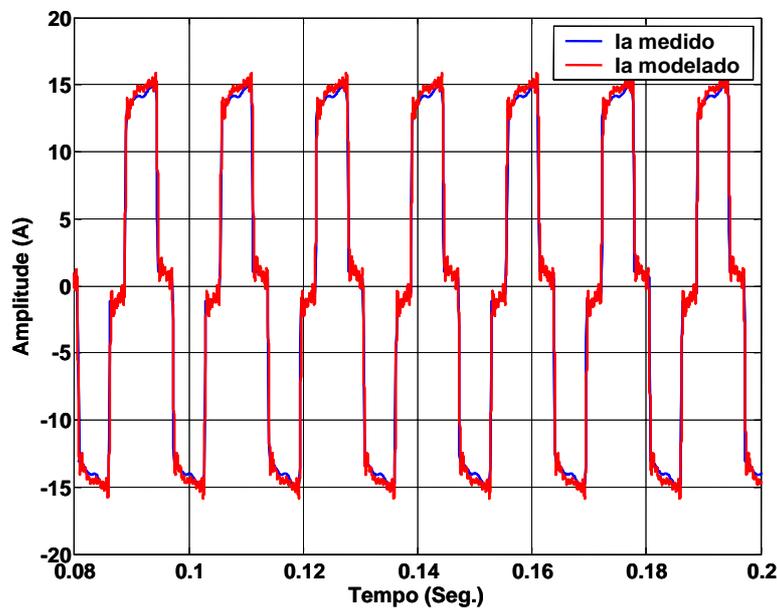


Figura 49: Formas de onda do sinal original e do sinal reconstruído, admitindo $V_{LL}=208$ V

Nas Figura 33, Figura 35, Figura 37, Figura 39, Figura 41, Figura 43, Figura 47 e Figura 49, todos os erros observados (tais como os fenômenos de gibbs) estão dentro das limitações da transforma de Fourier. Foram selecionados os harmônicos até

ordem 25, o que é suficiente para a reprodução fiel da forma de onda original. No caso do motor de indução, o harmônico de ordem 7 foi suficiente. Ressalta-se que tanto o retificador trifásico como monofásico com carga RL poderiam ser modelados como sendo uma carga tipo impedância constante. Só que foi provado empiricamente que a inclusão de uma parcela corrente constante, embora pequena, permite a melhor representação do modelo. O estudo matemático para a determinação dos coeficientes representando o peso de cada parcela de uma carga composta está em andamento.

Capítulo 5

Estudo de Caso: Carga Industrial

A indústria escolhida foi monitorada entre os dias 4 e 6 de janeiro de 2005. É alimentada em baixa tensão (110 V fase-neutro), tendo o medidor sido conectado em estrela, no secundário dos TPs e TCs conectados ao alimentador principal do cliente, o que permite o registro direto das tensões de fase e das três correntes da linha. Todavia, cabe ressaltar aqui que não recebemos informações adicionais destes TPs e TCs (resposta em frequência por exemplo).

5.1. Grandezas Coletadas

Os dados coletados indicam que as tensões de fase estiveram sempre entre 0,97 e 1,04 pu, aceitável para a classe de tensão do cliente, distribuídas ao longo do período de medição de acordo com o histograma apresentado na Figura 50.

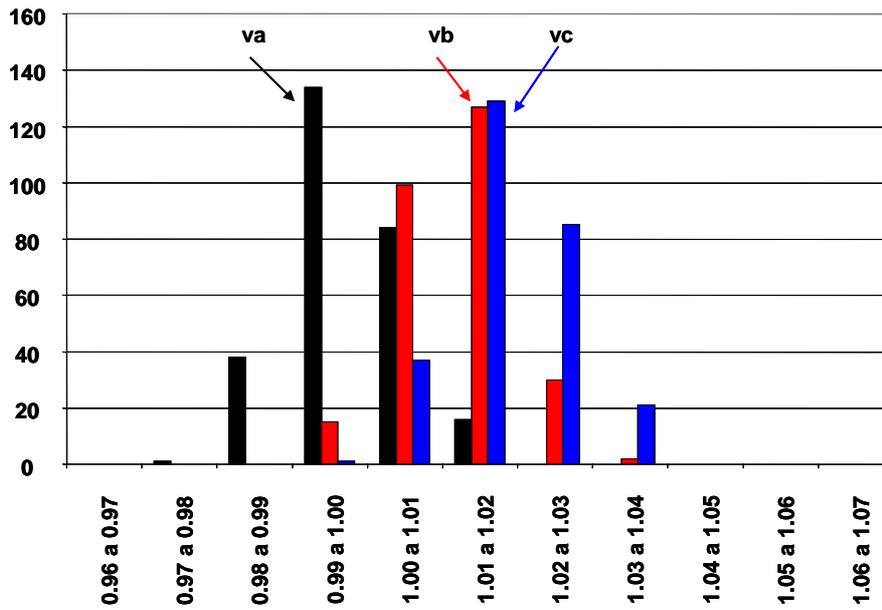


Figura 50: Histograma de tensões (pu)

A distorção harmônica total da tensão permanece na faixa de 0,8% a 2,5%, conforme mostrado na Figura 51 valor também considerado aceitável e dentro dos limites estabelecidos pela norma IEEE-519/1992 [10] para a aplicação da metodologia proposta (até 10%).

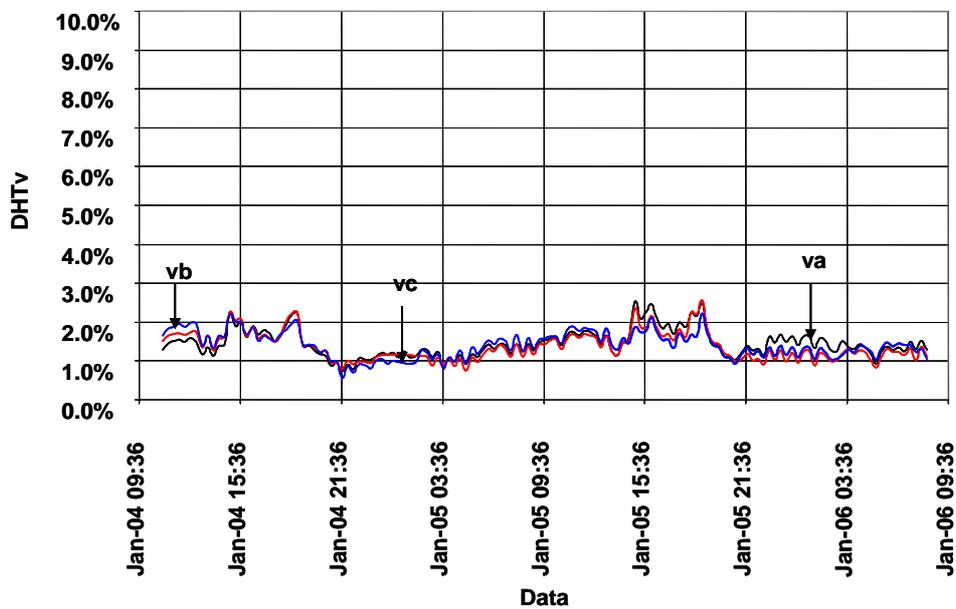


Figura 51: Distorção harmônica de tensão do consumidor industrial

No que se refere às correntes, poder-se-ia modelar o perfil de consumo da fábrica como essencialmente equilibrado e constante, oscilando ligeiramente ao longo do dia em torno de um valor médio de 8 A, conforme mostrado na Figura 52.

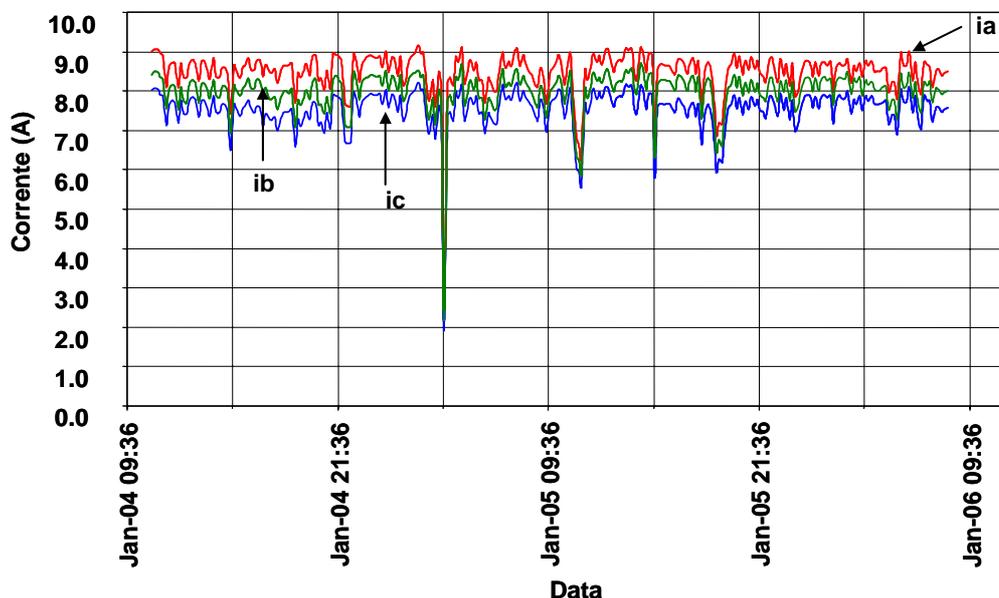


Figura 52: Correntes nas fases A, B e C

Ressalta-se que o evento aparentemente ocorrido na madrugada do dia 5 de janeiro causando a redução brusca das correntes foi provavelmente de origem interna, visto que os níveis de tensão foram preservados. Conforme na Figura 52, há uma predominância de cargas trifásicas na fábrica, o que indicaria como adequada a representação por meio de um modelo de injeções de correntes harmônicas trifásico e equilibrado.

A potência ativa média consumida pelo cliente durante o período de medição foi de 2,55 kW, o que corresponde a um consumo mensal de 1800 kWh. O fator de potência se manteve igualmente constante, em cerca de 0,96 indutivo. Tais dados indicam não haver variação significativa da composição da carga total durante a medição.

A Figura 53 e a Figura 54 apresentam os perfis dessas duas grandezas ao longo da medição.

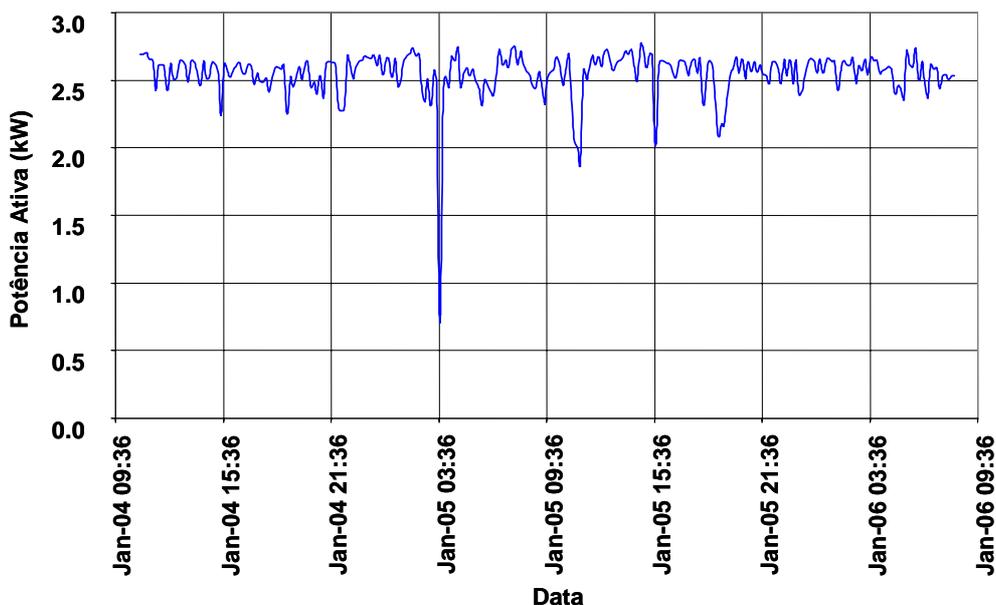


Figura 53: Potência ativa

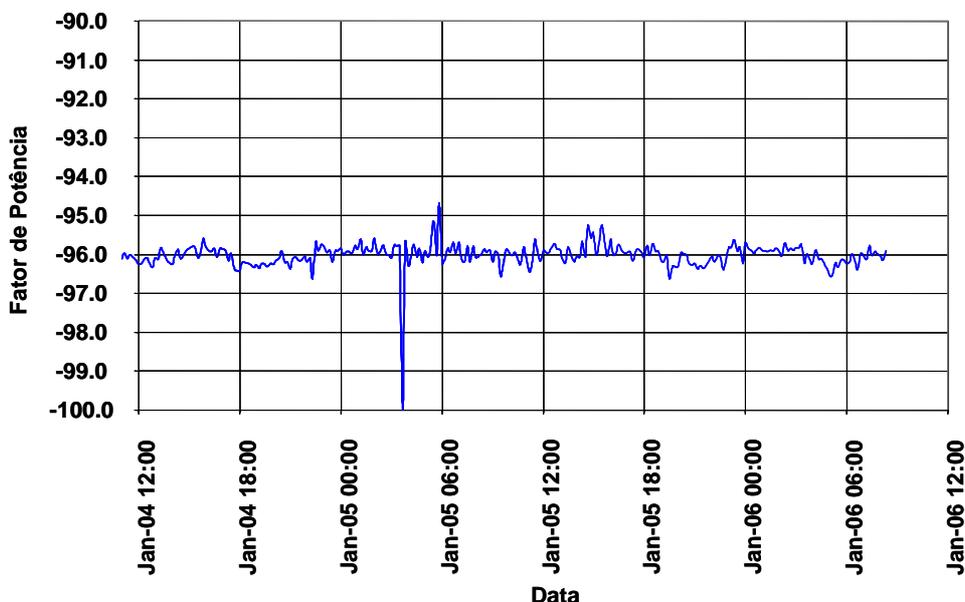


Figura 54: Fator de Potência Total

Uma análise do conteúdo harmônico das correntes, essencial para a concepção do modelo proposto no trabalho, mostra que a distorção harmônica total situa-se predominantemente na faixa entre 2% a 4%, um valor também considerado aceitável. A oscilação ao longo do dia não é significativa, como mostra a Figura 55. Conforme os histogramas e conclusões apresentadas em, os harmônicos predominantes e indicados para a representação da carga não-linear são os ímpares até o 13^o.

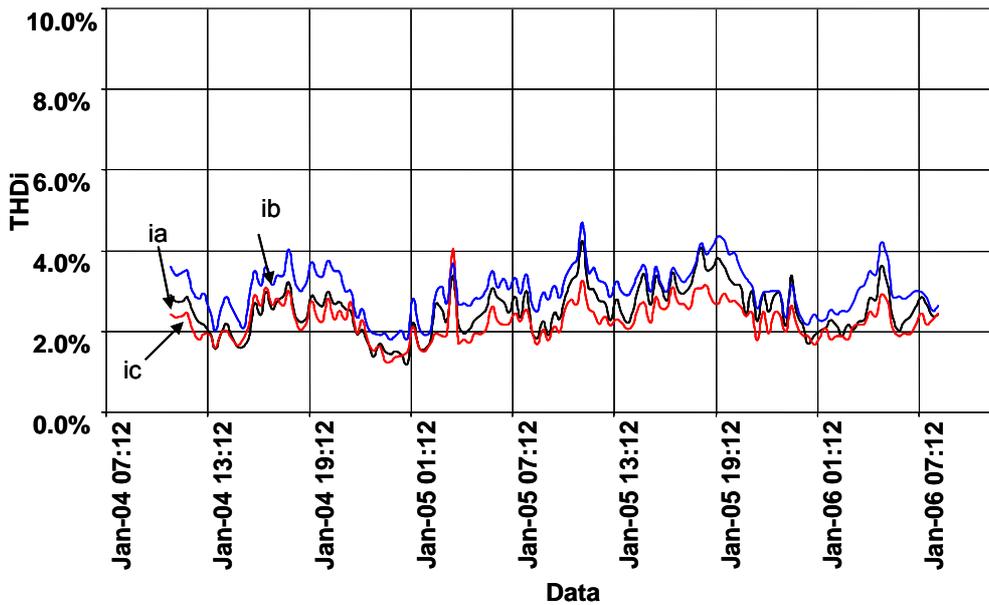


Figura 55: THD de corrente

A Figura 56 apresenta uma forma de onda típica medida na fábrica, com o conteúdo harmônico medido.

