

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 837

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA EM BAIXA TENSÃO ALTERNADA E CONTÍNUA**

Marcos Fernando dos Santos

DATA DA DEFESA: 04/08/2014

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA EM BAIXA TENSÃO ALTERNADA E
CONTÍNUA**

Marcos Fernando dos Santos

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Selênio Rocha Silva

Belo Horizonte - MG

Agosto de 2014

S237a

Santos, Marcos Fernando dos.

Análise de desempenho de uma rede de distribuição de energia elétrica em baixa tensão alternada e contínua [manuscrito] / Marcos Fernando dos Santos. -2014.

121 f., enc.: il.

Orientador: Selênio Rocha Silva.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos e apêndices: f. 99-112.

Bibliografia: f. 95-98.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Energia elétrica - Distribuição - Teses. I. Silva, Selênio Rocha. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3(043)

"Análise de Desempenho de Uma Rede de Distribuição de Energia Elétrica Em Baixa Tensão Alternada e Contínua"

Marcos Fernando dos Santos

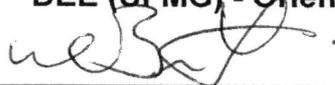
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 04 de agosto de 2014.

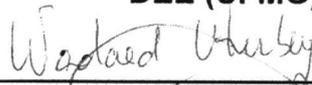
Por:



Prof. Dr. Selênio Rocha Silva
DEE (UFMG) - Orientador



Prof. Dr. Wallace do Couto Boaventura
DEE (UFMG)



Prof. Dr. Wadaed Uturbey da Costa
Engenharia Elétrica (UFMG)

"Todos os erros humanos são fruto
da impaciência. Interrupção
prematura de um processo
ordenado, obstáculo artificial
levantado em redor de uma
realidade artificial."

Franz Kafka

Agradecimentos

Não poderia começar sem reconhecer a inestimável contribuição do professor Selênio Rocha Silva, que foi, certamente, fator decisivo na conclusão deste trabalho. Sua orientação, paciência, encorajamento e o conhecimento compartilhado ajudaram-me a, finalmente, concluir essa importante etapa da minha vida. Reconheço na sua pessoa as qualidades de um verdadeiro mestre e um exemplo de ser humano.

Aos meus pais.

Aos meus amigos que contribuíram de forma significativa para a realização desse trabalho, em especial a Larissa Elias, Adélia Vaz, Gustavo Martins, Márcio Melquiádes, Clodualdo Venício e Christian Herrera.

Aos senhores Felipe Carlos Bastos e Marcio Vargas Lomelino, da Eletrobrás, e ao senhor Izonel Henriques Pereira Júnior, da CEMIG, pelo fornecimento de dados e informações para a realização desse trabalho.

Ao CEFET-MG.

Aos meus amigos nas unidades de Divinópolis e Belo Horizonte do CEFET-MG, em especial a Henrique Borges, Gray Farias, Dayse Diniz, Andréa Barros, Rosália Martins, Maria de Lourdes Couto, Sandra Vaz, Clever Oliveira, Ulisses Cavalca e Marconi Leite.

Resumo

A distribuição de energia elétrica teve início com um sistema de tensão contínua, construído por Thomas Edison, e que foi praticamente substituído pelo sistema de tensão alternada concebido por Nikola Tesla e George Westinghouse. Apesar de poucos sistemas elétricos atuais funcionarem em tensão contínua, os equipamentos eletrônicos de consumo utilizam este tipo de alimentação para os seus circuitos internos e possuem fontes de alimentação (interface com o sistema de tensão alternada) que, na maioria dos casos, poderiam utilizar diretamente tensões contínuas. Algumas fontes de energia renovável são inerentemente de tensão contínua, como as células a combustível e os painéis fotovoltaicos. É possível também melhorar a eficiência de alguns equipamentos eletrodomésticos a motor com o uso de inversores de frequência, que podem ser alimentados por uma fonte CC eliminando uma etapa de conversão (retificador). Neste trabalho, se realiza um estudo comparativo entre um sistema de distribuição de energia elétrica em baixa tensão, em tensão alternada e em tensão contínua. Este estudo considera um modelo de uma rede de distribuição com 50 unidades consumidoras, com diferentes perfis de posse de equipamentos e hábitos de consumo de energia elétrica, desenvolvido com base nos dados da Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso - Classe Residencial - Região Sudeste, realizada pelo Procel/Eletrobrás em 2005. Os modelos dos equipamentos elétricos considerados para essas unidades consumidoras são desenvolvidos a partir de dados de medições de grandezas elétricas (tensão, corrente, potências, distorção harmônica) em equipamentos disponíveis no mercado e a partir de conceitos estabelecidos na literatura. O foco das análises, realizadas a partir dos resultados de simulações do sistema proposto no software PowerFactory (DIgSILENT GmbH), está no desempenho da rede de distribuição de baixa tensão quanto aos aspectos de eficiência e qualidade de energia.

Palavras-chave: distribuição de energia elétrica, baixa tensão.

Abstract

The electric power distribution began with a DC voltage system, built by Thomas Edison, and later was almost replaced by AC voltage system designed by Nikola Tesla and George Westinghouse. Although few electrical systems operate on DC voltage currently, consumer electronics devices use this type of power for its internal circuitry and have power supplies (AC voltage interface with the system) that, in most cases, could use directly DC voltages. Some renewable energy sources are inherently DC voltage, such as fuel cells and photovoltaic panels. It is also possible to improve the efficiency of some motor electrical appliances using frequency inverters, which can be fed from a DC power source, eliminating one conversion step (rectifier). In this work, a comparative study between a power distribution system in low voltage on AC voltage and DC voltage is accomplished. This study considers a model of a distribution network with 50 consumer units, with different profiles of equipment ownership and use behavior, developed based on data from the Survey of Equipment Ownership and Use Behavior - Residential Class - Southeast Region of Brazil, held by Procel / Eletrobras in 2005. The models of electrical equipment considered for these consumer units are developed using data from electrical measurements (voltage, current, power, harmonic distortion) in equipment found on market and from literature concepts. The focus of the analysis, carried out from the results of simulations of the proposed system in PowerFactory software (DIgSILENT GmbH), is the performance of low-voltage distribution network in the matters of efficiency and power quality.

Keywords: electric power distribution, low voltage.

Sumário

1 Introdução	1
1.1 Motivação e Relevância da Pesquisa	1
1.2 Objetivos do trabalho	2
1.3 Organização do texto	2
2 Sistemas de Energia Elétrica em Baixa Tensão	5
2.1 Histórico	5
2.2 Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica	8
2.3 Sistemas de Energia Elétrica em Tensão Contínua	11
2.4 Interface entre os sistemas CA e CC	12
2.4.1 Retificadores não controlados	13
2.4.2 Retificadores com correção do fator de potência	14
2.4.3 Conversor controlado de tensão (VSC) de dois níveis	14
2.4.4 Conversor controlado de tensão (VSC) de três níveis	15
2.4.5 Conversor controlado de tensão (VSC) com circuito balanceador do ponto central do barramento CC	16
2.5 Configurações e níveis de tensão para os sistemas de distribuição em tensão contínua	17
2.6 Características básicas do sistema de distribuição em baixa tensão contínua proposto	18
2.7 Considerações Finais	18
3 Modelagem de um Sistema de Distribuição em Baixa Tensão - Parte 1: Curvas de Carga	21
3.1 Considerações iniciais	21
3.2 Área e Consumidores Atendidos	22
3.3 Posse de Equipamentos e Consumo de Energia Elétrica	25
3.4 Curvas de Carga Médias Diárias	29
3.5 Curvas de Carga para os Consumidores do Sistema de Distribuição Proposto	32

3.6	Curvas de Carga para os Equipamentos do Sistema de Distribuição Proposto	42
3.7	Considerações finais.....	51
4	Modelagem de um Sistema de Distribuição em Baixa Tensão - Parte 2: Equipamentos de Consumo e Rede Elétrica	53
4.1	Considerações iniciais.....	53
4.2	Equipamentos de consumo - medições e levantamento de dados	53
4.2.1	Lâmpadas de descarga.....	54
4.2.2	Motores elétricos.....	58
4.2.3	Equipamentos resistivos.....	60
4.2.4	Equipamentos eletrônicos	62
4.3	Equipamentos de consumo - alimentação em tensão contínua	64
4.4	Equipamentos de consumo - desenvolvimento de modelos.....	66
4.4.1	Modelos para tensão alternada - frequência fundamental	66
4.4.2	Modelos para tensão alternada - harmônicos	67
4.4.3	Modelos para tensão contínua.....	68
4.5	Modelos para a rede elétrica	69
4.6	Considerações finais.....	70
5	Análise de Desempenho de um Sistema de Distribuição em Baixa Tensão	71
5.1	Considerações iniciais.....	71
5.2	Resultados para a rede em tensão alternada	71
5.3	Resultados para a rede em tensão contínua	85
5.4	Análise comparativa dos resultados.....	88
5.5	Considerações finais.....	91
6	Conclusões e Propostas de Continuidade	93
	Referências Bibliográficas	95
	Anexo I - Dados de Medição de Distorção Harmônica de Corrente de Equipamentos	99
	Apêndice I - Dados dos Cabos de Baixa Tensão	113

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Lâmpada incandescente de Edison em outubro de 1879 (à esquerda) e representação artística da sala dos dínamos da Central de Geração CC em Pearl Street (propriedade do Smithsonian Institution) [1].	6
Figura 2.2 - Concepção geral dos sistemas de energia elétrica (adaptada de [7]).	8
Figura 2.3 - Padrões de redes de distribuição (adaptada de [7]).	9
Figura 2.4 - Sistema de distribuição secundário reticulado [10]	10
Figura 2.5 - Tipos básicos de circuitos secundários [11].	11
Figura 2.6 - Retificadores a diodos, monofásico (à esquerda) e trifásico (à direita) [16]	13
Figura 2.7 - Retificadores a diodos com correção do fator de potência: conversor <i>boost</i> (acima) e conversor <i>buck</i> (abaixo) [16].	14
Figura 2.8 - Conversor controlado de tensão (VSC) de dois níveis [13].	15
Figura 2.9 - Conversor controlado de tensão (VSC) de três níveis [16][13]	16
Figura 2.10 - VSC de dois níveis com balanceador do ponto central do barramento CC [19][13]	16
Figura 3.1 - Consumo Final do Setor Residencial [25]	21
Figura 3.2 - Modelo de sistema de distribuição proposto – área e consumidores a serem atendidos	23
Figura 3.3 - Curva de carga diária média para a região Sudeste obtida no SINPHA	30
Figura 3.4 - Curva de carga diária média para a região Sudeste na forma de degraus	31
Figura 3.5 - Curva “objetivo” de carga diária média para o sistema de distribuição proposto.	32
Figura 3.6 - Curva de carga diária do consumidor 421 – intervalo de demanda de 15 minutos	34
Figura 3.7 - Potência e demanda de um forno de microondas	36
Figura 3.8 - Curva de carga diária do consumidor 421 – intervalo de demanda de 1 hora	38
Figura 3.9 - Curva de carga diária do grupo 42 – intervalo de demanda de 15 minutos	38
Figura 3.10 - Curva de carga diária do grupo 42 – intervalo de demanda de 1 hora	39
Figura 3.11 - Curva de carga diária dos grupos 11 e 12 – intervalo de demanda de 1 hora	39
Figura 3.12 - Curvas de carga diárias dos grupos 21 e 22 – intervalo de demanda de 1 hora	39
Figura 3.13 - Curvas de carga diárias dos grupos 23 e 24 – intervalo de demanda de 1 hora	40
Figura 3.14 - Curvas de carga diárias dos grupos 31 e 32 – intervalo de demanda de 1 hora	40
Figura 3.15 - Curvas de carga diárias dos grupos 25 e 33 – intervalo de demanda de 1 hora	40
Figura 3.16 - Curvas de carga diárias dos grupos 41 e 42 – intervalo de demanda de 1 hora	41
Figura 3.17 - Curva de carga resultante para o sistema de distribuição proposto	41
Figura 3.18 - Participação relativa dos equipamentos na demanda média dos tipos de consumidores	43
Figura 3.19 - Curvas de demanda média diárias para os chuveiros	43
Figura 3.20 - Curvas de demanda média diárias para os refrigeradores	44
Figura 3.21 - Curvas de demanda média diárias de iluminação	45

Figura 3.22 - Curvas de carga de um alimentador de 13,8 kV de Governador Valadares/MG (dados fornecidos pela CEMIG).....	46
Figura 3.23 - Curvas de demanda média diárias para os condicionadores de ar	46
Figura 3.24 - Curvas de demanda média diárias para os televisores	47
Figura 3.25 - Curvas de demanda média diárias para os aparelhos de som.....	47
Figura 3.26 - Curvas de demanda média diárias para os ferros de passar	48
Figura 3.27 - Curvas de demanda média diárias para as máquinas de lavar roupas	48
Figura 3.28 - Curvas de demanda média diárias para os fornos de microondas.....	49
Figura 3.29 - Curvas de demanda média diárias para os microcomputadores	50
Figura 3.30 - Curvas de demanda média diárias para os demais equipamentos	50
Figura 3.31 - Curvas de demanda média diárias para os consumidores do sistema proposto.....	51
Figura 4.1 - Formas de onda de tensão (em azul) e corrente (em vermelho) para as LFC Osram “Duluxstar” 20W/865 (à esquerda), Philips “Twister” 23W/827 (no centro) e Soleil 25W/x27 (à direita)	56
Figura 4.2 - Espectros harmônicos de corrente das LFCs medidas	57
Figura 4.3 - Formas de onda de tensão (em azul) e corrente (em vermelho) para a lâmpada de vapor de sódio tubular Philips SON-T 150W	57
Figura 4.4 - Espectro harmônico de corrente lâmpada Philips SON-T 150W	58
Figura 4.5 - Formas de onda de tensão (em azul) e corrente (em vermelho) para os refrigeradores Continental de 270 litros (à esquerda) e Brastemp “Frost Free” de 320 litros (à direita)	59
Figura 4.6 - Espectros harmônicos de corrente dos equipamentos com motores elétricos	60
Figura 4.7 - Formas de onda de tensão (em azul) e corrente (em vermelho) para o chuveiro eletrônico a 3600W (à esquerda) e a 4500W (à direita).....	61
Figura 4.8 - Espectros harmônicos do chuveiro eletrônico	62
Figura 4.9 - Formas de onda de tensão (em azul) e corrente (em vermelho) para o televisor CRT de 20” (acima e à esquerda), para o televisor LED de 40” (acima e à direita), para o microcomputador Dell (abaixo e à esquerda) e para o forno de microondas (abaixo e à direita).....	63
Figura 4.10 - Curvas PV e IV para lâmpadas fluorescentes compactas	65
Figura 4.11 - Curvas PV e IV para um DVD Player.....	65
Figura 4.12 - Curvas PV e IV para um microcomputador e um monitor	66
Figura 5.1 - Tensão no poste 7.....	72
Figura 5.2 - Tensão no poste 3.....	73
Figura 5.3 - Tensão no poste 1.....	73
Figura 5.4 - Tensão no poste 9.....	73
Figura 5.5 - Tensão no poste 13.....	74
Figura 5.6 - Tensão de seqüência positiva nos postes 1, 3, 7, 9 e 13	74
Figura 5.7 - Tensão de seqüência positiva em alguns intervalos.....	75

Figura 5.8 – Desequilíbrio de tensão nos postes 1, 3, 7, 9 e 13	76
Figura 5.9 - Distorção harmônica de tensão na fase A nos postes 1, 3, 7, 9 e 13.....	77
Figura 5.10 - Distorção harmônica de tensão na fase B nos postes 1, 3, 7, 9 e 13	77
Figura 5.11 - Distorção harmônica de tensão na fase C nos postes 1, 3, 7, 9 e 13.....	78
Figura 5.12 – Correntes eficazes por unidade no lado de baixa tensão do transformador	78
Figura 5.13 – Correntes eficazes por unidade no lado de alta tensão do transformador (rede de média tensão).....	79
Figura 5.14 – Distorção harmônica de corrente no lado de baixa tensão do transformador.....	80
Figura 5.15 – Distorção total de demanda no lado de baixa tensão do transformador	81
Figura 5.16 – Corrente no neutro do transformador – valor eficaz e componente fundamental	81
Figura 5.17 - Distorção harmônica de corrente no lado de alta tensão do transformador	82
Figura 5.18 – Distorção total de demanda no lado de alta tensão do transformador	82
Figura 5.19 - Demanda de potência ativa e perdas na rede em tensão alternada.....	83
Figura 5.20 - Demanda de potências reativa na rede em tensão alternada	84
Figura 5.21 - Perdas nos condutores da rede e nos enrolamentos do transformador em tensão alternada.....	84
Figura 5.22 - Tensão contínua nos postes 1, 3, 7, 9 e 13	85
Figura 5.23 - Tensão contínua nos postes em alguns intervalos	86
Figura 5.24 – Correntes por unidade	87
Figura 5.25 - Demanda de potência na rede CC.....	87
Figura 5.26 - Perdas na rede de baixa tensão, no retificador e no transformador	88
Figura 5.27 - Comparação entre as tensões alternada e contínua no poste 7	89
Figura 5.28 - Comparação entre as tensões alternada e contínua no poste 1	89
Figura 5.29 - Comparação entre as perdas em tensão alternada e contínua.....	90
Figura 5.30 - Comparação entre os valores de demanda em tensão alternada e contínua.....	91

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Dados dos consumidores do sistema de distribuição proposto.....	24
Tabela 3.2 - Relação de cargas “1” – 6 consumidores	25
Tabela 3.3 - Relação de cargas “2” – 24 consumidores	26
Tabela 3.4 - Relação de cargas “3” – 12 consumidores	26
Tabela 3.5 - Relação de cargas “4” – 8 consumidores	27
Tabela 3.6 - Posse de Equipamentos	28
Tabela 3.7 - Faixas de consumo e quantidade de consumidores.....	29
Tabela 3.8 - Intervalos entre curvas de carga de unidades com mesmo consumo	33
Tabela 3.9 - Denominação dos grupos de unidades consumidoras com mesmo consumo	33
Tabela 3.10 - Fatores de carga e demanda aplicados aos equipamentos da unidade 421.....	36
Tabela 3.11 - Participação dos equipamentos da demanda média	42
Tabela 4.1 - Classificação dos equipamentos modelados.....	54
Tabela 4.2 - Grandezas elétricas medidas de lâmpadas de descarga	56
Tabela 4.3 - Grandezas elétricas medidas nos equipamentos com motores elétricos	59
Tabela 4.4 - Grandezas elétricas referentes aos chuveiros elétricos.....	61
Tabela 4.5 - Características das fontes de alimentação dos equipamentos eletrônicos.....	63
Tabela 4.6 - Grandezas elétricas medidas nos equipamentos eletrônicos	64
Tabela 4.7 - Valores de componentes de carga – modelo exponencial.....	67
Tabela 4.8 - Alterações nos equipamentos para uso em CC	68
Tabela A.1 - Dados de medição de harmônicos de uma lâmpada Osram Duluxstar 20W/865	99
Tabela A.2 - Dados de medição de harmônicos de uma lâmpada Philips “Twister” 23W/827	100
Tabela A.3 - Dados de medição de harmônicos de uma lâmpada Soleil 25W/x27.....	101
Tabela A.4 - Dados de medição de harmônicos de uma lâmpada Philips SON-T 150W	102
Tabela A.5 - Dados de medição de harmônicos de um refrigerador Continental 270 litros	102
Tabela A.6 - Dados de medição de harmônicos de um refrigerador. Brastemp 320 litros	102
Tabela A.7 - Dados de medição de harmônicos de um condicionador 7500BTU (ventilador apenas). 102	
Tabela A.8 - Dados de medição de harmônicos de um condicionador 7500BTU	103
Tabela A.9 - Dados de medição de harmônicos de uma lavadora Brastemp 7kg	103
Tabela A.10 - Dados de medição de harmônicos de um liquidificador Walita.....	103
Tabela A.11 - Dados de medição de harmônicos de um aspirador de pó Electrolux	103
Tabela A.12 - Dados de medição de harmônicos de um chuveiro eletrônico 5500W @ 3600W	104
Tabela A.13 - Dados de medição de harmônicos de um chuveiro eletrônico 5500W @4500W	104
Tabela A.14 - Dados de medição de harmônicos de um televisor Philips LED 40" (40PFL6615D/78) 105	
Tabela A.15 - Dados de medição de harmônicos de um televisor Philips LCD 32" (32PFL3805D/78) 105	

Tabela A.16 - Dados de medição de harmônicos de um televisor Philips CRT 20" (20PT4331D/78)...	105
Tabela A.17 - Dados de medição de harmônicos de um aparelho de som Philips MC320	106
Tabela A.18 - Dados de medição de harmônicos de um forno de microondas Electrolux 28 litros.....	106
Tabela A.19 - Dados de medição de harmônicos de um notebook.....	107
Tabela A.20 - Dados de medição de harmônicos de um notebook.....	108
Tabela A.21 - Dados de medição de harmônicos de um microcomputador "genérico"	109
Tabela A.22 - Dados de medição de harmônicos de um microcomputador	109
Tabela A.23 - Dados de medição de harmônicos de um DVD player Philips.....	110
Tabela A.24 - Dados de medição de harmônicos de um receptor de TV via satélite Zapper	111
Tabela A.25 - Dados de medição de harmônicos de um carregador de telefone celular (5W)	112

Lista de Abreviações

ABINEE	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica	
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas	
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica	
CA	Corrente alternada (pode também se referir a um sistema em tensão alternada), em alguns locais indicado por AC	
CC	Corrente contínua (pode também se referir a um sistema em tensão contínua), em alguns locais indicado por DC	
CQ	Metade de comprimento de uma frente de quadra	
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais	
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais	
D	Potência de Distorção	[VA]
D	Demanda	
DPF	<i>Displacement Power Factor</i> , fator de potência de deslocamento	
HVDC	<i>High Voltage Direct Current</i> (Sistema de Transmissão em Alta Tensão)	
I	Corrente elétrica	[A]
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>	
IRC	Índice de Reprodução de Cores	
LCD	Liquid Cristal Display (Display de Cristal Líquido)	
LED	Light Emitting Diode (Diodo Emissor de Luz)	
LFC	Lâmpada Fluorescente Compacta	
NBR	Norma Técnica Brasileira	
ND	Norma de Distribuição da CEMIG	
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico	

P	Potência Ativa	[W]
PF	<i>Power Factor</i> , Fator de Potência	
PPGEE	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica	
PPH	Pesquisa de Posse de Eletrodomésticos e Hábitos de Uso	
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica	
PRODIST	Procedimentos de Distribuição da ANEEL	
PUC	Pontifícia Universidade Católica	
Q	Potência Reativa	[VAr]
S	Potência Aparente	[VA]
SIN	Sistema Interligado Nacional	
SINPHA	Sistema de Informação de Posses e Hábitos de Uso de Aparelhos Elétricos	
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i> , Taxa de distorção harmônica	[%]
U	Tensão elétrica	[V]
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais	
VSC	<i>Voltage Source Converter</i> (Conversor tipo Fonte de Tensão)	
XLPE	Polietileno Reticulado	

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação e Relevância da Pesquisa

O primeiro sistema de distribuição de energia elétrica a operar comercialmente no mundo foi um sistema de tensão contínua, construído por Thomas Edison. Pouco tempo depois, Tesla e Westinghouse construíram um sistema de tensão alternada, que veio a se tornar praticamente o padrão no mundo, devido, especialmente à facilidade em elevar e abaixar os níveis de tensão através de transformadores. Poucos sistemas elétricos, como os presentes em veículos e sistemas de telecomunicações, funcionam em tensão contínua, apesar de os equipamentos eletrônicos utilizarem este tipo de alimentação para os seus circuitos internos.

Com o desenvolvimento da eletrônica de potência, a adequação dos níveis de tensão para transmissão e utilização da energia elétrica deixou de ser um entrave para os sistemas de tensão contínua.

Algumas fontes de energia renovável são inerentemente de tensão contínua, como as células a combustível e os painéis fotovoltaicos. Além disso, o uso de tensão contínua possibilita o uso de dispositivos de armazenamento de energia (baterias e supercapacitores) nas redes, podendo aumentar sua robustez frente a variações de tensão de curta duração.

A maioria dos equipamentos eletrônicos de consumo e iluminação utiliza fontes chaveadas em seus circuitos de entrada, que poderiam (com alterações em alguns casos) utilizar diretamente tensões contínuas. É possível também melhorar a eficiência de alguns equipamentos eletrodomésticos a motor com o uso de inversores de frequência, que possibilitam realizar controles de pressão e vazão através da variação de velocidade em vez de válvulas de restrição, com significativo ganho de performance e de eficiência.

Os sistemas de distribuição em tensão contínua podem, considerando o exposto acima, substituir com muitas vantagens os sistemas de distribuição em corrente alternada, permitindo a integração com simplicidade de fontes alternativas renováveis de energia.

1.2 Objetivos do trabalho

O principal objetivo deste trabalho é o estudo e proposição de um sistema de distribuição de energia elétrica em baixa tensão contínua que seja compatível, do ponto de vista de funcionamento dos equipamentos presentes nas unidades consumidoras, com os níveis de tensão alternada atualmente em uso. A fim de atingir esse objetivo geral, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Estudar os sistemas de distribuição de energia elétrica em baixa tensão, com foco na possível interface entre sistemas em tensão alternada e em tensão contínua;
- Propor um modelo de carga para uma rede de baixa tensão, baseado nos dados da Pesquisa de Posse de Eletrodomésticos e Hábitos de Uso - Classe Residencial, Região Sudeste - Ano Base 2005, publicada pela Eletrobrás, considerando equipamentos de consumo disponíveis no mercado;
- Realizar levantamento de dados de qualidade de energia de equipamentos de consumo de unidades residenciais através de medição e desenvolver modelos de simulação para esses equipamentos;
- Modelar eletricamente uma rede de distribuição em baixa tensão alternada, propor e modelar um sistema de distribuição de energia elétrica em baixa tensão contínua para a realização de estudos comparativos;
- Avaliar questões referentes à qualidade de energia e eficiência energética da implantação desse sistema em conjunto com os sistemas de distribuição de energia elétrica e equipamentos de utilização de energia atuais.

1.3 Organização do texto

O texto está dividido em seis capítulos, considerando este capítulo introdutório.

No segundo capítulo, faz-se uma breve apresentação do desenvolvimento histórico e nos aspectos construtivos dos sistemas de energia elétrica, com foco nos sistemas de distribuição de energia elétrica. São discutidas também as possibilidades de interface entre os sistemas de distribuição em corrente alternada e corrente contínua. A opção de interface entre o sistema de tensão alternada e contínua que

será avaliada nesse trabalho (retificador não controlado trifásico conectado ao secundário do transformador de distribuição) é justificada nesse capítulo.

A modelagem de carga de um sistema de distribuição em baixa tensão é realizada no terceiro capítulo, a partir de curvas de carga obtidas em pesquisas de relevância nacional e dados de consumo de equipamentos disponíveis no mercado. Essa modelagem considera dados de posse de equipamentos e hábitos de consumo para propor diversos modelos de unidades consumidoras.

O quarto capítulo trata dos aspectos relativos ao funcionamento dos equipamentos de consumo (que foram considerados no modelo desenvolvido no terceiro capítulo) em uma rede de distribuição e do seu comportamento em termos de tensão e corrente. São também desenvolvidos os modelos para a rede elétrica considerada no trabalho.

No quinto capítulo, são apresentados e avaliados comparativamente os resultados de simulação para a rede de distribuição em baixa tensão proposta, operando tanto em tensão alternada, quanto em tensão contínua.

As conclusões e propostas de continuidade compõem o sexto e último capítulo.

Capítulo 2

Sistemas de Energia Elétrica em Baixa Tensão

2.1 Histórico

Os primeiros sistemas de energia elétrica foram concebidos para o funcionamento da iluminação a arco elétrico. Esse tipo de iluminação, demonstrado por Sir Humphrey Davy para a “*Royal Society*” em 1808, começou a ser adotado comercialmente na Europa na década de 1870 e nos Estados Unidos na década de 1880. A luz era emitida por um arco elétrico, aberto entre dois eletrodos de carvão e alimentado por geradores de corrente contínua (também conhecidos como dínamos). Devido à produção de gases tóxicos e desgaste dos eletrodos, o uso dessas lâmpadas a arco restringia-se à iluminação pública e de grandes ambientes [1].

Thomas Edison, a partir das idéias de Joseph Swan, desenvolveu uma lâmpada com filamento de algodão carbonizado em um tubo vedado e com gás inerte, que foi a primeira lâmpada incandescente prática, com possibilidade de uso no interior das residências. Junto com sua equipe, Edison alterou os projetos dos dínamos, que eram máquinas de corrente contínua com enrolamento de campo série, para geradores de tensão constante (enrolamento de campo em derivação ou excitação independente) e com menores perdas internas para alimentar o sistema de iluminação com lâmpadas em paralelo.

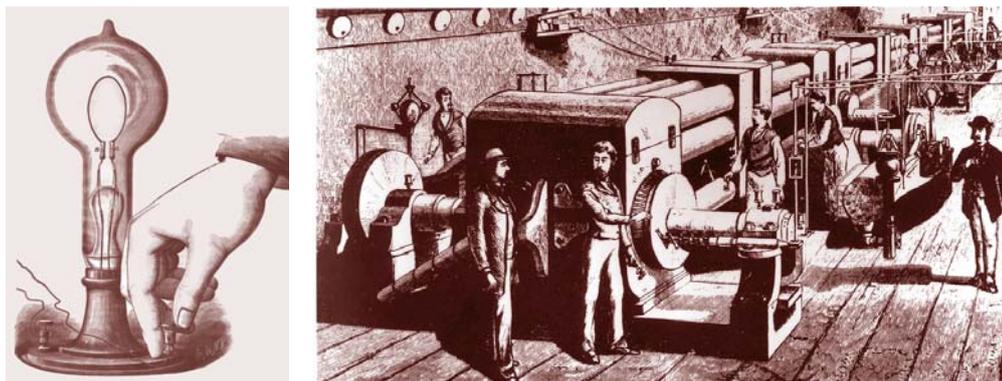


Figura 2.1 - Lâmpada incandescente de Edison em outubro de 1879 (à esquerda) e representação artística da sala dos dínamos da Central de Geração CC em Pearl Street (propriedade do Smithsonian Institution) [1].

Foram desenvolvidos também os medidores, soquetes para as lâmpadas, dispositivos de acionamento e proteção (fusíveis). O primeiro sistema de iluminação incandescente de Edison foi demonstrado em janeiro de 1882 em Londres, mas o mais conhecido é o de Pearl Street, em Nova Iorque, que começou a operar em 1882 e foi seguido pela instalação de sistemas semelhantes em diversas cidades dos Estados Unidos. O principal problema desse sistema é que ele operava em baixa tensão, 100 ou 110V, o que resultava em pequenos sistemas isolados. Um sistema de grande porte exigiria condutores de elevada seção transversal e de alto custo [1].

George Westinghouse adquiriu em 1886 os direitos de uso nos Estados Unidos da invenção do francês Lucien Gaulard e do britânico John Gibbs. Tratava-se de um sistema de corrente alternada com transformadores que tinham os seus primários conectados em série e alimentavam lâmpadas conectadas aos secundários. William Stanley, financiado por Westinghouse, reprojeteu os transformadores e propôs sua utilização em paralelo ao longo de uma linha de transmissão, eliminando as alterações de tensão devidas à conexão em série. O primeiro sistema de teste foi instalado em Lawrenceville, Pensilvânia, e forneceu energia para 400 lâmpadas por duas semanas. Depois, foi transferido para Buffalo, Nova Iorque, onde se tornou parte do primeiro sistema elétrico em tensão alternada dos Estados Unidos, em 1886.

A concepção completa de um sistema de tensão alternada polifásico foi realizada por Nikola Tesla, com patentes relacionadas a geradores, transformadores, linhas de transmissão, motores e iluminação. Westinghouse adquiriu os direitos dessas patentes e contratou Tesla para desenvolvimento em larga escala de sistemas CA.

A disputa entre os sistemas de tensão contínua de Edison e de tensão alternada de Westinghouse sobre qual seria estabelecido como tecnologia de referência para a expansão dos sistemas elétricos, ocorrida no período de 1888 a 1893, ficou conhecida como “Batalha das Correntes” [2]. O rápido desenvolvimento de equipamentos e dispositivos para tensão alternada por Tesla e outros, além do esforço empreendedor de Westinghouse, fizeram com este tivesse êxito em vários projetos, nos quais se destacaram a Feira Mundial de Chicago, em 1893 e a geração de energia elétrica em Niagara Falls, cuja concorrência foi vencida em 1893 e o funcionamento teve início em 1895. Isso afastou os receios criados por Edison e outros sobre os riscos do sistema de tensão alternada, principalmente em tensões acima de 300V, objetos de campanhas que incluíram a eletrocussão de animais em praça pública e a primeira cadeira elétrica. Paralelamente, linhas trifásicas em alta tensão alternada (30kV, 160km na Alemanha em 1891 e 40kV, 110km nos Estados Unidos) mostraram a grande vantagem tecnológica, na época desses sistemas, em relação ao proposto por Edison.