Portanto, a modelagem proposta para a esta indústria, de acordo com a metodologia desenvolvida neste trabalho, consistirá em injeções de correntes contendo os harmônicos de ordem 1, 3, 5, 7, 9 e 13. Para ilustrar a generalidade do modelo proposto e obter maior nível de detalhamento nas simulações, a fábrica será representada por um sistema desequilibrado de correntes, de modo a representar a ligeira diferença entre as correntes verificada na Figura 52.

Entretanto, deve-se enfatizar novamente que, de forma geral, o consumidor estaria adequadamente representado por um sistema equilibrado de injeções de correntes, tendo sido escolhida a representação desequilibrada apenas para ilustrar uma aplicação mais geral do modelo desenvolvido neste trabalho.

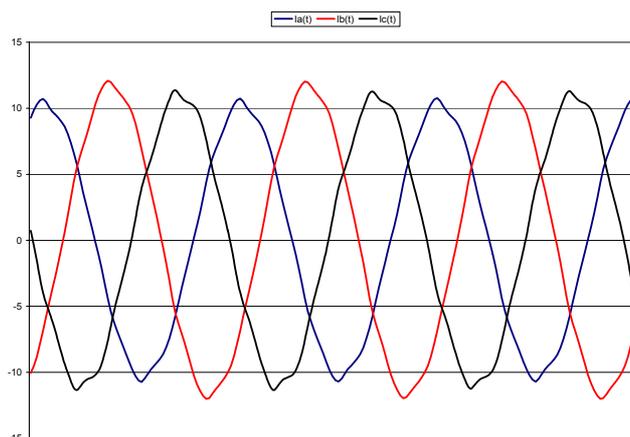


Figura 56: Formas de onda de corrente nas fases A, B e C – 05/01/2005 11:20h

A Tabela 5.1 apresenta os módulos e ângulos dos harmônicos das correntes a serem injetadas fases A, B e C, considerando-se o dia 4 de janeiro de 2005 às 12h.

Tabela 5.1: Espectro harmônico da corrente

Ordem do harmônico	Fase A		Fase B		Fase C	
	Módulo (A)	Ângulo (graus)	Módulo (A)	Ângulo* (graus)	Módulo (A)	Ângulo* (graus)
Fundamental	7,78	-12,4	8,74	-135	8,14	101
3°	0,0500	-91,6	0,0290	-157	0,0700	65,4
5°	0,0610	-6,94	0,0710	95,6	0,0850	-129
7°	0,200	157	0,194	56,5	0,260	-72,6
9°	0,0280	-20,2	0,0129	140	0,0170	175
11°	0,00997	24,3	0,0320	112	0,0340	-86,5
13°	0,0310	-60,4	0,0250	164	0,0312	24,7

Por fim, ressalta-se que, durante o período de medição considerado, não foram detectados problemas significativos na planta do cliente.

5.2. Modelagem no Programa PSCAD

Este item descreve a representação de uma subestação de uma concessionária no programa PSCAD. A modelagem inclui os transformadores e alimentadores da subestação, bem como a rede básica supridora através de equivalentes de seqüência positiva e zero. O capítulo apresenta ainda os parâmetros utilizados no modelo de carga

não-linear desenvolvido, tendo em vista a representação do consumidor industrial nas diversas condições de carga.

5.2.1. Equivalente da Rede Básica

A subestação que alimenta a indústria secciona duas linhas de transmissão de 138 kV entre duas subestações de 138 kV, conforme apresentado na Figura 57. A barra da SE opera normalmente separada em duas seções (barras A e B).

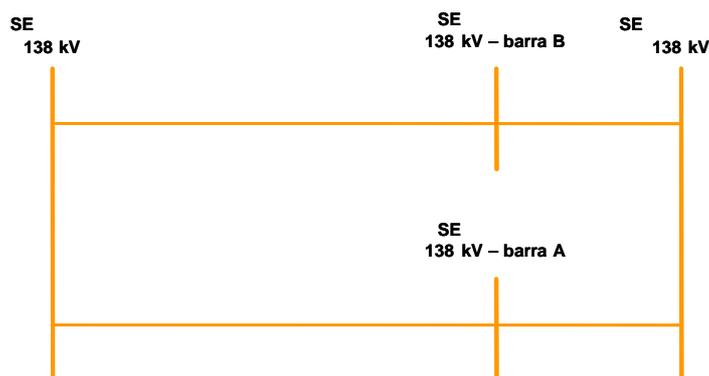


Figura 57: Conexão da SE à rede básica

Utilizando a base de dados de curto-circuito do Sistema Interligado Nacional, disponibilizada pelo ONS (configuração dezembro de 2006), foram obtidos os níveis de curto-circuito nas barras 138 kV A e B da SE. Os níveis de curto-circuito trifásico e monofásico, em MVA, estão apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Níveis de curto-circuito trifásico e monofásico na SE

Subestação	Barra	Nível de curto-circuito	
		Trifásico (MVA)	Monofásico (MVA)
Subestação 138 kV	A	296-j1856	205-j1109
	B	296-j1856	204-j1093

Partindo dos níveis de curto-circuito trifásico e monofásico obtidos no programa de curto-circuito, foram obtidas as impedâncias equivalentes para fins de representação da rede básica à montante das barras de 138 kV da SE. Os valores das impedâncias de seqüência positiva e zero calculados estão apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Impedância equivalente na barras 138 kV A e B da SE

Subestação	Barra	Impedância equivalente	
		$Z1=R1+j.X1$ (Ω)	$Z0=R0+j.X0$ (Ω)
Subestação 138 kV	A	1,59 + j.10,00	6,02 + j.29,81
	B	1,59 + j.10,00	6,21 + j.30,49

Para fins de representação no PSCAD, as barras A e B podem ser modeladas através de fonte de tensão com tensão nominal igual a 138 kV entre fases e com impedância de seqüência positiva e zero iguais aos valores indicados na Tabela 5.3. De fato, os resultados obtidos no PSCAD apresentam correntes de curto-circuito monofásico e trifásico coerentes com os níveis de curto indicados anteriormente.

5.2.2. Subestação 138/11,95 kV

A Figura 58 apresenta o diagrama unifilar esquemático da SE. Observa-se que os dois circuitos de 138 kV alimentam duas seções de barra que operam normalmente separadas.

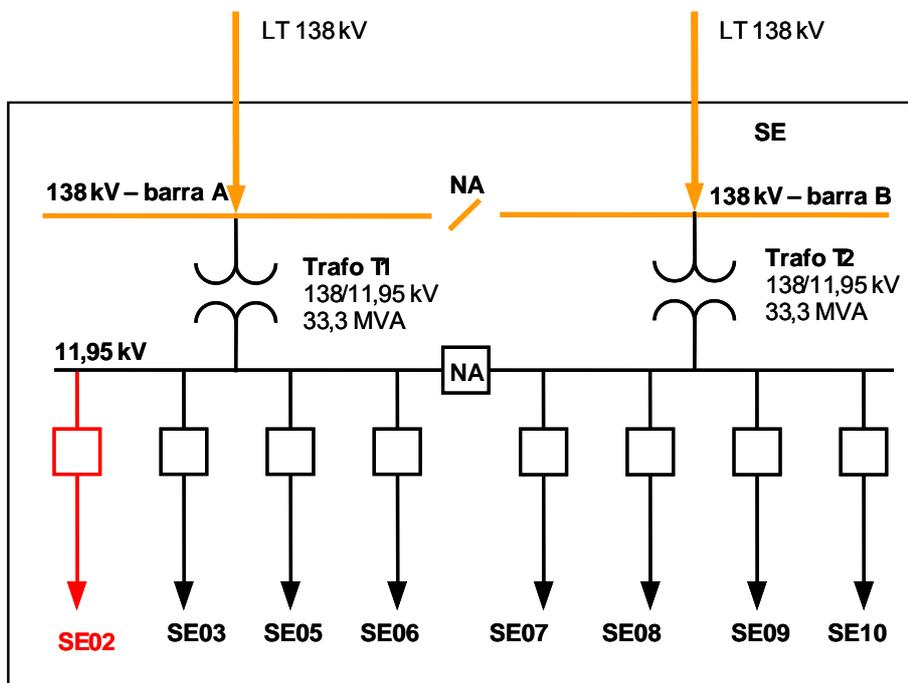


Figura 58: Diagrama unifilar da SE

Da subestação que alimenta o consumidor estudado, derivam oito alimentadores 11,95 kV para o suprimento das cargas da região. Em destaque na figura o alimentador SE02 no qual se encontra conectada a carga do consumidor industrial. A subestação possui dois transformadores trifásicos 138/11,95 kV, com recurso de regulação automática de tensão.

A potência nominal dos transformadores é de 33,3 MVA quando se consideram os dois estágios de ventilação forçada. Os transformadores são ligados em delta no lado de alta (138 kV) e estrela aterrada no lado de baixa (11,95 kV) e possuem comutador sob carga com 17 posições no lado de 138 kV. A impedância de dispersão do equipamento à 60 Hz (75° C) é de 12,47% na base do equipamento.

Não foram disponibilizados dados sobre a geometria do núcleo dos transformadores, razão pela qual não é possível representar o acoplamento magnético existente entre as fases.

Para fins de representação no PSCAD, utilizou-se o modelo [3-Phase 2-Winding Transformer], com representação do tap, das ligações dos enrolamentos e da impedância de dispersão.

5.2.3. Alimentadores

Observa-se na Figura 58 que tanto a barra de 138 kV quanto a barra de 11,95 kV operam com seções independentes. De fato, para analisar o desempenho do alimentador SE02, em particular da carga do consumidor industrial, pode-se representar apenas os alimentadores vizinhos SE03, SE05 e SE06, utilizando equivalentes de rede para a rede básica.

A representação dos alimentadores SE03, SE05 e SE06 baseia-se nas curvas de carga disponibilizadas pela concessionária. A representação foi feita utilizando modelo de carga [Fixed Load], que permite definir valores de potência ativa e reativa para uma determinada tensão de referência. Para o alimentador SE02, no qual se encontra conectada a carga da indústria, adotou-se representação mais detalhada,

considerando as impedâncias dos principais trechos e a distribuição da carga ao longo do alimentador.

a. Alimentador SE02

Para o alimentador SE02 utilizou-se representação detalhada, uma vez que a carga da indústria é atendida por este alimentador. O tronco principal do alimentador utiliza 3 condutores de 336,4 MCM e foi representado com referência no trajeto real do alimentador, até o ponto de conexão do consumidor.

A carga foi distribuída ao longo de todo o alimentador, adotando como referência os transformadores instalados, com fator de carga de 60% e fator de potência de 0,9.

A Figura 59 apresenta um diagrama esquemático unifilar do alimentador SE02. Observa-se que as cargas foram agregadas em alguns pontos do alimentador de forma a simplificar a representação. A figura indica as potências instaladas e a potência efetiva, tendo em vista o fator de carga e o fator de potência.

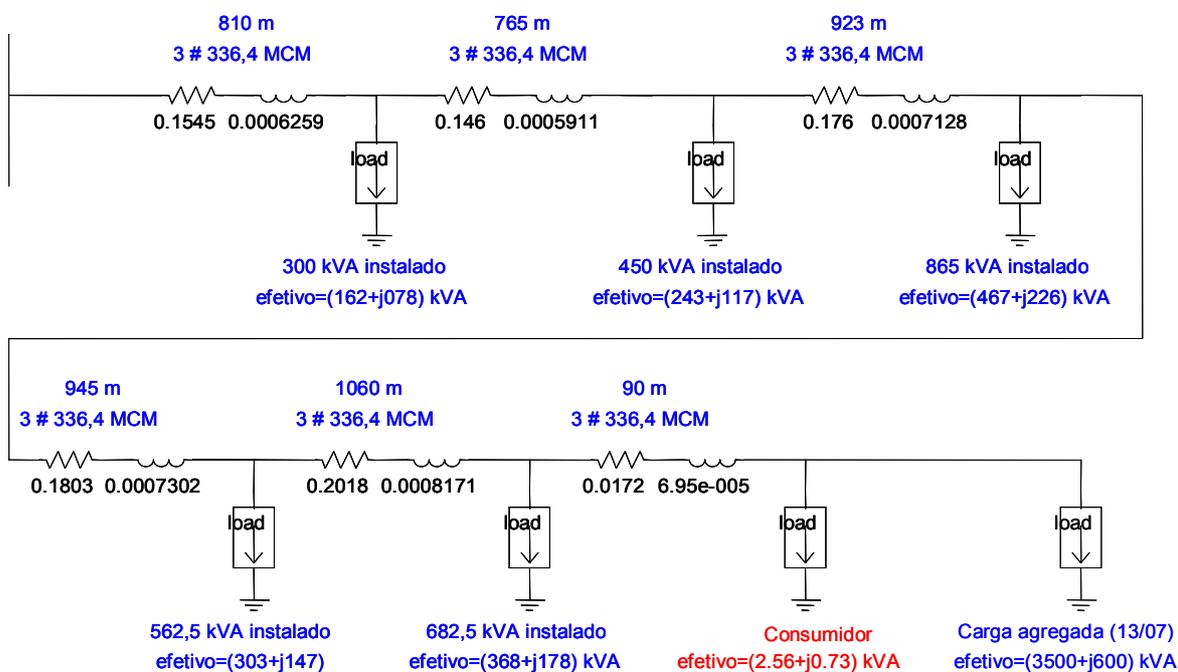


Figura 59: Representação do alimentador SE02 (diagrama unifilar)

Para ajustar a carga total do alimentador SE02, utilizou-se a curva de carga disponibilizada pela concessionária, que resulta de medições de campo em dois dias

distintos: 13 e 20 de julho de 2005. A Figura 60 apresenta a potência ativa e reativa medidas no alimentador SE02 nestes dias.

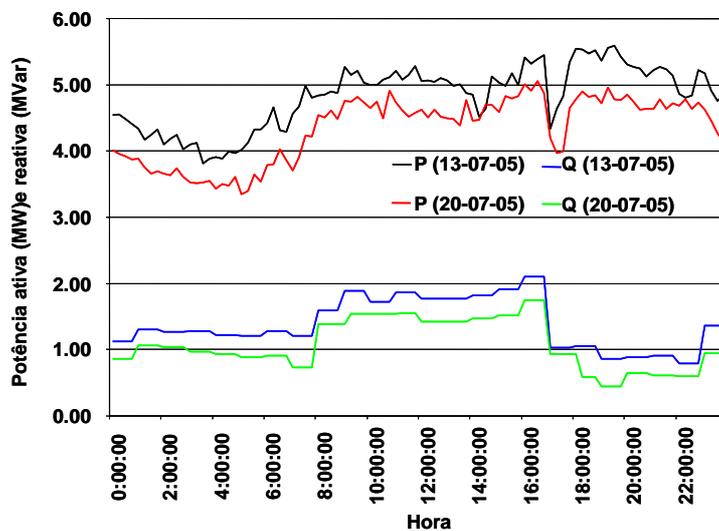


Figura 60: Potência ativa e reativa no alimentador da SE02 [13 e 20/07/2005]

b. Alimentador SE03

Para ajustar a carga total do alimentador SE03, utilizou-se a curva de carga disponibilizada pela concessionária, que resulta de medições de campo em dois dias distintos: 13 e 20 de julho de 2005 (duas quarta-feiras). A Figura 61 apresenta a potência ativa e reativa medidas no alimentador SE03 nestes dias.

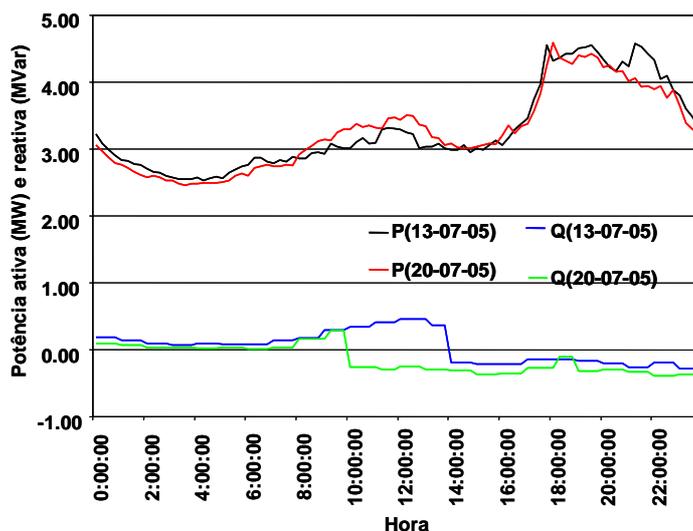


Figura 61: Potência ativa e reativa no alimentador da SE03 [13 e 20/07/2005]

c. Alimentador SE05

Para ajustar a carga total do alimentador SE05, utilizou-se a curva de carga disponibilizada pela concessionária, que resulta de medições de campo em dois dias distintos: 13 e 20 de julho de 2005. A Figura 62 apresenta a potência ativa e reativa medidas no alimentador SE05 nestes dias.

d. Alimentador SE06

Para ajustar a carga total do alimentador SE06, utilizou-se a curva de carga disponibilizada pela concessionária, que resulta de medições de campo em dois dias distintos: 13 e 20 de julho de 2005. A Figura 63 apresenta a potência ativa e reativa medidas no alimentador SE06 nestes dias.

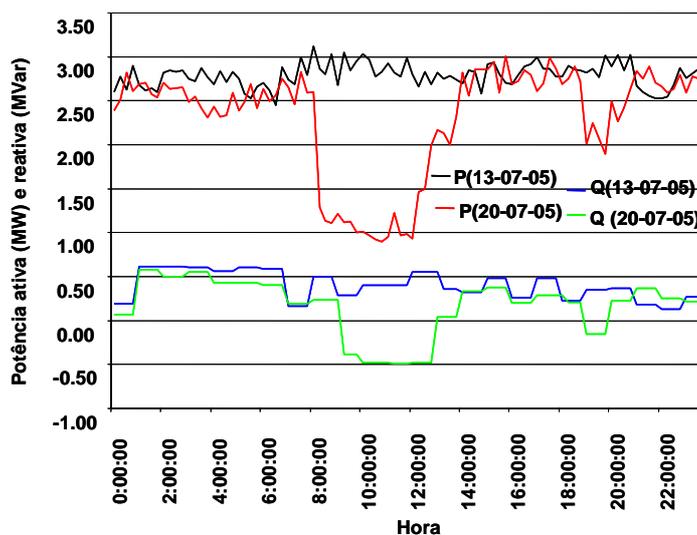


Figura 62: Potência ativa e reativa no alimentador da SE05 [13 e 20/07/2005]

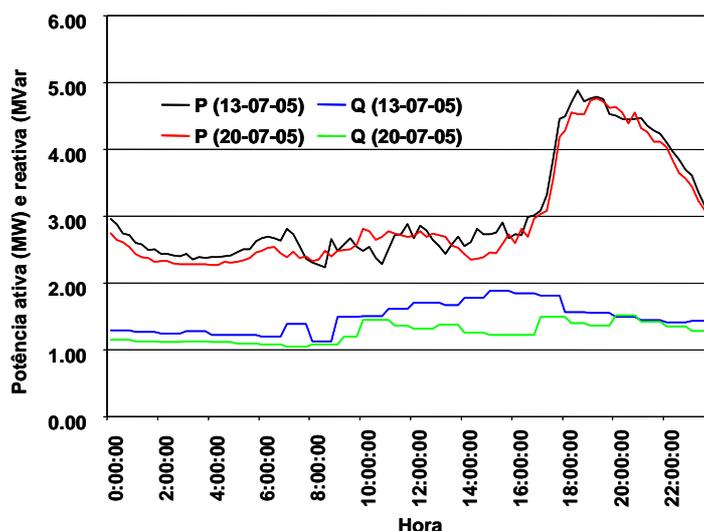


Figura 63: Potência ativa e reativa no alimentador da SE06 [13 e 20/07/2005]

5.3. Simulações no PSCAD

A fim de validar o modelo digital de carga não-linear desenvolvido, foram feitas diversas simulações computacionais, considerando diferentes distúrbios na rede CA representada. Os resultados obtidos permitem verificar o desempenho do sistema de suprimento ao consumidor e agregam subsídios para análises futuras da rede da concessionária, utilizando o simulador PSCAD.

5.3.1. Condições Normais de Operação

A Figura 64 apresenta as tensões fase-neutro no consumidor industrial em condições normais de operação.

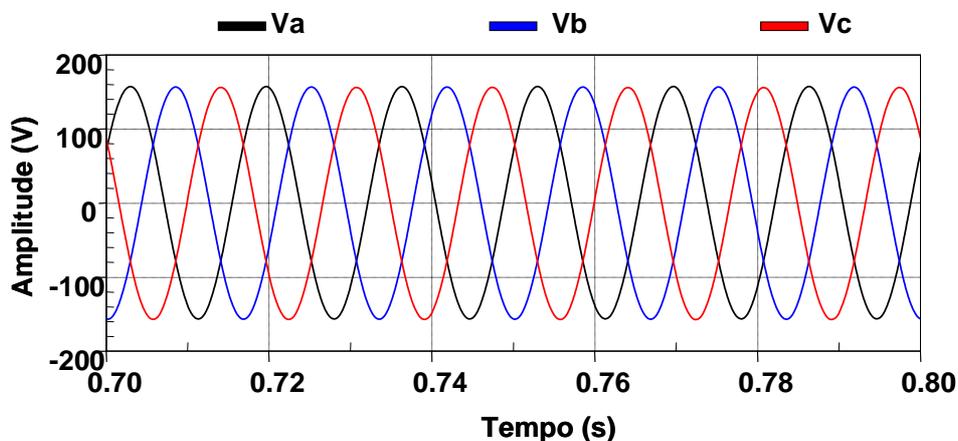


Figura 64: Tensões nas fases A, B e C no consumidor em condições normais

A Figura 65 apresenta a corrente nas três fases do consumidor industrial em condições normais de operação. Observa-se que as correntes obtidas nas simulações são coerentes com os resultados das medições de campo apresentadas anteriormente, tanto nas magnitudes quanto na composição harmônica (forma de onda).

A Figura 66 apresenta a tensão e a corrente na fase A do consumidor. Observa-se que a defasagem de 12° entre a tensão e corrente (componente fundamental) é verificada nos resultados de simulação, o que atesta a coerência dos resultados. Ressalta-se que a defasagem angular entre as formas de onda de tensão e corrente é mantida na simulação através da utilização de circuitos PLL, conforme mencionado anteriormente.

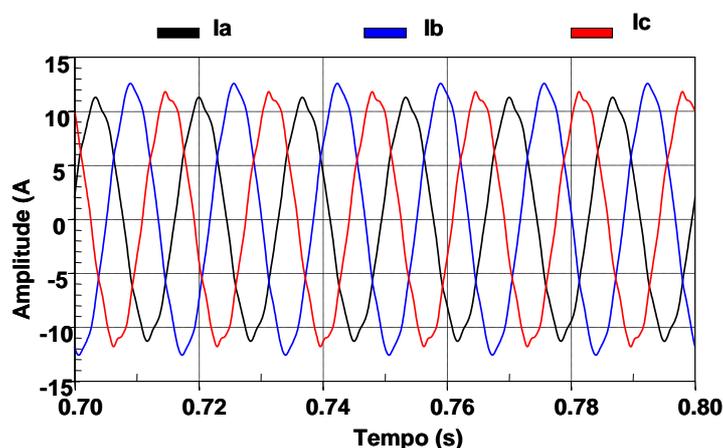


Figura 65:: Correntes nas fases A, B e C do consumidor em condições normais

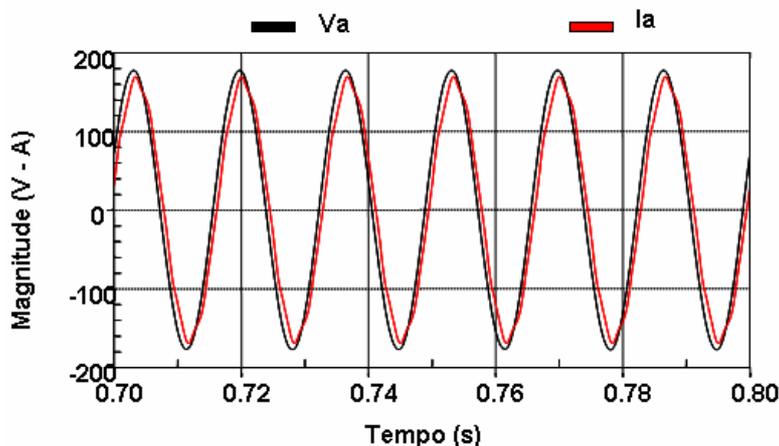


Figura 66: Tensão e corrente na fase A do consumidor em condições normais

A Figura 67 apresenta a potência ativa e reativa no consumidor. Observa-se que estas grandezas estabilizam-se, indicando que as defasagens angulares estão fixas pela ação do circuito PLL.

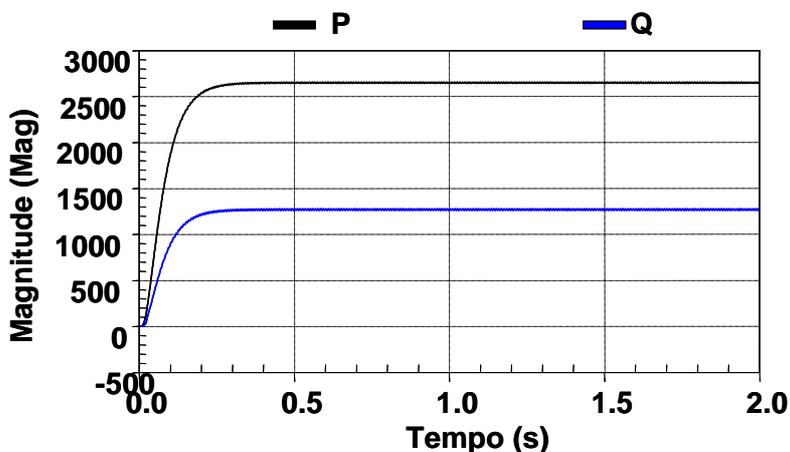


Figura 67: Potência ativa e reativa do consumidor em condições normais

Os resultados indicam que o modelo da carga do consumidor, que utiliza o modelo digital de carga não-linear desenvolvido no trabalho, apresenta resultados coerentes com as medições de campo realizadas. No caso das simulações, utilizou-se um filtro media-móvel para o calculo das potências ativas e reativas

5.3.2. Afundamento de Tensão na Fase A (50% por 300 ms)

Este item apresenta o desempenho do modelo digital frente a um afundamento de tensão monofásico. Foi simulado um curto-circuito monofásico de 300 ms de duração, a menos de 1 km da barra de 11,95 kV da SE. Observa-se na Figura 68 que a tensão na fase A do consumidor cai para 50% do valor nominal durante o distúrbio.

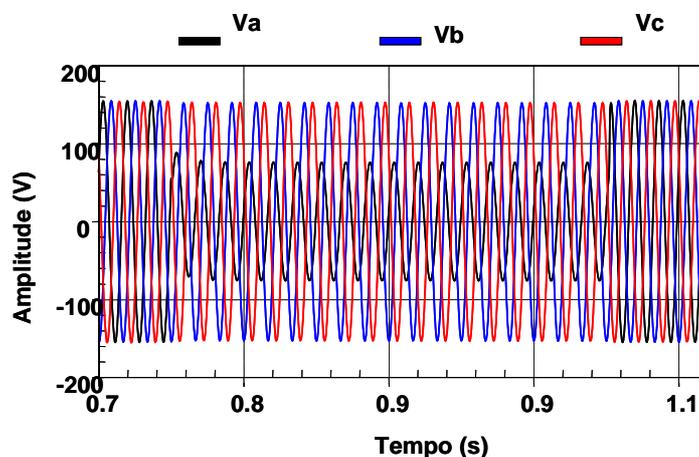


Figura 68: Tensões nas fases do consumidor para afundamento de 50% - 300 ms

A Figura 69 apresenta as correntes nas três fases do consumidor durante o afundamento de tensão. Observa-se que as correntes permanecem inalteradas, em função da própria característica do modelo (corrente constante). Na prática, durante um afundamento de tensão, a corrente também cai numa proporção que depende bastante da composição da carga. De qualquer forma, mesmo com o afundamento de tensão, o modelo não perde as referências.

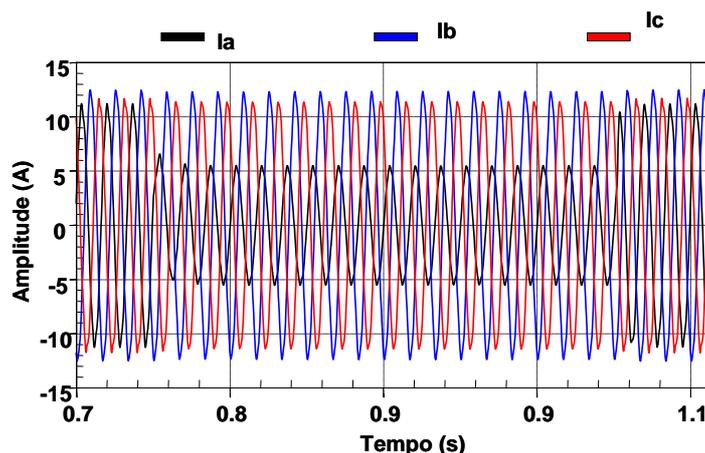


Figura 69: Correntes nas fases do consumidor para afundamento de 50% - 300 ms

A Figura 70 apresenta a potência ativa e reativa do consumidor durante o afundamento de tensão. Observa-se que em função da redução de tensão e corrente em uma das fases, ocorre redução da potência total consumida pela carga. Observa-se ainda que as grandezas estabilizam-se, o que indica que as defasagens angulares estão fixas pela ação do PLL mesmo durante o afundamento de tensão.

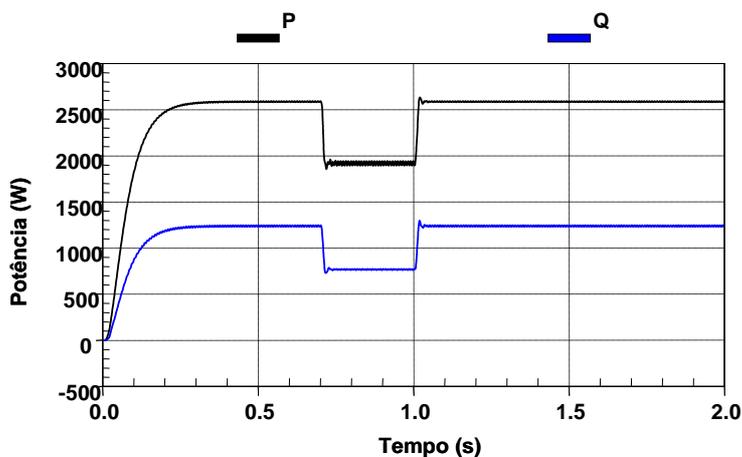


Figura 70: Potência ativa e reativa do consumidor para afundamento de 50% - 300 ms

5.3.3. Afundamento de tensão nas três fases (50% por 300 ms)

Este item apresenta o desempenho do modelo digital frente a um afundamento trifásico de tensão. Foi simulado um curto-circuito trifásico de 300 ms de duração, a menos de 1 km da barra de 11,95 kV da SE.