A possibilidade de elevar tensões, permitindo uma transmissão de energia com menores perdas e, posteriormente, reduzi-las a valores seguros próximo aos centros de consumo, definiu a questão a favor dos sistemas de tensão alternada, que se tornaram a primeira escolha a partir de então.

O desenvolvimento de dispositivos semicondutores de potência a partir da década de 1950 permitiu a implantação de alguns sistemas em tensão contínua [3], principalmente de transmissão em extra alta tensão, como o que interliga Itaipu a Ibiúna, próximo a São Paulo em $\pm 600\text{kV}$ [4]. Neste cenário, o uso de sistemas em tensão contínua para distribuição e utilização de energia elétrica volta a ser tema de debates [5].

Nas próximas sessões serão realizadas discussões sobre esses sistemas, notadamente no que se refere à distribuição de energia elétrica.

2.2 Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

Os sistemas de energia elétrica, numa concepção geral, podem ser subdivididos em três grandes blocos [6]:

- Geração, que converte alguma forma de energia em energia elétrica;
- Transmissão, que transporta a energia dos centros de produção aos de consumo;
- Distribuição, que entrega a energia do sistema de transmissão aos pequenos, médios e grandes consumidores.

A Fig. 2.2, adaptada de Short [7], apresenta essa concepção considerando os níveis usuais de tensão do sistema elétrico brasileiro.

O sistema de distribuição de energia elétrica é a parte do sistema elétrico entre os sistemas de transmissão e a entrada de energia dos consumidores [8] e inclui os seguintes componentes:

- Sistema de subtransmissão;
- Subestações de distribuição;
- Rede de distribuição primária (alimentadores primários);
- Transformadores de distribuição;
- Redes secundárias;
- Ramais de ligação.

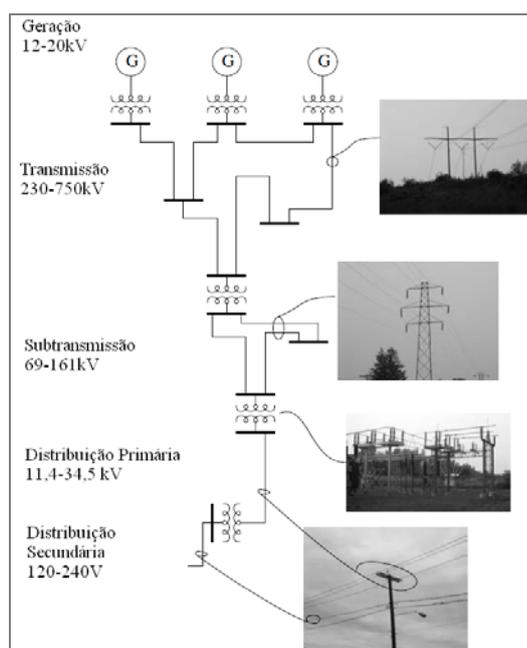


Figura 2.2 - Concepção geral dos sistemas de energia elétrica (adaptada de [7]).

Segundo Gönen, muitos engenheiros de sistemas de distribuição preferem definir o sistema de distribuição a partir das subestações de distribuição [8], que é o que será feito neste texto. As topologias dos sistemas de distribuição no mundo são, basicamente, variações ou composições dos padrões europeu ou norte-americano, apresentados na Fig. 2.3.

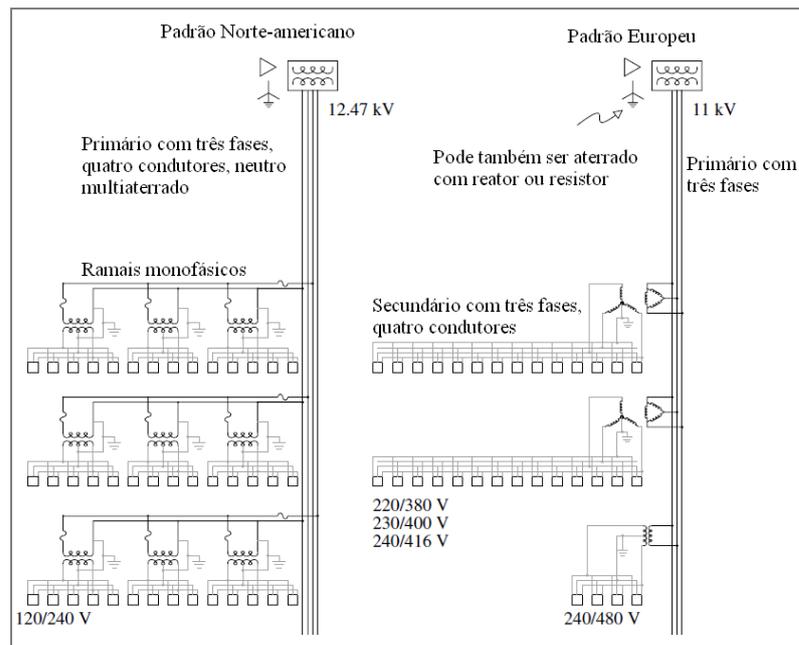


Figura 2.3 - Padrões de redes de distribuição (adaptada de [7]).

No Brasil, a concepção da rede primária é semelhante à norte-americana, mas as redes secundárias urbanas (rede de baixa tensão) tendem a ser trifásicas a quatro condutores, com transformadores triângulo-estrela, como no padrão europeu. O padrão norte-americano, porém, é o mais comum na distribuição em áreas rurais. A maioria das redes primárias utiliza a tensão de linha de 13,8kV, mas há sistemas em 11,4kV (interior de São Paulo), em 23,9kV (Juiz de Fora, MG) e 34,5kV (alguns locais no Paraná e Minas Gerais). Nas redes secundárias, as principais tensões utilizadas são 220/127V, 380/220V, 254/127V, 240/120V, 230/115V e 220/110V [9]. As duas primeiras são para sistemas trifásicos a quatro condutores e as demais para sistemas monofásicos a três condutores. Em Minas Gerais, as tensões utilizadas são 220/127V e 240/120V (sendo substituída por 254/127V).

As redes secundárias são, em sua maioria, aéreas e radiais. A exceção ocorre em áreas com alta densidade de carga (como a região central de Belo Horizonte) em que

são utilizadas redes subterrâneas em malha, também conhecidas como reticulado ou “spot network” (Fig. 2.4). Não há controle de tensão para essas redes.

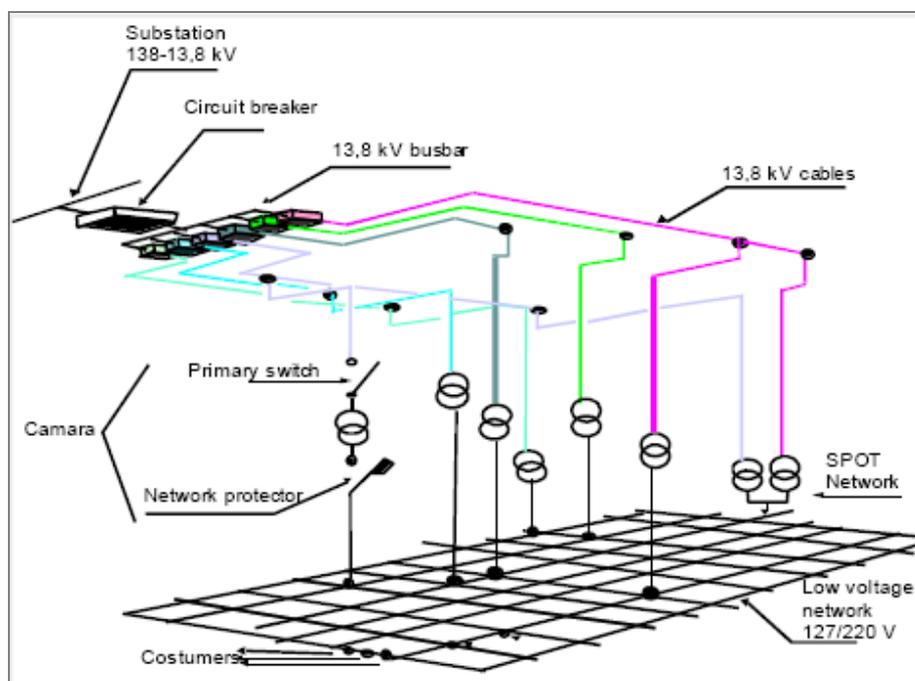


Figura 2.4 - Sistema de distribuição secundário reticulado [10]

As redes secundárias aéreas no Brasil utilizam, em sua maior parte, cabos multiplexados de alumínio, sendo três condutores para as redes monofásicas (“fase” 1, “fase 2” e neutro) e quatro condutores (três fases e neutro) para redes trifásicas. Os condutores fase são isolados em XLPE (polietileno reticulado) para tensões de 0,6/1kV. O condutor neutro (cabo nu) é comum às redes de baixa e média tensão e é aterrado nos postes em que há equipamentos ou mudança no tipo de rede primária e nas entradas de energia dos consumidores.

Os tipos básicos de circuitos secundários adotados pela CEMIG na ND-3.1:2005 [11] são apresentados na Fig. 2.5. Trata-se de uma vista de planta do arruamento em que as linhas representam a rede secundária e os triângulos representam os transformadores. A sigla CQ significa a metade do comprimento da frente de uma quadra. Esses esquemas podem também ser entendidos como os passos para expansão da rede secundária, levando em conta o crescimento da carga. Em áreas com baixa densidade de carga, adota-se um esquema em malha (tipo 1) em que são atendidas inteiramente duas quadras e metade das frentes de quadra adjacentes. Com o aumento da densidade de carga, dois circuitos dão lugar a três novos (tipo 2)

que, posteriormente, são novamente divididos em dois, neste caso em configuração radial (tipo 3). Atualmente, em Minas Gerais é difícil encontrar circuitos dos tipos 1 e 2, já partindo, a maior parte das instalações, do tipo 3 ou 4, tanto que a revisão de 2014 da ND-3.1 nem considera mais essas alternativas [12].

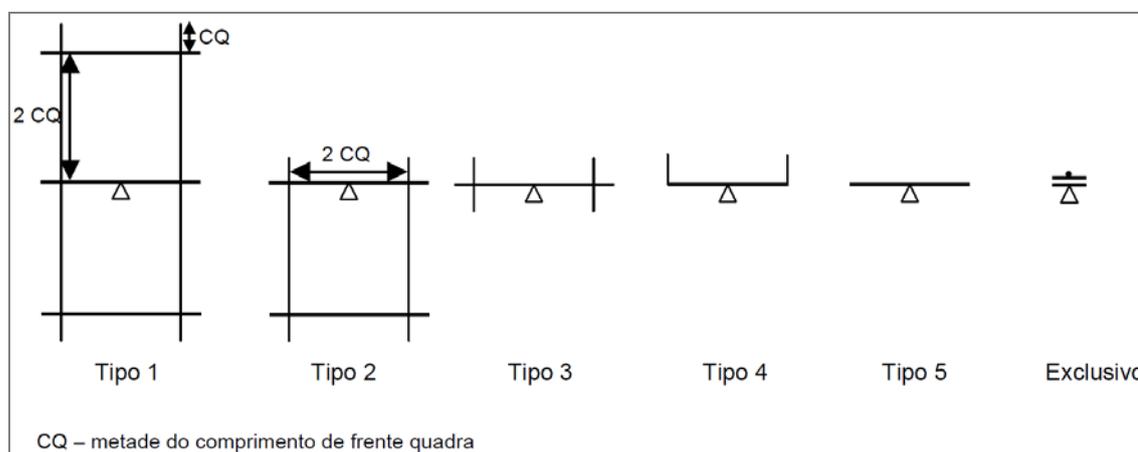


Figura 2.5 - Tipos básicos de circuitos secundários [11]

2.3 Sistemas de Energia Elétrica em Tensão Contínua

Apesar do grande crescimento dos sistemas em tensão alternada no último século, há diversos sistemas elétricos em tensão contínua atualmente, principalmente sistemas isolados, que precisem de armazenamento de energia ou aplicações específicas. Os sistemas de telecomunicações são um exemplo: através de conversores conectados à rede de distribuição, os equipamentos são alimentados a partir de um barramento de 48V, ao qual também são conectadas baterias que garantem a continuidade do fornecimento de energia em caso de desligamento da rede. O mesmo esquema é adotado em alguns sistemas de controle de plantas industriais, subestações e serviços em que a continuidade de funcionamento é um fator crítico [13].

Outra aplicação importante de tensão contínua são os sistemas de tração elétrica, sejam eles conectados à rede, como os trens metropolitanos, ou isolados, como veículos fora-de-estrada, locomotivas e navios. A simplicidade de controle de velocidade e torque das máquinas de corrente contínua faz com que seu uso continue, mesmo sendo um equipamento de manutenção mais complicada que as máquinas de corrente alternada. Além disso, a maioria dos veículos automotores

possui um sistema elétrico completo em baixa tensão contínua (12 ou 24V) para as funções de partida e suprimento de equipamentos de controle e acessórios.

O desenvolvimento da eletrônica de potência viabilizou a implantação de grandes sistemas de transmissão em corrente contínua (HVDC), com ganho de confiabilidade em relação aos sistemas em corrente alternada. A maioria dos sistemas de transmissão CC funcionam em configuração bipolo (dois condutores, um positivo e um negativo), tendo a terra como referência e caminho de circulação de corrente em caso de falha em um dos pólos, continuando a operar com metade da capacidade neste caso. Uma linha de transmissão CA, além de possuir três condutores (fases), deixa de operar em caso de falha (interrupção ou perda de isolamento) de algum deles [14],[4].

A geração de energia elétrica distribuída, com fontes que são inerentemente em tensão contínua, como os sistemas fotovoltaicos, ou sistemas que podem se beneficiar da flexibilidade de um barramento CC, como as turbinas eólicas, é um fator importante de impulso à concepção de sistemas em tensão contínua, principalmente em baixa tensão, que se beneficiam do baixo custo e maior diversidade de dispositivos de eletrônica de potência [16].

A possibilidade de armazenamento de energia e o conseqüente ganho em continuidade de operação mesmo na falta da rede de distribuição, importante, como comentado anteriormente, para diversos sistemas, tem motivado a concepção de microrredes para uso em edifícios e centros de processamento e armazenamento de dados. Há diversas iniciativas no sentido de padronizar equipamentos para uso nesses ambientes [15].

2.4 Interface entre os sistemas CA e CC

A interface entre as redes de distribuição em tensão alternada e em tensão contínua define, basicamente, a topologia e a operação dessa última. As principais opções para essa interface são apresentadas a seguir.

2.4.1 Retificadores não controlados

Os retificadores não controlados (a diodos) são as opções mais simples e de mais baixo custo para se obter uma rede em tensão contínua a partir de uma rede em tensão alternada (Fig. 2.6). No caso dos retificadores trifásicos, pode-se até prescindir do filtro capacitivo, considerando que a ondulação (*ripple*) da tensão contínua é relativamente baixa. Isso traz benefícios para o lado de tensão alternada com redução dos níveis de distorção harmônica da corrente quando comparados àqueles que se teria com o filtro capacitivo.

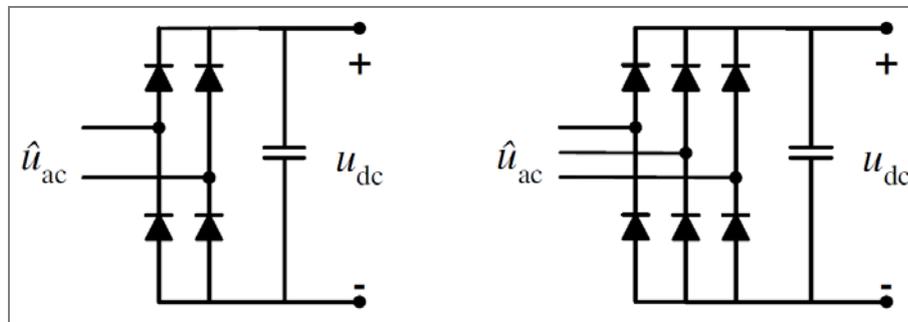


Figura 2.6 - Retificadores a diodos, monofásico (à esquerda) e trifásico (à direita) [16]

Com o filtro do lado CC, a tensão no barramento é igual ao valor de pico da tensão alternada de entrada. No retificador trifásico, sem o filtro, o valor médio da tensão retificada é aproximadamente 1,35 vezes o valor eficaz da tensão de linha de entrada [17].

O isolamento do sistema de tensão contínua pode ser conseguido com a instalação de um transformador entre o sistema de tensão alternada e o retificador. No caso das redes de distribuição, o retificador poderia ser instalado logo após o transformador abaixador.

A principal limitação desses conversores é a impossibilidade do fluxo de potência do sistema CC para o sistema CA, o que é desejável num cenário em que exista geração distribuída.

2.4.2 Retificadores com correção do fator de potência

A distorção harmônica produzida (e o conseqüente baixo fator de potência) dos retificadores de comutação natural apresentados anteriormente pode ser reduzida (e o fator de potência aumentado) pela inclusão de conversores CC-CC controlados no lado de tensão contínua. Isso é conseguido pelo controle da tensão no indutor através do chaveamento (em alta freqüência) dos transistores. As duas topologias mais simples, denominadas “*buck*” e “*boost*”, com retificador monofásico (que pode ser substituído por um trifásico) são mostradas na Fig. 2.7.

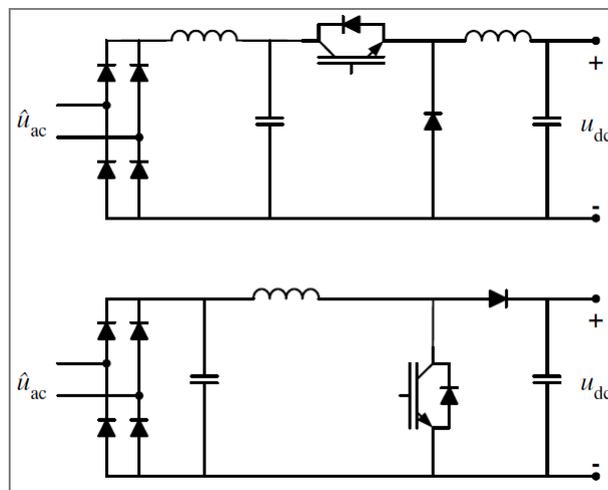


Figura 2.7 - Retificadores a diodos com correção do fator de potência: conversor *boost* (acima) e conversor *buck* (abaixo) [16]

No conversor *buck*, a máxima tensão no barramento CC é o valor de pico da tensão de entrada, enquanto que no conversor *boost*, esse é o valor mínimo. Devido à existência do retificador de comutação natural, não é possível o fluxo de potência do sistema CC para o sistema CA [16].

2.4.3 Conversor controlado de tensão (VSC) de dois níveis

O conversor trifásico controlado de tensão (“*voltage source converter*” ou VSC) é mostrado na Fig. 2.8. Esse conversor utiliza seis chaves (transistores com diodo de *roda livre*) e possibilita tanto o controle do fator de potência quanto o fluxo bidirecional de potência. Devido à comutação forçada das chaves, é necessária a existência de um filtro entre o conversor e a rede. Um transformador entre o

conversor e a rede de tensão alternada, além de proporcionar a isolação galvânica e redução dos níveis de tensão, pode funcionar como filtro devido à sua impedância de dispersão.

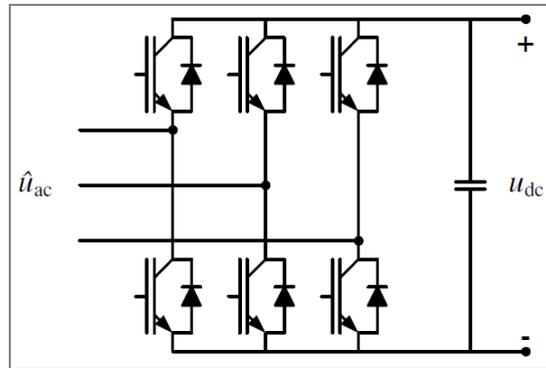


Figura 2.8 - Conversor controlado de tensão (VSC) de dois níveis [13]

O VSC operando como retificador, se comporta como um conversor *boost* e a mínima tensão no barramento CC é igual ao dobro do valor de pico da tensão fase-neutro da entrada [13], [16]. Numa rede de 220/127V, esse valor seria de aproximadamente 360V.

2.4.4 Conversor controlado de tensão (VSC) de três níveis

O VSC de três níveis (Fig. 2.9) utiliza doze chaves ativas para produzir duas tensões CC (u_{dc1} e u_{dc2}) que podem ser controladas individualmente. Além do controle do fator de potência e da possibilidade do fluxo bidirecional de potência, há três opções de conexão das cargas (entre positivo e a “terra”, entre a “terra” e o negativo ou entre o positivo e o negativo. Essa é uma característica interessante para uso em redes de distribuição, pois as cargas de maior potência podem ser alimentadas com uma tensão maior (o que reduz as perdas nos condutores de alimentação) e as cargas de baixa potência (equipamentos portáteis e iluminação, por exemplo) podem ser alimentadas com um nível de tensão menor e mais seguro para os utilizadores [18].

O controle individual das tensões do barramento CC permite a alimentação de cargas desequilibradas, que é normalmente o caso das redes de distribuição. Os valores mínimos das tensões u_{dc1} e u_{dc2} são iguais ao valor de pico da tensão fase-neutro da rede (algo em torno de 180V para uma rede de 220/127V) [19].

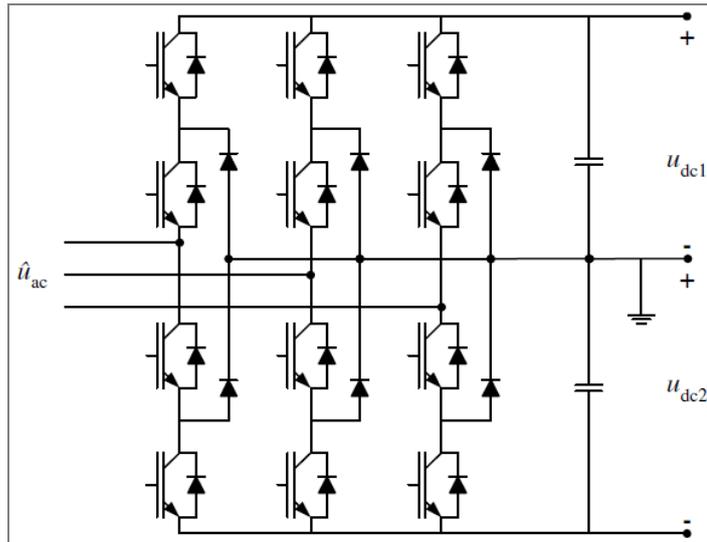


Figura 2.9 - Conversor controlado de tensão (VSC) de três níveis [16][13]

2.4.5 Conversor controlado de tensão (VSC) com circuito balanceador do ponto central do barramento CC

A adição de um quarto “braço” de chaves, um indutor e dois capacitores possibilita manter as tensões positiva e negativa do barramento CC balanceadas, mesmo na presença de cargas desequilibradas [19]. Esse circuito tem a vantagem de utilizar menos chaves que o VSC de três níveis. A Fig. 2.10 mostra esse conversor.

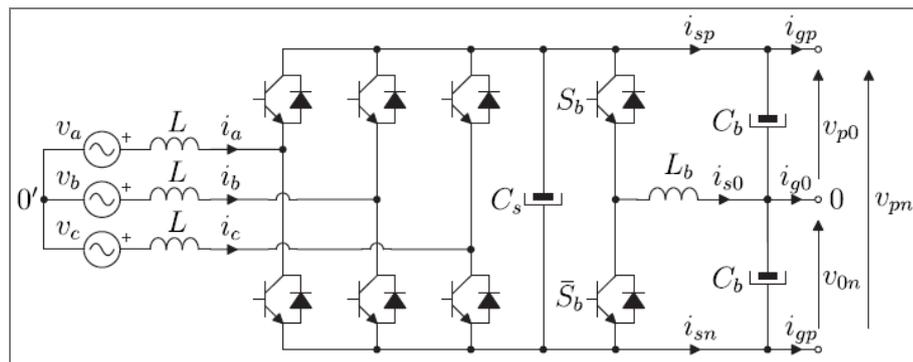


Figura 2.10 - VSC de dois níveis com balanceador do ponto central do barramento CC [19][13]

2.5 Configurações e níveis de tensão para os sistemas de distribuição em tensão contínua

De acordo com a norma ABNT NBR5410:2004 [20], os circuitos de corrente contínua podem ser unipolares (a dois condutores) ou bipolares (a três condutores). A distribuição a três condutores apresenta maior flexibilidade, mas exige medidas para manter as tensões no barramento CC balanceadas.

Vários níveis de tensão têm sido propostos para a distribuição em tensão contínua. Anand e Fernandes [21] discutem a aplicação de diversos níveis de tensão para microrredes CC, a saber:

- 48V: tensão utilizada em sistemas de telecomunicações;
- 120V: limite para extra baixa tensão em diversas normas, inclusive as da ABNT, o que significa requisitos mais simples de instalação considerando os riscos minimizados de conseqüências de choques elétricos;
- 230V: valor eficaz da tensão de fase na Europa (no Brasil há diversos valores, sendo os principais 127 e 220V), o que permite a operação dos equipamentos resistivos e com motores universais sem alteração em sua construção;
- 325V: valor de pico da tensão de fase na Europa (no Brasil os principais seriam 180 e 311V), que possibilita o funcionamento da maioria dos equipamentos eletrônicos sem alterações;
- 400V: tensão utilizada em alguns projetos de centros de processamento de dados.

A *Emerge Alliance* [15], consórcio formado por centros de pesquisa e fabricantes de equipamentos eletrônicos, iluminação e processamento de dados, desenvolveu padrões para distribuição CC em “espaços ocupados” (salas e escritórios, por exemplo) e para centros de processamento de dados e telecomunicações. No primeiro caso, utiliza-se a tensão de 24V e no segundo, 380V.

Kakigano e outros propuseram um sistema de distribuição para atendimento a uma área residencial no Japão em uma rede bipolar de $\pm 170V$ [22].

Heldwein propõe uma rede de distribuição bipolar com tensão de $\pm 320V$ [23], que pode ser obtida a partir de um VSC de três níveis ou de um VSC com

balanceador do ponto central do barramento CC alimentado em 380/220V, tensão de distribuição utilizada no estado de Santa Catarina.

Há uma proposta de implantar uma microrrede híbrida na Universidade Federal de Juiz de Fora com barramento unipolar de 320V, para integrar a geração fotovoltaica existente no campus e outras formas de geração às instalações elétricas de um edifício “sustentável” a ser construído [24].

2.6 Características básicas do sistema de distribuição em baixa tensão contínua proposto

A rede de distribuição em baixa tensão contínua que será objeto de estudo neste trabalho será unipolar, com tensão nominal de 320V, originada a partir de um retificador não controlado trifásico conectado ao transformador de distribuição.

O nível de tensão escolhido permite a operação de diversos equipamentos eletroeletrônicos disponíveis nas unidades consumidoras residenciais, sem alterações em seus circuitos de conexão à rede. As alterações necessárias nos demais equipamentos são discutidas no Capítulo 5 e incluem, na maioria dos casos, uma interface eletrônica (inversor de frequência ou conversor *buck*), que funciona bem a partir de um barramento CC com baixa ondulação (*ripple*) da tensão retificada, que é o caso daquele originado de um retificador de seis pulsos.

Entre as principais premissas dos sistemas de distribuição atuais estão a confiabilidade e o baixo custo de implantação e manutenção, que são plenamente atendidos por essa estratégia de conversão CA-CC. A escolha dessa topologia pode ser vista como um passo intermediário entre os sistemas atuais e uma rede ativa, no conceito de redes inteligentes (*smart grids*).

2.7 Considerações Finais

Nesse capítulo, foi apresentado um resumo histórico sobre a escolha dos sistemas em tensão alternada como a principal tecnologia de transmissão e distribuição de energia elétrica. Foram discutidos aspectos construtivos e de funcionamento dos sistemas em

tensão alternada e tensão contínua, além das possibilidades de integração entre redes de baixa tensão em tensão contínua aos sistemas de distribuição em tensão alternada.

Nos capítulos seguintes, será desenvolvido um modelo para uma rede de distribuição em baixa tensão de acordo com os padrões construtivos da CEMIG, considerando a variação da carga ao longo de um dia típico e o funcionamento dos equipamentos residenciais. Analisar-se-á a operação dessa rede em tensão alternada e contínua.

Capítulo 3

Modelagem de um Sistema de Distribuição em Baixa Tensão – Parte 1: Curvas de Carga

3.1 Considerações iniciais

A energia elétrica é a principal forma de energia usada no setor residencial no Brasil. A Figura 3.1, extraída do Balanço Energético Nacional de 2013- Ano Base 2012 [25], mostra a evolução do consumo de energia no setor residencial ao longo dos anos.

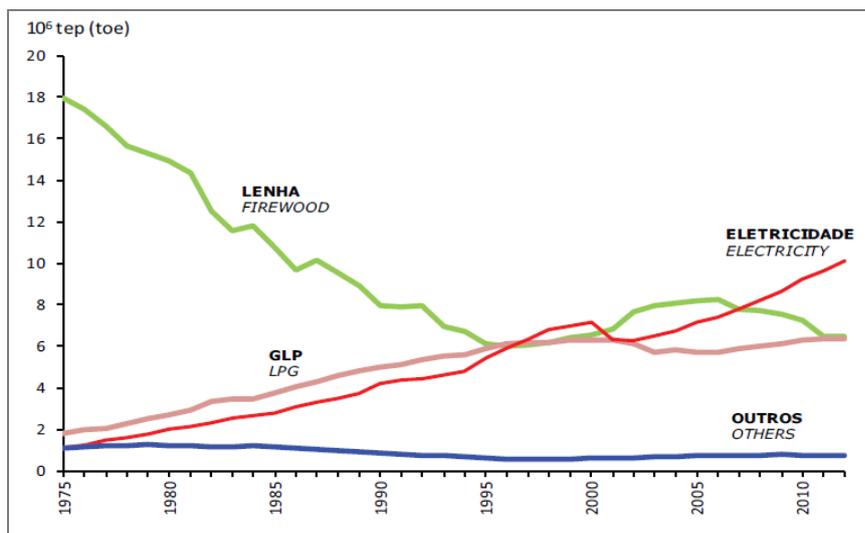


Figura 3.1 - Consumo Final do Setor Residencial [25]

O setor residencial foi responsável por 26,3% do consumo de toda a energia elétrica produzida no Brasil no ano de 2012 [26], sendo superado pelo setor industrial, com 40,9%. O crescimento da participação no consumo total foi de 5,1% para o setor residencial, contra -0,1% do setor industrial. O maior crescimento do setor residencial é devido às condições econômicas favoráveis relacionadas ao mercado de trabalho (emprego e renda), além do aumento do acesso à energia elétrica, sobretudo por parte da população de renda mais baixa. O consumo médio

residencial foi de 158,9 kWh/mês em 2012, registrando crescimento de 2,0% sobre o valor de 2011 [26]. Na região Sudeste, o consumo médio foi de 179,8 kWh/mês, contra 165 kWh/mês em 2008.

Em 2007, a Eletrobrás publicou o Relatório da Pesquisa de Posse de Eletrodomésticos e Hábitos de Uso - Classe Residencial, Região Sudeste - Ano Base 2005, no âmbito do Projeto de Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil. Esse relatório teve como base os dados de pesquisas de campo realizadas por consórcio formado pela PUC-Rio e Ecoluz, em projeto implementado dentro do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - PROCEL [27]. Como desdobramento desse projeto, foi elaborado o SINPHA - Sistema de Informação de Posses e Hábitos de Uso de Aparelhos Elétricos, sistema que apresenta os indicadores obtidos a partir dos dados das Pesquisas de Posse e Hábitos de Consumo de Energia - PPH, e possibilita cruzamentos desses dados e simulações da curva de carga.

Nesse capítulo, serão desenvolvidas curvas de carga para consumidores de um modelo de sistema de distribuição de energia elétrica em baixa tensão. Os pontos de partida para esse desenvolvimento serão os dados do Relatório da Pesquisa de Posse de Eletrodomésticos e Hábitos de Uso - Classe Residencial, Região Sudeste e do SINPHA e as características de consumo de equipamentos disponíveis no mercado, que por sua vez, serão modelados para simulação no Capítulo 4.

3.2 Área e Consumidores Atendidos

O modelo de sistema de distribuição de energia elétrica em baixa tensão desenvolvido nesse trabalho tem como objetivo o fornecimento de energia para 50 unidades consumidoras residenciais, distribuídas em uma área conforme a Fig. 3.2.