Observa-se na Figura 71 que a tensão nas três fases do consumidor caem para 50% do valor nominal durante o distúrbio.

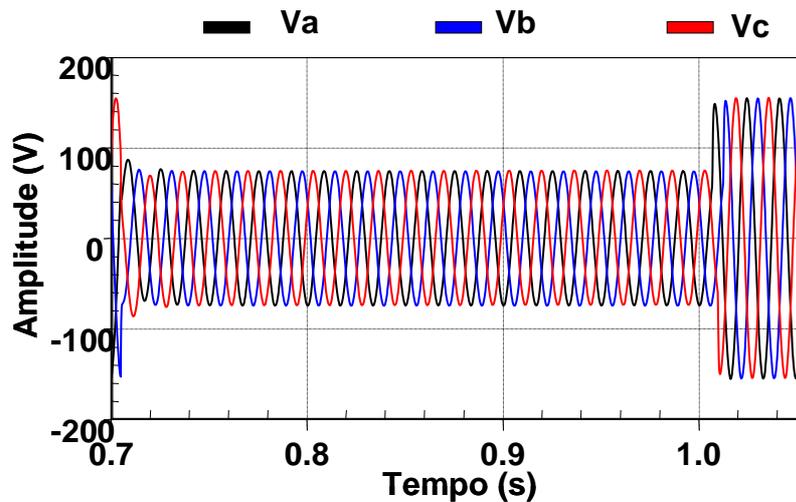


Figura 71: Tensões nas fases do consumidor para afundamento trifásico de 50% - 300 ms

A Figura 72 apresenta as correntes nas três fases do consumidor durante o afundamento de tensão.

A Figura 73 apresenta a potência ativa e reativa do consumidor durante o afundamento de tensão. Observa-se ainda que as grandezas estabilizam-se, o que indica que as defasagens angulares estão fixas pela ação do PLL mesmo durante o afundamento de tensão.

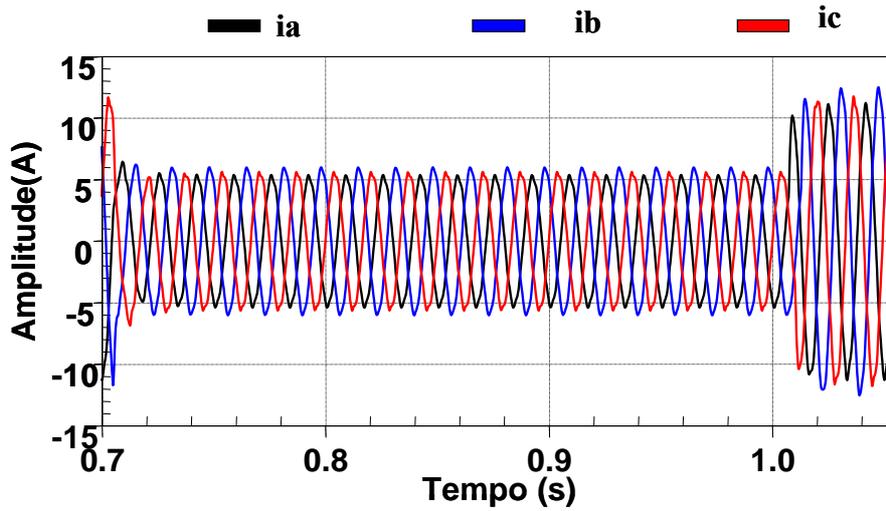


Figura 72: Correntes nas fases do consumidor para afundamento trifásico de 50% - 300 ms

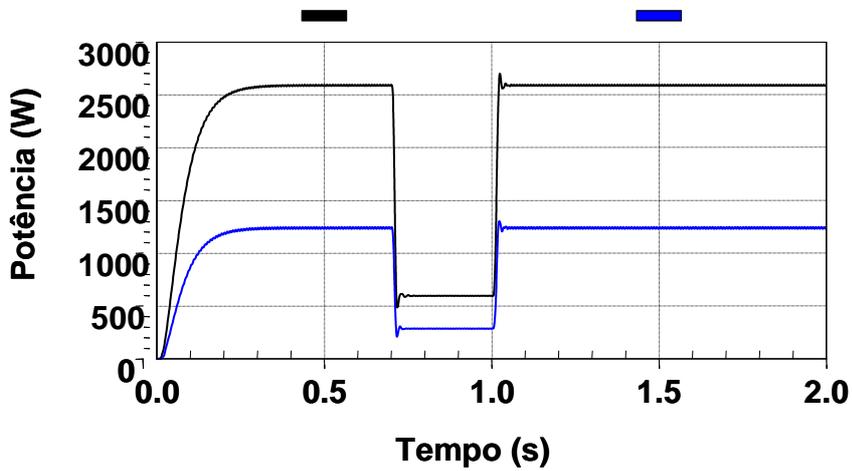


Figura 73: Potência ativa e reativa do consumidor para afundamento trifásico de 50% - 300 ms

5.3.4. Rejeição de carga (alimentadores SE03, SE05 e SE06)

A Figura 74 apresenta as tensões fase-neutro no consumidor industrial após a rejeição dos alimentadores 03, 05 e 06. Observa-se ligeira elevação no perfil de tensão após a rejeição de parte da carga da SE.

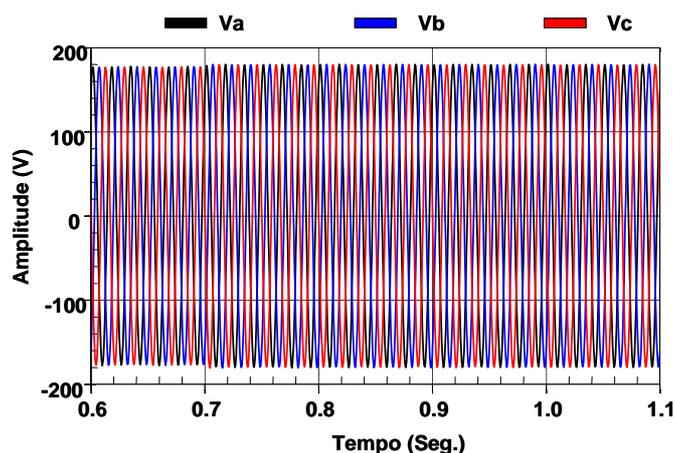


Figura 74: Tensões nas fases do consumidor do consumidor após rejeição de SE03, SE05 e SE06

A Figura 75 apresenta a corrente nas três fases do transformador 138/11,95 kV da SE, após a rejeição dos alimentadores 03, 05 e 06. Observa-se que o carregamento na transformação cai para menos da metade após o distúrbio, o que provoca alterações nas defasagens angulares da rede.

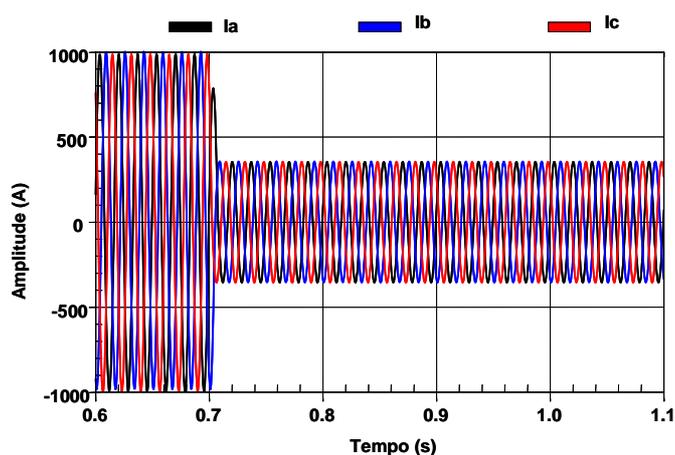


Figura 75: Correntes nas fases do TR1 da SE após rejeição de SE03, SE05 e SE06

A Figura 76 apresenta a corrente nas três fases do consumidor industrial após rejeição dos alimentadores 03, 05 e 06. Observa-se que as correntes obtidas nas simulações são coerentes com os resultados das medições de campo, tanto nas magnitudes quanto na composição harmônica (forma de onda). Ressalta-se que o distúrbio impõe variações angulares no sistema e que o modelo não incorre em erro em função da presença do PLL.

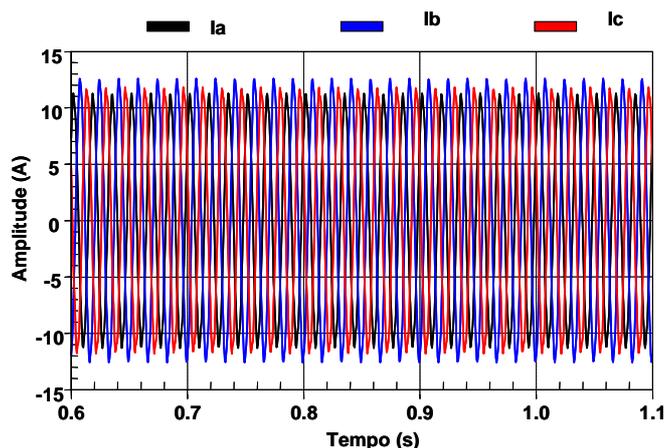


Figura 76: Correntes nas fases do consumidor em após rejeição de SE03, SE05 e SE06

A Figura 77 apresenta a potência ativa e reativa do consumidor. Observa-se ligeiro acréscimo da carga total após a rejeição, em função da elevação verificada no perfil de tensão. Observa-se ainda que as grandezas estabilizam-se, indicando que as defasagens angulares estão fixas pela ação do PLL.

Os resultados indicam que o modelo do consumidor, que utiliza o modelo digital de carga não-linear desenvolvido, apresenta resultados coerentes com as medições de campo, mesmo após a rejeição dos alimentadores 03, 05 e 06.

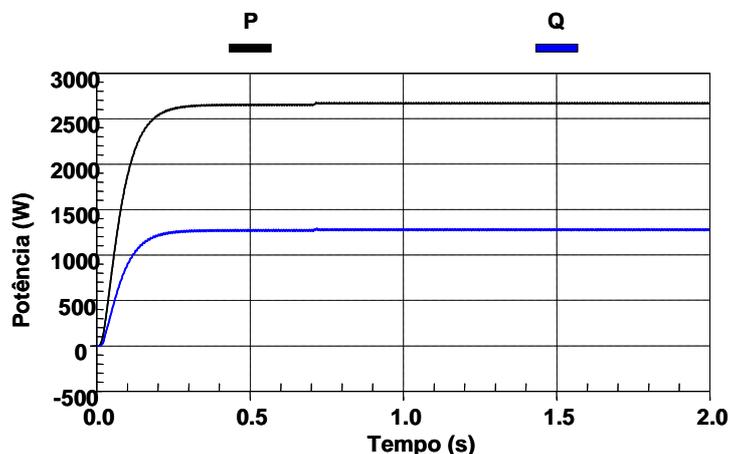


Figura 77: Potência ativa e reativa do consumidor após rejeição de SE03, SE05 e SE06

5.3.5. Variação de frequência

O objetivo deste tópico é mostrar o comportamento do modelo de carga frente às variações na frequência da rede. Uma rampa de frequência variando entre 57 e 60 Hz é aplicada na barra de 138 kV. Com o PLL, a frequência das correntes acompanhou a

freqüência da tensão conforme mostrado nas Figuras 54 e 55. A Figura 54 mostra o comportamento da tensão e corrente da fase A durante a variação da freqüência, enquanto que na Figura 55 observa-se a estabilização da mesma em 60 Hz.

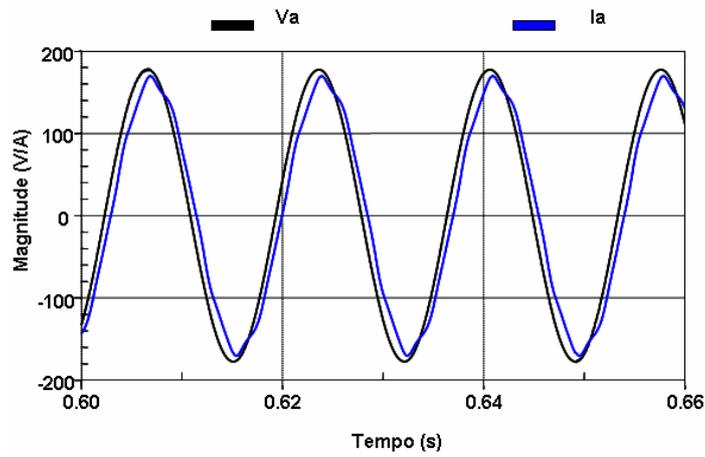


Figura 78: Tensão e corrente na fase A do consumidor durante a variação da freqüência

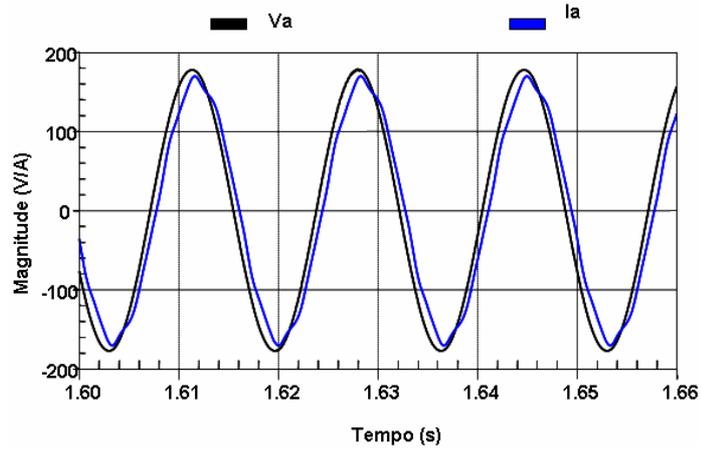


Figura 79: Tensão e corrente na fase A do consumidor após a estabilização da freqüência

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1. Conclusões

Neste trabalho, foi visto que a modelagem de cargas não-lineares através da reprodução fiel dos circuitos, embora dê resultados bastante precisos, leva a um aumento significativo da complexidade do modelo e das análises resultantes. Neste caso, há grande dificuldade na obtenção dos próprios circuitos, uma vez que não há interesse dos fabricantes na divulgação deste tipo de informação. Adicionalmente, esta estratégia não pode ser diretamente aplicada para a representação de cargas compostas, tais como escritórios comerciais, residências e pequenas indústrias.

A representação das cargas não-lineares por fontes de corrente harmônicas equivalentes mostra-se uma alternativa bastante interessante. Esta estratégia pode ser empregada quando se dispõe de informações precisas a respeito do conteúdo harmônico da corrente drenada por determinada carga (magnitude e fase dos harmônicos principais). A norma IEEE 519 recomenda a utilização desta metodologia, nos casos onde a distorção máxima de tensão na barra de interesse é igual ou inferior a 10%..

Todavia, a maior dificuldade da modelagem por fontes de corrente equivalentes é que os ângulos dos harmônicos gerados pela FFT devem estar referenciados à barra de carga, ponto onde se deseja conectar a carga não-linear na simulação. Nas simulações envolvendo sistemas de distribuição é comum a utilização de uma única fonte de tensão, representando uma determinada barra do sistema de transmissão. É precisamente em relação ao ângulo desta barra de referência que todos os demais ângulos são gerados, em função dos fluxos de carga nos diversos ramos. Neste caso, o modelo fica extremamente dependente das condições de carregamento, devendo as simulações ser precedidas por uma análise em regime permanente. As próprias variações transitórias de carregamento, que resultam das variações de tensão ou rejeição de carga, podem levar a distorções da carga não-linear original.

Para contornar o problema mencionado anteriormente, desenvolveu-se um modelo mais elaborado que procura determinar o ângulo da barra de carga em tempo de simulação. Desta forma, o modelo de carga fica imune às variações de carregamento nas simulações e pode ser conectado em qualquer barra sem maiores considerações.

O modelo de carga não-linear desenvolvido utiliza circuitos PLL para a determinação da referência de ângulo da barra de carga. Este tipo de circuito de sincronismo pode ser empregado em sistemas trifásicos ou monofásicos.