Considerando a terminologia adotada na norma ND-3.1 da CEMIG [11], trata-se de um circuito tipo 3, que tem origem em um transformador trifásico de 45 kVA. Esse circuito atende uma frente de quadra e metade das frentes de quadra adjacentes através de uma rede aérea com 13 postes. Nessa região, há 56 lotes com área de 360 m² cada (12x36m ou 15x24m), situação muito comum em Minas Gerais. As quadras

foram numeradas de 1 a 6 e os lotes em cada quadra de 1 a 22. Acima do número do lote, as letras A, B e C indicam o tipo de fornecimento conforme a norma CEMIG ND-5.1 [28]. O fornecimento tipo A é a dois condutores (fase e neutro), o tipo B a três condutores (duas fases e neutro) e o tipo C a quatro condutores (três fases e neutro). A sigla NC (não conectado) indica que o lote não possui unidade consumidora conectada ao sistema elétrico.

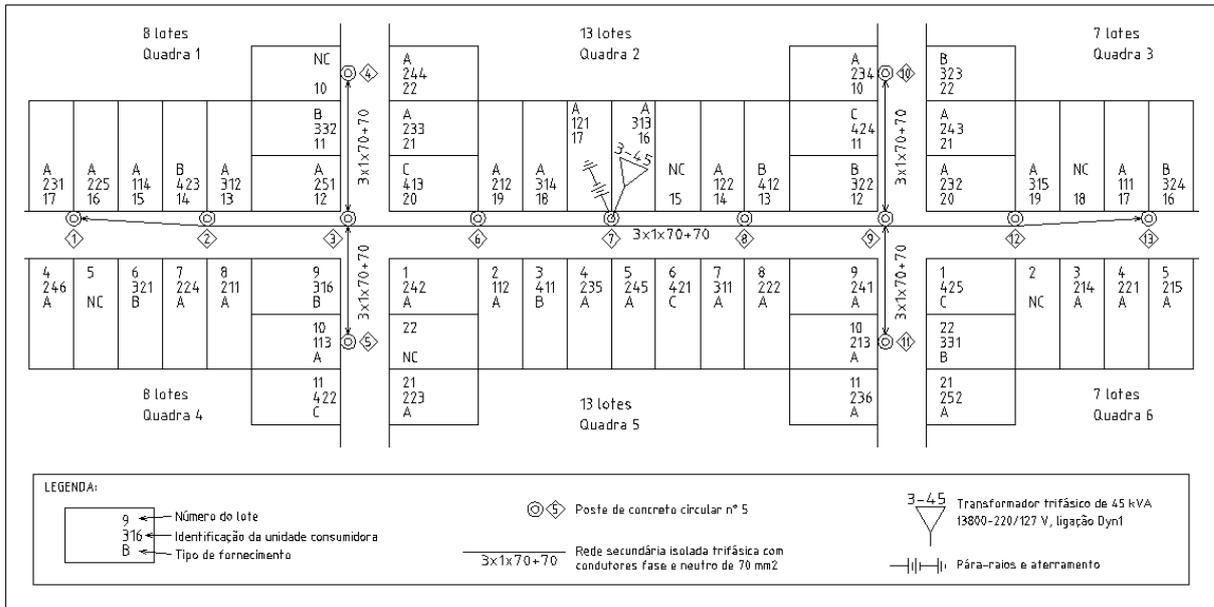


Figura 3.2 - Modelo de sistema de distribuição proposto – área e consumidores a serem atendidos

O tipo de fornecimento é definido pela concessionária com base na relação de cargas apresentada pelo consumidor quando do pedido de fornecimento de energia elétrica. Muitas vezes, ocorre aumento ou redução da carga instalada na unidade consumidora sem a devida alteração do tipo de fornecimento. Além disso, a carga instalada e o tipo de fornecimento não determinam de maneira final o consumo de energia elétrica. A Tabela 3.1 resume os dados de conexão dos consumidores considerados nesse modelo.

Tabela 3.1 - Dados dos consumidores do sistema de distribuição proposto

Poste	Quadra	Lote	Id	Carga Instalada (kW)	Consumo (kWh/mês)	Tipo de Fornecimento	Fases
1	1	16	225	7,21	100	A	S
		17	231	7,21	120	A	T
	4	4	246	7,21	150	A	R
		6	321	14,09	250	B	SR
2	1	13	312	14,09	180	A	R
		14	423	17,08	450	B	TS
		15	114	6,15	50	A	R
	4	7	224	7,21	100	A	T
		8	211	7,21	90	A	S
3	1	12	251	7,21	225	A	R
	2	20	413	17,08	275	C	RST
4	1	11	332	14,09	325	B	RT
	2	21	233	7,21	120	A	S
		22	244	7,21	150	A	T
5	4	9	316	14,09	180	B	RS
		10	113	6,15	50	A	T
		11	422	17,08	450	C	RST
	5	1	242	7,21	150	A	S
6	2	18	314	14,09	180	A	S
		19	212	7,21	90	A	T
	5	2	112	6,15	50	A	S
		3	411	17,08	275	B	TR
		16	313	14,09	180	A	T
7	2	17	121	6,15	75	A	S
		4	235	7,21	120	A	S
	5	5	245	7,21	150	A	R
		6	421	17,08	450	C	RST
8	2	13	412	17,08	275	B	ST
		14	122	6,15	75	A	T
	5	7	311	14,09	180	A	R
		8	222	7,21	100	A	R
9	2	12	322	14,09	250	B	RS
	3	20	232	7,21	120	A	T
10	2	10	234	7,21	120	A	R
		11	424	17,08	450	C	RST
	3	21	243	7,21	150	A	S
		22	323	14,09	250	B	ST
11	5	9	241	7,21	150	A	T
		10	213	7,21	90	A	S
		11	236	7,21	120	A	R
	6	1	425	17,08	450	C	RST
		21	252	7,21	225	A	S
12	3	22	331	14,09	325	B	TR
		19	315	14,09	180	A	T

	6	3	214	7,21	90	A	R
13	3	16	324	14,09	250	B	SR
		17	111	6,15	50	A	R
	6	4	221	7,21	100	A	S
		5	215	7,21	90	A	T

3.3 Posse de Equipamentos e Consumo de Energia Elétrica

Foram elaboradas quatro relações de carga, com equipamentos típicos de unidades consumidoras de baixa tensão, correspondentes aos valores totais de carga instalada citados na Tabela 3.1. As Tabelas 3.2 a 3.5 apresentam essas relações de carga.

Tabela 3.2 - Relação de cargas "1" - 6 consumidores

Descrição	Quantidade	Potência (W)	
		Unitária	Total
Refrigerador 270 litros	1	109,7	109,7
Lâmpada fluorescente compacta 20W/865	1	16,6	16,6
Lâmpada fluorescente compacta 25W/x65	2	26,0	51,9
Lâmpada incandescente 60W	2	60,0	120,0
Chuveiro elétrico 4600W	1	4600,0	4600,0
Televisor CRT 20"	1	49,3	49,3
Ferro de passar	1	1200,0	1200,0
Telefone celular (fonte de 5W)	1	5,1	5,1
Total			6,15 kW

Tabela 3.3 - Relação de cargas “2” – 24 consumidores

Descrição	Quantidade	Potência (W)	
		Unitária	Total
Refrigerador 270 litros	1	109,7	109,7
Lâmpada fluorescente compacta 20W/865	3	16,6	49,8
Lâmpada fluorescente compacta 25W/x65	2	26,0	51,9
Lâmpada incandescente 60W	2	60,0	120,0
Lâmpada incandescente 100W	1	100,0	100,0
Chuveiro elétrico 4600W	1	4600,0	4600,0
Televisor LCD 32"	1	123,0	123,0
Aparelho de som	1	38,6	38,6
Ferro de passar	1	1200,0	1200,0
Lavadora de roupas 9 kg	1	328,1	328,1
Microcomputador 1 (fonte de "400W")	1	139,2	139,2
DVD player	1	6,6	6,6
Telefone celular (fonte de 5W)	2	5,1	10,2
Liquidificador	1	331,4	331,4
Total			7,21 kW

Tabela 3.4 - Relação de cargas “3” – 12 consumidores

Descrição	Quantidade	Potência (W)	
		Unitária	Total
Refrigerador com freezer 320 litros	1	150,3	150,3
Lâmpada fluorescente compacta 20W/865	3	16,6	49,8
Lâmpada fluorescente compacta 23W/827	3	19,7	59,1
Lâmpada incandescente 60W	3	60,0	180,0
Lâmpada incandescente 100W	1	100,0	100,0
Chuveiro elétrico 4600W	2	4600,0	9200,0
Televisor LED 40"	1	60,5	60,5
Televisor LCD 32"	1	123,0	123,0
Aparelho de som	1	38,6	38,6
Ferro de passar	1	1200,0	1200,0
Lavadora de roupas 9 kg	1	328,1	328,1
Forno de microondas	1	1250,0	1250,0
Notebook com tela de 14,1" (fonte de 65W)	1	67,3	67,3
DVD player	1	6,6	6,6
Telefone celular (fonte de 5W)	2	5,1	10,2
Liquidificador	1	331,4	331,4
Aspirador de pó	1	934,2	934,2
Total			14,09 kW

Tabela 3.5 - Relação de cargas "4" - 8 consumidores

Descrição	Quantidade	Potência (W)	
		Unitária	Total
Refrigerador 270 litros	1	109,7	109,7
Refrigerador com freezer 320 litros	1	150,3	150,3
Lâmpada fluorescente compacta 20W/865	4	16,6	66,4
Lâmpada fluorescente compacta 23W/827	4	19,7	78,8
Lâmpada incandescente 60W	3	60,0	180,0
Lâmpada incandescente 100W	2	100,0	200,0
Chuveiro elétrico 5500W	1	5500,0	5500,0
Chuveiro eletrônico 5500W	1	5500,0	5500,0
Condicionador de ar 7500 BTU/h	1	880,0	880,0
Televisor LED 40"	1	60,5	60,5
Televisor LCD 32"	1	123,0	123,0
Aparelho de som	1	38,6	38,6
Ferro de passar	1	1200,0	1200,0
Lavadora de roupas 9 kg	1	328,1	328,1
Forno de microondas	1	1250,0	1250,0
Notebook com tela de 10,1" (fonte de 45W)	1	44,8	44,8
Microcomputador 2 (fonte de 275W)	1	73,4	73,4
DVD player	1	6,6	6,6
Receptor de TV via satélite	1	9,0	9,0
Telefone celular (fonte de 5W)	2	5,1	10,2
Liquidificador	1	331,4	331,4
Aspirador de pó	1	934,2	934,2
Total			17,03 kW

A sigla 865 após a potência nominal da lâmpada fluorescente compacta (LFC) significa que o seu índice de reprodução de cores (IRC) é maior que 80% e que sua temperatura de cor é de 6500K. A lâmpada de 23W tem, pois, temperatura de cor de 2700K. No rótulo da LFC de 25W considerada nessa dissertação não foi indicado o IRC. As lâmpadas incandescentes, os chuveiros, o ferro de passar roupas e o condicionador de ar tem suas potências especificadas no valor nominal. No caso dos demais equipamentos, os valores indicados foram medidos. Os microcomputadores possuem monitores LCD de 17" e a potência indicada se refere ao conjunto.

Entende-se como "posse" de um determinado tipo de equipamento a quantidade média de por unidade consumidora desse tipo de equipamento. Procurou-se, na elaboração das relações de carga apresentadas anteriormente, correlacionar a posse dos equipamentos por unidade consumidora com os dados da Pesquisa de Posse de

Eletrodomésticos e Hábitos de Uso - Classe Residencial, Região Sudeste – Ano Base 2005. A Tabela 6 apresenta os valores de posse considerados nesse trabalho e os da pesquisa.

Tabela 3.6 - Posse de Equipamentos

Equipamento	PPH – Procel - 2005	Modelo proposto
Refrigerador/freezer	1,24	1,16
Lâmpadas	8,71	8,92
Incandescentes	5,36	3,44
Fluorescentes	3,35	5,48
Chuveiro	1,10	1,40
Condicionador de ar	0,09	0,16
Televisor	1,46	1,40
Aparelho de som	0,73	0,88
Ferro de passar	0,94	1,00
Lava roupa	0,74	0,88
Microcomputador	0,24	1,04
Liquidificador	0,82	0,88
DVD player	0,20	0,88

A posse de refrigeradores (referidos como “geladeira”) na PPH-Procel 2005 foi somada com a de freezers (1,02 e 0,22, respectivamente). No modelo proposto, foram considerados um refrigerador convencional e um refrigerador com freezer embutido.

Considerando que após o racionamento de energia de 2001 e 2002 existe a tendência de substituição das lâmpadas incandescentes por outras de menor consumo, inclusive devido à proibição progressiva de sua fabricação [29], e que houve uma redução significativa do custo de lâmpadas fluorescentes compactas dessa época até os dias atuais, a relação entre os valores de posse dos dois tipos de lâmpadas foi invertida.

No estabelecimento de posse de DVD player, levou-se em conta que a posse de videocassetes (equipamentos que se tornaram obsoletos com o surgimento da tecnologia de gravação em mídia óptica digital) era de 0,41 equipamento por residência na PPH-Procel 2005. E a posse de microcomputadores no modelo considera o aumento da aquisição desse tipo de equipamento nos últimos anos.

A PPH-Procel 2005 considerou os consumidores em três faixas de consumo: faixa 1 (0-200 kWh/mês), faixa 2 (200-300 kWh/mês) e faixa 3 (acima de 300 kWh/mês).

Segundo a pesquisa, a distribuição dos consumidores da região Sudeste nas faixas de consumo é de 69%, 16,9% e 14,1% respectivamente. Nesta dissertação, foram considerados 12 valores de consumo, conforme a Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Faixas de consumo e quantidade de consumidores

Faixa de consumo	Consumo (kWh/mês)	Quantidade de consumidores		Relação de carga
		Unidades	%	
1 (0-200 kWh/mês)	50	4	68	1
	75	2		1
	90	5		2
	100	5		2
	120	6		2
	150	6		2
	180	6		3
2 (200-300 kWh/mês)	225	2	18	2
	250	4		3
	275	3		4
3 (acima de 300 kWh/mês)	325	2	14	3
	450	5		4

Considerando os respectivos valores de consumo e quantidade de consumidores conforme a Tabela 3.7, o consumo médio por residência será de 183,5 kWh/mês. Esse valor é próximo do esperado para 2013 na região Sudeste, considerando o valor de 2012 (179,8 kWh/mês) e a taxa de crescimento de 2011-2012 (cerca de 2%) [26].

3.4 Curvas de Carga Médias Diárias

O SINPHA - Sistema de Informação de Posses e Hábitos de Uso de Aparelhos Elétricos, conforme mencionado anteriormente, é um sistema de informação disponível na página do Procel na internet e possibilita simulações de curvas de carga médias de uso de equipamentos residenciais para o Brasil ou para cada uma das regiões. É possível selecionar um ou mais equipamentos e obter as curvas resultantes. A Fig. 3.3 mostra a curva de carga média diária para a região Sudeste com todos os equipamentos disponíveis no SINPHA.

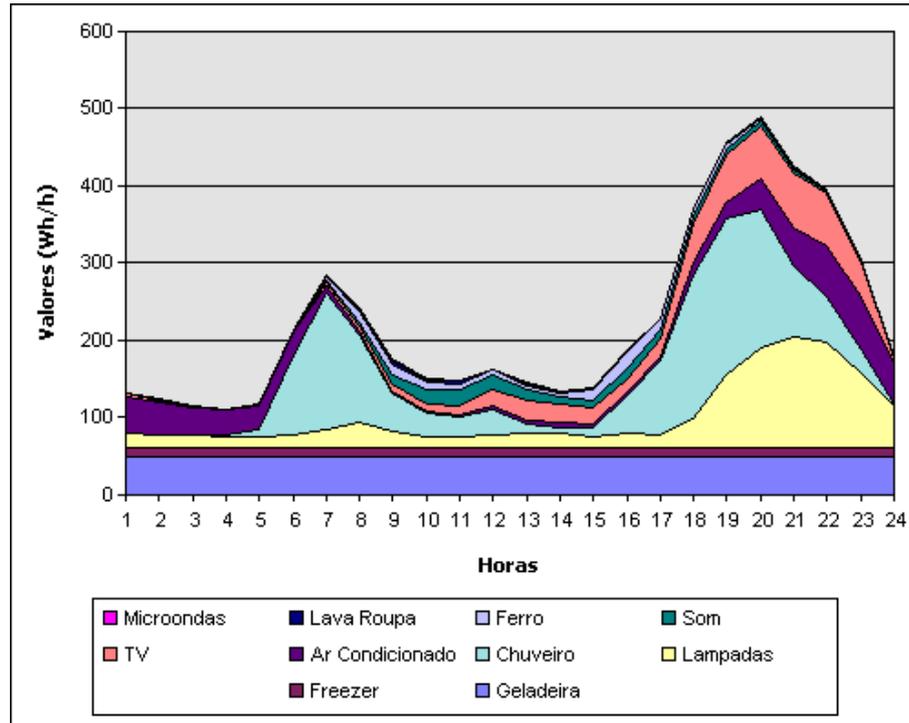


Figura 3.3 - Curva de carga diária média para a região Sudeste obtida no SINPHA

Considerando que demanda é a média da potência elétrica num dado intervalo de tempo, do ponto de vista do autor, o mais adequado é a apresentação dos valores na forma de degraus para cada intervalo, como é feito por Gönen [8]. A Fig. 3.4 apresenta, dessa forma, a curva de carga diária para a região Sudeste do SINPHA.

Os dados utilizados para a obtenção das curvas de carga do SINPHA para a região Sudeste foram cedidos pela Eletrobrás/Procel para a elaboração desse trabalho. Trata-se de valores de demanda para 24 intervalos de 1 hora, sendo o intervalo 1 iniciado às 0h0min1s e com término às 1h0min0s, ou seja, o número do intervalo designa a hora de término. A demanda média é de 226,2 W, que corresponde ao consumo mensal de 165,1 kWh. A demanda máxima é de 490,2 W, o que significa que o fator de carga médio no universo de consumidores pesquisados na região Sudeste foi de 0,461.

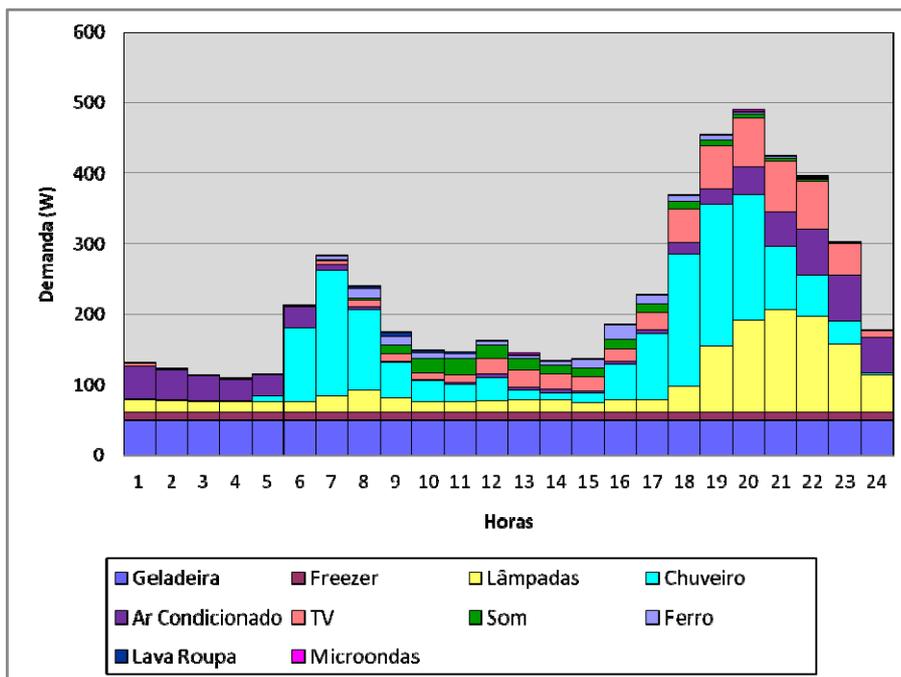


Figura 3.4 - Curva de carga diária média para a região Sudeste na forma de degraus

Devido ao aumento do consumo médio residencial nos últimos anos e à maior presença de equipamentos que não eram relevantes em termos de sua parcela de consumo na época da PPH-Procel, foram realizadas algumas alterações nos valores de demanda média diária fornecidos pelo Procel/Eletróbrás, a saber:

- Inclusão de "Microcomputador" entre os grupos de equipamentos de consumo, com demanda horária igual a 25% da soma da demanda dos grupos "TV" e "Som" (50% no intervalo 24);

- Inclusão do grupo "Outros", no qual foram incluídos e modelados um DVD player, um carregador de telefone celular, um receptor de TV via satélite, um liquidificador e um aspirador de pó; para os três primeiros a demanda corresponde à 5% da soma dos grupos "TV" e "Som" e para os demais a 25% da soma dos grupos "Ferro", "Lava Roupa" e "Microondas";

- Os grupos "Geladeira" e "Freezer" foram unificados e o novo grupo foi denominado "Refrigerador", com aumento de 5% na demanda;

- Os grupos "Chuveiro" e "Ferro" tiveram suas demandas aumentadas em 5%, os grupos "TV", "Som" e "Ar Condicionado" em 10% e os grupos "Lava Roupa" e "Microondas" em 50%.

de uso foi realizar defasamentos sucessivos no tempo entre as curvas de carga das unidades do mesmo grupo, considerando a quantidade dessas, conforme a Tabela 3.8. Dessa forma, pode-se dizer que cada unidade consumidora terá uma curva de carga distinta.

Tabela 3.8 - Intervalos entre curvas de carga de unidades com mesmo consumo

Quantidade de unidades consumidoras por grupo	Intervalo entre curvas de carga (minutos)
2	60
3	45
4	30
5	15
6	15

A partir das relações de carga e dos valores de consumo, os grupos de unidades consumidoras com mesmo perfil de curva de carga foram denominados de acordo com a Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Denominação dos grupos de unidades consumidoras com mesmo consumo

Nome do grupo	Relação de carga	Consumo (kWh/mês)	Quantidade de unidades consumidoras
11	1	50	4
12		75	2
21		90	5
22	2	100	5
23		120	6
24		150	6
25		225	2
31	3	180	6
32		250	4
33		325	2
41	4	275	3
42		450	5

Cada unidade consumidora foi então designada por um código formado por três algarismos, sendo os dois primeiros relativos ao grupo e o terceiro à seqüência temporal da curva de carga dentro do grupo. Assim, “323” designa um consumidor com relação de carga 3 (14,09 kW de carga instalada), consumo de 250 kWh/mês e com curva de carga atrasada de 1 hora em relação ao primeiro consumidor do grupo. Considerando a aleatoriedade de uso de energia elétrica por parte dos consumidores,

esses foram distribuídos de forma também aleatória, sendo a identificação (Id) de acordo com a Tabela 3.1.

Para exemplificar o processo de obtenção das curvas de carga individuais e dos grupos, utilizar-se-á o grupo 42. Esse grupo possui cinco consumidores com relação de carga 4 (carga instalada de 17,03 kW) e consumo mensal de 450 kWh cada. O consumidor 423 (quadra 1, lote 14, poste 2) é atendido pelo tipo de fornecimento B (duas fases e neutro), enquanto que os demais pelo tipo C (três fases e neutro). A curva de carga diária do consumidor 421, para 96 intervalos, é apresentada na Fig. 3.6.

A unidade consumidora “421” possui 33 equipamentos: dois refrigeradores, oito lâmpadas fluorescentes compactas, cinco lâmpadas incandescentes, dois chuveiros, um condicionador de ar, dois televisores, um aparelho de som, um ferro de passar, uma lavadora de roupas, um forno de microondas, dois microcomputadores, um DVD player, um receptor de TV via satélite, dois carregadores de telefone celular, um liquidificador e um aspirador de pó.

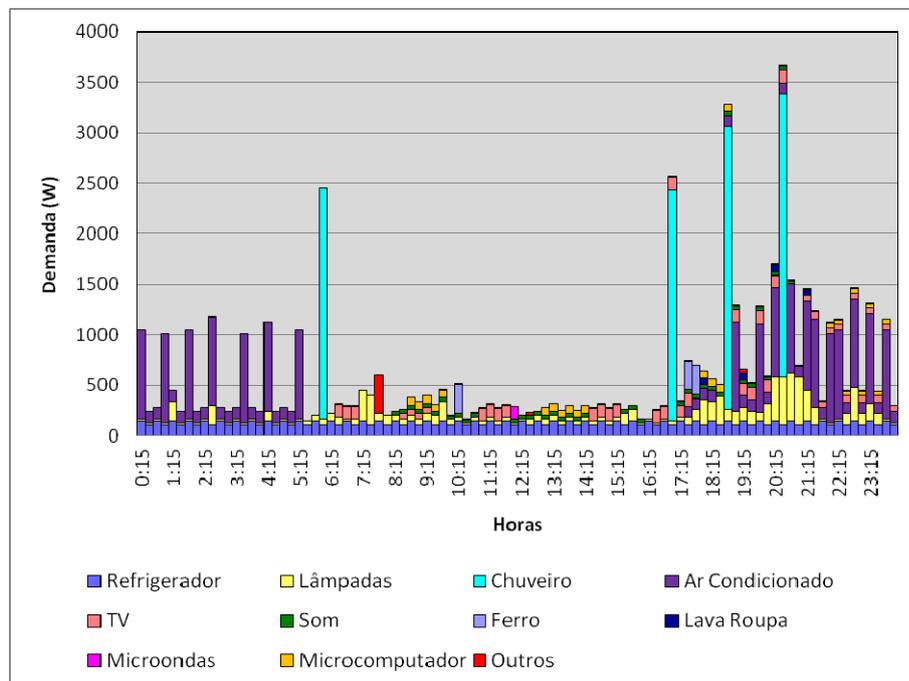


Figura 3.6 - Curva de carga diária do consumidor 421 – intervalo de demanda de 15 minutos

O estado de cada equipamento em cada intervalo é representado por 0 (zero) quando o equipamento está desligado e por 1 (um) quando o equipamento está ligado. Para essa unidade foi, então, construída uma matriz 33 x 96, na qual cada

linha está relacionada a um equipamento e cada coluna a um intervalo de tempo de 15 minutos. Muitos equipamentos são utilizados em intervalos normalmente inferiores a 15 minutos, como é o caso do forno de microondas, cujo intervalo de uso neste trabalho foi considerado de 1,5 minutos. No caso do chuveiro, além do intervalo de uso ser menor que 15 minutos (8 minutos), há a possibilidade de uso na posição inverno (potência nominal) ou verão (cerca de 60% da potência nominal) ou a variação contínua de potência no caso de controle eletrônico. Assim, a demanda de um equipamento para um dado intervalo de tempo T pode ser obtida a partir da Eq. 3.1:

$$D_T = \frac{T_{uso}}{T} F_d P_{nom} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

onde D_T é a demanda média no intervalo de tempo T ; T_{uso} é o período de utilização do equipamento; F_d é o fator de demanda; e P_{nom} é a potência nominal do equipamento.

O fator de demanda é definido como a relação entre a demanda máxima $D_{máx}$ de uma instalação ou equipamento e a sua carga instalada (C_{inst}) [8]:

$$F_d = \frac{D_{máx}}{C_{inst}} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

No caso de equipamentos, considera-se, normalmente, a carga instalada como sendo a sua potência nominal (P_{nom}).

O fator de carga é a relação entre a demanda média e a demanda máxima de uma instalação ou equipamento [8]:

$$F_c = \frac{D_{med}}{D_{máx}} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Na Eq. 3.1, a relação T_{uso}/T funciona como um fator de carga (F_c), já que o produto $F_d P_{nom}$ equivale à demanda máxima do equipamento.

Se o forno de microondas com potência de 1250W tiver sido ligado de 11:53:13 às 11:54:42h (1,5 minutos), sua demanda aparece no intervalo de 11:45:01 às 12:00:00h como 125W. Se o intervalo de integralização demanda for de 1 hora, o valor de demanda do forno de microondas será de 31,25W no intervalo de 11:00:01 às 12:00:00 h. Essa situação é representada na Fig. 3.7.

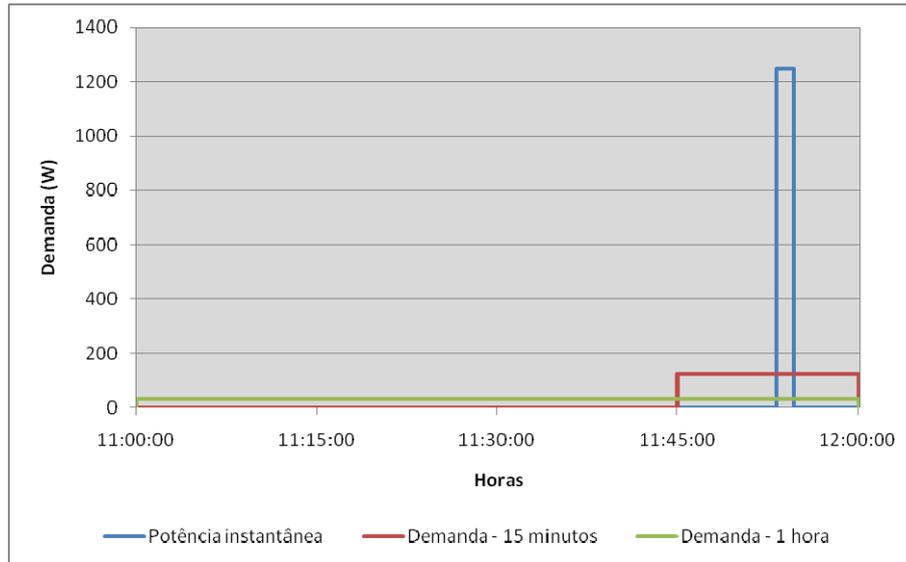


Figura 3.7 - Potência e demanda de um forno de microondas

Os fatores de demanda e de carga para intervalos de demanda de 15 minutos aplicados aos equipamentos da unidade consumidora 421 são apresentados na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 - Fatores de carga e demanda aplicados aos equipamentos da unidade 421

Equipamento	Fator de demanda	Fator de carga
Lâmpadas incandescentes	0,953	1,0
Chuveiro elétrico	0,953	0,533
Chuveiro eletrônico	0,780	0,533
Condicionador de ar (ventilação)	0,125	1,0
Condicionador de ar (refrigeração)	1,0	1,0
Ferro de passar	0,953	0,25
Lavadora de roupas	1,0	0,20
Forno de microondas	1,0	0,10
Liquidificador	1,0	0,10
Aspirador de pó	1,0	0,40

Para os demais equipamentos, os fatores foram considerados unitários. No caso dos equipamentos resistivos, o fator de demanda considera a redução da potência devido à aplicação de uma tensão inferior à nominal (124V em vez de 127V), o que é comum nas redes de baixa tensão devido à queda de tensão nas redes e transformadores, principalmente nos horários de maior carregamento. A demanda do condicionador de ar considerado neste trabalho é de 12,5% da sua potência nominal quando ocorre o desligamento do compressor (funcionamento apenas o ventilador). Para o chuveiro eletrônico (potência nominal de 5500W), considerou-se o ajuste da potência de entrada para 4500W. Os fatores de carga dos demais

equipamentos consideram os intervalos em que os equipamentos estão efetivamente ligados dentro do período de utilização, sendo, para os chuveiros, igual ao período de banho médio considerado pelo Inmetro (8 minutos) para a estimativa de consumo mensal [30].

Um dos problemas da representação da curva de carga em intervalos de demanda, além da eventual perda da informação do valor de pico, é a perda da informação do período real de utilização de determinado equipamento. Quanto maior o número de intervalos, menores são os erros cometidos, daí a escolha do uso de 96 intervalos para as simulações envolvendo as curvas de carga diárias neste trabalho. Considerando que a curva de carga de referência parte dos dados do SINPHA, que utiliza intervalo de demanda de 1 hora (24 intervalos para o dia), a maioria dos resultados será apresentada com esse intervalo. Neste caso, a curva de carga diária do consumidor 421 é apresentada na Fig. 3.8.

A curva de carga com intervalo de demanda de 15 minutos apresenta demanda máxima de 3.666,1 W de 20:15:01 às 20:30:00h e demanda média de 616,4W. O fator de carga é de 0,168. Se o intervalo de integralização de demanda for de 1 hora, a demanda máxima passa a ser de 1.904,7W de 20:00:01 às 21:00:00h e o fator de carga passa a ser de 0,324.

A agregação das curvas de carga dos consumidores do grupo 42 para o intervalo de demanda de 15 minutos é apresentada na Fig. 3.9. Observa-se que a diversidade de uso, modelada por simples deslocamentos sucessivos de curvas de carga semelhantes, melhora muito o fator de carga, que passa a ser de 0,339. A demanda máxima diversificada do grupo para a ser de 9.080W e ocorre no intervalo de 21:00:01 às 21:15:00h. A demanda média é de 3.082W ($5 \times 616,4W$) e o fator de carga é de 0,339.