O exemplo de aplicação do modelo proposto apresentou a simulação de um controlador de luminosidade no PSCAD/EMTDC, fazendo uso do modelo de fontes de corrente harmônicas em conjunto com o circuito de sincronismo. Os resultados de simulação foram bastante precisos e servirão de base para o desenvolvimento do modelo completo de cargas não-lineares.

O modelo desenvolvido mostrou-se adequado para a representação da carga total de consumidores que apresentam correntes distorcidas. Em particular, a representação do consumidor industrial através do modelo desenvolvido mostrou-se bastante adequada.

O modelo desenvolvido mostrou-se imune a afundamentos de tensão na rede, motivados por curtos-circuitos em pontos remotos. Foram analisadas condições severas, com afundamentos monofásicos e trifásicos de 50% da tensão por até 300 ms. Mesmo nestas condições, nas quais ocorrem variações importantes nas defasagens angulares dos diversos pontos da rede elétrica, o modelo digital manteve integras suas referências em função do circuito PLL.

O modelo mostrou-se imune a rejeições de carga na rede CA. Foram analisadas condições severas, com rejeição simultânea de até três alimentadores. Mesmo nestas condições, nas quais ocorrem variações importantes nas defasagens angulares dos diversos pontos da rede elétrica, o modelo digital manteve integras suas referências em função do circuito PLL.

O modelo mostrou-se imune a variações de frequência na rede, motivadas por perda de carga ou geração. Foram analisadas condições severas, com a frequência atingindo o valor mínimo de 57 Hz. Mesmo nestas condições, o modelo manteve integras suas referências em função do circuito PLL.

O Modelo apresentado mostrou ser viável a análise de problemas reais da rede da concessionária utilizando o PSCAD/EMTDC, mesmo quando estão envolvidos consumidores especiais. O trabalho serve de base para avaliações futuras, tendo em vista a busca da concessionária pela manutenção dos padrões de qualidade do fornecimento de energia elétrica em sua rede.

A concepção inicial do modelo digital baseia-se na normal IEEE 519 (utilização de fontes de corrente) e neste caso as correntes harmônicas no modelo não variariam com a tensão da rede. Na prática, variações de tensão levam a variações de corrente na carga e esta correlação depende muito da composição da mesma. Cargas com predominância de motores tendem a aumentar a corrente quando ocorre

afundamento de tensão, de forma a manter a potência constante. Por outro lado, cargas típicas de aquecimento tendem a variar a corrente na mesma proporção da variação da tensão, o que indica que a impedância é constante.

6.2. Trabalhos Futuros

Como sugestão de trabalhos futuros, seria importante dotar o modelo desenvolvido de opções para a representação deste tipo de fenômeno, que se verifica entre a tensão e corrente na carga e que depende, sobretudo da composição da mesma. Estão em estudos algoritmos adaptativos capazes de detectar os coeficientes do modelo ZIP de forma dinâmica quando trata-se de uma carga composta. Representações de cargas capacitivas também estão sendo estudados.

Referências Bibliográficas

- [1] Philippe FERRACCI, “*La qualité de l’énergie électrique*”, Cahier Technique Schneider Electric n° 199, outubro de 2001.
- [2] James Will Gray and Frank J. Haydock, “*Industrial power quality considerations when installing adjustable speed drives systems*”, IEEE Trans. Industry Application, Vol. IA-32, no.3, pp. 646-654, May/June 1996.
- [3] Thomas H. Ortmeyer, Michael Grizer. “*Harmônic evaluation of inductor location in a variable speed drive* ”, IEEE International Conference on Harmonics in Power Systems, Atlanta, September 22 - 25, 1992.
- [4] Joachim Holtz, “*Pulsewidth modulation for electronic power conversion*”, Proceedings of the IEEE, Vol. 82, no. 8, pp. 1194-1214, August 1994.
- [5] R. Arseneau, M. Quелlette, “*The Effects of Supply Harmonics on The Performance of Compact Fluorescent LAMPS*”,. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, n° 2, Abril 1993.
- [6] Ângelo Stano Jr. , Délvio Franco Bernardes , José Carlos G. Rodrigues , José Manuel E. Vicente, “*O Impacto do Uso de Microcomputadores na Qualidade da Energia Elétrica*”, SBQEE 1997.
- [7] IEC Standard 1000-3-6, Part 3: “*Limit Section 6 Assessment of Emission Limits for Distorting Loads in MV and HV Power Systems- Basic EMC Publication*”, 1996
- [8] *IEEE Std 1159-1995: Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*”, 1995
- [9] *IEEE Std 1000-1992: IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment*”, 1992
- [10] *IEEE Recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems. IEEE Standard 519*, 1992.
- [11] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robins, “*Power Electronics Converters, Applications, and Design*”, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1995.
- [12] A. de Oliveira, J. C. de Oliveira, A. L. Vilaça, A. L. Ferreira Filho, “*Uma Contribuição para a quantificação e qualificação da distorção harmônica*”, IV Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência – COBEP’97, Belo Horizonte, Brasil, 1997.

- [13] Thierry GOURAUD, “*Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique*”, Thèse De Doctorat, Université De Nantes, Janvier 1997.
- [14] Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, “*Submódulo 2.2, Padrões de Desempenho da Rede Básica*”, Agosto de 2002.
- [15] Yen-Ju Wang, Robert M. O’Connell, and Gary Brownfield, “*Modeling and Prediction of Distribution, System Voltage Distortion Caused by Nonlinear Residential Loads*”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. XVI, no.4, pp.744-751, October 2001.
- [16] P. Kundur, “*Power System Stability and Control*”, McGraw-Hill, 1994
- [17] Lisa M. Anderson, Kenneth B. Bowes, “*The Effect of Power-Line Disturbances on Consumer Electronic Equipment*”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 5, nº2, Maio 1990.
- [18] H. L. Willis, “*Characteristics of Distribution Loads*”, Electrical Transmission and Distribution Reference Book, ABB Power T&D Company Inc., Fifth Edition, USA, 1997
- [19] Curso sobre Qualidade de Energia de Energia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil, 2000.
- [20] Jacques DELABALLE, “*La CEM la compatibilité électromagnétique*”, Cahier Technique Schneider Electric nº149 / p.3, dezembro 2001.
- [21] Roland CALVAS, “*Les perturbations électriques en BT*”, Cahier Technique Schneider Electric nº 141, Maio 2001.
- [22] PEE.6312.7 “*Desenvolvimento de Modelos Digitais para Estudo dos Impactos na Média e Baixa Tensão devido a Equipamentos Eletro-Eletrônicos e Cargas Não-Lineares – Banco de Dados sobre Qualidade e Projetos Pilotos – Consumidores Residenciais*”, COPPE/UFRJ Rio de Janeiro, Janeiro de 2005.
- [23] F. P. Ayello, J. M. Carvalho Filho, et al. “*Influência do sistema de Proteção na Qualidade da Energia*”, III Conladis”, Congresso Latino Americano de Distribuição de Energia Elétrica, USP - São Paulo, 1999.
- [24] L. Conrad, K. Little, C. Grigg, “*Predicting and Preventing Problems Associated with Remote Fault-Clearing Voltage Dips*”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.27, No.1 pp.167-172., Jan/Feb 1991.

- [25] T. H. Ortmeier, T. Hiyama, H. Salehfar, “*Power Quality Effects of Distribution System Faults*”, *Electrical Power & Energy Systems*, Vol.18, No.5, pp.323-329.1996.
- [26] R. S. Thallam, G. T. Heydt, “*Power Acceptability and Voltage Sag Indices in the Three Phase Sense*”, IEEE PES Summer Meeting, Seattle, USA, July 2000.
- [27] M. H. J. Bollen, E. Styvaktakis, “*Characterization of three-phase unbalanced dips (as easy as one-twothree?)*”, 9th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Orlando USA, Outubro 2000.
- [28] H. J. Bollen, “*Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*”, IEEE Press Series on Power Engineering.
- [29] Roland CALVAS, “*Les perturbations électriques en BT*”, Cahier Technique Schneider Electric n° 141, Maio 2001.
- [30] René Wierda, “*Flicker ou scintillement des sources lumineuses*”, Cahier Technique Merlin Gerin n° 176, Dezembro 1995.
- [31] Liang Jiao, Don Koval, Jonh Salmon, and Wilsun Xu, “*Modelling the Power Quality Characteristics of Computer Loads* “ IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Alberta, Canada, May 9-12, 1999.
- [32] IEEE Std C57.110-1986, “*IEEE Recommended practice for establishing transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents*”, 1986.
- [33] M. McEachern, W. M. Grady, W. A. Moncrief, G. T. Heydt, M. McGranaghan, “*Revenue and Harmonics: An Evaluation of Some Proposed Rate Structures*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 1 January 1995.
- [34] H.W. Dommel, “*Electromagnetic Transients Program Reference Manual, (EMTP Theory Book)*”, Bonneville Power Administrator, Portland, USA, August 1986.
- [35] PSCAD/EMTD User’s Guide, Manitoba HVDC Research Centre Inc., 2001.
- [36] Wilsun Xu, “*Comparison ant Comments on Harmonic Standards IEC 1000-3-6 and IEEE Std. 519, Harmonic Limits and Standars- an Integrated Perspective*”, 2000.
- [37] Burce Bivalet, Thomas H. Ortmeier, Michael Grizer, “*Harmonic Evaluation og Induction Location in a Variable Speed Drive*”, IEEE Trans. Industry Application

- [38] A. Capasso, W. Grattieri, R. Lamedica, A. Prudenzi, “*A Bottom-up Approach to Residential Load Modeling, IEEE Transaction on Power Systems*”, Vol. 9, nº7, Maio 1994
- [39] Jiming Lin, Jo’sé Marti, “*Implementation of the CDA Procedure in the EMTP, IEEE Transactions on Power Systems*”, Vol. 5, nº 2, Maio 1990.
- [40] Christophe SÉRAUDIE, “*Surtensions et Parafoudres en BT, -coordination de l’isolement en BT*”, Cahier Technique Merlin Gerin nº 179 / p.3, Stembro 1995
- [41] Aloísio De Oliveira, José Carlos De Oliveira, Anderson L. A. Vilaça,, Anésio De Leles Ferreira Filho, “*Uma Contribuição Para A Quantificação E Qualificação Da Distorção Harmônica*”, SBQE 1997
- [42] Ana Claudia D. Santos, Simário B. Santos José C. Oliveira, Walkyria A. Gonçalves, “*Desempenho de Fontes Lineares e Chaveados no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica*”, IV SBQEE, Porto Alegre/RS, Agosto 2001.
- [43] A. I. Maswood Shen Wei, “*Harmonic Propagation In High Power Converter Under Unbalanced And Distorted Input Voltages*”, IEEE Trans. Industry Application, 2003
- [44] A. F. C. Aquino, G. Santos Jr., U. Miranda, M. Aredes, A. C. M. Araújo, “*Synchronizing Circuits Applied to Non-Linear Loads Models*”, IEEE-PES Transmission & Distribution 2004 – Latin America, São Paulo-SP, Brazil, November 2004.
- [45] PEE.6312.9 “*Desenvolvimento de Modelos Digitais para Estudo dos Impactos na Média e Baixa Tensão devido a Equipamentos Eletro-Eletrônicos e Cargas Não-Lineares – Banco de Dados sobre Qualidade e Projetos Pilotos – Consumidores Industriais*”, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Junho de 2005.

Apêndice A

Modelo Desenvolvido no PSCAD/EMTDC

Nas próximas Figuras, mostramos os recursos disponíveis no modelo desenvolvido a partir do PSCAD/EMTDC e do Fortran. A estrutura global do modelo está mostrada na Figura. O valor da tensão nominal medido deve ser fornecido em kV, os valores das correntes harmônicas são informados em ampères e as fases em graus. A soma dos coeficientes C_z , C_i e Z_p tem que ser unitário (Figura A.1). O modelo permite escolher se a carga é trifásica ou monofásica (Figura A.2). Ele prevê o cálculo das correntes harmônicas ímpares até de ordem 25 e das correntes pares até de ordem 8 (Figura A.3). Quando a carga é trifásica e equilibrada, os valores das correntes harmônicas da fase A são fornecidos e as correntes das fases B e C são automaticamente calculadas (Figura A.4, Figura A.5 e Figura A.6). Para o caso desequilibrado, as correntes da fase B e C devem ser informadas (Figura A.7 e Figura A.8).

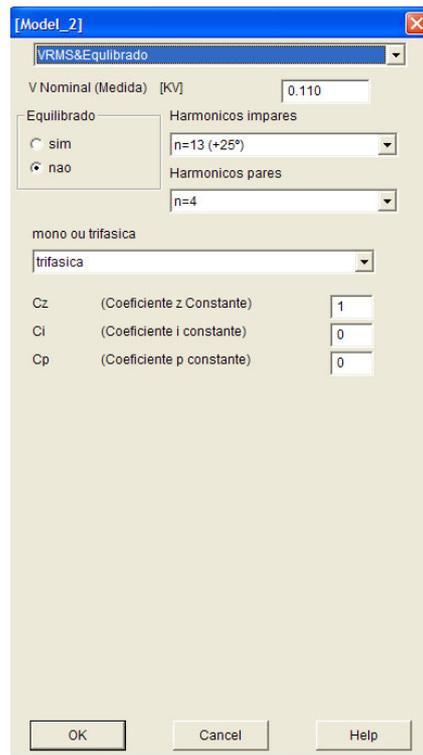


Figura A.1: Estrutura do modelo



Figura A.2: Escolha do tipo de carga (mono ou trifásica)

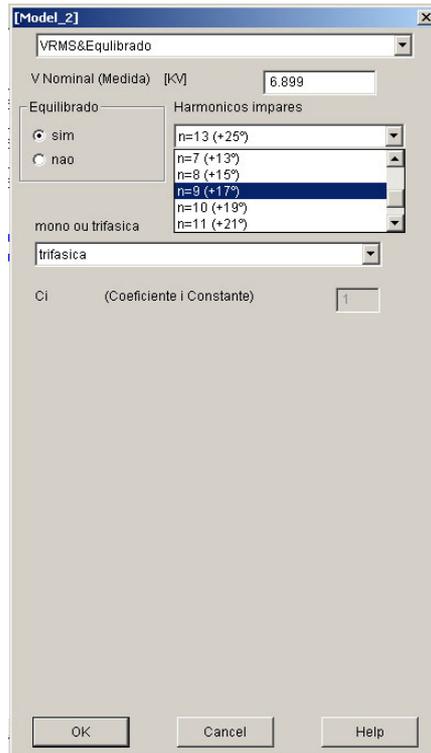


Figura A.3: Escolha das ordens dos Harmônicos

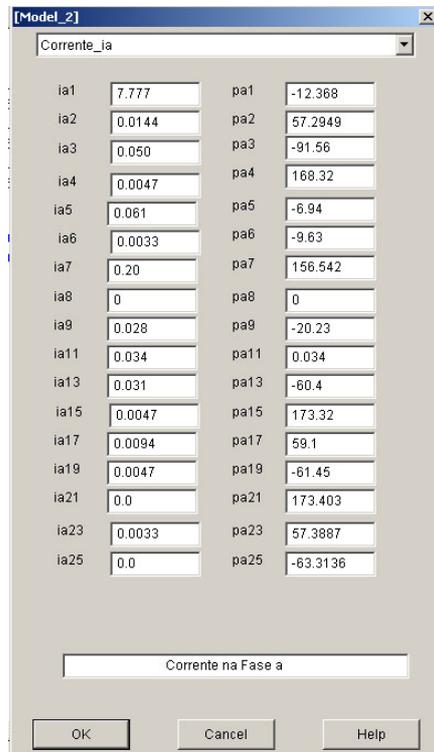


Figura A.4: Harmônicos de corrente da fase A

Variable	Value	Variable	Value
ib1	.100	pb1	150
ib2	0	pb2	0
ib3	0	pb3	0
ib4	0	pb4	0
ib5	0	pb5	0
ib6	0	pb6	0
ib7	0	pb7	0
ib8	0	pb8	0
ib9	0	pb9	0
ib11	0	pb11	0
ib13	0	pb13	0
ib15	0	pb15	0
ib17	0	pb17	0
ib19	0	pb19	0
ib21	0	pb21	0
ib23	0	pb23	0
ib25	0	pb25	0

Figura A.5: Fase B desabilitada para carga equilibrada ou monofásica

Variable	Value	Variable	Value
ic1	.100	pc1	90
ic2	0	pc2	0
ic3	0	pc3	0
ic4	0	pc4	0
ic5	0	pc5	0
ic6	0	pc6	0
ic7	0	pc7	0
ic8	0	pc8	0
ic9	0	pc9	0
ic11	0	pc11	0
ic13	0	pc13	0
ic15	0	pc15	0
ic17	0	pc17	0
ic19	0	pc19	0
ic21	0	pc21	0
ic23	0	pc23	0
ic25	0	pc25	0

Figura A.6: Fase C desabilitada para carga equilibrada ou monofásica

[Model_2] x

Corrente_ib

ib1	8.740	pb1	-134.53
ib2	0.012	pb2	-166.84
ib3	0.029	pb3	-157.17
ib4	0.0033	pb4	-46.42
ib5	0.071	pb5	95.637
ib6	0.0033	pb6	74.11
ib7	0.1944	pb7	56.51
ib8	0.0	pb8	0.0
ib9	0.0129	pb9	139.59
ib11	0.032	pb11	112.43
ib13	0.025	pb13	164.35
ib15	.0033	pb15	109.24
ib17	0.0105	pb17	-68.75
ib19	0.0033	pb19	-111.92
ib21	0	pb21	0
ib23	0	pb23	0
ib25	0	pb25	0

OK Cancel Help

Figura A.7 : Fase B habilitada para carga trifásica

[Model_2] x

Corrente_ic

ic1	8.14	pc1	100.57
ic2	0.011	pc2	-74.25
ic3	0.070	pc3	65.43
ic4	0.0	pc4	0.0
ic5	0.085	pc5	-129.28
ic6	0.0047	pc6	-164.94
ic7	0.26	pc7	-72.57
ic8	0.0	pc8	.0
ic9	0.017	pc9	175.39
ic11	0.034	pc11	-96.54
ic13	0.0312	pc13	24.74
ic15	0.047	pc15	-11.30
ic17	.0094	pc17	57.97
ic19	.0047	pc19	120.76
ic21	0	pc21	173.25
ic23	0.0033	pc23	-78.96
ic25	0	pc25	0

OK Cancel Help

Figura A.8: Fase C habilitada para carga trifásica

Apêndice B

Degradação da Qualidade de Energia Elétrica

A problemática da qualidade de energia elétrica é um assunto de interesse de todos os setores (geradoras, transmissoras, distribuidoras, consumidores). Entre eles, a empresa distribuidora ocupa uma posição central. A sua responsabilidade é garantir os meios que permitam o controle da qualidade das interfaces entre a sua rede de energia e o mundo externo (usuários, redes vizinhas, etc.) de modo a respeitar o regulamento técnico, a estrutura tarifária, os contratos, entre outros.

A necessidade de se garantir a qualidade de energia elétrica tornou-se bastante intensa com a partir de caracterização da energia elétrica como um “produto”, sendo mais um item a ser considerado em uma concorrência. Enquanto o serviço é garantido por empresas distribuidoras operando em um determinado território, as companhias transmissoras são responsáveis pela garantia por qualquer produtor acessar a rede básica

e vender seu produto para qualquer consumidor. Frente a essa situação, a qualidade do produto deve ser submetida a uma verificação quantificável e mais rigorosa do que as regras que já existiam [11].

B.1. Qualidade de Energia Elétrica e Compatibilidade

B.1.1. Qualidade de Energia Elétrica

Para o IEEE, um problema de qualidade de energia elétrica é qualquer variação na alimentação da potência elétrica, tendo por conseqüência o mau ou o não funcionamento dos aparelhos dos consumidores, tais como afundamentos/elevações de tensão, transitórios, distorções harmônicas, etc. Porém, todos estes fenômenos afetam essencialmente a tensão fornecida ao consumidor. Se o consumidor não usa cargas perturbadoras, a corrente pode estar deformada, mas unicamente de uma maneira que sintetiza a tensão fornecida. Por este motivo, na literatura, alguns consideram que a qualidade da energia elétrica se resume à qualidade da tensão (“power quality”= “voltage quality”) [28].

Porém, a expressão “quality of power” estende-se geralmente a uma aceitação mais ampla. Ela inclui também o conceito da “continuidade da tensão” (ou “confiabilidade na alimentação”). No caso de interrupção da tensão, (momentânea ou longa dependendo se a duração seja menor ou maior do que três minutos), trata-se de problema de continuidade da tensão (confiabilidade na alimentação). Quanto menor o número de interrupções e suas durações, mais confiável é a alimentação. A forma mais adequada para descrever esta situação é considerar a qualidade de energia como sendo a continuidade de fornecimento somada à qualidade da tensão.

B.1.2. Compatibilidade Eletromagnética

A norma do IEC define a Compatibilidade Eletromagnética (CEM) como sendo a aptidão de um dispositivo, aparelho, ou de um sistema a funcionar adequadamente dentro de um ambiente eletromagnético e sem ele produzir perturbações

intoleráveis capazes de afetar os outros elementos do mesmo ambiente. Percebe-se que este é um conceito mais amplo, cobrindo as perturbações entrando pelas Entradas/Saídas de um aparelho além da sua alimentação elétrica, as perturbações induzidas além das perturbações conduzidas, os fenômenos de altas frequências ($>9\text{kHz}$), além dos fenômenos de baixas frequências ($<9\text{kHz}$). Uma certa ambigüidade resulta pelo fato de utilizar-se a CEM em duas aceitações distintas [20].

-No caso da Norma, utiliza-se a CEM no sentido mais amplo. Trata-se de assegurar a compatibilidade por uma boa coordenação dos níveis de imunidade dos aparelhos sensíveis e dos níveis de emissão dos aparelhos perturbadores.

- Na linguagem comum, considera-se que a CEM e a qualidade de energia cobrem dois ramos distintos, resultando assim técnicas de análise e de interpretações diferentes (a CEM preocupa-se com perturbações de alta frequência, penetrando pelas tomadas de terra, entradas e saídas de sinais induzidos, enquanto a qualidade de energia elétrica trata das perturbações de baixa frequência, penetrando pela alimentação elétrica).

Este trabalho limita-se à qualidade da energia elétrica. Todavia, vale ressaltar que a responsabilidade da distribuidora não se limita somente a garantir a qualidade de energia elétrica nos pontos de entrega dos seus consumidores e dos sistemas vizinhos. Ela deve preocupar-se igualmente com os sistemas terceiros (redes de Telecomunicações, tração elétrica, dutos enterrados, e meio ambiente).

B.2. Os Fenômenos perturbadores

B.2.1. Afundamento de tensão

a. Conceitos, Definições e Características

A amplitude da tensão é um fator crucial para a qualidade de energia elétrica. Ela constitui geralmente o primeiro requisito contratual do distribuidor de energia elétrica. Junto às problemáticas de controle e de gestão das redes de transporte e distribuição (manutenção e controle das centrais, sistemas de proteção automáticas,

etc.), a amplitude da tensão pode sofrer variações anormais e pode até afundar a níveis próximos de zero. Existem vários tipos de fenômenos que causam essas variações de tensão. Quando estes fenômenos aparecem na transmissão, são classificados como aleatórios e são devidos às descargas atmosféricas, curto-circuitos acidentais (isolamento mau feito, perda de linha). Quando os problemas aparecem no consumidor, na maioria das vezes são causadas pela má instalação da planta do cliente [21].

As conexões de alta demanda de energia podem acarretar variações de tensão se a potência de curto circuito é subdimensionada. Motores de alta potência e transformadores são tipos de cargas que podem introduzir variações de tensão.

Os principais parâmetros que caracterizam um afundamento de tensão monofásico são a amplitude e a duração, os quais, somados à frequência de ocorrência, fornecem informações satisfatórias sobre o fenômeno [17].

No entanto, quando se trata de afundamentos de tensão trifásicos, outros parâmetros tais como o desequilíbrio também podem ser incorporados. Adicionalmente, o comportamento dinâmico associado à evolução da forma de onda, também pode ser empregado para caracterizar tanto os afundamentos de tensão monofásicos como os trifásicos.

b. Normas

A Norma IEEE 1159 (1995) [8] que trata da monitoração dos fenômenos de qualidade de energia elétrica, define o afundamento de tensão como sendo a redução do valor eficaz da tensão para um valor entre 0,90 e 0,1 pu, durante um período de tempo compreendido entre 1/2 ciclo e 60 segundos. Adicionalmente, o IEEE classifica os afundamentos de tensão, segundo a sua duração, em três categorias:

Instantâneos: entre 0,5 ciclos e 30 ciclos;

Momentâneos: entre 30 ciclos e 3 segundos;

Temporários: entre 3 segundos e 1 minuto.

Por esta norma do IEEE, a intensidade de um afundamento de tensão é definida pela menor tensão remanescente durante a ocorrência do distúrbio, ou seja, a

ocorrência de um afundamento de tensão de 0,80 pu significa que a tensão foi reduzida para o patamar de 0,80 pu. Um evento cuja tensão é inferior a 0,10 pu é considerado pela IEEE como sendo uma interrupção.

A norma do IEC, por outro lado, define a intensidade do afundamento de tensão como sendo a queda do valor eficaz da tensão. A IEC considera afundamento de tensão um evento onde ocorre uma queda do valor eficaz da tensão entre 0,10 e 0,90 pu, durante um período de tempo compreendido entre 1/2 ciclo e alguns segundos. Distúrbios com queda de tensão acima de 0,90 pu, o que equivale a tensões remanescentes abaixo de 0,1 pu, são considerados pela IEC como interrupções [7].

No Brasil, os indicadores utilizados para avaliar o desempenho de uma rede são documentados pelo Operador Nacional do sistema Elétrico (ONS) e regulamentado pelo ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Todos os procedimentos referentes à qualidade de energia elétrica estão definidos nos Padrões de desempenho da rede básica. [13] Thierry GOURAUD, “*Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique*”, Thèse De Doctorat, Université De Nantes, Janvier 1997.

].

A título de ilustração, a Figura B.1 mostra um exemplo de afundamento trifásico de 50% no secundário de um transformador de 11,95 kV/220.

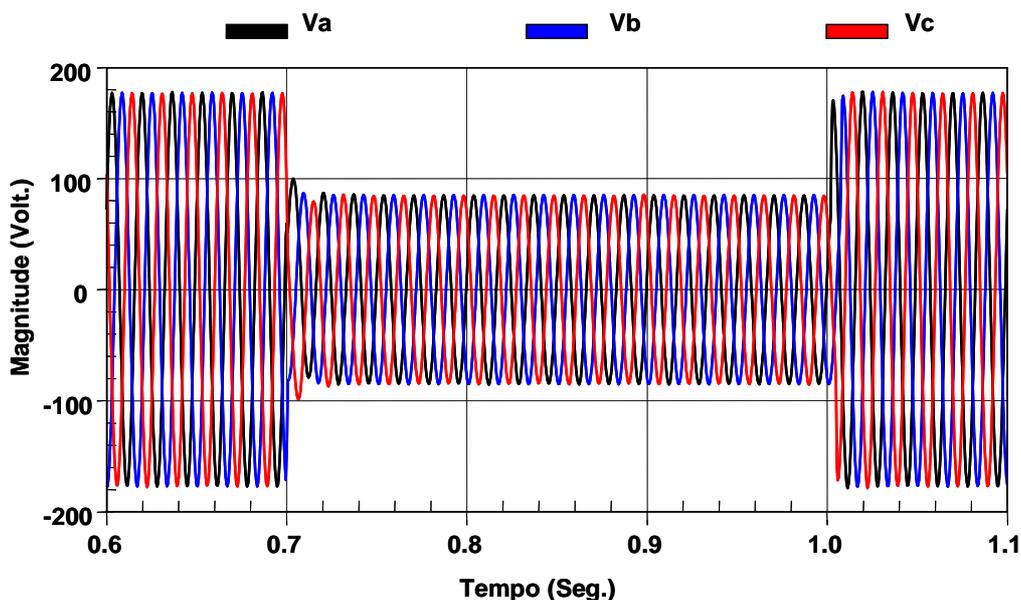


Figura B.1: Tensões nas fases a, b e c de um consumidor para afundamento trifásico de 50% - 300 ms

c. Componentes lentos das variações de tensão

O valor eficaz da tensão varia continuamente em função das modificações das cargas alimentadas. As distribuidoras de energia elétrica concebem e exploram o sistema de tal maneira a confinar as variações dentro dos limites contratuais preestabelecidos. Os aparelhos usuais podem suportar variações de tensão de $\pm 10\%$ da tensão nominal. A Figura B.2 [22] mostra a tensão fase-neutro (em pu) de um consumidor residencial caracterizando estas variações.

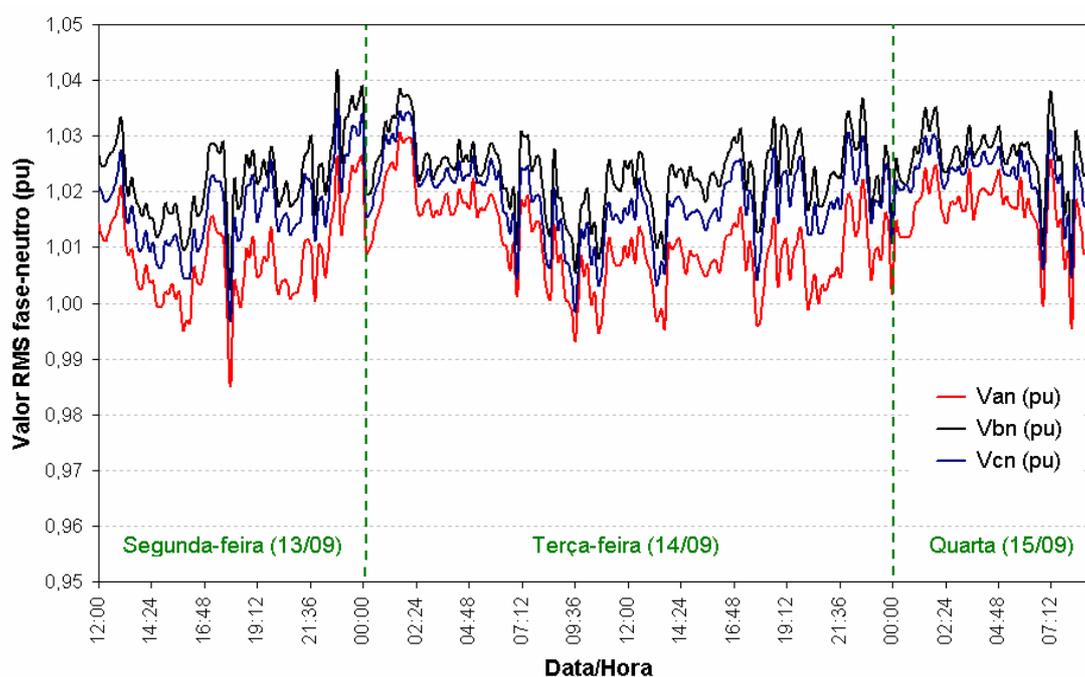


Figura B.2: Tensões fase-neutro (pu) de um consumidor residencial

d. Origem dos afundamentos

Geralmente, os afundamentos de tensão são devidos aos curtos-circuitos que ocorrem na rede principal ou nas instalações dos consumidores. A duração varia entre $\frac{1}{2}$ ciclo e alguns segundos em função da localização do curto-circuito e do funcionamento dos circuitos de proteção.

Os afundamentos de tensão no sistema elétrico são geralmente gerados por: partida de motores de grande porte, energização de transformadores e ocorrência de curtos-circuitos na rede [23], [24], [25]. As faltas no sistema elétrico, sem sombra de

dúvida, são a principal causa do afundamento de tensão, sobretudo no sistema da concessionária, devido à existência de milhares de quilômetros de linhas aéreas de transmissão e de distribuição, sujeitas a toda a sorte de fenômenos naturais.