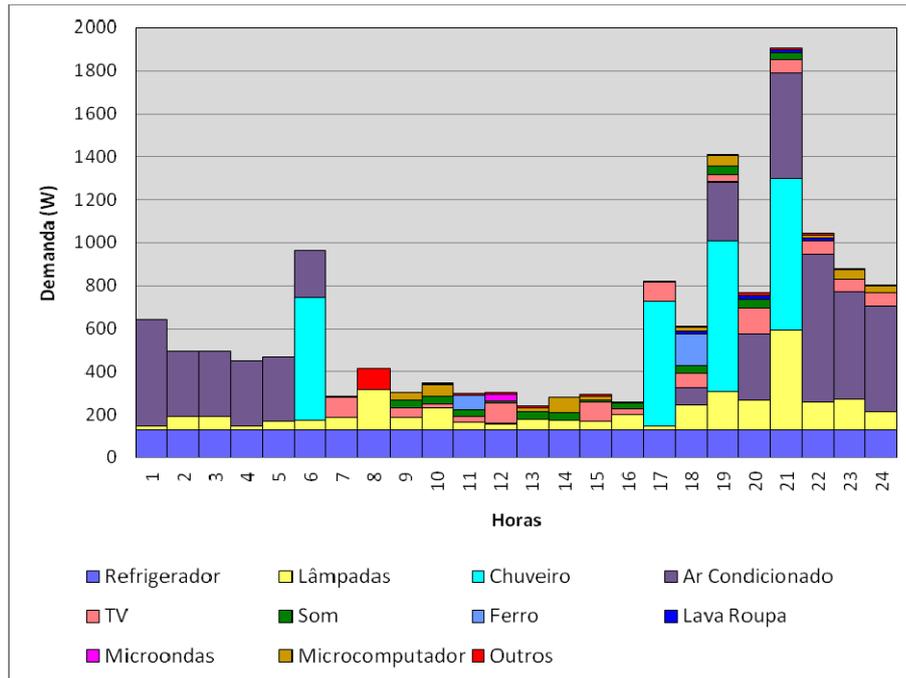


Figura 3.8 - Curva de carga diária do consumidor 421 – intervalo de demanda de 1 hora

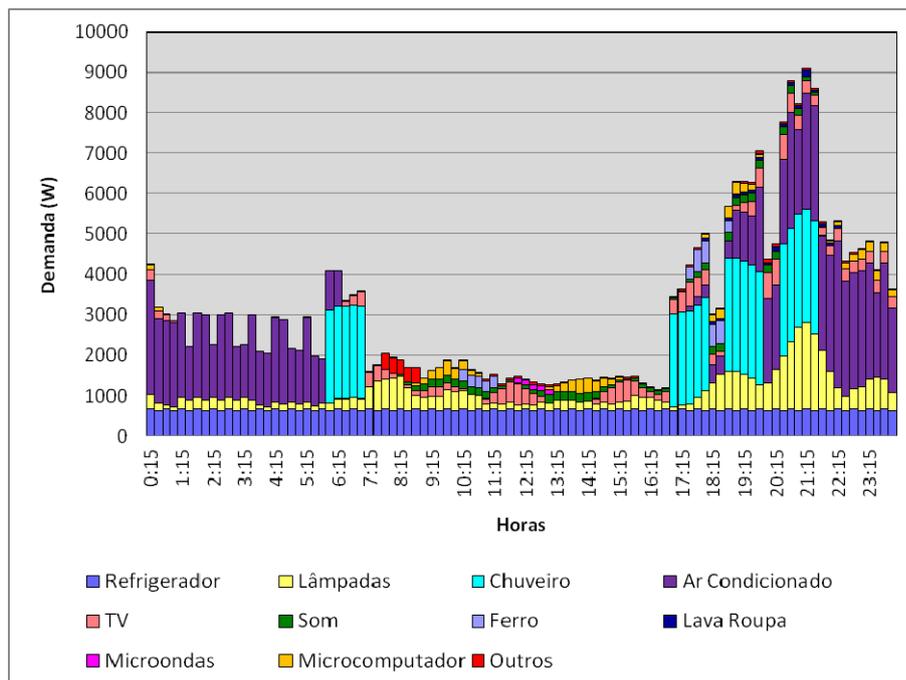


Figura 3.9 - Curva de carga diária do grupo 42 – intervalo de demanda de 15 minutos

Se o intervalo de integralização de demanda for de 1 hora, a curva de carga do grupo 42 passa a ser conforme apresentada na Fig. 3.10. Nesse caso, a demanda máxima passa a ser de 7.391W no intervalo de 20:00:01 às 21:00:00h. O fator de carga é de 0,417, próximo daquele obtido na pesquisa PPH-Procel (SINPHA) para a região Sudeste (0,461).

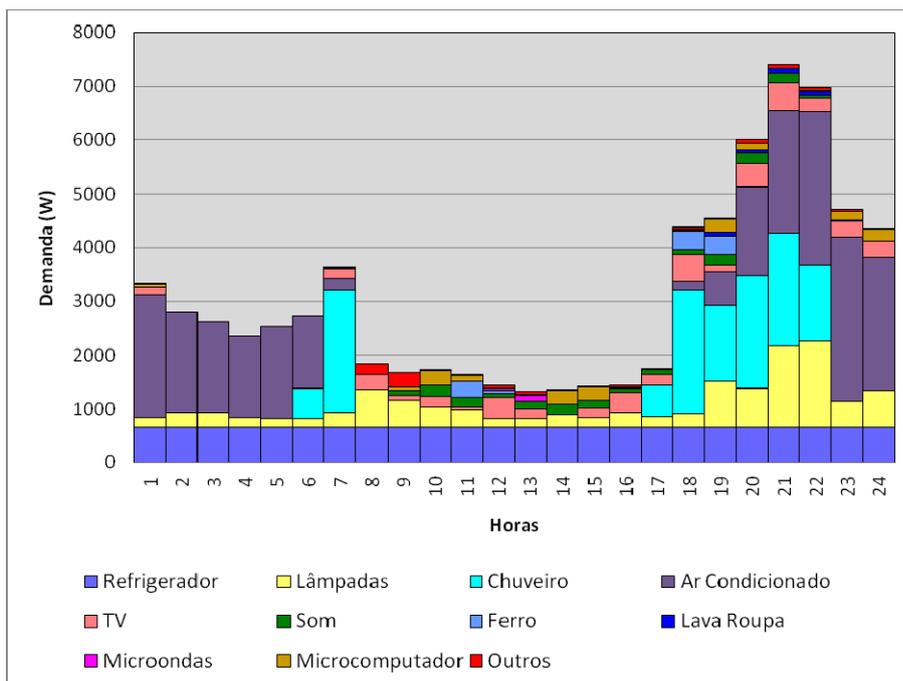


Figura 3.10 - Curva de carga diária do grupo 42 - intervalo de demanda de 1 hora

O mesmo processo foi realizado para os demais grupos, sendo as curvas de carga com intervalos de demanda de 1 hora apresentadas nas Fig. 3.11 a 3.16.

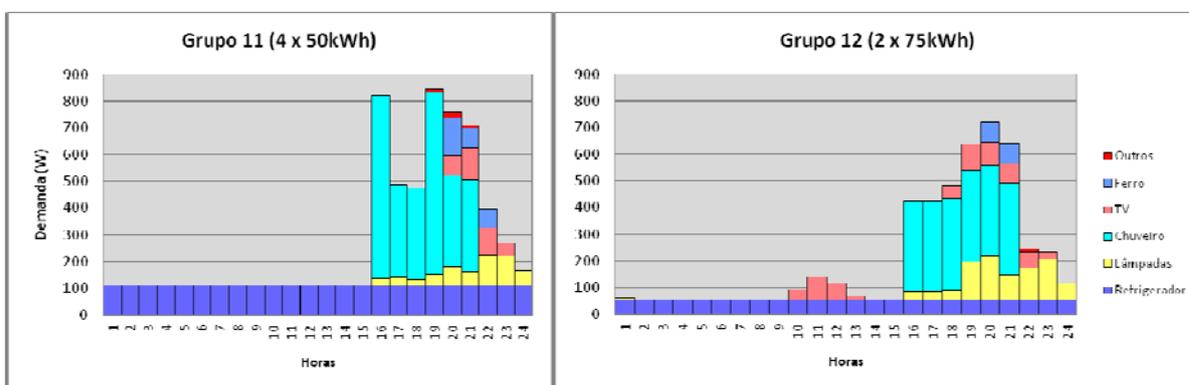


Figura 3.11 - Curva de carga diária dos grupos 11 e 12 - intervalo de demanda de 1 hora

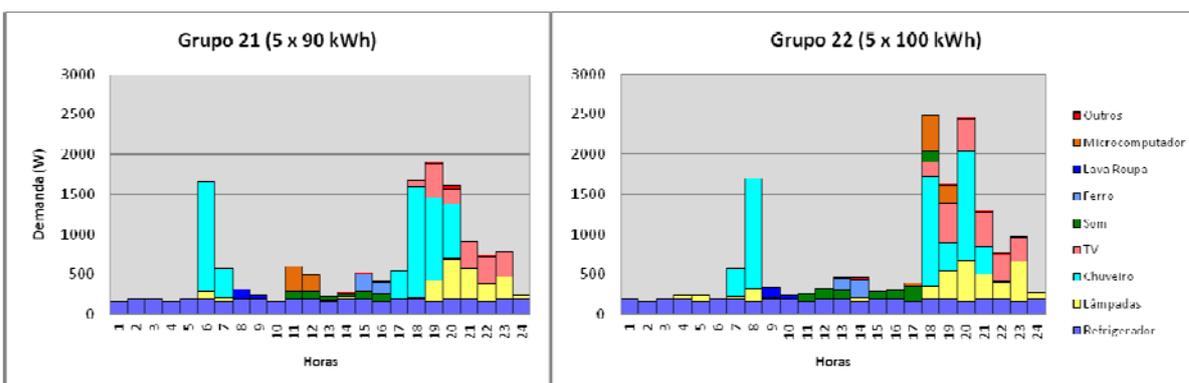


Figura 3.12 - Curvas de carga diárias dos grupos 21 e 22 - intervalo de demanda de 1 hora

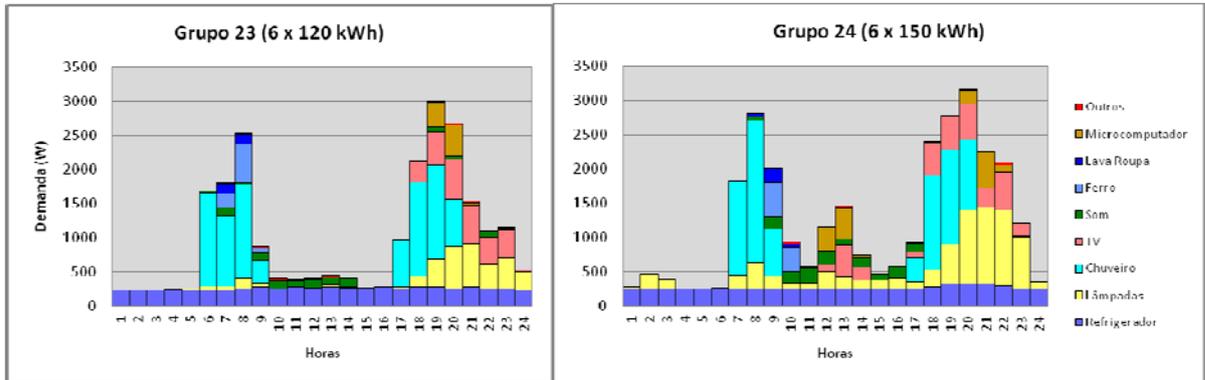


Figura 3.13 - Curvas de carga diárias dos grupos 23 e 24 – intervalo de demanda de 1 hora

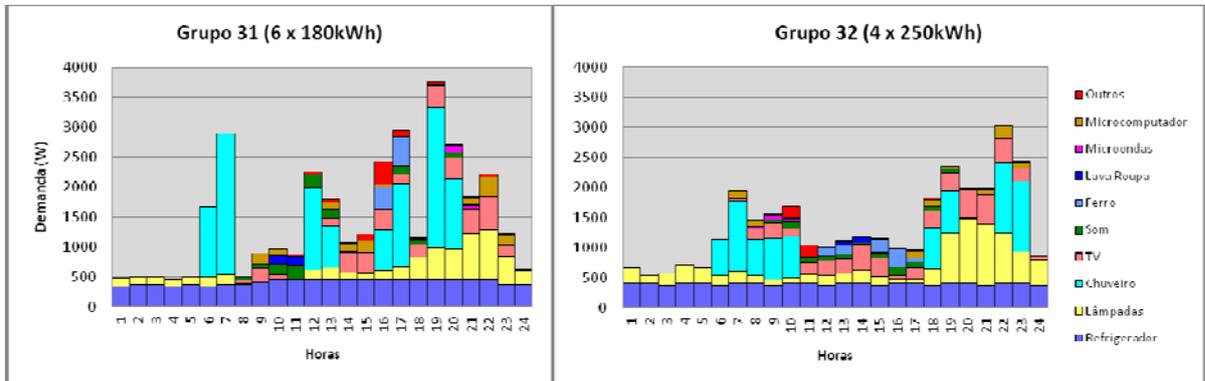


Figura 3.14 - Curvas de carga diárias dos grupos 31 e 32 – intervalo de demanda de 1 hora

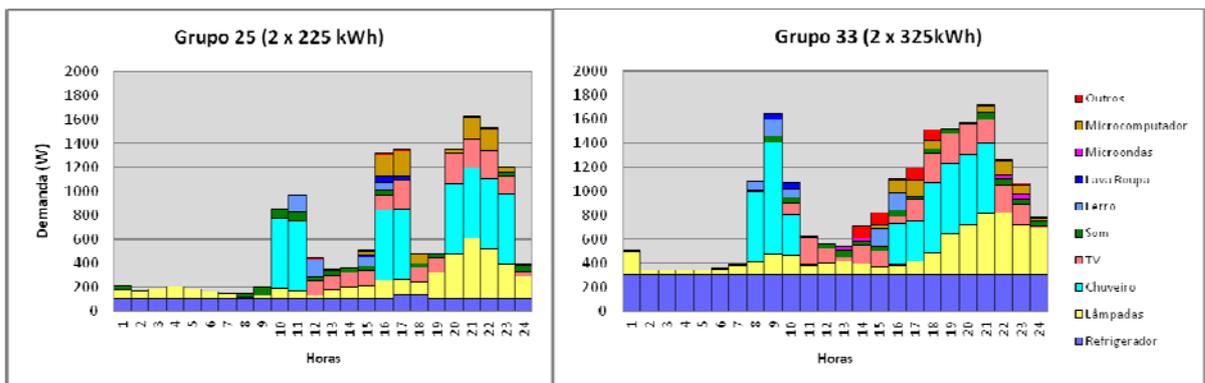


Figura 3.15 - Curvas de carga diárias dos grupos 25 e 33 – intervalo de demanda de 1 hora

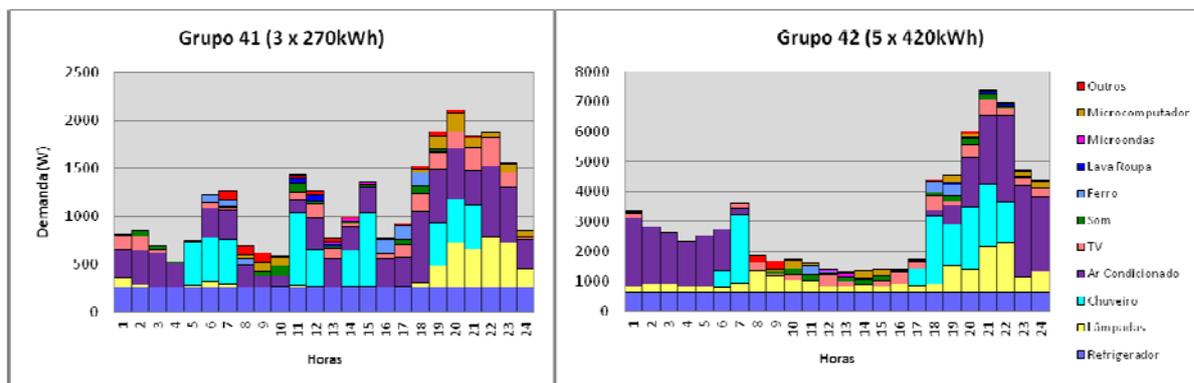


Figura 3.16 - Curvas de carga diárias dos grupos 41 e 42 - intervalo de demanda de 1 hora

A curva de carga resultante para o circuito, considerando todos os grupos acima é apresentada na Fig. 3.17.

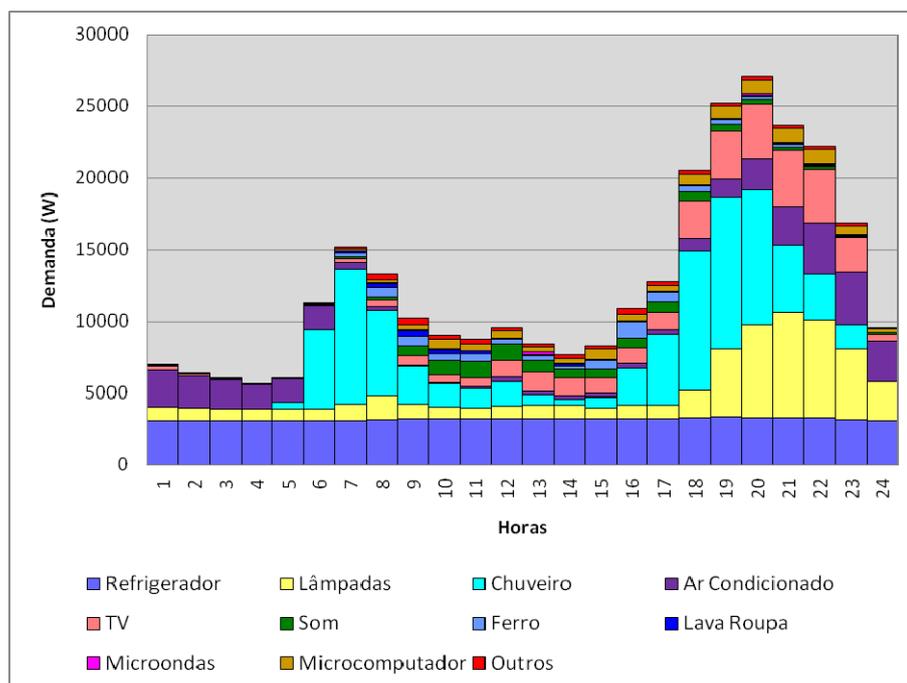


Figura 3.17 - Curva de carga resultante para o sistema de distribuição proposto

O formato dessa curva é bastante próximo ao da curva de carga definida como objetivo na seção 3.4 (Fig. 3.5). As demandas máxima e média são iguais a 27.101W e 12.567W, respectivamente. Se os valores de demanda máxima e média da curva de carga objetivo forem multiplicarmos por 50 (que é o número de consumidores do sistema proposto), obtém-se 27.100W e 12.565W, respectivamente, o que mostra que em termos desses valores obteve-se boa aproximação entre as duas curvas. Na seção seguinte, serão analisadas as curvas de carga por equipamento.

3.6 Curvas de Carga para os Equipamentos do Sistema de Distribuição Proposto

O processo de obtenção das curvas de carga para os consumidores apresentado na seção 3.5 passou pela definição das curvas de carga de cada um dos equipamentos. Procurou-se a melhor aproximação entre os valores de demanda horária de cada um dos equipamentos da curva de carga objetivo (extrapolada para 50 consumidores) e a agregação das curvas dos equipamentos das unidades consumidoras do sistema de distribuição proposto. A modelagem detalhada dos equipamentos será objeto de estudo do Capítulo 4. Nesta seção, assim como nas demais deste capítulo, a análise limitar-se-á aos valores de demanda de potência ativa.

Os valores percentuais de participação na demanda média e, conseqüentemente, no consumo de energia para os equipamentos, por tipo, são apresentados na Tabela 3.11, considerando a pesquisa PPH-Procel (SINPHA), a curva de carga diária média “objetivo” e a curva de carga diária média obtida na seção anterior.

Tabela 3.11 - Participação dos equipamentos da demanda média

Equipamento	Participação (%)		
	SINPHA	Curva “objetivo”	Modelo proposto
Refrigerador	26,73	25,27	25,26
Lâmpadas	18,68	16,82	16,86
Incandescentes	13,61	-	8,01
Fluorescentes	5,07	-	8,85
Chuveiro	27,16	25,69	25,67
Ar Condicionado	10,65	10,54	10,54
Televisores	10,22	10,12	10,12
Som	3,35	3,32	3,32
Ferro de passar	2,56	2,42	2,42
Lava Roupa	0,50	0,68	0,69
Forno de microondas	0,15	0,22	0,23
Microcomputador	-	3,41	3,41
Outros	-	1,52	1,49

O equipamento com maior participação no consumo médio residencial de energia na região Sudeste é o chuveiro elétrico, seguido pelo refrigerador e pela iluminação. A participação relativa de cada tipo de equipamento no consumo de energia (demanda média) dos consumidores de cada um dos grupos do modelo desenvolvido neste trabalho é apresentada na Fig. 3.18.

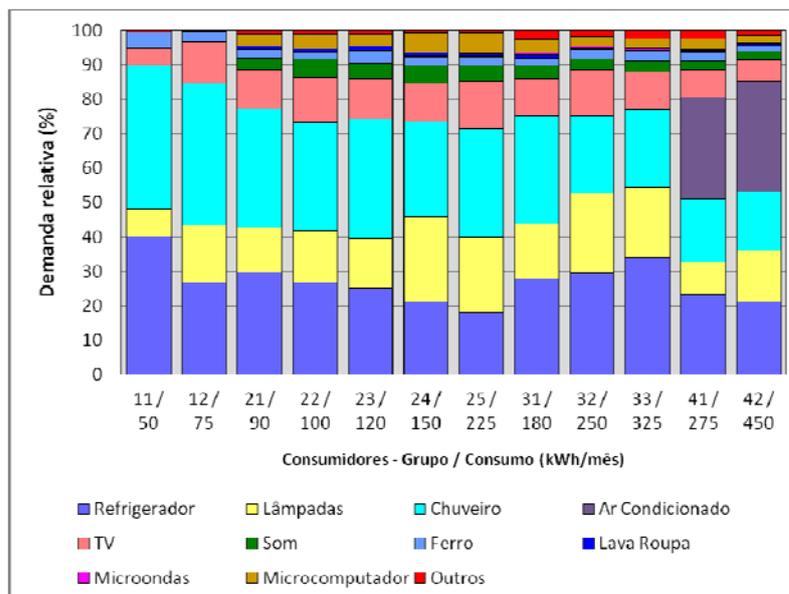


Figura 3.18 - Participação relativa dos equipamentos na demanda média dos tipos de consumidores

No caso dos chuveiros elétricos, as curvas de demanda média diária são apresentadas na Fig. 3.19. Os períodos de maior utilização desse equipamento se concentram no final da madrugada e início da manhã (entre 5 e 8 horas) e no final da tarde e parte da noite (16 às 21 horas). Trata-se, pois, de um equipamento com baixo fator de carga (0,305).

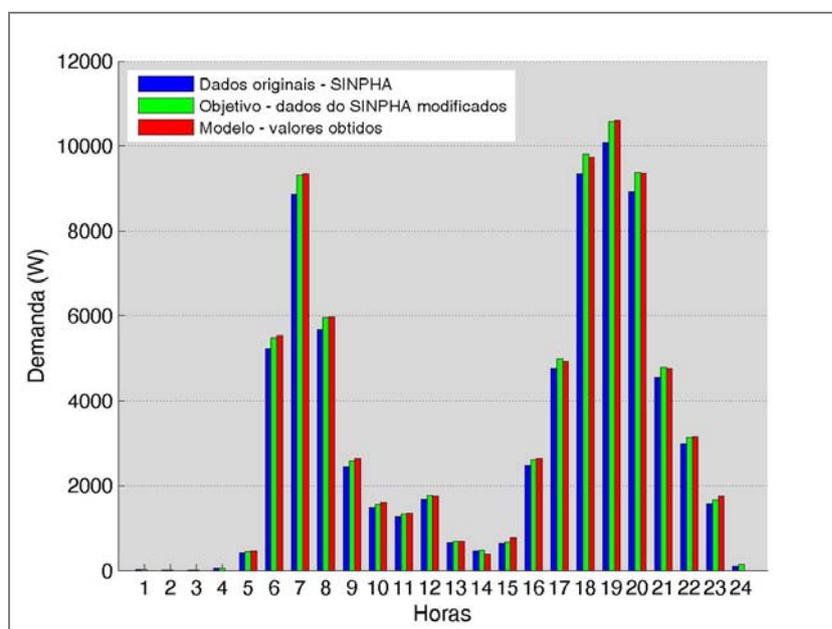


Figura 3.19 - Curvas de demanda média diárias para os chuveiros

Por outro lado, os refrigeradores, que são o segundo tipo de equipamento com maior participação no consumo residencial na região Sudeste, possuem alto fator de

carga (próximo da unidade). Em alguns dos grupos de consumidores, foi considerado de forma aproximada o efeito da abertura da porta no consumo, com o aumento do consumo nos períodos de maior utilização (e redução do fator de carga para 0,959). Na Fig. 3.20, são mostradas as curvas de carga médias diárias para os refrigeradores.

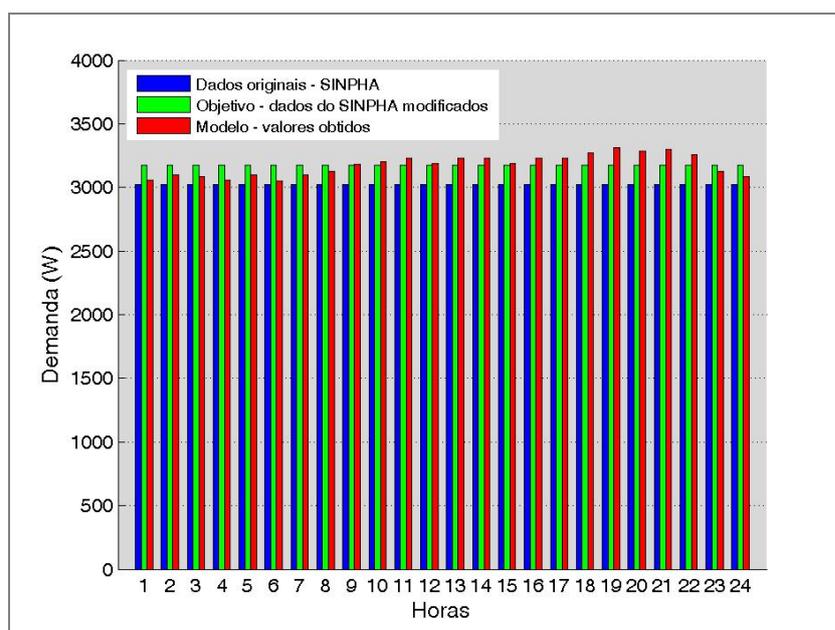


Figura 3.20 - Curvas de demanda média diárias para os refrigeradores

Os valores “objetivo” para a iluminação foram considerados iguais aos da pesquisa PPH-Procel (SINPHA), mesmo tendo-se verificado um aumento de cerca de 11,14% no consumo médio residencial da época da pesquisa até 2013. A razão dessa escolha reside no fato de que o aumento da participação da iluminação fluorescente concorre para aumentar a eficiência energética nesse tipo de utilização final da eletricidade. A Fig. 3.21 apresenta as curvas diárias de iluminação. Devido natureza de sua utilização, a iluminação elétrica apresenta baixo fator de carga (0,291).

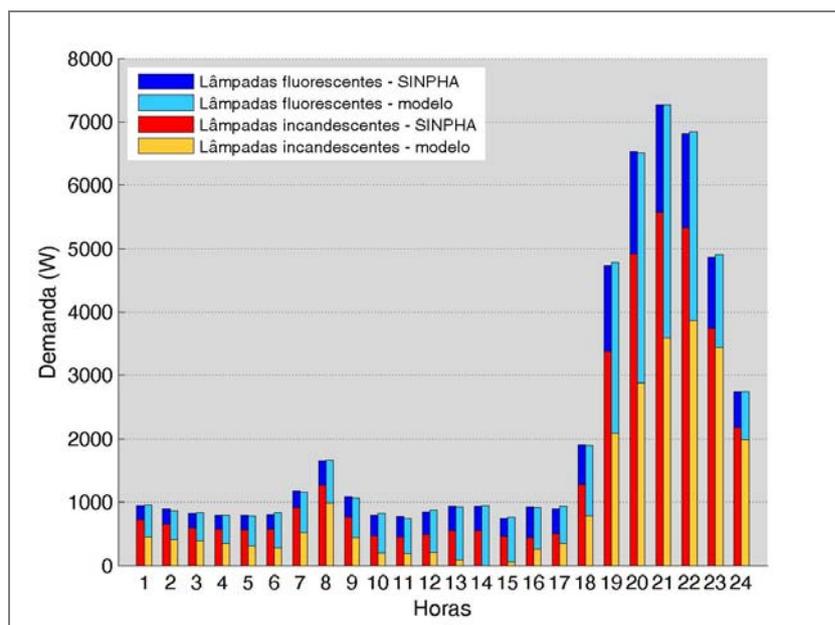


Figura 3.21 - Curvas de demanda média diárias de iluminação

Apesar de a posse média de condicionadores de ar obtida pelo Procel na pesquisa realizada em 2005 ser baixa (presente em cerca de 9% das residências), esse tipo de equipamento ocupa o quarto lugar em termos do consumo de energia elétrica residencial. Nas regiões Leste e Norte de Minas Gerais, o uso desse equipamento influencia de maneira significativa as curvas de carga dos alimentadores, como mostrado na Fig. 3.22 para um alimentador de 13,8 kV com carga tipicamente residencial no município de Governador Valadares. Nota-se que os intervalos de maior demanda ocorrem entre 22h e 1h, horário em que as pessoas vão dormir e ligam os condicionadores de ar.

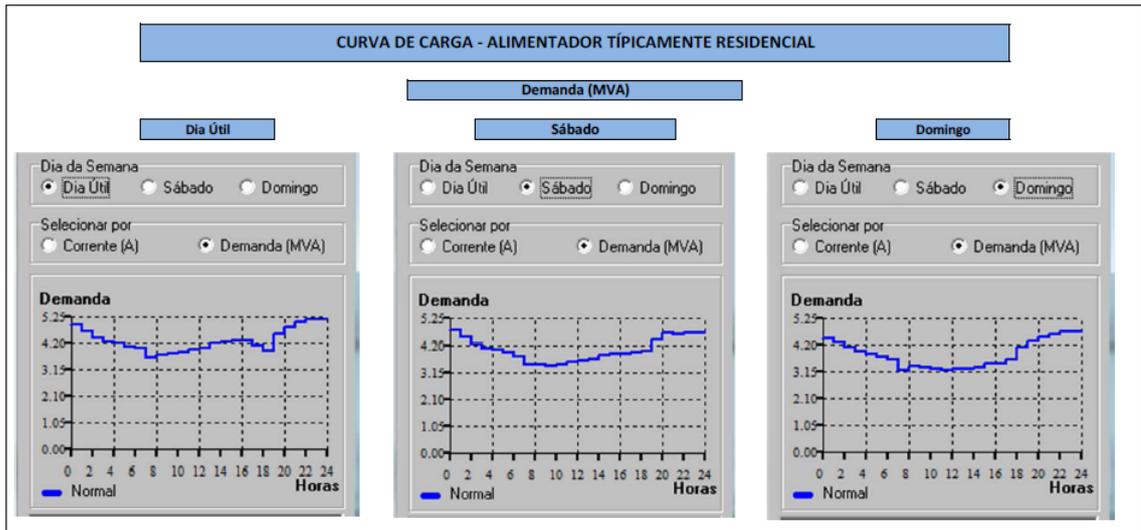


Figura 3.22 - Curvas de carga de um alimentador de 13,8 kV de Governador Valadares/MG (dados fornecidos pela CEMIG)

No modelo proposto, a posse desse equipamento é de 16%, ou seja, 8 consumidores possuem um condicionador de ar cada. Além disso, foi considerado um aumento de 10% no consumo médio em relação àquele da pesquisa do Procel. As curvas de carga para os condicionadores de ar são apresentadas na Fig. 3.23. O fator de carga dos condicionadores de ar (0,360 no SINPHA e 0,365 no modelo proposto) é um pouco melhor que os referentes aos chuveiros e à iluminação.

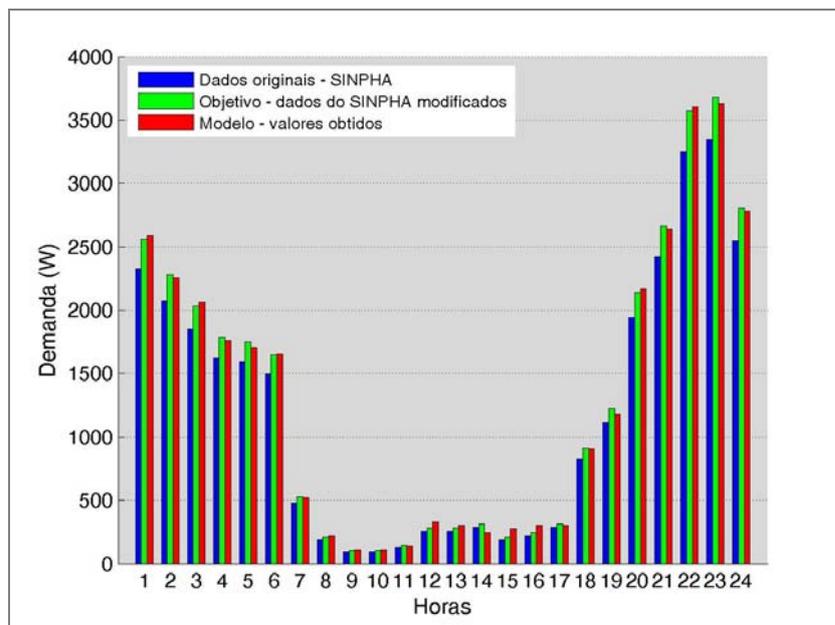


Figura 3.23 - Curvas de demanda média diárias para os condicionadores de ar

Outro equipamento que tem uma participação razoável no consumo de energia elétrica das residências é o televisor, com mais de 10%. As curvas de carga desses equipamentos são apresentadas na Fig. 3.24. O fator de carga do uso desses equipamentos é de cerca de 0,325.

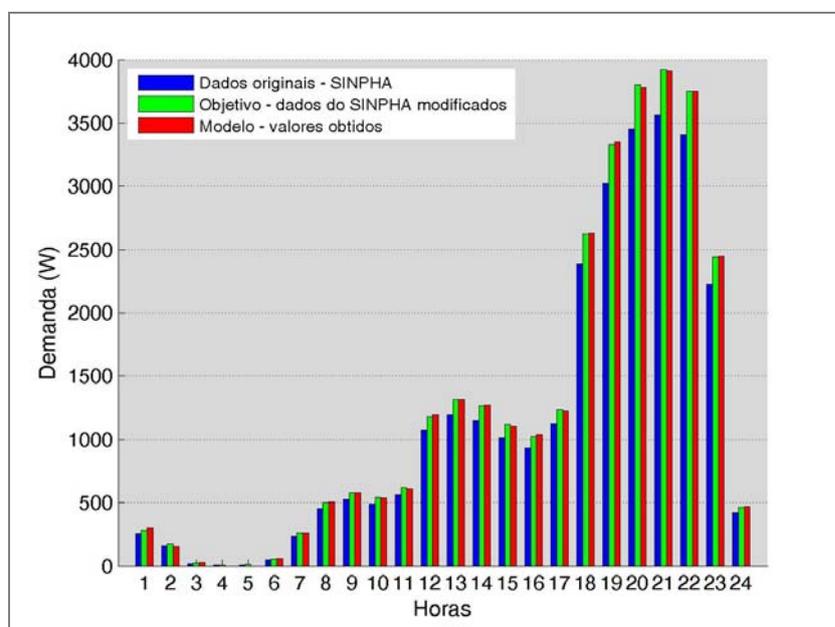


Figura 3.24 - Curvas de demanda média diárias para os televisores

A Figura 3.25 mostra a curva de demanda para os aparelhos de som. Esses equipamentos possuem um fator de carga de 0,35, um pouco melhor que os televisores, além de uma boa diversidade de uso em relação aos últimos.

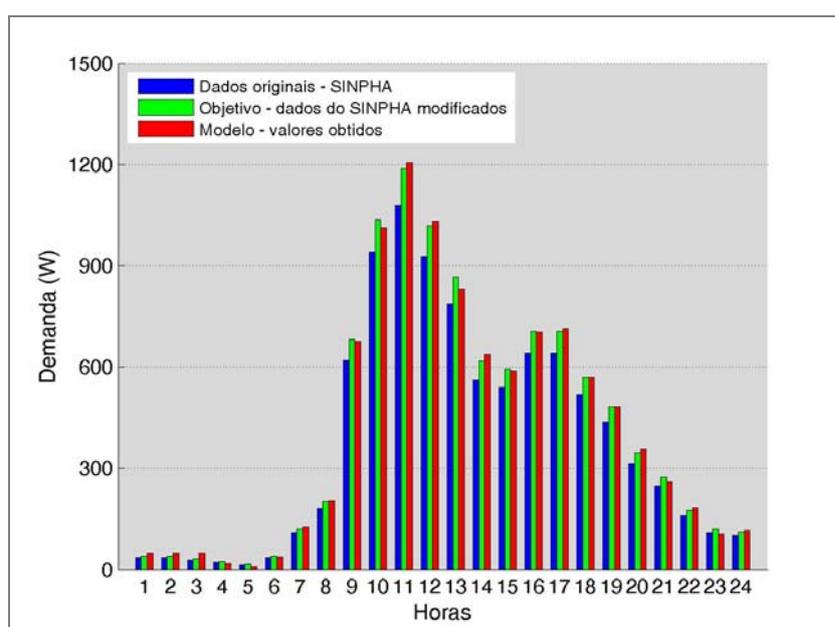


Figura 3.25 - Curvas de demanda média diárias para os aparelhos de som

Nas Figuras 3.26 a 3.28 são apresentadas as curvas de demanda para os ferros elétricos de passar, máquinas de lavar roupa e fornos de microondas. Esses equipamentos são utilizados de forma menos contínua que os demais, o que ocasiona fatores de carga baixos. Os fatores obtidos no modelo foram de 0,266 para os ferros de passar; 0,212 para as máquinas de lavar e 0,153 para os fornos de microondas, ligeiramente melhores que os da pesquisa do Procel (0,259; 0,204 e 0,126, respectivamente).

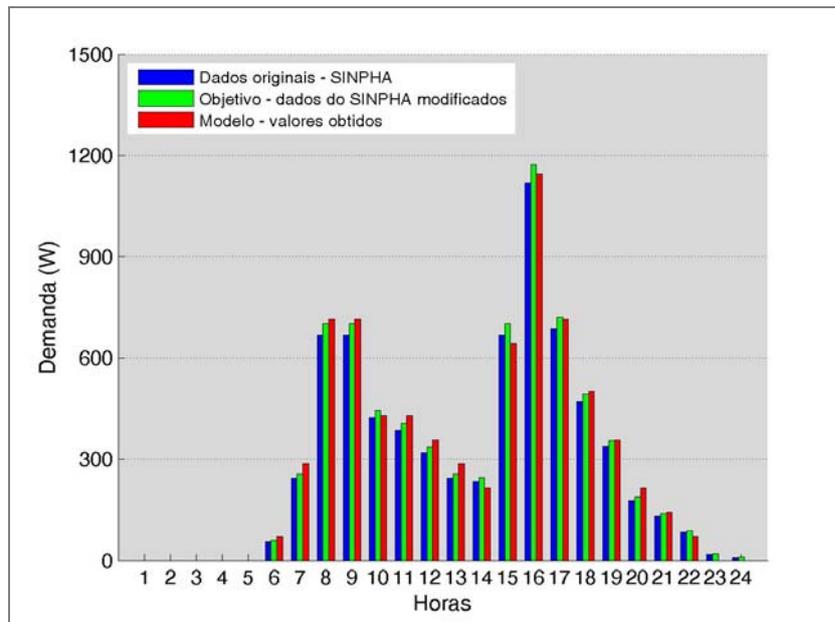


Figura 3.26 - Curvas de demanda média diárias para os ferros de passar

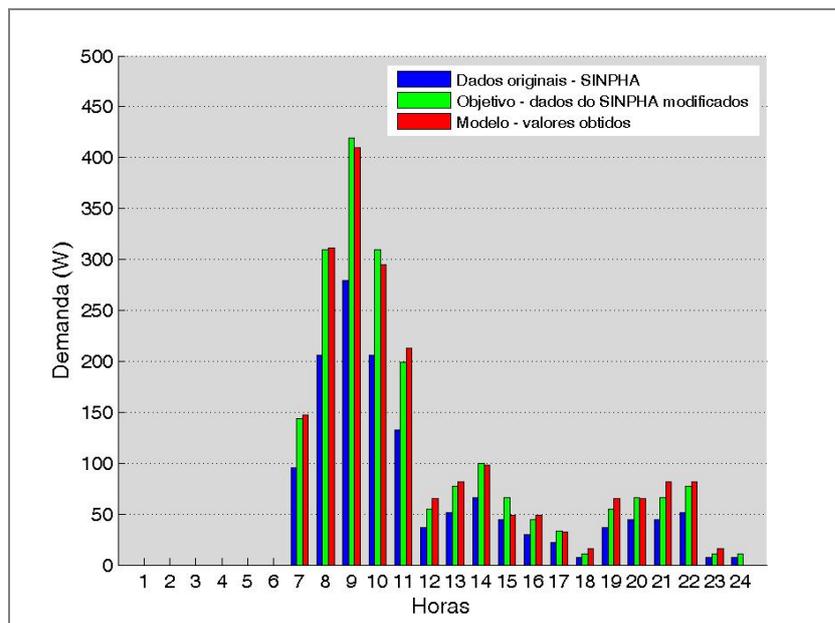


Figura 3.27 - Curvas de demanda média diárias para as máquinas de lavar roupas

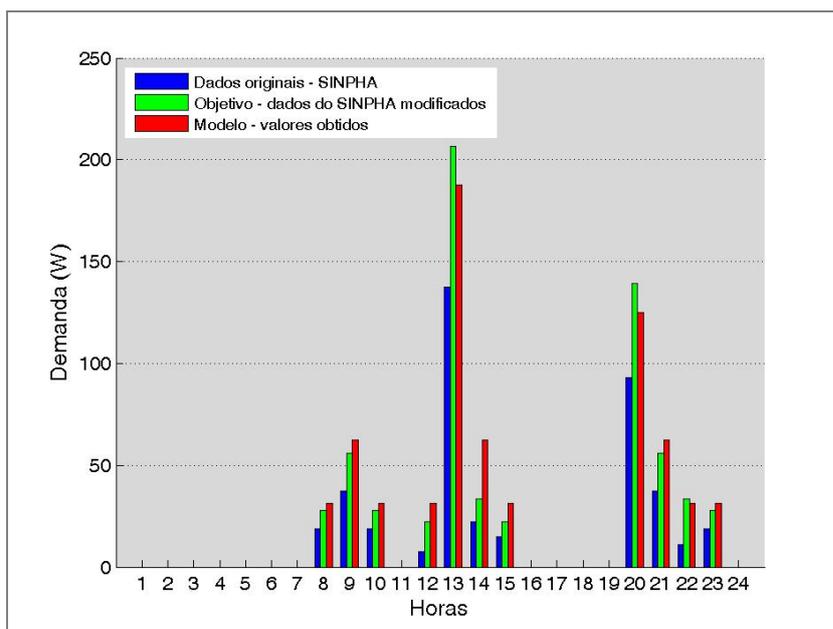


Figura 3.28 - Curvas de demanda média diárias para os fornos de microondas

As Figuras 3.29 e 3.30 apresentam as curvas de demanda para microcomputadores e outros equipamentos. Na época da pesquisa do Procel que deu origem ao SINPHA, a participação desses equipamentos no consumo residencial não era significativa, mas o aumento da renda e o maior acesso dos consumidores ao crédito dos últimos anos tornaram mais fácil a sua aquisição por maior parcela da população, razão de terem sido incluídos neste trabalho. As curvas de carga “objetivo” para esses equipamentos foram estabelecidas com base em combinações de curvas de outros equipamentos e foram consideradas como simples referências, tolerando-se um erro maior no modelo obtido.

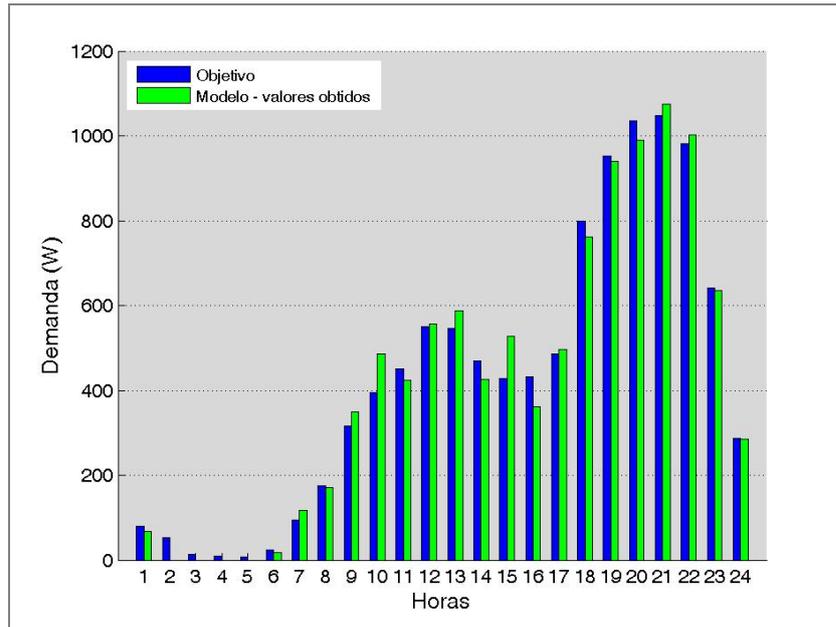


Figura 3.29 - Curvas de demanda média diárias para os microcomputadores

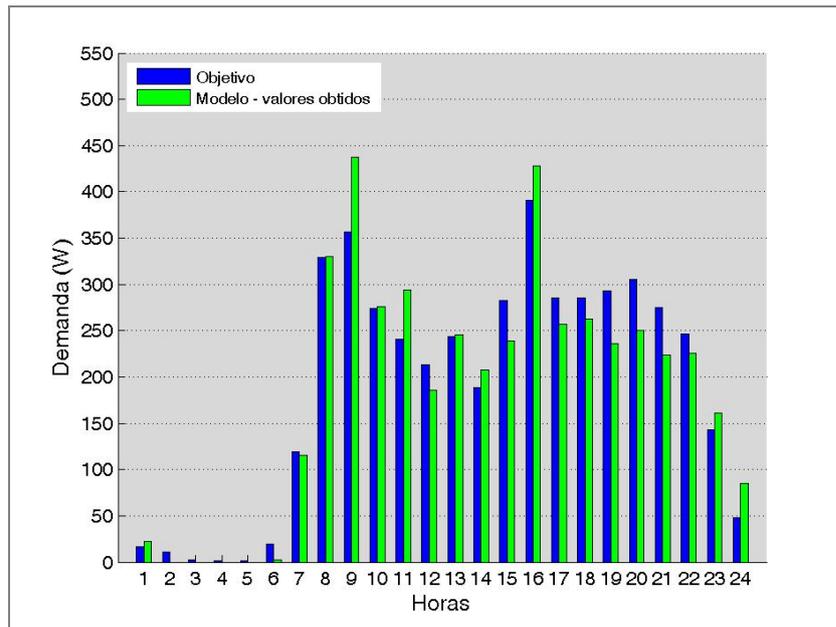


Figura 3.30 - Curvas de demanda média diárias para os demais equipamentos

Por fim, na Figura 3.31, são mostradas as curvas de carga para todos os consumidores do sistema proposto. Trata-se, basicamente, das curvas apresentadas nas Fig. 3.4, 3.5 e 3.15.

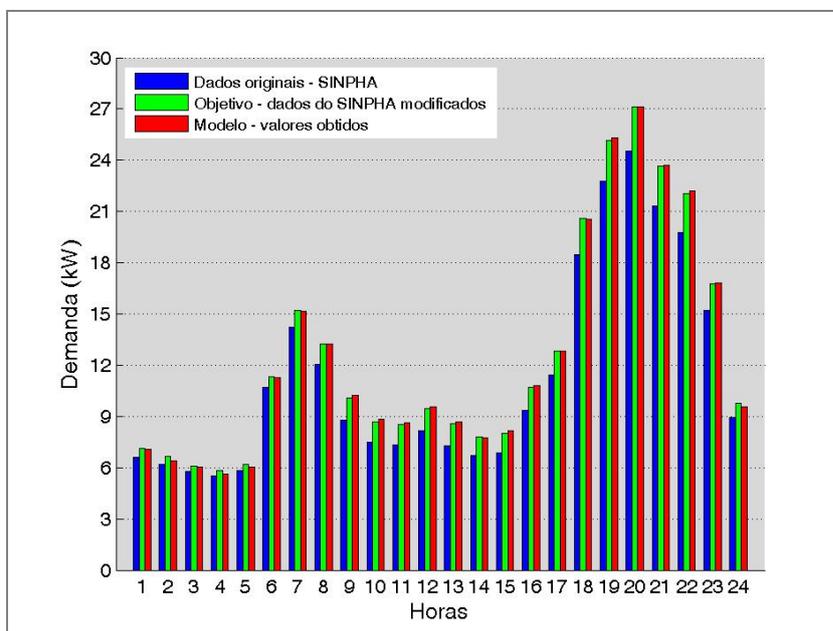


Figura 3.31 - Curvas de demanda média diárias para os consumidores do sistema proposto

3.7 Considerações finais

Neste capítulo, foi apresentado o desenvolvimento do modelo de um sistema de distribuição de energia elétrica em baixa tensão em termos de curvas de carga. A referência para a definição das curvas de carga foram os dados para a região Sudeste do SINPHA, sistema desenvolvido pelo Procel/Eletróbrás a partir de dados obtidos em pesquisa de hábitos de uso de energia elétrica realizada em 2005. Devido ao tempo decorrido até o presente, foram feitas algumas modificações nos dados na tentativa de adequá-los ao que se observa atualmente, principalmente ao valor de consumo médio mensal.

Num cenário com 50 consumidores, foram desenvolvidos 12 perfis de curvas de carga que, juntamente com defasamentos no tempo, resultaram em 50 curvas de carga diferentes, procurando reproduzir a diversidade de uso de energia elétrica por parte dos consumidores residenciais em uma rede de distribuição. A combinação dessas curvas representou uma boa aproximação aos dados originais, também considerando os perfis de utilização dos equipamentos.

Capítulo 4

Modelagem de um Sistema de Distribuição em Baixa Tensão – Parte 2: Equipamentos de Consumo e Rede Elétrica

4.1 Considerações iniciais

Neste capítulo, é realizada a modelagem dos equipamentos de consumo e da rede elétrica para fins de simulação do sistema de distribuição proposto no domínio da frequência para intervalos de tempo correspondentes a um dia típico. Os modelos dos equipamentos foram obtidos a partir de medições realizadas em tensão alternada (tensão, corrente, potência, distorção harmônica) e em tensão contínua para alguns deles. Os modelos dos componentes da rede de distribuição secundária consideram os padrões construtivos definidos na normalização técnica da CEMIG.

4.2 Equipamentos de consumo - medições e levantamento de dados

Foi utilizado um analisador de qualidade de energia monofásico, Fluke 43B, para a realização de medições de potência, tensão, corrente e distorção harmônica em equipamentos típicos de unidades consumidoras residenciais em tensão alternada. Alguns equipamentos foram submetidos à alimentação em tensão contínua. No capítulo 3, os equipamentos foram agrupados por finalidade, conforme a Pesquisa de Posse de Eletrodomésticos e Hábitos de Uso - Classe Residencial, Região Sudeste - Ano Base 2005. Neste capítulo, os equipamentos serão considerados de acordo com suas características elétricas, nos seguintes grupos: lâmpadas de descarga, motores elétricos, equipamentos resistivos e equipamentos eletrônicos. A Tabela 4.1 apresenta um resumo das características desses equipamentos.

Tabela 4.1 - Classificação dos equipamentos modelados

Descrição	Quant.	Classificação	
		SINPHA	Modelo
Refrigerador Continental 270 litros	38	Refrigerador	Motores
Refrigerador Brastemp com freezer 320 litros	20	Refrigerador	Motores
Lâmpada Osram <i>Duluxstar</i> 20W/865	146	Lâmpadas	Lâmp. descarga
Lâmpada Philips <i>Twister</i> 23W/827	68	Lâmpadas	Lâmp. descarga
Lâmpada Soleil 25W/x27	60	Lâmpadas	Lâmp. descarga
Lâmpada incandescente Philips 60W	120	Lâmpadas	Equip. resistivos
Lâmpada incandescente Philips 100W	52	Lâmpadas	Equip. resistivos
Lâmpada vapor de sódio Philips SON-T 150W	13	Lâmpadas	Lâmp. descarga
Chuveiro elétrico Lorenzetti <i>Maxi Ducha</i> 4600W	54	Chuveiros	Equip. resistivos
Chuveiro elétrico Lorenzetti <i>Maxi Ducha</i> 5500W	8	Chuveiros	Equip. resistivos
Chuveiro eletrônico Lorenzetti <i>Top Jet</i> 5500W	8	Chuveiros	Equip. resistivos
Condicionador de ar 7500 BTU/h	8	Ar condicionado	Motores
Televisor Philips LED 40" (40PFL6615D/78)	20	Televisor	Eletrônicos
Televisor Philips LCD 32" (32PFL3805D/78)	44	Televisor	Eletrônicos
Televisor Philips CRT 20" (20PT4331D/78)	6	Televisor	Eletrônicos
Aparelho de som Philips MC320	44	Som	Eletrônicos
Ferro de passar a vapor Walita RI2196	50	Ferro	Equip. resistivos
Lavadora de roupas Brastemp 7 kg	44	Lava Roupa	Motores
Forno de microondas Electrolux 28 litros	20	Microondas	Eletrônicos
Notebook HP DM1 (tela de 10,1", fonte de 45W)	8	Microcomputador	Eletrônicos
Notebook Dell D630 (tela de 14,1", fonte de 65W)	12	Microcomputador	Eletrônicos
Microcomputador "genérico" (fonte de "400W") e monitor Samsung 17"	24	Microcomputador	Eletrônicos
Microcomputador Dell Optiplex 755DT (fonte de 275W) e monitor Dell E178FP (17")	8	Microcomputador	Eletrônicos
DVD player Philips	44	Outros	Eletrônicos
Receptor de TV via satélite Zapper	8	Outros	Eletrônicos
Telefone celular Samsung (fonte de 5W)	94	Outros	Eletrônicos
Liquidificador Walita	44	Outros	Motores
Aspirador de pó Electrolux Hidrovac	20	Outros	Motores

4.2.1 Lâmpadas de descarga

Nas lâmpadas de descarga utilizadas em iluminação, a luz é produzida pela radiação emitida pela descarga elétrica através de uma mistura gasosa composta de gases inertes e vapores metálicos [31]. A mistura gasosa encontra-se confinada em um invólucro translúcido (tubo de descarga) em cujas extremidades encontram-se inseridos eletrodos (hastes metálicas ou filamentos) que formam a interface entre a descarga e o circuito elétrico de alimentação. A corrente elétrica através da descarga é

formada majoritariamente por elétrons emitidos pelo eletrodo negativo (catodo) que são acelerados por uma diferença de potencial externa em direção ao eletrodo positivo (anodo) gerando colisões com os átomos do vapor metálico. Para que a descarga elétrica se inicie, é necessário que a diferença de potencial entre os eletrodos seja superior a um certo valor crítico, que pode ser reduzido pelo aquecimento dos eletrodos. Uma vez iniciada a descarga, ela poderá ser mantida, com estabilidade, com tensões menores que as de ignição, podendo-se, também, eliminar o aquecimento dos eletrodos, que se manterão na temperatura ideal pela própria descarga elétrica que existe entre eles [32].

Segundo a Philips, o reator tem como função principal a limitação da corrente na lâmpada ao valor recomendado. Um starter, ou ignitor, é usado para iniciar a descarga. Sozinho ou em combinação com o reator fornece pulsações de tensão, que ionizam o caminho da descarga e provocam a partida. A ignição é seguida pela estabilização do gás ou vapor, que poderá demorar alguns minutos, dependendo do tipo de lâmpada. Durante esse tempo, o fluxo luminoso aumenta com o aumento do consumo, até a lâmpada atingir seu valor nominal [33].

Neste trabalho foram considerados quatro modelos de lâmpadas de descarga, sendo três lâmpadas fluorescentes compactas (LFC) e uma lâmpada de vapor de sódio (iluminação pública). As primeiras nada mais são que lâmpadas de descarga tubulares com reatores eletrônicos incorporados à sua base. As lâmpadas de vapor de sódio, por necessitarem de altos valores de tensão para sua ignição, utilizam em conjunto com o reator eletromagnético um ignitor e um capacitor (correção do fator de potência). Os valores de potência ativa (P), potência reativa (Q), potência de distorção (D), potência aparente (S), fator de potência (PF), fator de potência de deslocamento (DPF) e distorção harmônica de corrente ($THDi$) obtidos através de medições para os três modelos de LFC e da lâmpada de vapor de sódio são mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Grandezas elétricas medidas de lâmpadas de descarga

Lâmpada	P (W)	Q (VAr)	D (VA)	S (VA)	PF	DPF	THDi (%)
Osram “ <i>Duluxstar</i> ” 20W/865	16,6	-7,4	21,6	28,3	0,588	0,914	119,0
Philips “ <i>Twister</i> ” 23W/827	19,7	-11,8	25,9	34,7	0,569	0,857	112,8
Soleil 25W/x27	26,0	-10,0	28,4	39,8	0,653	0,934	102,3
Philips SON-T 150W	162,3	19,9	68,5	177,3	0,915	0,993	41,9

As formas de onda de tensão e corrente para as lâmpadas fluorescentes compactas são apresentadas na Figura 4.1. As medições foram realizadas com os equipamentos conectados à rede de 127V. O fundo de escala para a tensão é de 200V e para a corrente é de 2A.

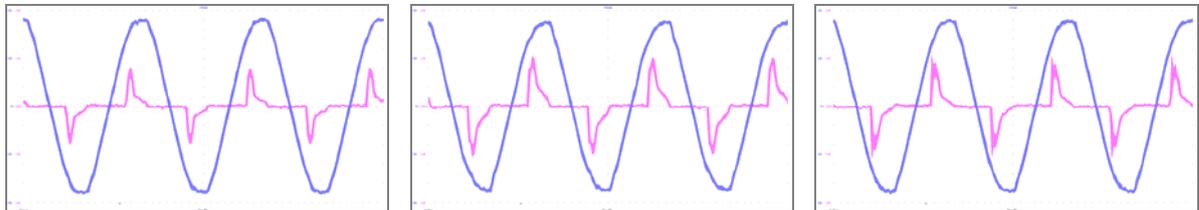


Figura 4.1 - Formas de onda de tensão (em azul) e corrente (em vermelho) para as LFC Osram “*Duluxstar*” 20W/865 (à esquerda), Philips “*Twister*” 23W/827 (no centro) e Soleil 25W/x27 (à direita)

A distorção harmônica de corrente é alta, pois o estágio de entrada do reator (embutido na base da lâmpada) é um retificador com filtro a capacitor, o que explica o pequeno período de condução e o adiantamento da corrente em relação à tensão nesses equipamentos. O espectro harmônico das correntes de alimentação dessas LFCs é apresentado na Fig. 4.2.

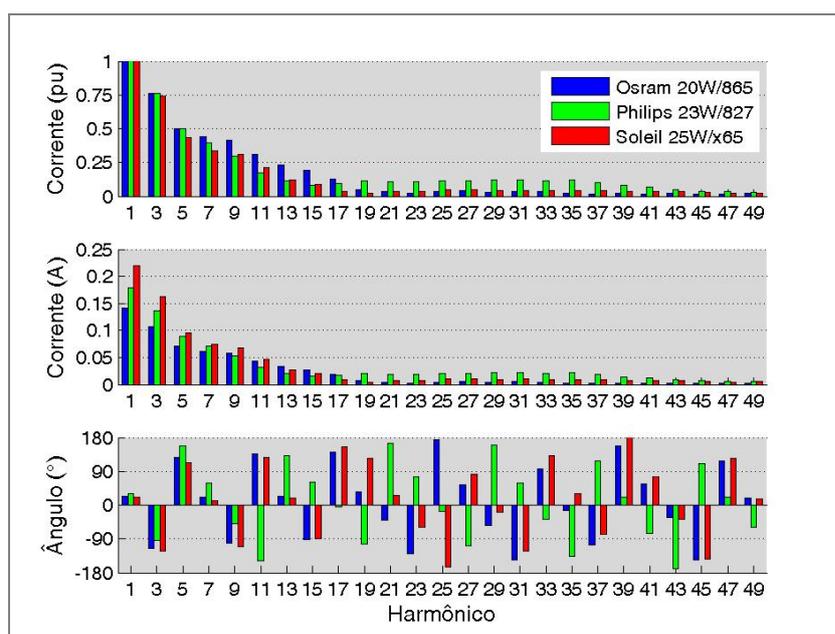


Figura 4.2 - Espectros harmônicos de corrente das LFCs medidas

As lâmpadas dos fabricantes Osram e Soleil possuem características próximas, principalmente no que se refere aos ângulos de fase das componentes harmônicas. Há uma boa diversidade dessas em relação à lâmpada da Philips, o que pode levar à atenuação das componentes de corrente de algumas ordens harmônicas em associações com essa última.

O “comportamento” da lâmpada de vapor de sódio, mostrado na Fig. 4.3, é bastante diferente das LFCs e está relacionado à não linearidade do arco elétrico e sua interação com a reatância (também não linear) do reator eletromagnético (indutor) e do capacitor. Durante a medição, o reator eletromagnético da lâmpada foi conectado à uma rede de 220V. O fundo de escala de tensão é de 400V e o de corrente é de 2A.

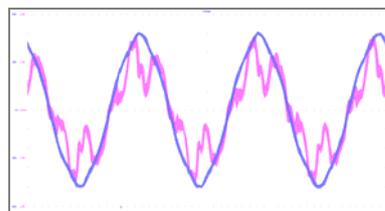


Figura 4.3 - Formas de onda de tensão (em azul) e corrente (em vermelho) para a lâmpada de vapor de sódio tubular Philips SON-T 150W

A distorção harmônica total de corrente é significativamente menor que a das demais lâmpadas consideradas, o que pode ser visto no espectro harmônico apresentado na Fig. 4.4.

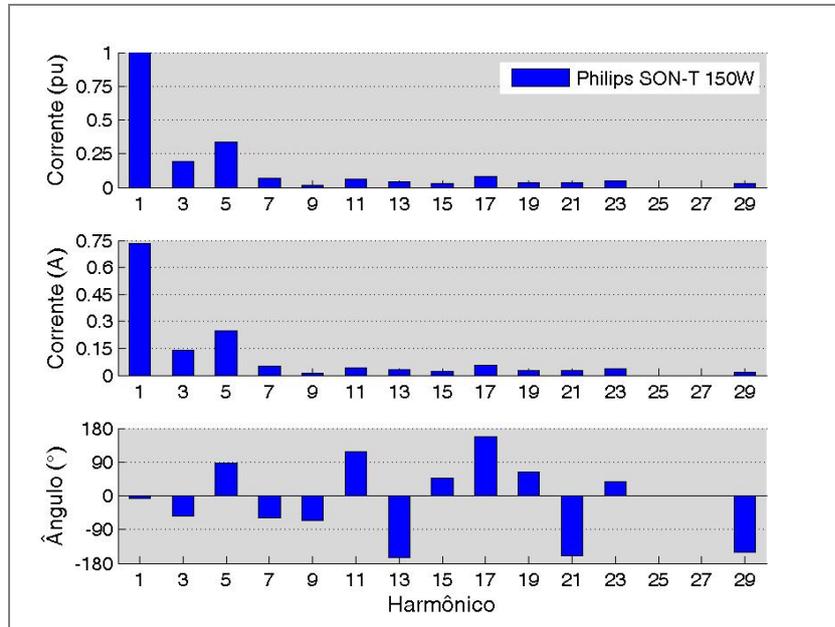


Figura 4.4 - Espectro harmônico de corrente lâmpada Philips SON-T 150W

4.2.2 Motores elétricos

Neste grupo estão os refrigeradores, o condicionador de ar, a lavadora de roupas, o liquidificador e o aspirador de pó. O liquidificador utiliza um motor universal (motor de corrente contínua com enrolamento de campo série) e os demais utilizam motores de indução monofásicos. Os valores de potência ativa (P), potência reativa (Q), potência de distorção (D), potência aparente (S), fator de potência (PF), fator de potência de deslocamento (DPF) e distorção harmônica de corrente ($THDi$) para esses equipamentos são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Grandezas elétricas medidas nos equipamentos com motores elétricos

Lâmpada	P (W)	Q (VAr)	D (VA)	S (VA)	PF	DPF	THDi (%)
Ref. Continental 270 litros	109,7	130,7	25,8	172,6	0,636	0,643	15,1
Ref. Brastemp 320 litros	150,3	199,5	14,6	250,2	0,601	0,602	5,9
Condic. de ar 7500 BTU/h – ventilador apenas	110,0	-13,51	8,6	111,2	0,990	0,993	7,8
Condic. de ar 7500 BTU/h – ventilador e compressor	880,0	123,7	128,6	897,9	0,980	0,990	14,5
Lava Roupas Brastemp 7kg	328,1	11,5	43,7	331,2	0,991	0,999	13,3
Liquidificador Walita	331,4	88,8	55,5	347,6	0,954	0,966	16,2
Aspirador de pó Electrolux	934,2	164,7	190,2	967,5	0,966	0,985	20,1

As formas de onda de tensão e corrente para os refrigeradores, obtidas com o Fluke 43B, são apresentadas na Figura 4.5. Os demais equipamentos possuem formas de onda de corrente semelhantes, mas com fator de potência de deslocamento melhores. No caso do condicionador de ar, da lavadora e do aspirador, isto se deve ao fato de possuírem capacitores para correção do fator de potência. Quanto ao liquidificador, o baixo rendimento do motor (circuito muito resistivo) explica o alto fator de potência.