Curtos-circuitos também ocorrem em subestações terminais de linhas e em sistemas industriais, porém, com menor frequência de ocorrência. Em sistemas industriais, por exemplo, a distribuição primária e secundária é tipicamente realizada através de cabos isolados, que possuem reduzida taxa de falha se comparados às linhas aéreas. As faltas em linhas aéreas ocorrem principalmente devido à incidência de descargas atmosféricas. Nos sistemas de distribuição o problema é mais crítico porque são geralmente desprovidos de cabos guarda. Portanto, pode-se concluir que a ocorrência de afundamentos de tensão está fortemente correlacionada com o nível cerâmico da região onde as linhas aéreas se encontram instaladas. Outras causas de ocorrência de curtos-circuitos são as queimadas em plantações, vendavais, contatos por animais e aves, contaminação de isoladores, falhas humanas, etc. Quando da ocorrência do curto-circuito, o afundamento de tensão transcorre durante o tempo de permanência da falta, ou seja, desde o instante inicial do defeito até à atuação do sistema de proteção ou à completa eliminação do defeito.

e. Frequência de ocorrência

O número de ocorrência de afundamentos de tensão está intimamente relacionado com a existência de sistema de religamento no sistema de proteção e com a origem dos curtos circuitos no sistema elétrico.

Do ponto de vista de quantificação existem duas metodologias para contabilizar os afundamentos de tensão quando ocorrem religamentos. A primeira metodologia considera todos os afundamentos registrados, resultando em um número sobreestimado de eventos. A segunda metodologia consiste em associar os registros de afundamentos à falta que os originou. Desta maneira para cada falta na rede será contabilizado um único distúrbio. Uma das formas de agrupar a seqüência de afundamentos é a agregação temporal dos distúrbios.

Assim, é definida uma janela de tempo para agregar todos os eventos que aconteçam dentro daquele intervalo. Normalmente, tem sido utilizado intervalo de agregação de um minuto, de modo a acomodar à operação típica dos religadores automáticos.

f. Agregação Temporal

O objetivo da agregação temporal é agrupar todos os eventos devidos a uma única falta no sistema de potência e assim identificá-los como um único evento. Procura-se obter uma relação única entre as faltas que realmente acontecem na rede e a série de eventos registrados pelos medidores de qualidade [26].

Muitos equipamentos e processos industriais desligam durante a ocorrência do primeiro evento registrado. Uma vez que o processo parou, os eventos seguintes não causam nenhum efeito sobre a carga. Conseqüentemente, a contabilização de todos os eventos levaria a um erro estatístico na avaliação do desempenho do suprimento da concessionária, sobreestimando o número de ocorrências de afundamentos de tensão.

Uma das maneiras de sanar este problema é a utilização da agregação temporal com uma janela de tempo pré-definida, ou seja, a partir da ocorrência do primeiro evento todos os que sucederem dentro do intervalo de tempo estabelecido da janela serão considerados como um mesmo evento. Embora o intervalo de tempo possa ser escolhido arbitrariamente, a norma IEEE 1159-1995 [8] recomenda o intervalo de um minuto. Algumas concessionárias, contudo, tem adotado janelas entre 15 e 30 minutos para considerar o impacto de afundamentos de tensão em processos industriais.

Um evento agregado representa o conjunto de todos os registros associados à ocorrência de uma falta na rede. O evento agregado associado à falta deve sintetizar as informações da série de registros em um único conjunto de características, tais como; intensidade, duração, tipo de afundamento, etc. Normalmente, os parâmetros associados ao evento agregado são definidos pelas características do evento mais severo, ou seja, aquele que apresenta a maior intensidade.

g. Método de caracterização

Uma ocorrência no sistema de potência pode afetar uma, duas ou as três fases. A magnitude e a duração do afundamento de tensão resultante em cada fase podem diferenciar-se substancialmente. Para fins de cálculo de indicadores e avaliação do impacto dos fenômenos sobre equipamentos utiliza-se o procedimento chamado de agregação de fases, que consiste em atribuir um único conjunto de parâmetros (amplitude, duração, etc.) a uma ocorrência que provoque registro em mais de uma fase.

Ao contrário de outros métodos, que caracterizam o afundamento de tensão somente através da intensidade e duração, o método proposto por Bollen [27] considera a assimetria e desequilíbrio dos fasores de tensão durante a ocorrência do distúrbio. Com isto, evita-se desprezar efeitos importantes, permitindo que o comportamento dos equipamentos sensíveis, principalmente os trifásicos, possa ser avaliado perante estas outras características dos afundamentos de tensão.

O método considera os diversos tipos de falta: trifásicas, bifásicas e monofásicas; as conexões estrela e delta, utilizadas nos equipamentos elétricos; e todos os tipos de conexões dos transformadores [28].

B.2.2. Elevação de tensão

Sobretensão pode ser definida como uma tensão variável com o tempo, cujo valor máximo é superior ao valor da tensão nominal de operação do sistema. De uma forma geral, existem dois tipos de sobretensões, de origem interna e externa ao sistema. A diferença entre ambas depende somente da localização dos eventos que as causam [15]

[15] Yen-Ju Wang, Robert M. O'Connell, and Gary Brownfield, "*Modeling and Prediction of Distribution, System Voltage Distortion Caused by Nonlinear Residential Loads* ", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. XVI, no.4, pp.744-751, October 2001.

[16] P. Kundur, "*Power System Stability and Control*", McGraw-Hill, 1994

[17] Lisa M. Anderson, Kenneth B. Bowes, "*The Effect of Power-Line Disturbances on Consumer Electronic Equipment*", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 5, nº2, Maio 1990.

[18] H. L. Willis, “*Characteristics of Distribution Loads*”, Electrical Transmission and Distribution Reference Book, ABB Power T&D Company Inc., Fifth Edition, USA, 1997

[19].

As sobretensões externas são originadas fora do sistema considerado, sendo sua principal fonte as descargas atmosféricas, enquanto as internas são causadas por eventos dentro do sistema em si, como por exemplo manobras de disjuntores ou curto-circuitos.

Baseada no grau de amortecimento e no tempo de duração, pode ser feita uma distinção entre duas categorias gerais: sobretensões impulsivas e oscilatórias ou em três categorias específicas (sobretensões temporárias, de manobra e atmosféricas).

Não podem ser estabelecidos limites definidos de transição entres estes grupos, uma vez que certos fenômenos podem causar sobretensões que se enquadram em uma ou outra classe. Como por exemplo, a energização de uma linha terminada em transformador dá origem a uma sobretensão que pode ser considerada como de manobra ou temporária, dependendo do grau de amortecimento das cristas sucessivas, sendo melhor classificada como sobretensão oscilatória [15] Yen-Ju Wang, Robert M. O’Connell, and Gary Brownfield, “*Modeling and Prediction of Distribution, System Voltage Distortion Caused by Nonlinear Residential Loads*”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. XVI, no.4, pp.744-751, October 2001.

[16] P. Kundur, “*Power System Stability and Control*”, McGraw-Hill, 1994

[17] Lisa M. Anderson, Kenneth B. Bowes, “*The Effect of Power-Line Disturbances on Consumer Electronic Equipment*”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 5, n°2, Maio 1990.

[18] H. L. Willis, “*Characteristics of Distribution Loads*”, Electrical Transmission and Distribution Reference Book, ABB Power T&D Company Inc., Fifth Edition, USA, 1997

[19].

A determinação das sobretensões que podem ocorrer em um sistema elétrico é de fundamental importância uma vez que fornece subsídios para a coordenação de

isolamento de linhas e subestações assim como a especificação dos equipamentos atuando diretamente na qualidade de energia do sistema.

Desta forma, o conhecimento das características das diferentes categorias das sobretensões classificadas anteriormente, deve ser a base para a elaboração de um projeto de um sistema econômico que opere de maneira confiável, garantindo a qualidade no fornecimento e no uso da energia.

a. Sobretensão Temporária

Sobretensão temporária é uma sobretensão fase-terra ou entre fases, em um dado ponto do sistema, oscilatória de duração relativamente longa e fracamente amortecida ou não amortecida [29].

Desta forma, mesmo que as amplitudes destas sobretensões sejam inferiores às de outros tipos de sobretensões, elas podem ser determinantes no projeto tanto de isolamento interno como também de isolamento externa dos equipamentos.

As sobretensões temporárias são geralmente causadas por:

- Manobras; como por exemplo, rejeição de carga;
 - Falhas, como por exemplo, curto-circuito monofásico;
 - Fenômenos não-lineares como por exemplo ferro-ressonância;
 - Efeito Ferranti.
-
- **Faltas para terra:** o tipo de falta mais comum que aparece em um sistema é o curto-circuito monofásico, sendo o bifásico e o trifásico envolvendo ou não a presença da terra, muito menos freqüente.

A ocorrência da falta fase-terra em um determinado ponto acarreta uma elevação de tensão nas fases sãs, cujo valor depende principalmente do grau de aterramento do sistema no ponto em questão. A Figura B.3 mostra um exemplo de falta da fase em $t=300$ ms, o que acarreta uma sobretensão nas fases b e c.

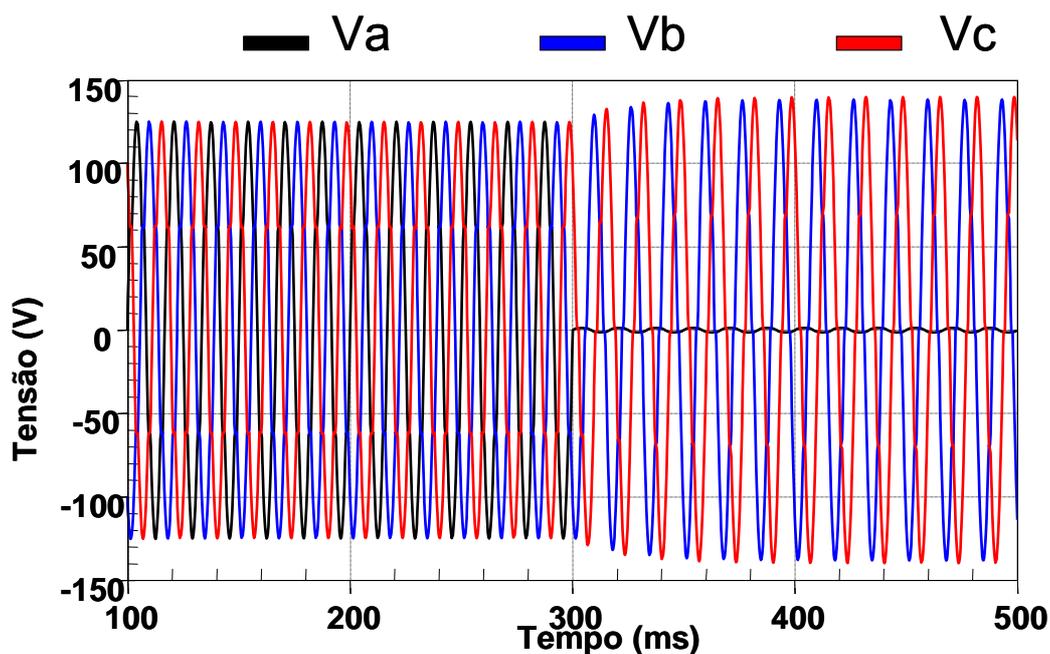


Figura B.3: Sobretensão devida à falta de uma fase

Para sistemas com neutro isolado, como por exemplo uma carga não aterrada suprida pelo delta de um transformador, as sobretensões nas fases sãs podem exceder a tensão fase-fase, ou seja alcançar valores superiores a 1,73 pu. Isto se deve ao fato que na realidade este tipo de sistema é acoplado à terra através de suas capacitâncias distribuídas.

No caso de um sistema eficazmente aterrado, onde a relação de reatância de seqüência zero e a reatância de seqüência positiva é inferior a 3 e a relação entre a resistência de seqüência zero e a reatância de seqüência zero é inferior a 1, as sobretensões nas fases sãs não alcançam 1,4 pu, o que significa atingir no máximo 80% da tensão fase-fase.

- **Rejeição de Carga:** A perda súbita de uma carga causada por exemplo por uma operação indevida de um disjuntor, irá produzir uma elevação de tensão ao longo de todo o sistema, pois, com a conseqüente redução do fluxo de corrente, o efeito capacitivo das linhas se acentuará e a queda de tensão através das impedâncias longitudinais se reduzirá. Além disto, há o fato dos geradores que alimentam cargas indutivas em geral, estarem operando sobre-excitadas, o que faz com que sua tensão seja superior à das cargas.

Em regra geral, as sobretensões decorrentes do fenômeno de rejeição têm uma forma senoidal à frequência industrial sendo grandemente influenciadas pelo comprimento das linhas, pela potência de curto-circuito do sistema e pela geração de reativos das linhas que é determinada pelo grau de compensação série e em derivação (shunt).

- **Efeito Ferranti:** O fenômeno conhecido como efeito Ferranti é o que leva à tensão sustentada na extremidade aberta de uma linha de transmissão ser superior à tensão no lado da geração. Isso ocorre devido ao fluxo de corrente capacitiva através da indutância série da linha.

Considerando a linha de transmissão como sendo um circuito de dois terminais, a equação geral desta linha é então dada por: [29]

$$V_1 = V_2 \cosh(\gamma\ell) + Z_c I_2 \sinh(\gamma\ell) \quad (\text{B.1})$$

Onde V_1 é a tensão no lado da geração, V_2 a tensão no lado da carga, ℓ o comprimento da linha, Z_c a impedância característica da linha e γ a constante de propagação. Admitindo-se a linha aberta na extremidade receptora, como no caso de energizações ou rejeições de carga, tem-se $I_2 = 0$ assim,

$$V_1 = V_2 \cosh(\gamma\ell). \quad (\text{B.2})$$

Desta forma, para uma linha não compensada na condição de se desprezarem as perdas, o efeito Ferranti é calculado aproximadamente pela fórmula:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{\cos(\beta\ell)}, \quad (\text{B.3})$$

onde $\beta = \omega\sqrt{LC}$, a constante de fase tipicamente igual a 7,2 °/100 km em 60Hz para linhas áreas de transmissão. A forma de onda da sobretensão resultante deste fenômeno é, em geral, senoidal à frequência industrial, chegando a 1,3 pu de sobretensão no final de uma linha de 600 km de comprimento sem compensação.

- **Ressonância e Ferro-ressonância:** Condições de ressonância são estabelecidas quando um circuito contendo capacitâncias e indutâncias lineares é excitado por uma

tensão à frequência próxima ou igual a frequência natural, enquanto que podem ser caracterizados por ferro-ressonância os efeitos peculiares introduzidos pela presença de saturação no circuito magnético de indutâncias.

Como exemplo destas situações pode-se citar: ressonância que ocorre entre cabos de elevada capacitância e reatores limitadores de corrente, Ressonância que ocorre entre a indutância linear e capacitância de um sistema constituído por uma linha levemente carregada, ferro-ressonância entre a reatância de transformadores de potencial e a capacitância entre enrolamentos de um transformador de distribuição e ferro- ressonância em sistemas que contêm elementos saturáveis e filtros harmônicos.

Observa-se que a ressonância ocorre somente em situações particulares de um sistema com respeito à sua configuração, como por exemplo o circuito ressonante formado pela indutância de dispersão de um transformador isolado em série com a capacitância de um cabo onde somente estão energizadas.

O aparecimento ou não da ferro-ressonância depende do valor da sobretensão (causada por algum distúrbio no sistema) e do valor do fluxo no instante de defeito, não ocorrendo necessariamente em todos os casos. Este fenômeno é típico de sistemas isolados que tenham a possibilidade de operar de forma desbalanceada, como é o caso de serviços auxiliares de subestações.

Neste tipo de instalação, onde se têm transformadores alimentados por cabos subterrâneos e protegidos por chaves fusíveis, o cabo, representado basicamente por sua capacitância para terra, está em série com a reatância de magnetização do transformador onde somente uma ou duas fases estão energizadas devido à abertura de uma ou duas chaves fusíveis. Sob determinadas condições, este circuito L-C pode tornar-se ressonante produzindo altas tensões nos enrolamentos do transformador e nas fases abertas.