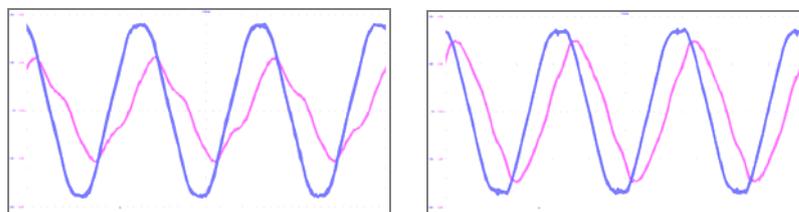


Figura 4.5 - Formas de onda de tensão (em azul) e corrente (em vermelho) para os refrigeradores Continental de 270 litros (à esquerda) e Brastemp “Frost Free” de 320 litros (à direita)

A distorção harmônica de corrente é, em geral, baixa e se deve, principalmente, à saturação do material ferromagnético do núcleo do motor, o que é confirmado pela importância relativa do terceiro harmônico, conforme mostra a Figura 4.6.

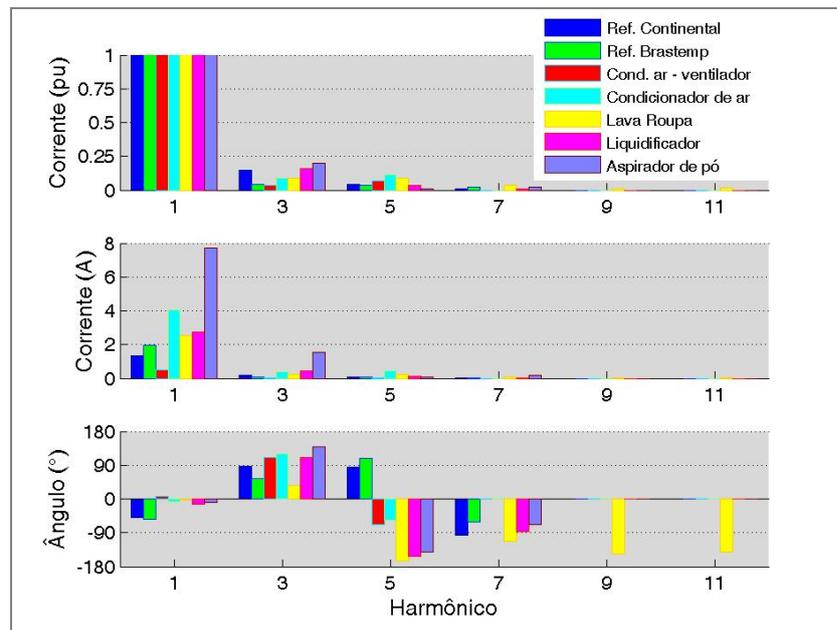


Figura 4.6 - Espectros harmônicos de corrente dos equipamentos com motores elétricos

4.2.3 Equipamentos resistivos

Os principais equipamentos resistivos em uso nas residências são as lâmpadas incandescentes, os chuveiros elétricos e os ferros de passar. Há, além desses, os fornos elétricos, secadores de cabelo, sanduicheiras e outros não considerados neste trabalho. A função principal é a transformação da energia elétrica em energia térmica ou luminosa.

Há muita controvérsia sobre o uso dos chuveiros elétricos no Brasil e o seu custo social e ambiental, já que esse equipamento contribui de forma importante para a demanda máxima diária do sistema interligado nacional (SIN). Segundo Pinheiro e Cerqueira, em 1994, a substituição dos chuveiros elétricos por aquecedores solares não seria uma alternativa viável economicamente do ponto de vista do usuário, mas seria do ponto de vista das concessionárias, considerando o custo marginal da expansão do sistema elétrico [34]. Uma discussão mais recente sobre essa substituição é feita por Araújo e Belchior [35]. A ABINEE, por outro lado, defende o uso do chuveiro elétrico devido ao menor consumo de água e aponta no sentido de

uma solução híbrida, com aquecimento solar e chuveiro elétrico [36]. Neste trabalho, foram considerados os chuveiros elétricos apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Grandezas elétricas referentes aos chuveiros elétricos

Modelo	Quant.	P (W)	Q (VA _r)	D (VA)	S (VA)	PF	DPF	THDi (%)
Chuveiro elétrico 4600W – chave na posição verão	40	2700	0	0	2700	1	1	0
Chuveiro elétrico 4600W – chave na posição inverno	14	4600	0	0	4600	1	1	0
Chuveiro elétrico 5500W chave na posição verão	3	3000	0	0	3000	1	1	0
Chuveiro elétrico 5500W chave na posição inverno	5	5500	0	0	5500	1	1	0
Chuveiro eletrônico 5500W @ 3600W	3	3600	831,1	1048,1	3840,5	0,937	0,974	28,4
Chuveiro eletrônico 5500W @ 4500W	5	4500	632,4	834,2	4620,2	0,974	0,990	18,4

Nos consumidores com tipo de fornecimento B ou C, optou-se por considerar os chuveiros conectados entre duas fases (220V).

Os chuveiros eletrônicos possuem circuitos gradadores (*tiristores* em antiparalelo ou *triacs*) que possibilitam a variação contínua da potência através da variação do ângulo de disparo dos dispositivos semicondutores. A distorção harmônica de corrente tende a aumentar à medida que o ângulo de disparo aumenta (e a potência diminui). As formas de onda de tensão e corrente para esses equipamentos, obtidas através de medições em uma rede de 127V, são apresentadas na Fig. 4.7. O fundo de escala para tensão é de 200V e para a corrente é de 80A.

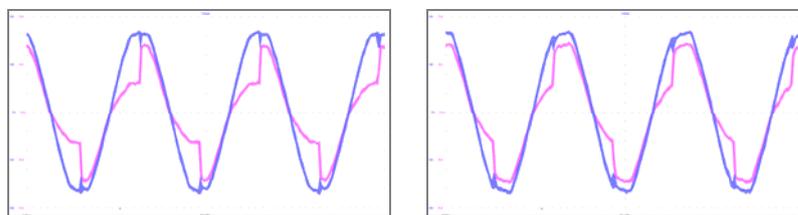


Figura 4.7 - Formas de onda de tensão (em azul) e corrente (em vermelho) para o chuveiro eletrônico a 3600W (à esquerda) e a 4500W (à direita)

Uma característica interessante do chuveiro eletrônico testado é que a sua resistência é constituída de dois ramos em paralelo, cada um com um circuito gradador independente, que são acionados um após o outro. Assim, na faixa de potência mais utilizada, o “corte” na forma de onda da corrente afeta cerca da

metade do seu valor, o que diminui a distorção harmônica e permite o uso de semicondutores com corrente nominal menor que a alternativa convencional de uma única resistência. O espectro harmônico de corrente desse chuveiro para as potências consideradas é apresentado na Fig. 4.8.

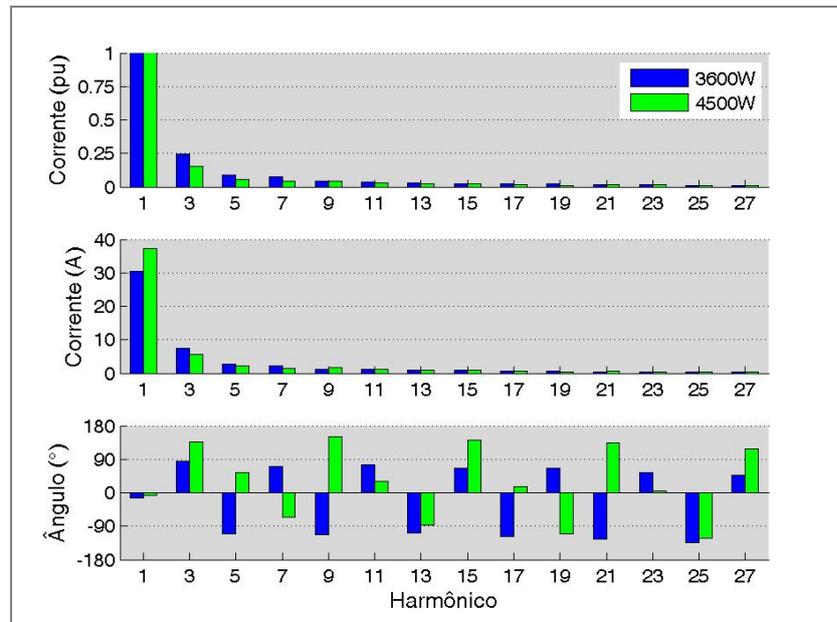


Figura 4.8 - Espectros harmônicos do chuveiro eletrônico

4.2.4 Equipamentos eletrônicos

A interface entre os circuitos internos desses equipamentos e o sistema de energia elétrica é realizada através de fontes chaveadas ou reguladas. Essas fontes, na maioria dos casos, têm o seu estágio de entrada constituído por um retificador monofásico de onda completa com filtro a capacitor, o que faz com que a corrente apresente elevados níveis de distorção harmônica. Em algumas fontes, há circuitos para melhoria do fator de potência (redução da distorção harmônica), podendo ser passivos (filtros) ou ativos (conversor tipo “*boost*” para controle da tensão no barramento CC). A Tabela 4.5 sumariza as informações principais sobre as fontes de alimentação dos equipamentos considerados neste trabalho.

Tabela 4.5 - Características das fontes de alimentação dos equipamentos eletrônicos

Modelo	Tensão nominal de alimentação	Estágio de entrada da fonte de alimentação
Televisor Philips LED 40" (40PFL6615D/78)	100 a 240V	Retificador e conversor "boost"
Televisor Philips LCD 32" (32PFL3805D/78)	100 a 240V	Retificador e conversor "boost"
Televisor Philips CRT 20" (20PT4331D/78)	110 a 240V	Retificador com filtro a capacitor
Aparelho de som Philips MC320	127V	Transformador, retificador e filtro a capacitor
Forno de microondas Electrolux 28 litros	127V	Gradador, transformador e retificador dobrador de tensão [37]
Notebook HP DM1 (tela de 10,1", fonte de 45W)	100 a 240V	Retificador com filtro a capacitor
Notebook Dell D630 (tela de 14,1", fonte de 65W)	100 a 240V	Retificador com filtro a capacitor
Microcomputador "genérico" (fonte de "400W") e monitor Samsung 17"	115/230V (seletor manual)	Retificador com filtro a capacitor
Microcomputador Dell Optiplex 755DT (fonte de 275W) e monitor Dell E178FP (17")	115/230V (seletor manual)	Retificador com filtro LC (indutor e capacitor) na CPU e retificador com filtro a capacitor no monitor
DVD player Philips	100 a 240V	Retificador com filtro a capacitor
Receptor de TV via satélite Zapper	100 a 240V	Retificador com filtro a capacitor
Telefone celular Samsung (fonte de 5W)	100 a 240V	Retificador com filtro a capacitor

As diferenças na topologia dos circuitos de interface CA/CC das fontes interferem nas formas de onda e nos espectros harmônicos de corrente. Para evidenciar essas diferenças, na Fig. 4.9, são mostradas as formas de onda do televisor CRT de 20", do televisor LED de 40", do microcomputador Dell e do forno de microondas.

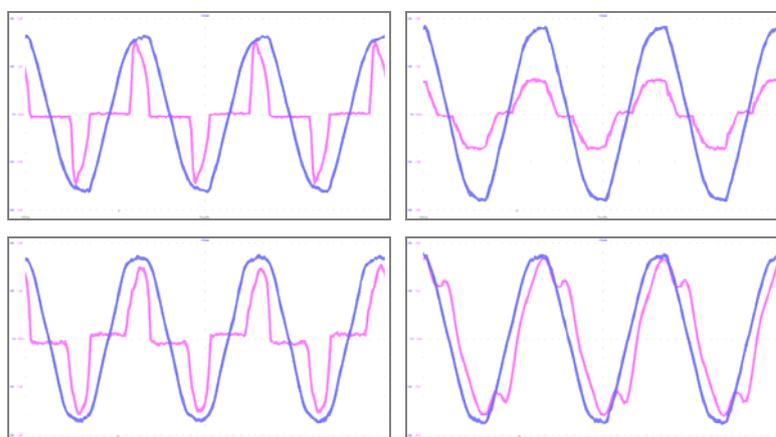


Figura 4.9 - Formas de onda de tensão (em azul) e corrente (em vermelho) para o televisor CRT de 20" (acima e à esquerda), para o televisor LED de 40" (acima e à direita), para o microcomputador Dell (abaixo e à esquerda) e para o forno de microondas (abaixo e à direita)

O resumo dos dados medidos para esses equipamentos é apresentado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Grandezas elétricas medidas nos equipamentos eletrônicos

Equipamento	P (W)	Q (VAr)	D (VA)	S (VA)	PF	DPF	THDi (%)
Televisor LED 40"	60,5	-11,8	15,1	63,4	0,953	0,982	24,5
Televisor LCD 32"	123,0	-12,9	18,3	125,0	0,984	0,995	14,8
Televisor CRT 20"	49,3	-5,2	46,7	68,1	0,724	0,995	94,2
Aparelho de som	38,6	4,7	25,6	46,5	0,829	0,993	65,8
Forno de microondas	1250,0	664,6	241,7	1436,2	0,870	0,883	17,1
Notebook (tela de 10,1", fonte de 45W)	44,8	-14,6	65,0	80,3	0,558	0,951	137,9
Notebook (tela de 14,1", fonte de 65W)	67,3	-23,2	105,2	127,1	0,530	0,946	147,7
Microcomputador "genérico"	139,2	-42,6	132,4	196,7	0,708	0,956	90,9
Microcomputador Dell Optiplex 755DT	73,4	-6,4	55,1	92,0	0,798	0,996	74,8
DVD player	6,6	1,5	7,5	10,1	0,649	0,974	112,0
Receptor de TV via satélite	9,0	3,6	12,6	15,9	0,565	0,927	130,0
Telefone celular (fonte de 5W)	5,1	2,2	7,2	9,1	0,558	0,921	131,1

4.3 Equipamentos de consumo - alimentação em tensão contínua

Foram realizados testes em alguns equipamentos eletrônicos de consumo com alimentação em tensões contínuas. Utilizou-se um circuito retificador monofásico não controlado de onda completa com filtro a capacitor. A capacitância do filtro foi calculada para que a ondulação de tensão (*ripple*) fosse inferior a 5% para correntes de carga de até 1A. O controle da tensão de saída foi feito a partir da variação da tensão de entrada, com um transformador variador de tensão.

No caso das lâmpadas fluorescentes compactas, o valor máximo de tensão aplicado foi de cerca de 191V, equivalente ao valor de pico de uma tensão alternada de 135V, limite superior precário definido pelo Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST) da ANEEL para sistemas com tensão nominal de 220/127V [9]. A Fig. 4.10 mostra as curvas PV e IV para as lâmpadas testadas.

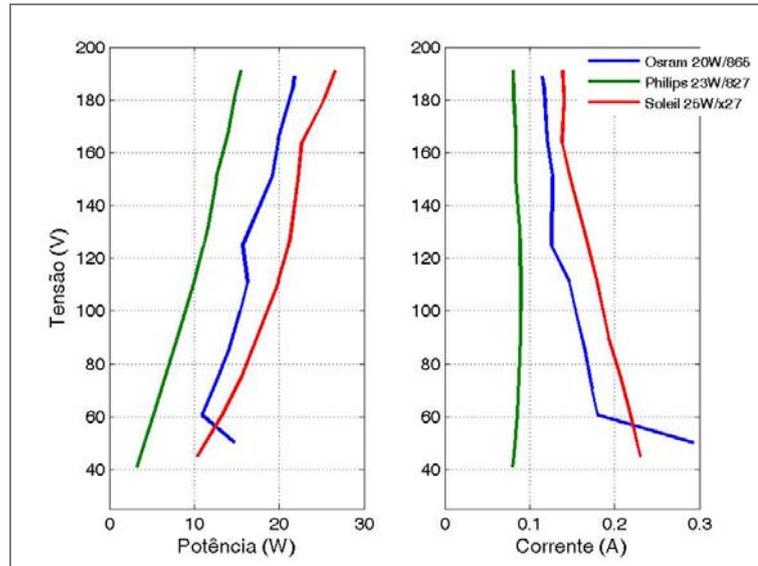


Figura 4.10 - Curvas PV e IV para lâmpadas fluorescentes compactas

Nota-se que para a faixa de tensão de 155 a 180V, correspondente ao valor de pico da tensão nominal dessas lâmpadas, que é de 110 a 130V em 60Hz, elas se comportam aproximadamente como cargas de corrente constante. Além disso, a partir de 60Vcc (cerca de 42Vca), as lâmpadas já funcionam de maneira estável, embora com fluxo luminoso reduzido.

Além das lâmpadas, foram testados outros eletroeletrônicos. As Figuras 4.11 e 4.12 mostram os resultados para um DVD Player, para um microcomputador e um monitor. O comportamento desses equipamentos frente à variação da tensão de alimentação é típico de cargas de potência constante.

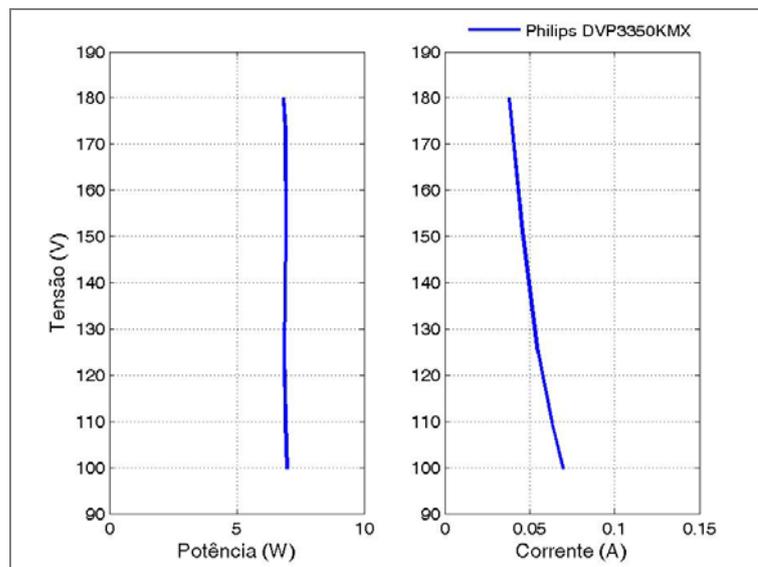


Figura 4.11 - Curvas PV e IV para um DVD Player

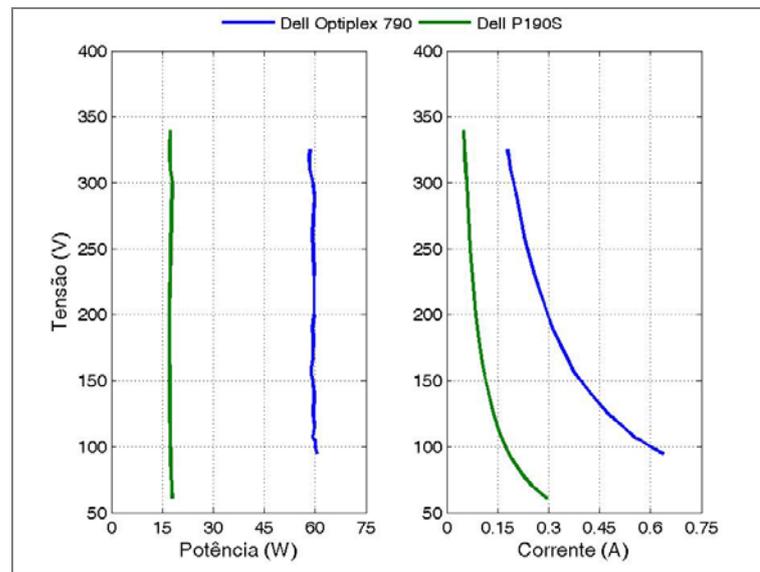


Figura 4.12 - Curvas PV e IV para um microcomputador e um monitor

4.4 Equipamentos de consumo – desenvolvimento de modelos

A partir dos dados obtidos por medições, foram desenvolvidos modelos para simulação do funcionamento dos equipamentos em redes de distribuição de baixa tensão alternada e contínua. As simulações foram realizadas no software Power Factory, desenvolvido pela empresa DigSILENT GmbH. Os modelos consideram os cálculos de fluxo de potência em tensão alternada, para a frequência fundamental e para os harmônicos, e em tensão contínua.

4.4.1 Modelos para tensão alternada – frequência fundamental

Uma questão importante na modelagem de carga para estudos dinâmicos e de fluxo de potência é a variação das potências ativa e reativa com a tensão [38],[39]. Um estudo bastante completo sobre os modelos de carga e o seu desenvolvimento histórico foi realizado por Souza em 2010 [40]. Dentre os diversos modelos disponíveis, optou-se pelo modelo exponencial, que expressa as variações das potências de acordo com as Equações 4.1 e 4.2.

$$P = P_{nom} \left(\frac{U}{U_{nom}} \right)^n \quad (\text{Eq. 4.1})$$

$$Q = Q_{nom} \left(\frac{U}{U_{nom}} \right)^m \quad (\text{Eq. 4.2})$$

P_{nom} e Q_{nom} são as potências ativa e reativa, respectivamente, à tensão nominal (U_{nom}) e P e Q são as potências à tensão U . A variação das potências com a tensão é, então, determinada pelos expoentes n e m . De acordo com o valor dos expoentes, a carga pode ser definida como potência (ativa ou reativa) constante (expoente nulo), corrente constante (expoente unitário) ou impedância constante (expoente igual a 2). Ocorre que em diversas cargas, o comportamento das potências não segue exatamente uma dessas três formulações básicas. Assim, com base em dados disponíveis na literatura [38],[39],[40],[41],[42], para as cargas consideradas neste trabalho, foram adotados os valores de n e m apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Valores de componentes de carga - modelo exponencial

Equipamento	n	m
Refrigerador	0,8	2,5
Lâmpadas incandescentes	1,6	0
Lâmpadas fluorescentes compactas	1	0,4
Lâmpada de vapor de sódio	0	0
Chuveiros	2	0
Chuveiros eletrônicos	2	2
Ar condicionado (ventilador)	0	2
Ar condicionado (ventilador e compressor)	0,2	2,5
Lavadora de roupas	0,1	1,6
Ferro de passar	2	0
Equipamentos eletrônicos	0	0
Liquidificador	1	2
Aspirador de pó	0	2

4.4.2 Modelos para tensão alternada - harmônicos

Os equipamentos de consumo considerados neste trabalho, exceto os resistivos, foram modelados como fontes de corrente harmônicas. Esse modelo representa bem o comportamento dos equipamentos quando a relação entre a potência de curto-circuito da rede de alimentação e a potência dos equipamentos é alta, que é normalmente o caso das redes de distribuição em baixa tensão e dos equipamentos residenciais.

Os valores percentuais de corrente de cada componente harmônico e os ângulos de fase relativos à componente fundamental são constantes. Isto significa que a única variação dos valores desses componentes ocorre quando a magnitude ou o ângulo de fase da componente fundamental varia, ou seja, a distorção harmônica total de corrente do equipamento modelado é constante. Esses valores, para cada um dos equipamentos considerados, são apresentados no Anexo 1.

4.4.3 Modelos para tensão contínua

O sistema de corrente contínua proposto neste trabalho é um sistema unipolar (a dois condutores) com tensão de 320V. As adequações necessárias para conexão dos equipamentos de consumo e a tensão de alimentação foram consideradas de acordo com a Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Alterações nos equipamentos para uso em CC

Equipamento	Adequação necessária
Refrigerador	Inversor de frequência
Lâmpadas incandescentes	Alteração do valor da resistência
Lâmpadas fluorescentes compactas	Substituição por lâmpadas para a faixa de tensão 200-240Vca.
Lâmpada de vapor de sódio	Reator eletrônico
Chuveiros	Alteração do valor da resistência
Chuveiros eletrônicos	Substituição do gradador por um conversor “buck”
Ar condicionado (ventilador)	Inversor de frequência
Ar condicionado (ventilador e compressor)	Inversor de frequência
Lavadora de roupas	Inversor de frequência
Ferro de passar	Alteração do valor da resistência
Forno de microondas	Inversor de frequência
Televisores	Nenhuma
Outros eletrônicos	Nenhuma
Microcomputadores	Nenhuma
Liquidificador	Alteração no número de espiras do motor
Aspirador de pó	Inversor de frequência

Apesar de o uso de inversores de frequência na alimentação de equipamentos eletrodomésticos a motor contribuir para o aumento de eficiência destes, neste trabalho foi considerado o inversor apenas como um dispositivo de adaptação, continuando os equipamentos com a mesma dinâmica de funcionamento (e potência)

que tinham em tensão alternada. Neste caso, o inversor faz com que, do ponto de vista da rede, eles operem como cargas de potência constante.

A modelagem do PowerFactory leva em conta o efeito da variação da tensão contínua na potência ativa das cargas, conforme a Eq. 4.1 e a Tabela 4.7.

4.5 Modelos para a rede elétrica

A rede de distribuição em baixa tensão modelada nesse trabalho tem origem em um transformador trifásico de 45kVA conectado à rede de média tensão de 13,8kV. No ponto de conexão do transformador, o valor da corrente de curto-circuito trifásico considerada foi de cerca de 1700A, com relação X/R unitária. Esses valores representam um alimentador de rede protegida trifásica com 9km de tronco e 1,5km de derivação (ramal), construído com os cabos padronizados pela CEMIG de 150 e 50mm² [43], respectivamente, e que parte de um transformador de 20MVA com reatância de 8% (resistência desprezada). Essa configuração foi escolhida por ser uma aproximação de situações típicas das redes de distribuição no estado de Minas Gerais.

O transformador de distribuição de 45kVA foi modelado de acordo com as especificações técnicas de transformadores para redes de distribuição aéreas da CEMIG [44], sendo sua impedância igual a 3,5% e as perdas nos enrolamentos à plena carga iguais a 800W. A tensão nominal no lado de baixa tensão é 220/127V. Em tensão alternada, a tensão no ponto de conexão foi considerada igual a 1pu (13800V), o que significa que a tensão a vazio no secundário é de 220V.

Normalmente, os transformadores de distribuição possuem *taps* de 13,8/13,2/12,6/12/11,4kV. Considerou-se, na operação da rede em tensão contínua, o uso do tap de 13,2kV e uma tensão de linha de 1,03pu no ponto de conexão (14214V), o que garante o valor médio da tensão de saída de um retificador trifásico não controlado igual a 320V quando a vazio.

Os circuitos de baixa tensão são constituídos de cabos de alumínio multiplexados isolados em XLPE para 0,6/1kV. Para a rede em tensão alternada, foram considerados os cabos 3x1x70+70 mm² (três condutores isolados e um condutor nu).

No caso da rede em tensão contínua, considerou-se o uso de cabos $2 \times 1 \times 70 \text{mm}^2$ (dois condutores isolados). Os ramais de ligação das unidades consumidoras, levando em conta os valores de carga instalada conforme a ND-5.1 são de $3 \times 1 \times 16 + 16 \text{mm}^2$ para as unidades do tipo de fornecimento C, $2 \times 1 \times 16 + 16 \text{mm}^2$ para as do tipo B e $1 \times 1 \times 16 \text{mm}^2$ para as demais. Os ramais de ligação em tensão contínua serão de $2 \times 1 \times 16 \text{mm}^2$. Os dados considerados para esses cabos foram obtidos no sítio na Internet do fabricante Nexans.

4.6 Considerações finais

Este capítulo apresentou os modelos dos equipamentos e da rede elétrica utilizados nas simulações que fazem parte dessa dissertação, tanto em tensão alternada, quanto em tensão contínua. Para a maior parte dos equipamentos considerados, os modelos foram desenvolvidos a partir de dados de medições e se levou em conta o efeito da variação de tensão nas potências ativa (para CA e CC) e reativa (CA). Os modelos em tensão alternada também consideram a distorção harmônica de corrente de cada equipamento.

No próximo capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados das simulações dos modelos da rede de distribuição em baixa tensão considerada nesta dissertação.

Capítulo 5

Análise de Desempenho de um Sistema de Distribuição em Baixa Tensão

5.1 Considerações iniciais

Os modelos do sistema de distribuição em estudo foram simulados no software Power Factory, considerando as condições de alimentação e conexão descritas no capítulo anterior. Foram avaliados os valores de tensão nos postes, as correntes e potências injetadas e as perdas para a rede de distribuição em tensão alternada e em tensão contínua para cada um dos 96 intervalos de 15 minutos de um dia, considerando a curva de demanda diária.

5.2 Resultados para a rede em tensão alternada

O uso aleatório e distribuído da carga em uma rede de distribuição em baixa tensão leva a perfis diferentes de variação de tensão nos diversos pontos de conexão dos ramais de ligação dos consumidores, que se situam junto aos postes. Para ilustrar essa situação, nas Figuras 5.1 a 5.5 são apresentados os valores de tensão para cada uma das fases nos postes 7, 3, 1, 9 e 13 da rede. O valor base da tensão de linha é igual a 220V (tensão de fase de aproximadamente 127,02V).

Na planta da rede de distribuição proposta para este estudo (Fig. 3.2), o poste 7 (tronco) é aquele em que se encontra o transformador. O poste 1 e o poste 13 são os mais afastados do transformador. No poste 3 e no poste 9 há derivações para atendimento aos postes 4, 5, 10 e 11, instalados em ruas transversais àquela em que estão os demais.

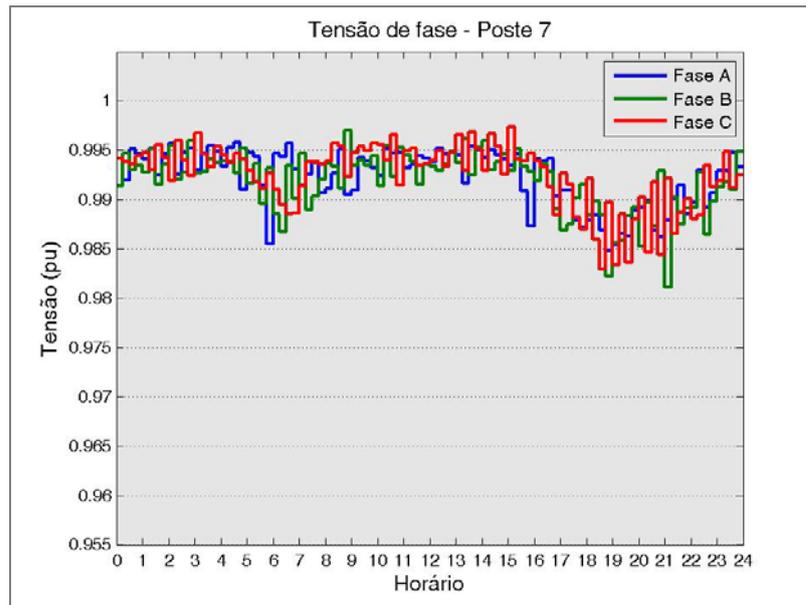


Figura 5.1 - Tensão no poste 7

Como é de se esperar, se comparada a Figura 5.1 com as Figuras 5.2 a 5.5, observa-se que a tensão no poste 7 é a que sofre menores variações ao longo do dia, já que a queda de tensão nele é devida apenas à circulação de corrente nos enrolamentos do transformador.

O perfil da variação de tensão nos postes 3 e 1, mostrado nas Figuras 5.2 e 5.3, é bastante semelhante, já que eles se encontram no mesmo sentido a partir do poste 7. A variação de tensão no poste 1 tende a ser maior que no poste 3, pois ele se encontra mais afastado do transformador, sendo a tensão nesse ponto mais sujeita às quedas de tensão nos condutores da rede à montante.

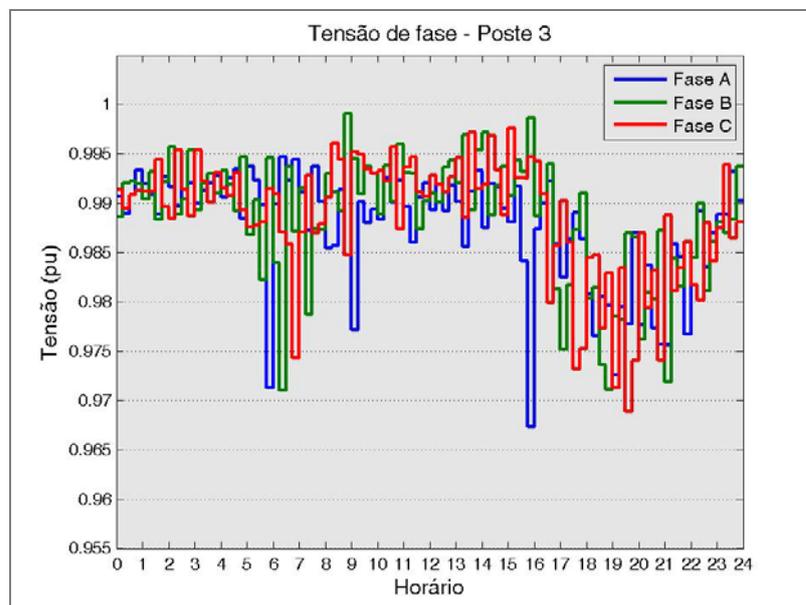


Figura 5.2 - Tensão no poste 3

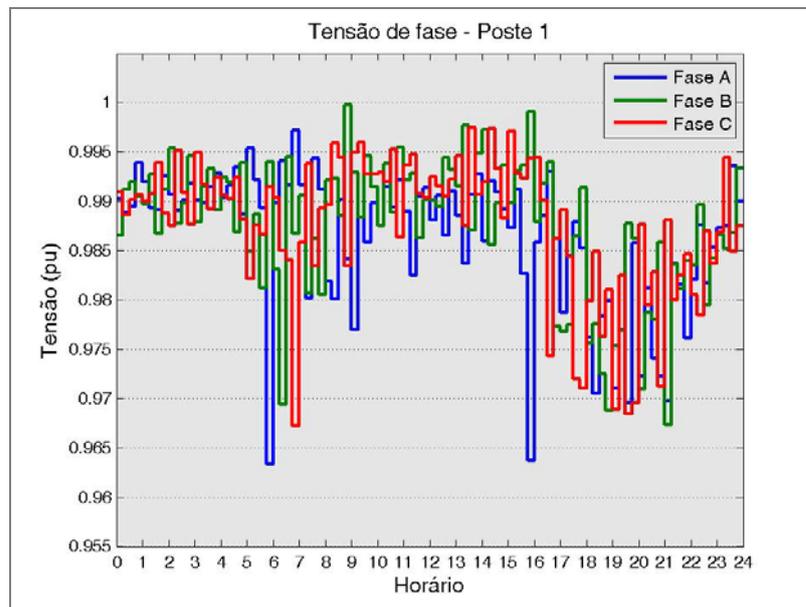


Figura 5.3 - Tensão no poste 1

No sentido oposto, do poste 9 para o poste 13, as variações de tensão também aumentam, mantendo certa semelhança nos seus perfis, como pode ser visto nas Figuras 5.4 e 5.5.

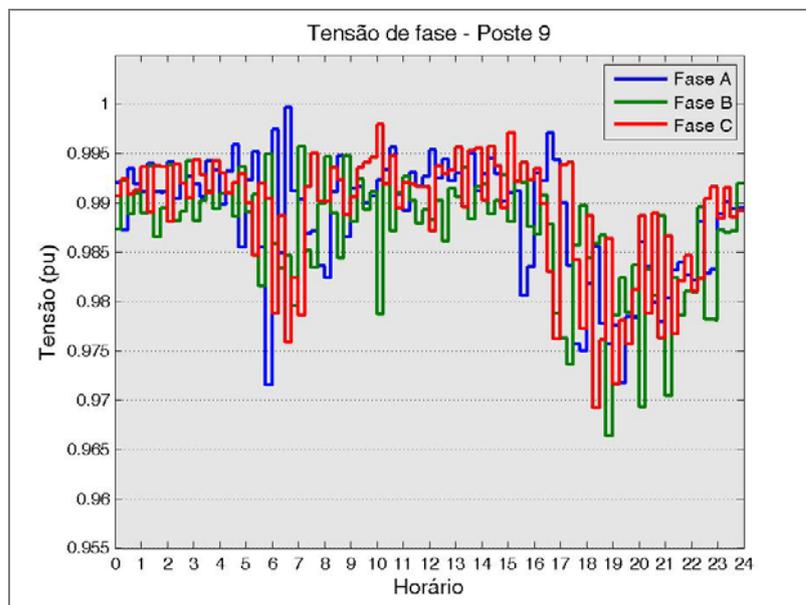


Figura 5.4 - Tensão no poste 9

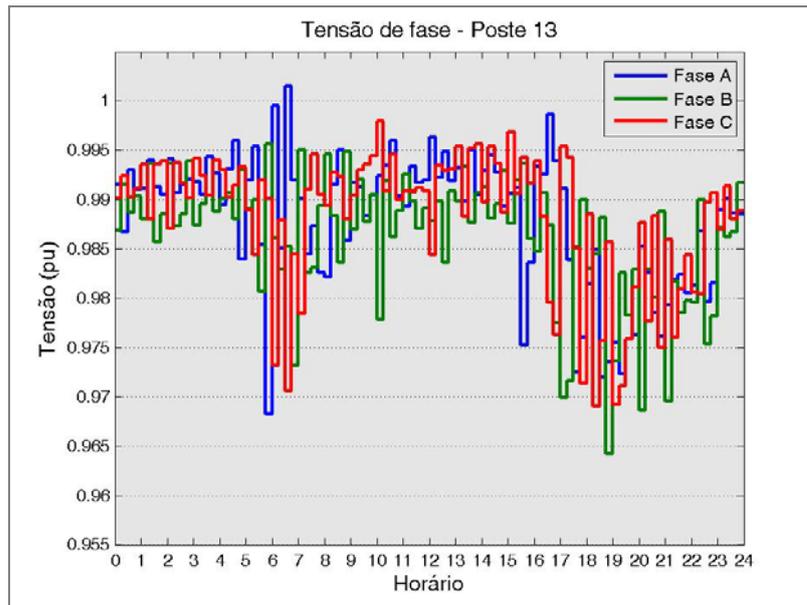


Figura 5.5 – Tensão no poste 13

Devido às quedas de tensão nos condutores, a tensão tende a ser menor nos postes mais afastados do transformador e nos intervalos de maior carregamento. A Figura 5.6, que mostra os valores da tensão de seqüência positiva para os postes 1, 3, 7, 9 e 13 ao longo do dia, torna mais perceptível essa tendência ao eliminar as variações devidas ao desequilíbrio.

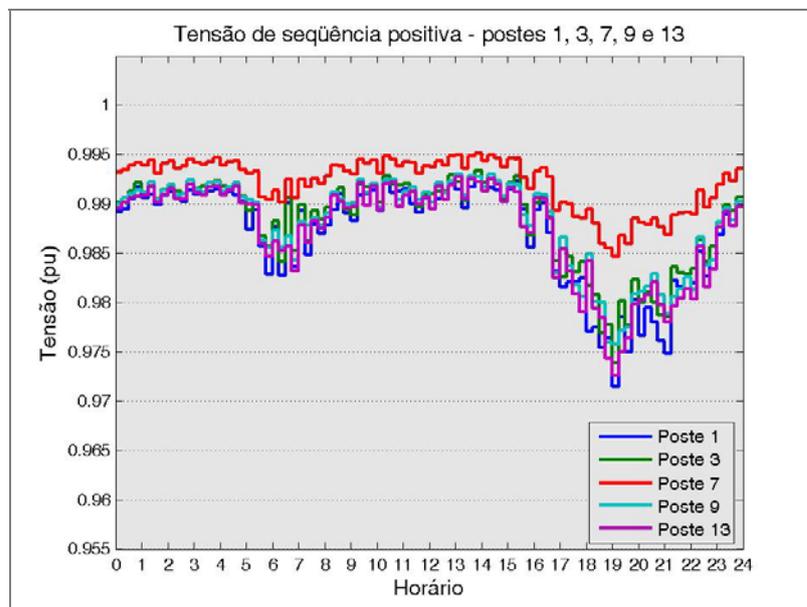


Figura 5.6 – Tensão de seqüência positiva nos postes 1, 3, 7, 9 e 13

A Figura 5.7 mostra o valor da tensão de seqüência positiva em cada poste nos intervalos de 03:45 às 04:00h, de 07:00 às 07:15h, de 13:45 às 14:00h, de 19:00 às 19:15h

e de 23:00 às 23:15h. O intervalo de 03:45 às 04:00h é o de menor carga devida às unidades consumidoras, mas, por causa da iluminação pública, a sua demanda supera a do intervalo de 13:45 às 14:00h em cerca de 600W. Os dois intervalos foram considerados para representar os de menor carregamento do sistema. Por causa da demanda devida à iluminação pública, também foram escolhidos dois intervalos para representar o carregamento médio do sistema: de 07:00 às 07:15h e de 23:00 às 23:15h. O intervalo de 19:00 às 19:15h corresponde à carga máxima. Os postes foram ordenados considerando a sua posição espacial, daí a alteração da seqüência dos postes 3, 4 e 5.

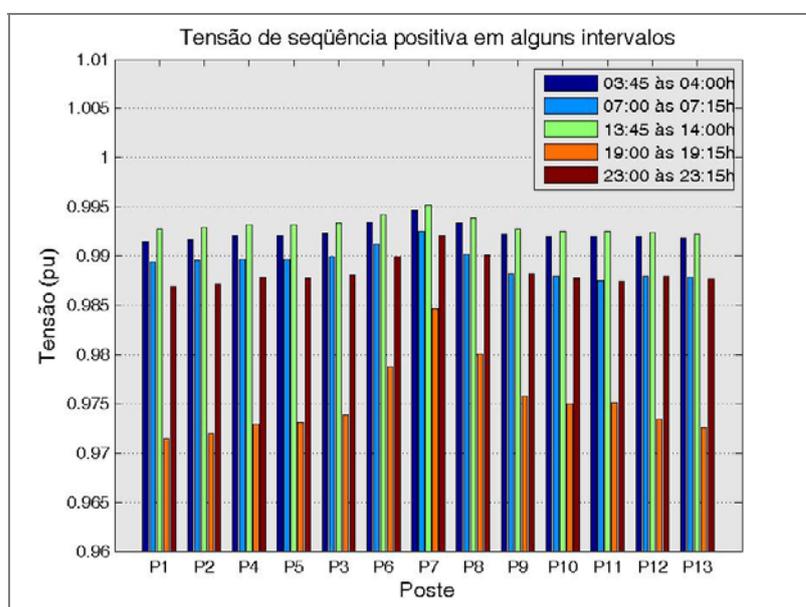


Figura 5.7 - Tensão de seqüência positiva em alguns intervalos

O fato de a maioria dos equipamentos de consumo ser constituída de unidades monofásicas, ligadas entre fase e neutro, ocasiona desequilíbrios de corrente que se refletem em desequilíbrios de tensão. Como apresentado nas Figuras 5.1 a 5.5, esses desequilíbrios tendem a aumentar à medida que se afasta do transformador e também nos intervalos de maior demanda. A Figura 5.8 mostra os valores de desequilíbrio de tensão (relação entre tensão de seqüência negativa e seqüência positiva) para os postes 1, 3, 7, 9 e 13.

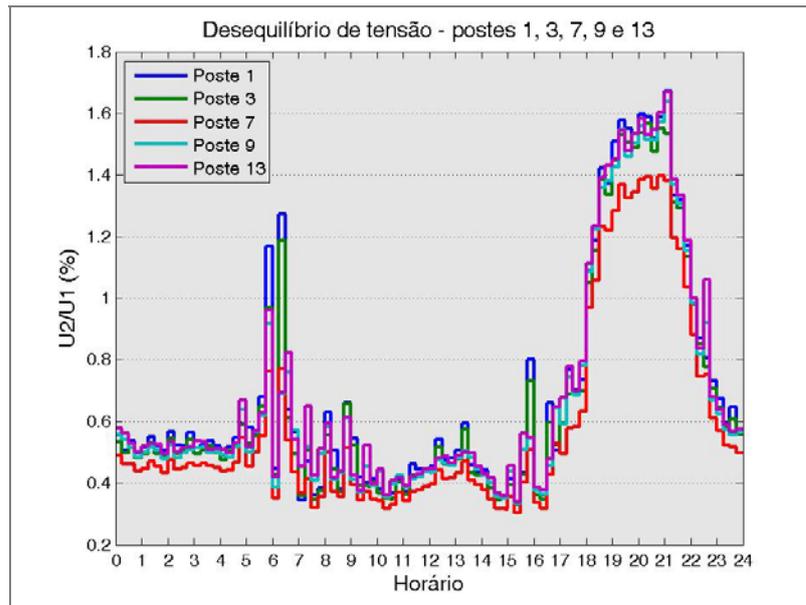


Figura 5.8 - Desequilíbrio de tensão nos postes 1, 3, 7, 9 e 13

Há vários estudos realizados, inclusive no âmbito do PPGEE-UFMG, sobre os efeitos da distorção harmônica de corrente dos equipamentos residenciais em redes de distribuição de baixa tensão. Pires [45] e Nunes [46], sob a orientação do Prof. Gonzalez, modelaram equipamentos residenciais e comerciais através de medições e consideraram combinações de uso dos mesmos em uma rede de distribuição de baixa tensão, na qual também foram realizadas medições de qualidade de energia. Essa metodologia foi adotada, em grande parte, no presente trabalho. Considerando o funcionamento das cargas e os modelos definidos, são apresentados nas Figuras 5.9 a 5.11 os resultados de distorção harmônica total de tensão nas fases A, B e C nos postes 1, 3, 7, 9 e 13.

Embora os valores de distorção harmônica sejam parecidos, pode-se perceber diferenças entre os valores em cada fase e em cada poste nos diferentes instantes do dia, devido à natureza desequilibrada e aleatória da carga.

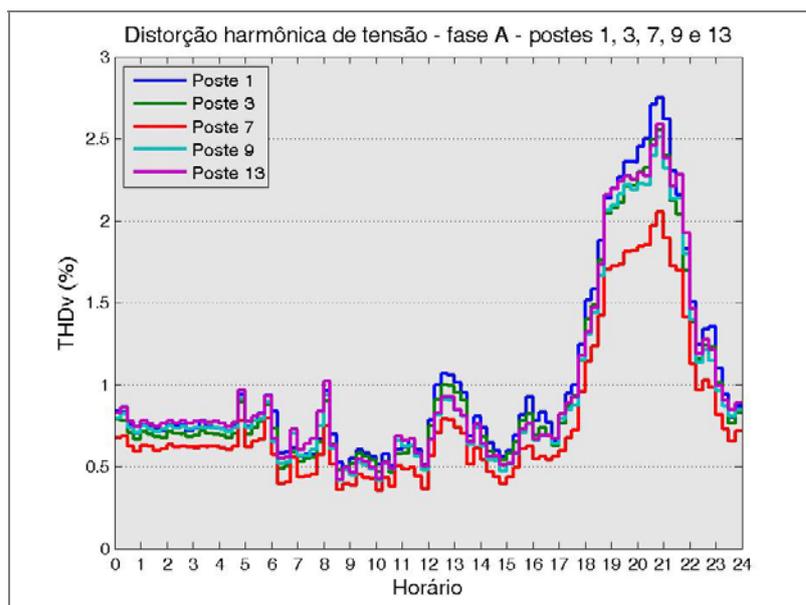


Figura 5.9 - Distorção harmônica de tensão na fase A nos postes 1, 3, 7, 9 e 13

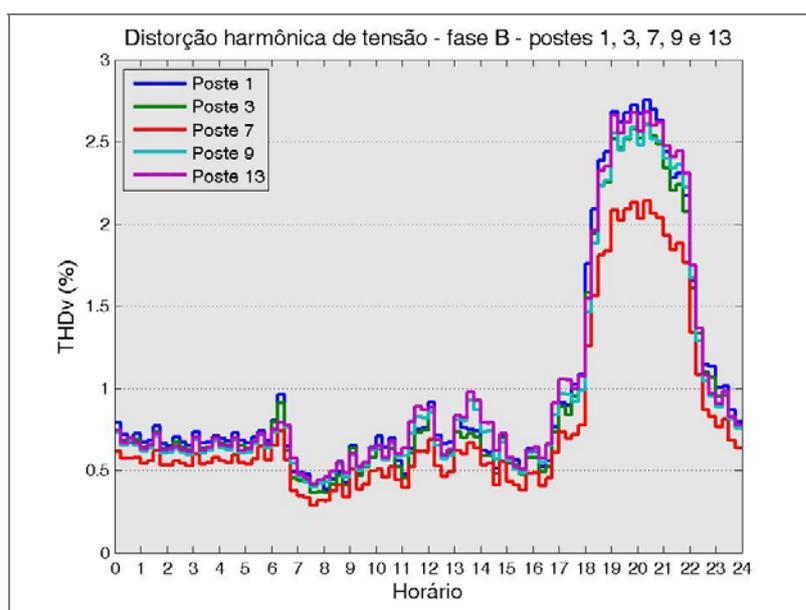


Figura 5.10 - Distorção harmônica de tensão na fase B nos postes 1, 3, 7, 9 e 13

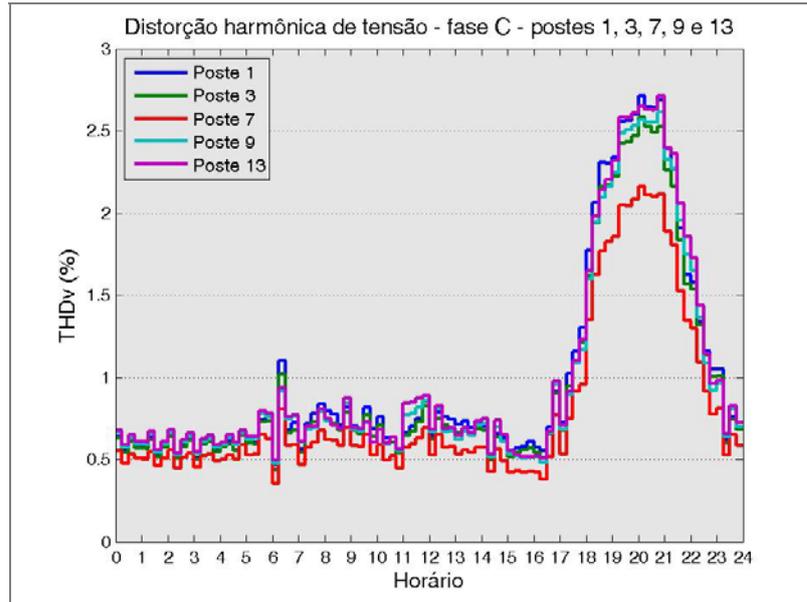


Figura 5.11 - Distorção harmônica de tensão na fase C nos postes 1, 3, 7, 9 e 13

A Figura 5.12 mostra os valores eficazes por unidade das correntes de linha no lado de baixa tensão do transformador. O valor considerado como base para a corrente é de 118,09A, valor nominal de corrente no secundário do transformador de 45kVA em 220/127V. Em alguns intervalos, como de 05:45 às 06:00h e de 16:30 às 16:45h, o desequilíbrio de corrente é tão significativo que a corrente no neutro chega a ser maior que em duas das três fases. Em nenhum dos instantes ocorre uma situação equilibrada.

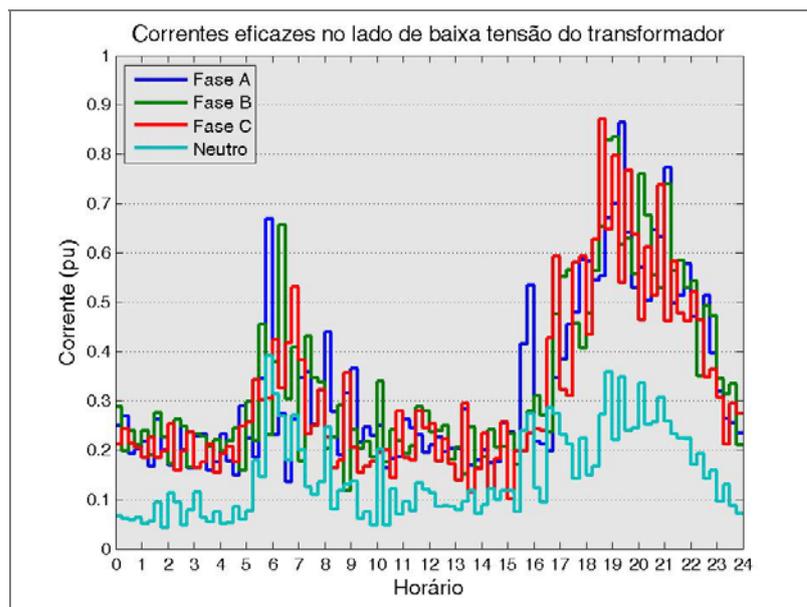


Figura 5.12 - Correntes eficazes por unidade no lado de baixa tensão do transformador

Devido à conexão Dyn1 (triângulo no primário e estrela no secundário), o desequilíbrio de corrente introduzido pelo circuito de baixa tensão é menos significativo na rede de média tensão, como pode ser visto na Figura 5.13. O valor base da corrente no primário do transformador de 45kVA é de 1,883A (tensão nominal de 13800V).

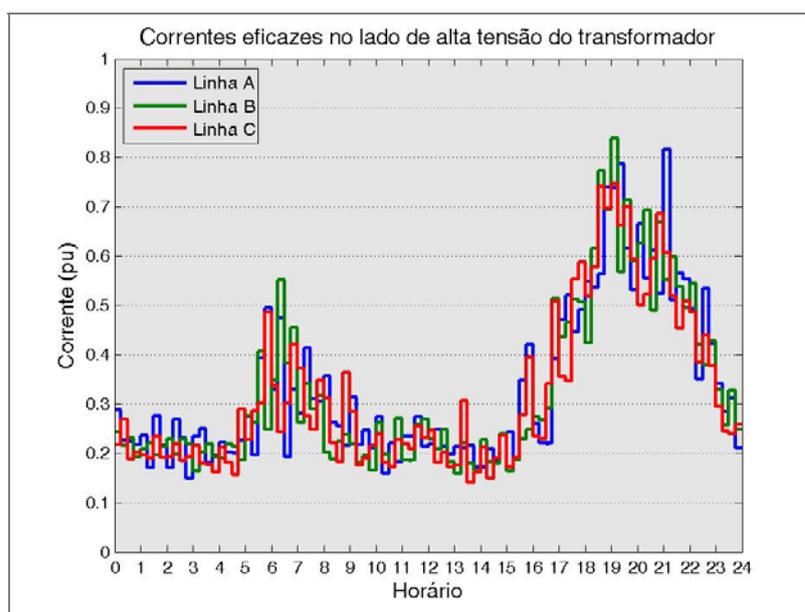


Figura 5.13 - Correntes eficazes por unidade no lado de alta tensão do transformador (rede de média tensão)

As distorções harmônicas de corrente também foram obtidas, sendo apresentadas na Figura 5.14 para o lado de baixa tensão do transformador. Os valores de distorção de corrente são diferentes em cada horário e em cada fase e aumentam com a presença das cargas eletrônicas ou ausência das cargas lineares.

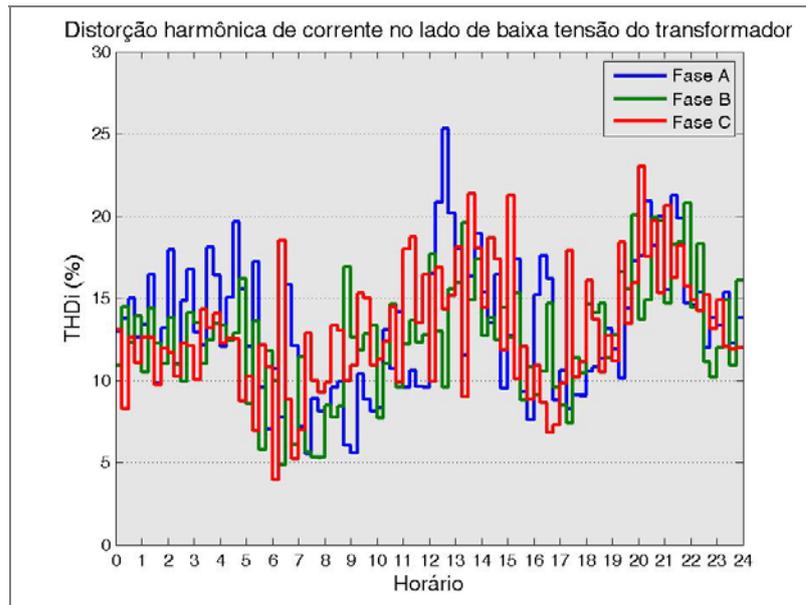


Figura 5.14 - Distorção harmônica de corrente no lado de baixa tensão do transformador

Considerando que a distorção harmônica total de corrente (THD_I) é calculada em função da componente fundamental em cada intervalo, os efeitos da distorção sobre o sistema dependem do valor dessa componente. Então, um valor alto de distorção significa elevada circulação de harmônicos apenas se a componente fundamental também for elevada. A distorção total de demanda (TDD) é um índice semelhante à THD, mas calculado em relação à corrente nominal do sistema e, portanto, fornece uma informação mais completa [46],[47],[48]. A Figura 5.15 apresenta a distorção total de demanda de corrente no lado de baixa tensão do transformador, considerando a corrente nominal do transformador como referência.

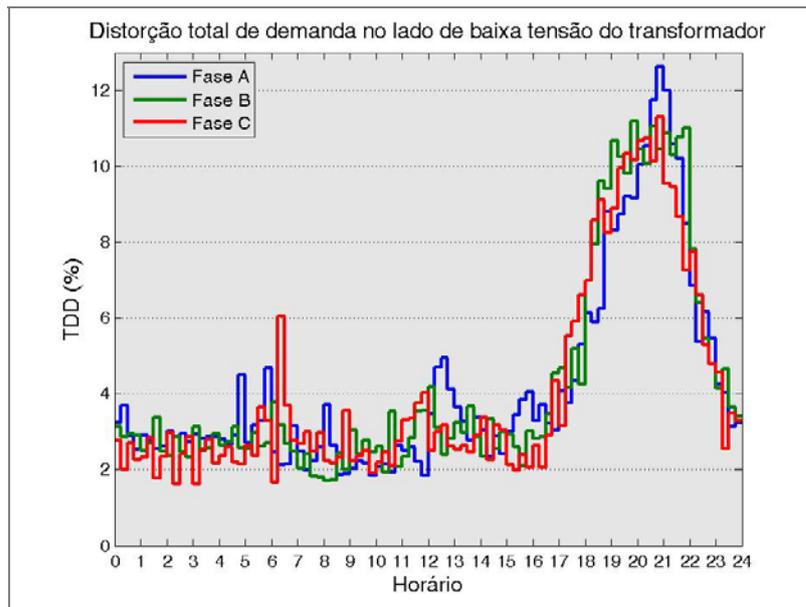


Figura 5.15 – Distorção total de demanda no lado de baixa tensão do transformador

Essas distorções harmônicas também contribuem para o aumento da corrente no neutro, principalmente devido à presença de componentes múltiplos de três e de componentes desequilibrados de outras ordens. A Figura 5.15 apresenta os valores de corrente fundamental e eficaz no neutro do transformador. Observa-se que a diferença é maior nos instantes de maior uso de iluminação (lâmpadas fluorescentes compactas) e equipamentos eletrônicos, no caso em estudo entre 19 e 23h.

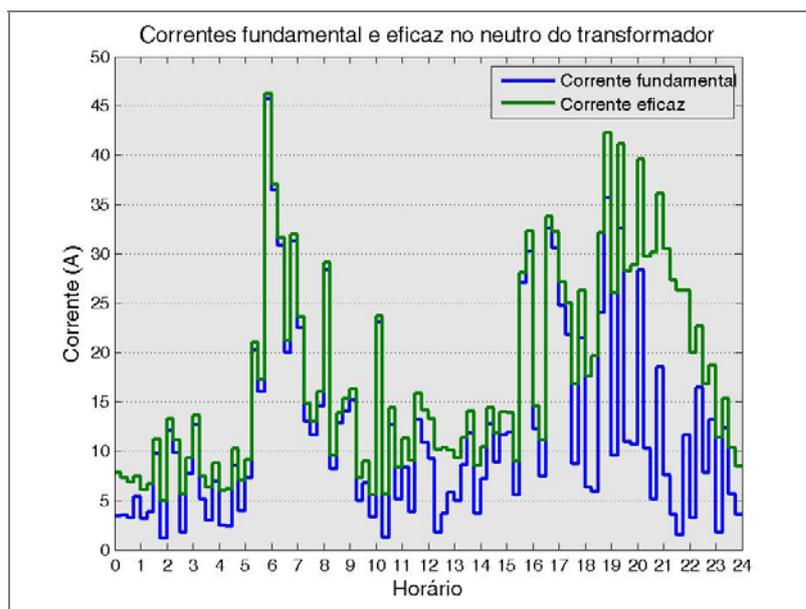


Figura 5.16 – Corrente no neutro do transformador – valor eficaz e componente fundamental

A distorção harmônica total de corrente e a distorção total de demanda no lado de alta tensão do transformador são apresentadas nas Figuras 5.17 e 5.18. Aqui também se observa o papel da ligação Dyn1 do transformador na atenuação dos níveis de distorção harmônica que passam para a rede de média tensão, pela impossibilidade de transferência dos componentes de seqüência zero. Enquanto que no lado de baixa tensão do transformador o valor máximo de distorção de demanda ultrapassa 12%, no lado de alta tensão (rede de média tensão) a máxima distorção harmônica de corrente introduzida é inferior a 8%.

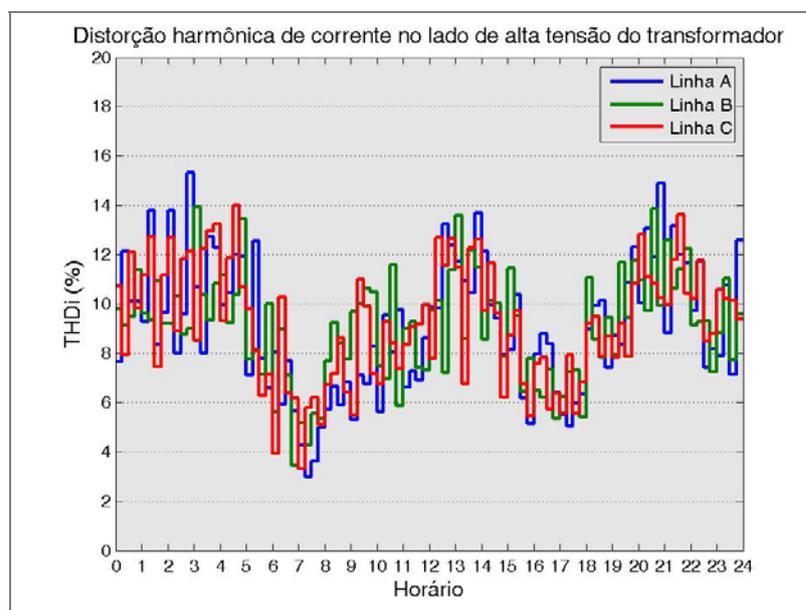


Figura 5.17 - Distorção harmônica de corrente no lado de alta tensão do transformador

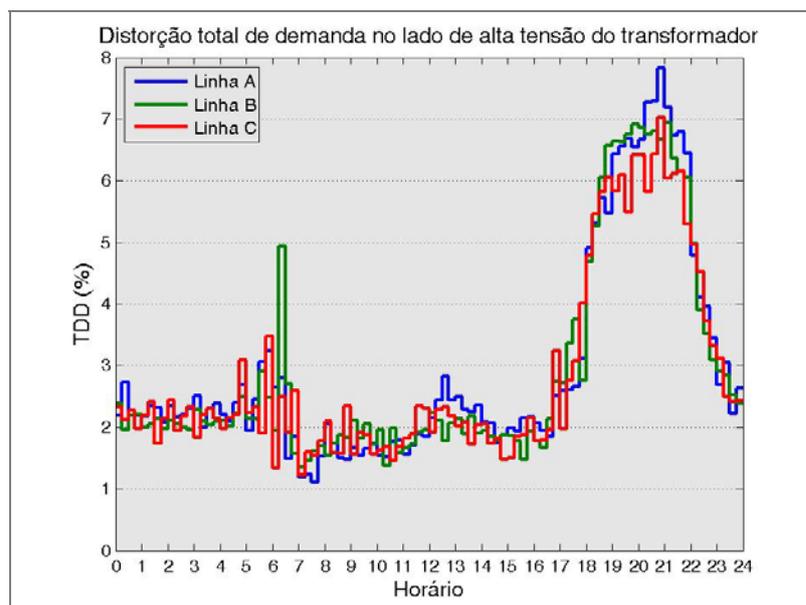


Figura 5.18 - Distorção total de demanda no lado de alta tensão do transformador

Foram contabilizadas as demandas de potência ativa (Figura 5.19) e reativa (Figura 5.20) do sistema em estudo. Aos valores de demanda previstos nos capítulos 3 e 4, foram acrescentados os da iluminação pública (uma lâmpada de vapor de sódio de 150W em cada poste) no intervalo de 18 às 06h.