- **Sobretensão de Manobra:** Sobretensão de manobra é uma sobretensão fase-terra ou entre fases, em um dado ponto do sistema, devido à operação de um equipamento de manobra, falta ou outra causa, cuja forma de onda é similar à onda de impulso de

manobra utilizada para ensaio. Tal sobretensão é em geral fortemente amortecida e de curta duração.

Assim, sobretensões, com duração entre 100 e 500 microsegundos (que correspondem às frequências entre 10 kHz e 2 kHz) e com o tempo até o meio valor da ordem de 2500 microsegundos, são geralmente consideradas como sobretensões de manobra.

A distribuição destas sobretensões ao longo da isolação é aproximadamente igual àquela devida às sobretensões temporárias, porém não são repetitivas e somente uma crista, de qualquer polaridade, é normalmente significativa.

A amplitude e duração das sobretensões de manobra dependem dos parâmetros do sistema, da sua configuração, e das condições em que ele se encontra no momento da manobra. Desta forma, para um mesmo sistema, a mesma operação pode resultar em valores diferentes de sobretensão. Como exemplo de sobretensões de manobra mais comuns, temos energização e religamento de linhas e aplicação e abertura de faltas.

Os efeitos das sobretensões de manobra no isolamento são substancialmente diferentes daqueles impostos pelas sobretensões temporárias, uma vez que atingem valores bem mais elevados e por esta razão são um fator determinante no projeto econômico dos sistemas, tanto dos equipamentos como de linhas de transmissão.

- **Energização e Religamento de linhas:** Energização e religamento de linhas de transmissão são manobras que ocorrem tipicamente em um sistema e cuja análise pode ser feita considerando-se três períodos distintos: transitórios, dinâmico e regime permanente.

Uma linha de transmissão aberta em uma das suas extremidades age como uma capacitância à frequência fundamental causando elevação da tensão ao longo do sistema. Esta capacitância pode ser compensada por meio de reatores em derivação, porém esta compensação geralmente não é total, o que faz com que uma linha, mesmo compensada, atue como um capacitor. Se o lado emissor estiver eletricamente próximo a geradores, o efeito dos reguladores das máquinas nas tensões durante o regime

permanente deve ser levado em consideração. Os períodos transitórios e dinâmico não são afetados pela atuação dos reguladores, uma vez que sua operação é lenta.

Chaveamento de capacitores e reatores: tensões elevadas podem se desenvolver durante manobras em circuito que contêm reatores ou capacitores, particularmente se ocorre o fenômeno da reignição entre os contatos do disjuntor. Geralmente, neste tipo de chaveamento, o fenômeno envolve o armazenamento de energia nas indutâncias e capacitâncias, com uma troca entre ambos.

Considerando o circuito que envolve uma carga capacitiva alimentada através de uma fonte indutiva, tem-se que a corrente está adiantada de 90° em relação à tensão. Assim, quando os contatos do disjuntor se abrem estabelece-se um arco entre esses contatos e a corrente continua a fluir até passar por zero, quando então o arco perde sua condutividade. Neste caso, não ocorre a reignição do arco porque a tensão através do disjuntor é muito pequena; assim, o capacitor permanece carregado com a tensão máxima da fonte.

Quando a tensão da fonte muda de polaridade, a tensão de restabelecimento do disjuntor aumenta, e quando aquela tensão atinge metade do ciclo, a tensão da fonte, e, se o disjuntor não tiver obtido suficiente rigidez dielétrica para suportar esta tensão através de seus contatos, ocorrerá então a reignição. Quando a tensão no capacitor atingir seu máximo, a corrente de descarga transitória estará passando por zero e o arco extinguirá novamente, deixando o capacitor carregado em uma tensão mais alta. Teoricamente o capacitor poderia ficar carregado em três vezes a tensão da fonte. O processo pode continuar, mais uma segunda reignição poderia acontecer meio ciclo após, quando a tensão através dos contatos do disjuntor atinge 4 vezes a tensão da fonte. Esta reignição poderia teoricamente deixar o capacitor em cinco vezes a tensão da fonte. Em suma, este processo teoricamente poderia continuar indefinidamente, mas na prática, perdas, capacitâncias parasitas e provavelmente falha de isolamento limitam esta sobretensão.

b. Sobretensão Atmosférica

Sobretensão atmosférica é uma sobretensão fase-terra ou entre fases, em um dado ponto do sistema, devida a uma descarga atmosférica ou outra causa, cuja forma de onda pode ser considerada similar a uma onda de impulso atmosférico normalizada utilizada em ensaios. Tal sobretensão é usualmente de duração muito curta (tempo de frente de onda até 20 μ s o que corresponde às frequências maiores que 50 kHz e um tempo de meio valor da ordem de 50 μ s) e amplitude máxima de ordem de 2 pu.

De certa forma, cada equipamento em um sistema de energia está sujeito a ser submetido a elevados valores de tensão, em função da ocorrência de descargas atmosféricas. A incidência destas descargas pode se dar diretamente sobre o equipamento (no caso de descargas atmosféricas atingindo a subestação), sobre as linhas de transmissão, originando neste caso, surtos de tensão, que se propagam ao longo destas linhas, ou de forma indireta, por indução de tensão.

As sobretensões assim originadas são na sua grande maioria suficientemente elevadas para provocar falhas nos isolamentos, sejam de linhas de transmissão como de equipamentos, com a conseqüente perda de continuidade no atendimento aos consumidores e/ ou parada no processo industrial. A fim de evitar que estas falhas sejam uma constante nos sistemas, implicando em redução na confiabilidade, são utilizados esquemas de proteção de forma a impedir que as descargas atmosféricas atinjam diretamente as linhas e os equipamentos, e uso de equipamentos de proteção tais como para-raio e air gap para que as sobretensões advindas da linha ou induzidas não danifiquem os isolamentos.

B.2.3. Proteção contra Sobretensões

As sobretensões em um sistema de transmissão não podem ser evitadas, assim como sua total supressão é difícil. Entretanto, suas magnitudes podem ser limitadas de modo a ficarem compatíveis com os níveis de isolamento dos equipamentos.

Existem diversas formas para controlar as sobretensões, sendo que os mecanismos especiais utilizados para este fim devem levar em consideração que cada tipo de sobretensão é dependente das características dos equipamentos usados, da configuração e dos seus critérios operativos [23],[29].

a. Inserção de Resistores

Um dos meios mais efetivos na redução das sobretensões causadas por operações de chaveamento, usada durante vários anos, é a inserção de resistores no momento de chaveamento. No caso de energização da linha, inicialmente fecha-se o disjuntor colocando-se o resistor de pré-inserção em série, entre a fonte e a linha de transmissão. Após um breve período de tempo este resistor é retirado ou curto-circuitado, dependendo do esquema de resistor de pré-inserção utilizado.

Assim, na realidade, a linha é energizada em dois estágios, com cada um deles produzindo uma determinada sobretensão. A primeira é devida à energização através do resistor e a segunda é causada pelo “by-pass” do resistor. As magnitudes de ambas as sobretensões dependem do valor do resistor de pré-inserção utilizado, sendo que um valor ótimo deste resistor depende basicamente da potência de curto-circuito da fonte, do comprimento da linha e do grau de compensação da linha.

Em regra geral, entretanto, este valor ótimo é da ordem da impedância da linha. Os tempos de inserção normalmente utilizados se encontram na faixa de 6 a 15 milissegundos, sendo a condição a ser obedecida é que o resistor não deve ser curto-circuitado antes que a primeira reflexão na extremidade aberta da linha retorne ao terminal da fonte, isto é, de modo a ser efetivo, o tempo de permanência deve ser maior do que duas vezes o tempo de trânsito da linha.

Um outro fator que deve ser levado em consideração no dimensionamento do resistor é a quantidade da energia dissipada. Com o aumento no valor do resistor, a corrente que flui através dele diminui, levando-o a absorver menor energia. Por esta razão, deve-se selecionar um resistor igual ou maior que aquele correspondente ao valor ótimo que atenda às condições pré-determinadas de máxima sobretensão permitida.

As sobretensões transitórias causadas pela abertura de disjuntores podem também ser reduzidas pela inserção de resistores, em geral de valor superior àqueles usados no fechamento.

b. Pára-raios

A utilização de pára-raios no controle das sobretensões permite que se possam reduzir os níveis de isolamento de diversos equipamentos e garantir a qualidade da energia do sistema.

De forma sucinta, os pára-raios são elementos shunt, adequadamente posicionados no sistema, formados por blocos de resistores não-lineares, podendo ter ou não "gap's" em série ou em paralelo para equalização de tensão nos blocos, que disparam assim que o nível de tensão nos seus terminais excede a um determinado valor, drenando a corrente e estabilizando a tensão em valores suficientemente baixos.

De modo ideal os pára-raios deveriam se comportar do seguinte modo:

- Começar a conduzir somente a partir de uma tensão acima da sua tensão nominal;
- Manter esta tensão, com pequenas variações, durante todo o tempo que permanecer o surto de tensão;
- Cessar a condução a uma tensão muito próxima àquela que começou a conduzir.

Desta maneira tais pára-raios conduziram somente a corrente requerida para redução da sobretensão ao nível de proteção dos pára-raios. Assim, o funcionamento ótimo dos pára-raios seria aquele em que a tensão a que eles ficam submetidos fosse independente da corrente através dos mesmos. No entanto tal fato não ocorre, uma vez que as características $V \times I$ destes elementos não são perfeitas, mesmo para pára-raios de óxido de zinco (ZnO) que mais se aproximam do ideal. A tensão nos terminais de um pára-raio depende basicamente de dois fatores, quais sejam a magnitude e a forma de onda da corrente através do pára-raios. A magnitude da corrente é fortemente influenciada pela impedância de surto do circuito (Z_0) entre o pára-raio e a fonte do surto. Quando o circuito no qual o pára-raio está operando tem uma baixa impedância (linhas múltiplas, bancos de capacitores), a corrente inicial no pára-raios poderá ser bastante elevada havendo a possibilidade de danificá-lo, e ainda fornecendo tensões elevadas nos seus terminais.

Os pára-raios são usados na proteção de sistemas cuja sobretensão é oriundo de rejeição de carga. No caso de surtos atmosféricos, a corrente que os pára-raios terão que dissipar é limitada pela blindagem oferecida pelos cabos pára-raios, uma vez que não permitem que valores elevados de corrente atinjam os condutores fase de uma linha de transmissão. Estas correntes são normalmente elevadas, mas de curta duração.

Quando da ocorrência de sobretensões temporárias, os pára-raios são capazes de proteger equipamentos somente por um período curto de tempo, pois, caso fiquem submetidos a altos níveis de tensão durante um longo tempo (alguns segundos), sua capacidade de absorver energia será ultrapassada, causando danos permanentes aos mesmos.

B.2.4. Flutuações de tensão

“Flicker” ou Cintilação luminosa é definida como a sensação visual das variações do fluxo luminoso de lâmpadas, quando ocorrem flutuações de tensão, ou seja, quando o valor eficaz da tensão de suprimento do sistema elétrico sofre variações em torno de seu valor nominal. Tais variações são rápidas, repetitivas, de baixa amplitude e de frequência inferior a 30 Hz, causadas por operações de fornos a arco, motores, soldadores, etc. Há mais de 50 anos, as flutuações de tensão são objetos de vários estudos e publicações. É um fenômeno bem definido pela norma IEC 868 para análise, medição elementos de previsão e soluções [30].

As fontes destas flutuações são os equipamentos elétricos cujos funcionamentos necessitam de altas variações cíclicas de corrente que, percorrendo a impedância da rede (R, X), provocam variações da tensão.

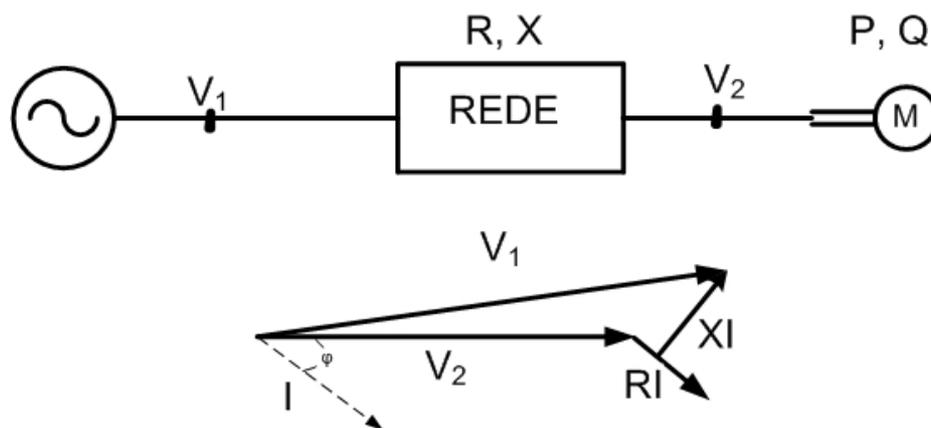


Figura B.4: Variações de tensão e corrente acarretando flutuações de tensão

Definindo V_1 como a tensão nominal da fonte (de funcionamento), V_2 a tensão da rede, ΔV a queda de tensão ($\Delta V = V_1 - V_2$), P a potência da carga sob a tensão nominal V_2 , Q a potência reativa da carga sob a tensão nominal V_2 , $\cos(\varphi)$ o fator de

potência da carga, I a corrente nominal da carga, S_{cc} a potência de curto-circuito da rede, R e X a resistência e impedância total da rede, respectivamente.

Considerando o ângulo entre V₁ e V₂ pequeno,

$$\Delta V = V_1 - V_2 = RI \cos(\varphi) + XI \sin(\varphi) \quad (\text{B. 4})$$

$$P = V_2 I \cos(\varphi) \quad (\text{B. 5})$$

$$Q = V_2 I \sin(\varphi)$$

$$\Delta V = \frac{RP + XQ}{V_2} \quad (\text{B. 6})$$

ou em valor relativo:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{RP + XQ}{V_2^2}$$

Para tensões superiores a 1 kV, a resistência R é desprezível em relação à impedância X, e a equação anterior se transforma em:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{XQ}{V_2^2} = \frac{Q}{S_{cc}} \quad (\text{B. 7})$$

É a variação da potência reativa Q que é preponderante e deve ser controlada.

Para tensões menores do que 1 kV, R não é mais desprezível, neste caso, é necessário agir sobre as potências ativa e reativa, P e Q.

Em resumo, apresentamos a Tabela B.1 [13] Thierry GOURAUD, “*Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique*”, Thèse De Doctorat, Université De Nantes, Janvier 1997.

] que mostra a denominação das diferentes variações de tensão que podem ocorrer em um sistema elétrico .

Tabela B.1: Denominação das Variações de Tensão de Curta Duração

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à nominal
Varição Momentânea de	Interrupção Momentânea de	Inferior ou igual a três segundos	inferior a 0,1 pu

Tensão	Tensão		
Varição Momentânea de Tensão	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 pu
Varição Momentânea de Tensão	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	superior a 1,1 pu
Varição Momentânea de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	superior a três segundos e inferior ou igual a um minuto	inferior a 0,1 pu
Varição Momentânea de Tensão	Afundamento Temporário de Tensão	superior a três segundos e inferior ou igual a um minuto	superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 pu
Varição Momentânea de Tensão	Elevação Temporária de Tensão	superior a três segundos e inferior ou igual a um minuto	superior a 1,1 pu

B.2.5. Variação de Freqüência

Além do curto-circuito e da rejeição de carga, outro efeito tipicamente transitório ao qual os sistemas de distribuição estão sujeitos é a variação na freqüência do sistema. Para a representação proposta neste projeto, por meio de fontes harmônicas, tal variação é dos eventos mais severos, já que as freqüências das fontes são definidas pelo teorema de Fourier.

Este distúrbio evidencia a utilidade do circuito de sincronismo, já que ele é capaz de identificar a freqüência em tempo real e ajustar os valores das fontes harmônicas.