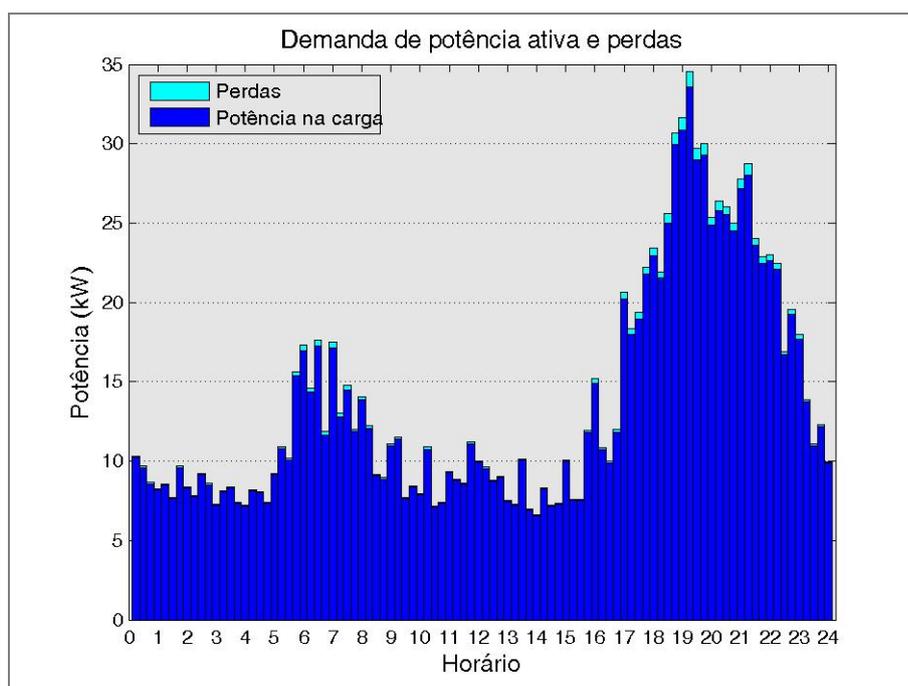


Figura 5.19 - Demanda de potência ativa e perdas na rede em tensão alternada

Assim como no caso da potência ativa, observa-se na Figura 5.20 que o “consumo” de potência reativa nos enrolamentos do transformador e nos condutores da rede cresce com a demanda. Observa-se também que demanda de potência reativa diminui nos períodos de maior utilização de equipamentos eletrônicos e iluminação fluorescente compacta, o que se deve ao comportamento capacitivo (corrente fundamental adiantada em relação à tensão fundamental) dessas cargas.

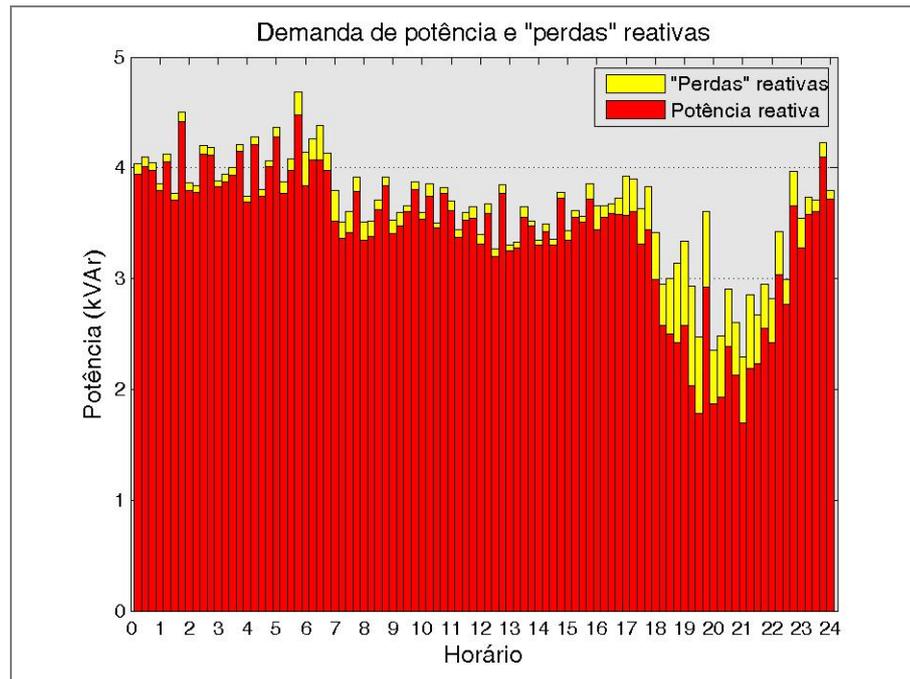


Figura 5.20 - Demanda de potências reativa na rede em tensão alternada

Por fim, na Figura 5.21 são detalhadas as perdas na rede de distribuição em estudo. Os valores de perdas nos condutores da rede e nos enrolamentos do transformador são relativamente próximos e variam conforme a distribuição das cargas em uso e o desequilíbrio das correntes.

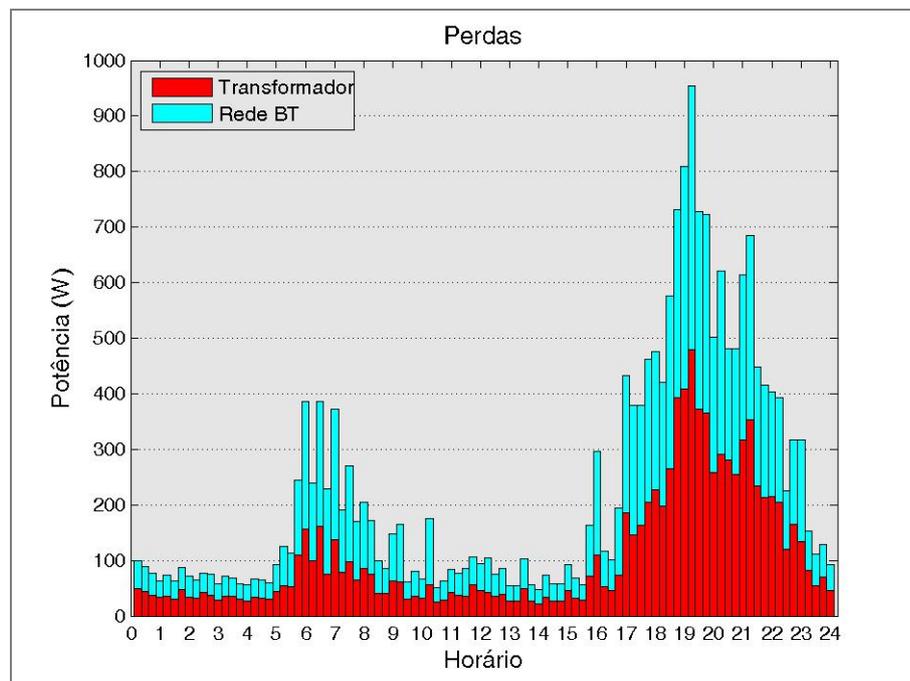


Figura 5.21 - Perdas nos condutores da rede e nos enrolamentos do transformador em tensão alternada

5.3 Resultados para a rede em tensão contínua

Assim como realizado para a rede em tensão alternada, foram obtidos os perfis de tensão contínua nos postes 1, 3, 7, 9 e 13, sendo os resultados mostrados na Figura 5.22.

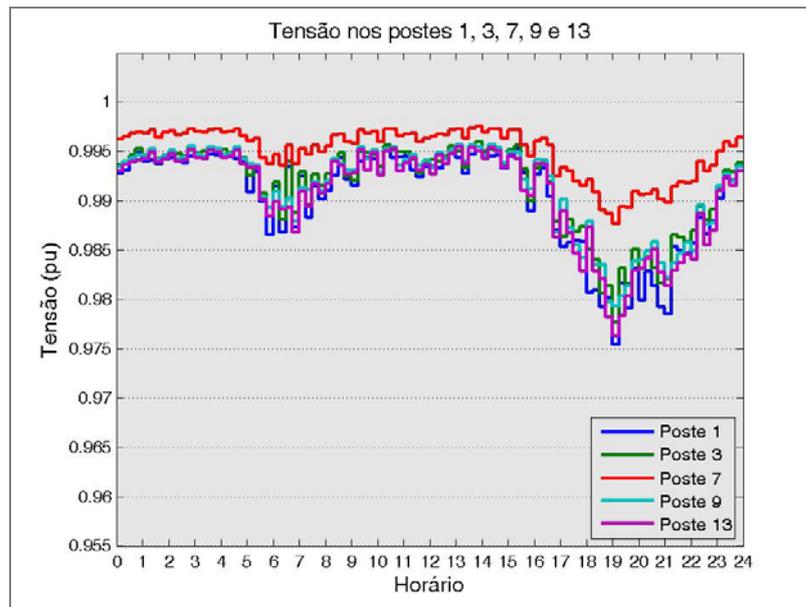


Figura 5.22 - Tensão contínua nos postes 1, 3, 7, 9 e 13

Observa-se um comportamento similar ao das tensões alternadas de seqüência positiva nos mesmos pontos. Esse comportamento é confirmado pelos valores de tensão nos postes para alguns intervalos (Figura 5.23). O valor base da tensão contínua é igual a 320V.

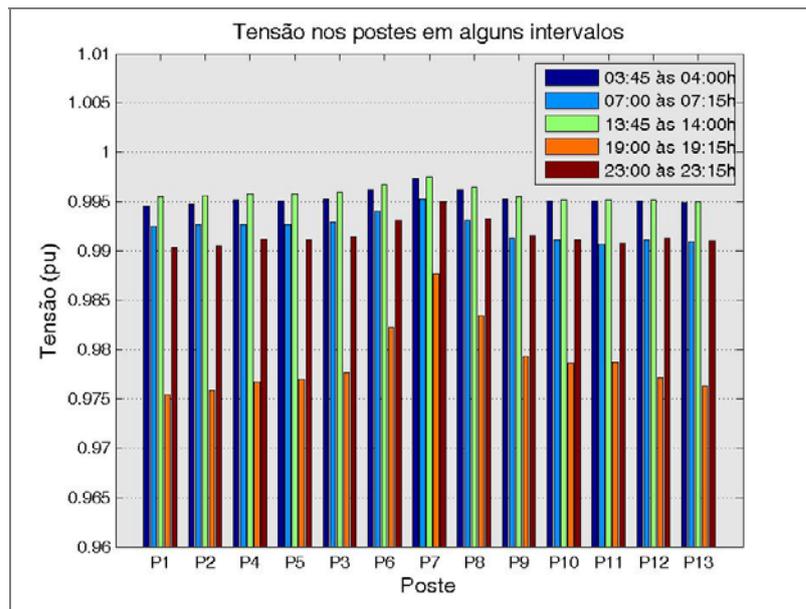


Figura 5.23 - Tensão contínua nos postes em alguns intervalos

Como a rede é unipolar e o retificador é uma ponte trifásica não controlada, as correntes no transformador são equilibradas. A versão utilizada do software PowerFactory não realiza os cálculos de fluxo de potência harmônico para sistemas híbridos (CA e CC). Então, foram obtidos apenas os valores das componentes fundamentais de corrente no transformador e a componente contínua da corrente na saída do retificador. O formato das curvas de corrente em função dos intervalos simulados na saída do retificador, no lado de baixa tensão e no lado de alta tensão do transformador é exatamente o mesmo, diferindo apenas os valores. Por esse motivo, a Figura 5.24 apresenta os valores de corrente por unidade, considerando os seguintes valores base: 151,46 para a saída do retificador, 118,09A para o lado de baixa tensão do transformador e 1,968A para o lado de alta tensão do transformador.

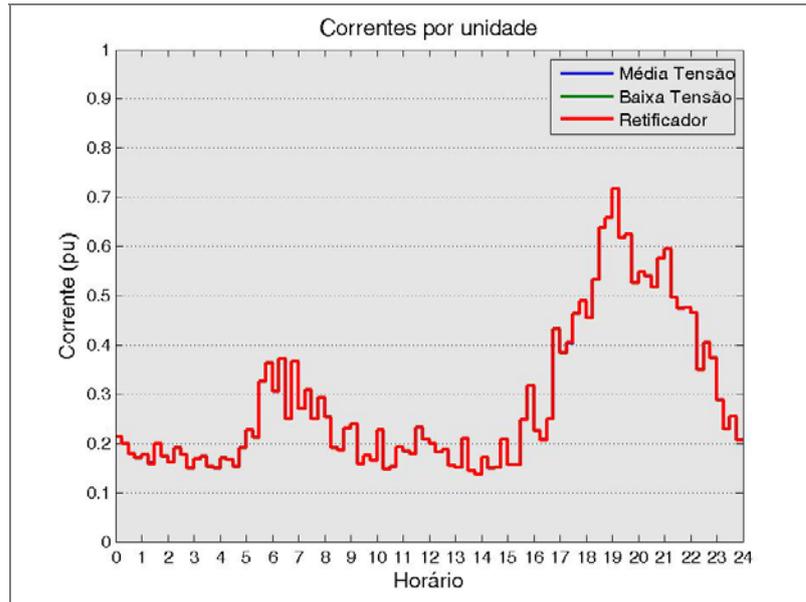


Figura 5.24 – Correntes por unidade

Os valores de demanda de potência ativa e perdas são mostrados na Figura 5.25. O detalhamento das perdas é feito na Figura 5.26.

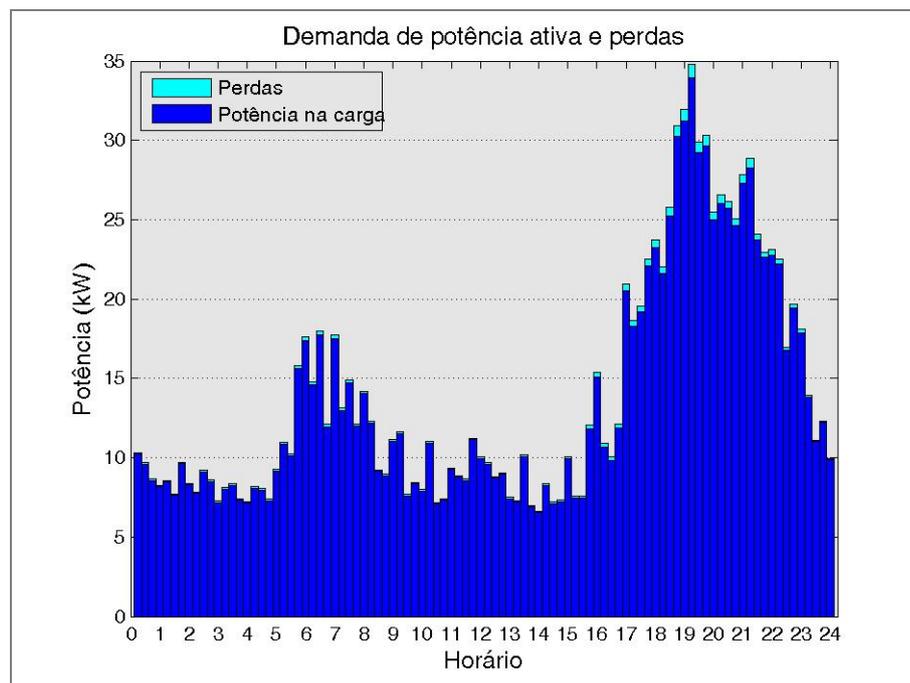


Figura 5.25 - Demanda de potência na rede CC

As perdas no retificador dependem da queda de tensão em condução dos diodos e do valor médio da corrente que passa por eles, enquanto que as perdas na rede e no

transformador dependem do quadrado das respectivas correntes. Daí a maior importância relativa das perdas no retificador nos momentos de menor demanda.

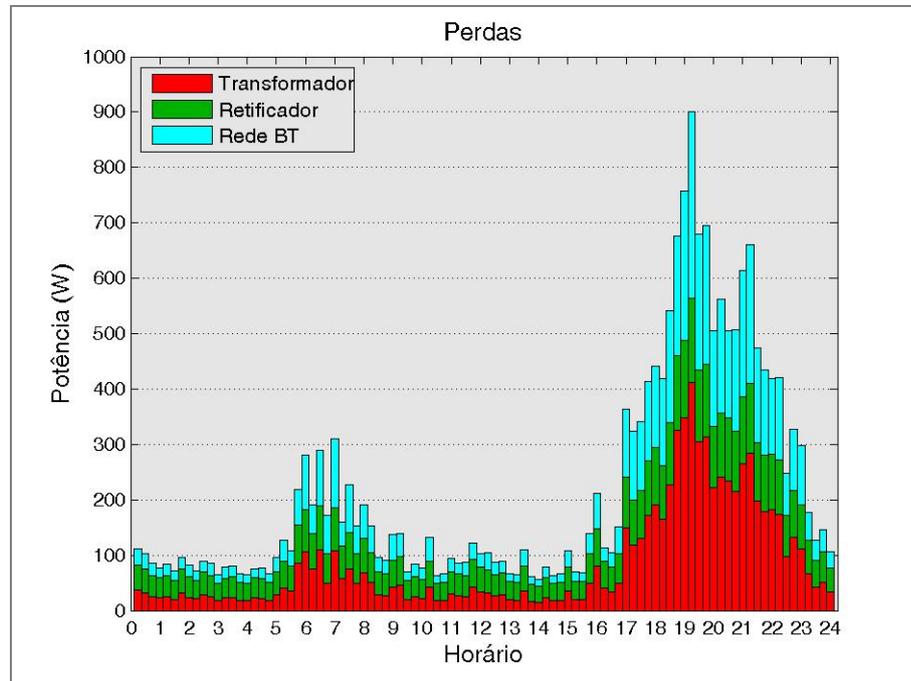


Figura 5.26 - Perdas na rede de baixa tensão, no retificador e no transformador

5.4 Análise comparativa dos resultados

Na Figura 5.27 são mostrados os valores de tensão alternada de sequência positiva e de tensão contínua para o poste 7. O mesmo é feito na Figura 5.28 para o poste 1.

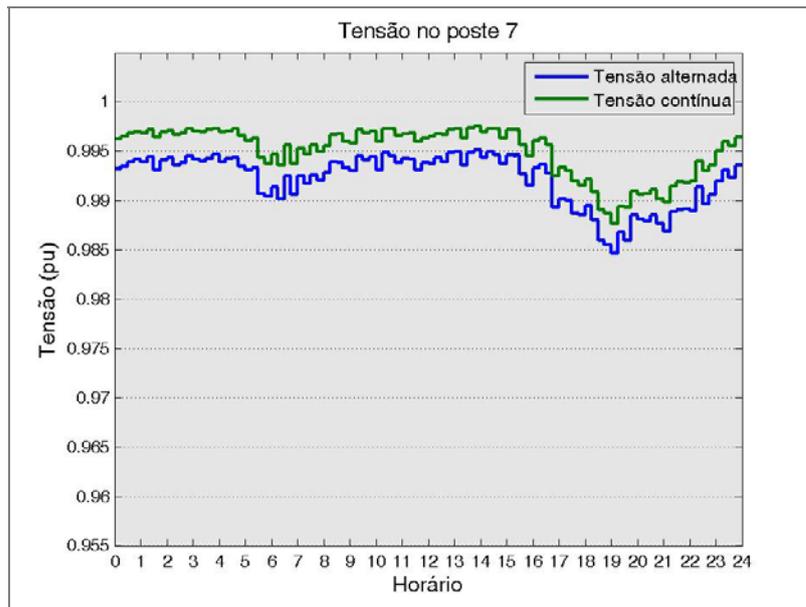


Figura 5.27 - Comparação entre as tensões alternada e contínua no poste 7

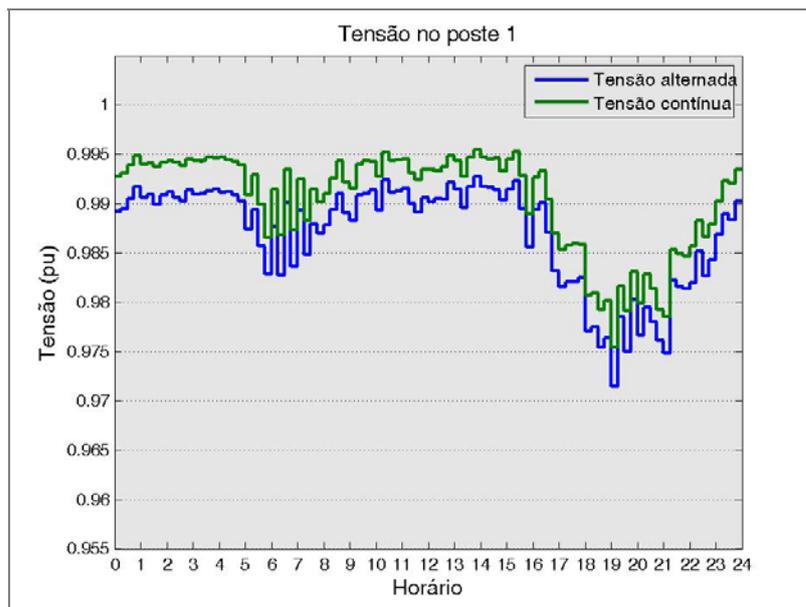


Figura 5.28 - Comparação entre as tensões alternada e contínua no poste 1

Apesar dos perfis de tensão serem parecidos, as quedas de tensão são menores para a rede em tensão contínua.

Outra vantagem da rede em tensão contínua é que, em tese, não há desequilíbrio de correntes na entrada do retificador e, conseqüentemente, no secundário e primário do transformador (na rede de média tensão). Porém, os níveis de distorção harmônica total de corrente de entrada do conversor utilizado (ponte retificadora trifásica não controlada), considerando a natureza da carga, se situam na faixa de 25

a 35% [49], sendo maiores que os valores produzidos pelos equipamentos na rede de tensão alternada. Isso, seguramente, contribui para o aumento das perdas no transformador, além de, por si só, ser algo indesejado.

O software de simulação utilizado não calcula as perdas para os componentes harmônicos das correntes. Ocorre que os valores de distorção harmônica encontrados para as correntes em tensão alternada na rede de baixa tensão são relativamente baixos, o que impacta pouco nas perdas e no dimensionamento dos condutores, que de acordo com as normas brasileiras deve considerar o valor eficaz da corrente [20].

Em termos de perdas totais, os resultados para os dois sistemas foram bastante próximos (Figuras 5.29). Se comparados apenas os valores das perdas no transformador e no circuito de baixa tensão, os valores em CC são um pouco menores, mas não se pode deixar de considerar as perdas no conversor CA-CC. Outras topologias de conversor podem fazer com que as perdas totais sejam maiores em CC do que em CA.

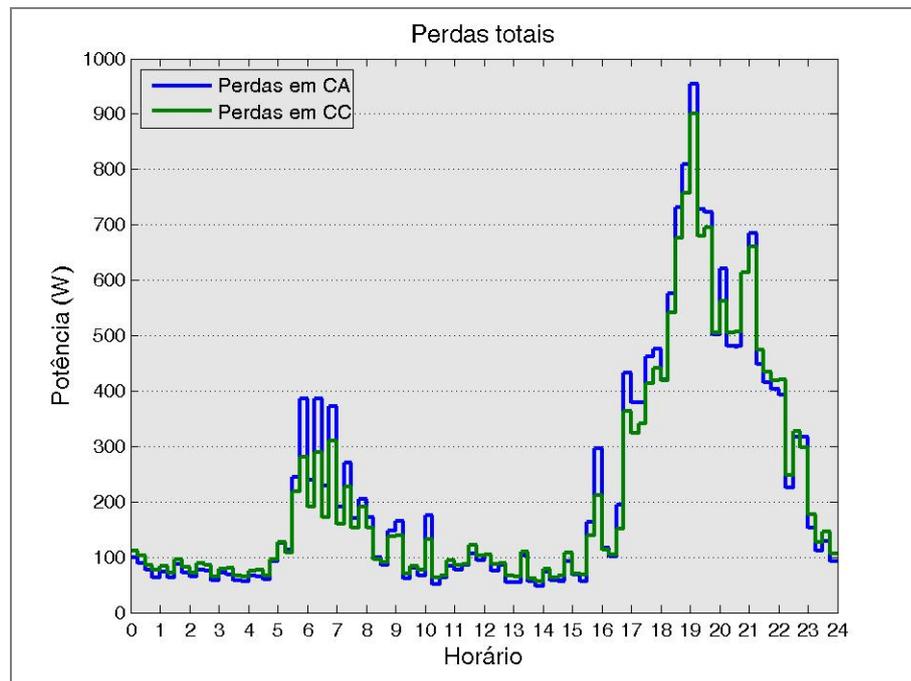


Figura 5.29 - Comparação entre as perdas em tensão alternada e contínua

Observa-se na Figura 5.30 que os valores de demanda em tensão contínua são ligeiramente maiores que aqueles obtidos para os mesmos horários em tensão alternada.

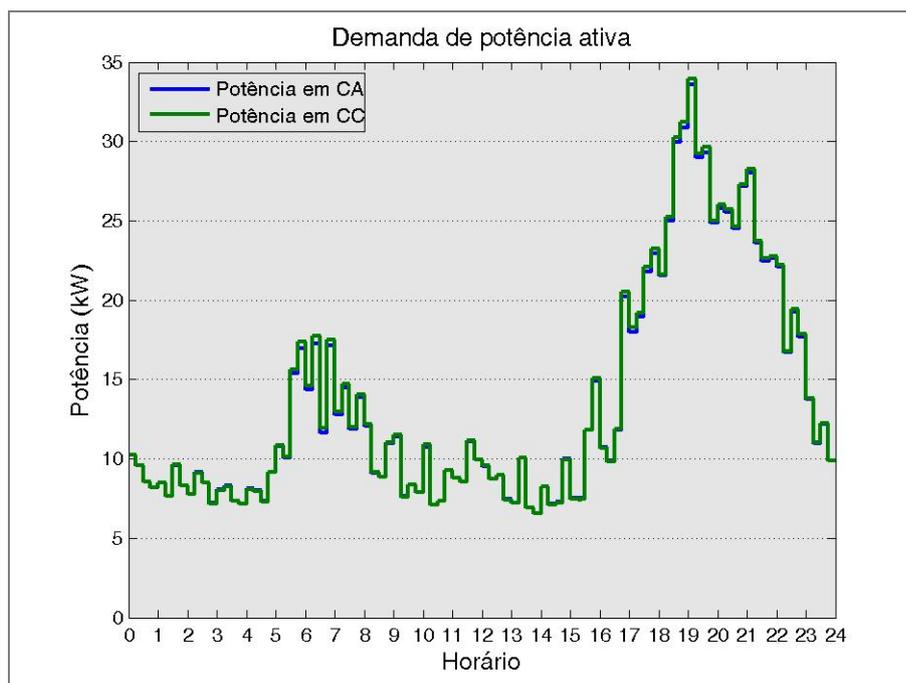


Figura 5.30 - Comparação entre os valores de demanda em tensão alternada e contínua

Isso se deve à menor queda de tensão percentual em tensão contínua, que tem menor influência na variação de potência das cargas resistivas. Além disso, os equipamentos a motor, se incluídos conversores CC-CA, tendem a se comportar como cargas de potência constante, assim como a maioria dos equipamentos eletrônicos. Pode-se, pois, afirmar que há um pequeno aumento de eficiência do sistema em tensão contínua.

Outra vantagem da rede de tensão contínua proposta é que são utilizados metade dos condutores nos trechos entre os postes. Reduz-se também o número de condutores nos ramais de ligação dos consumidores que em tensão alternada recebem duas ou três fases. Nesse, sentido, pode-se afirmar que há um ganho em eficiência, pois ocorrem perdas ligeiramente menores que em tensão alternada, mas em uma quantidade significativamente menor de condutores “em paralelo”.

5.5 Considerações finais

Nesse capítulo foram apresentados e discutidos os resultados de simulação para as duas alternativas de rede de distribuição (CA e CC) modeladas anteriormente.

Há vários trabalhos publicados em que se discute a questão de perdas em redes em tensão alternada e contínua. Alguns concluem que há desvantagem para a distribuição em CC, como o desenvolvido por Starke e outros [50]. E há outros trabalhos, como o de Kakigano [51], que consideram muito vantajosa a distribuição em CC. Os resultados obtidos neste trabalho mostram que há uma pequena vantagem para as redes em CC nesse aspecto, considerando a topologia proposta.

Além disso, há muitas outras questões importantes a serem avaliadas referentes à implantação de uma rede CC, como as questões de aterramento, sobretensões, proteção contra choques elétricos, o chaveamento (liga e desliga) dos equipamentos (que é mais difícil em CC) e questões de custo para adaptação dos equipamentos.

Capítulo 6

Conclusões e Propostas de Continuidade

Nessa dissertação, foi proposto um modelo de sistema de distribuição de energia elétrica em baixa tensão para avaliação das possibilidades de alimentação em tensão alternada e tensão contínua. Procurou-se reproduzir a natureza aleatória e distribuída das cargas em redes de distribuição, tendo como referência a Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Consumo de Energia Elétrica em Residências realizada pelo PROCEL/Eletróbrás em 2005. Através de medições e de procedimentos estabelecidos na literatura, foram propostos modelos para os equipamentos de consumo e para os componentes da rede elétrica. Essa modelagem pode ser alterada e adaptada considerando aspectos socioeconômicos e regionais.

Uma ferramenta de simulação de fluxo de potência e harmônicos foi, então, utilizada para obtenção de perfis de tensão, corrente e perdas no sistema proposto. Os resultados mostraram que a distribuição de energia elétrica em baixa tensão contínua, da forma como foi proposta, é uma alternativa que apresenta algumas vantagens em relação à distribuição convencional, em tensão alternada. A principal vantagem de uma rede de distribuição em tensão contínua, e que vai além do que foi avaliado neste trabalho, é a facilidade de integração às redes de fontes de energia renováveis como a fotovoltaica, que é uma fonte inerentemente CC.

A tecnologia de conversão CA-CC escolhida foi a mais simples possível (um conversor a diodos) e apresenta alguns inconvenientes, considerando os cenários que se projetam para o futuro, como a presença significativa de geração distribuída. O principal inconveniente, nesse caso, é a impossibilidade da inversão do fluxo de potência. Outro problema é o baixo fator de potência (nível relativamente alto de distorção harmônica de corrente) desse tipo de conversor. Por outro lado, essa tecnologia requer poucas alterações construtivas nas redes de distribuição atuais e é

compatível, considerando o nível de tensão escolhido, com grande parte dos equipamentos existentes nas unidades consumidoras residenciais. Como dito anteriormente, ela pode ser considerada como um passo intermediário entre os sistemas de distribuição em baixa tensão atuais e uma rede de distribuição “inteligente”.

Este é, pois, de um trabalho inicial no assunto. Há várias vertentes possíveis de continuidade. Entre elas, o levantamento de dados de um sistema de distribuição real, a avaliação de outras alternativas de conversão CA-CC, a elaboração de uma rotina de cálculo para as topologias típicas de sistemas de distribuição existentes (que supere algumas limitações encontradas na ferramenta de simulação utilizada nesse trabalho), a investigação do funcionamento de uma rede de distribuição através da implantação de uma microrrede CC completa em um laboratório ou edifício de alguma Instituição de pesquisa ou, até mesmo, em uma residência. Outras questões importantes a serem estudadas são os custos e estratégias de adequação necessárias no processo de migração das atuais redes CA para redes CC.

Referências Bibliográficas

- [1].SULZBERGER , C. Triumph of ac - from Pearl Street to Niagara. IEEE Power Energy Mag., vol. 1, no. 3, pp. 64-67, May/June 2003.
- [2].SULZBERGER , C. Triumph of ac - the battle of the currents, IEEE Power Energy Mag., vol. 1, no. 4, pp. 70-73, July/ Aug. 2003.
- [3].HORIGOME, T. ; KUROKAWA, K. ; KISHI, K. ; OZU, K. A 100-kV thyristor converter for high-voltage dc transmission. IEEE Transactions on Electron Devices, Volume:17, Issue: 9, pp. 809- 815, 1970.
- [4].PEIXOTO, C.A.O. ; FRONTIN, S.O. ; JARDINI, J.A. Engineering studies for Itaipu converter station design. Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings Volume: 130, Issue: 1, pp 41- 50, 1983.
- [5].HAMMERSTROM, D. J. (2007), AC Versus DC Distribution Systems - Did We Get it Right? 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp. 1-5.
- [6].KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B.; ROBBA, E. J. Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. Editora Edgar Blücher. 2005.
- [7].SHORT, T. A. Electric Power Distribution Handbook. CRC Press. 2004.
- [8].GÖNEN, T. Electric Power Distribution System Engineering, Second Edition. CRC Press, 2008.
- [9].AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, Procedimentos Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, módulo 8.
- [10].OLIVEIRA, A., COSTA, P. Electric Diagram Conception of a New Substation BH Centro 2. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. 2011.
- [11].CEMIG. ND-3.1 - Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas. 2005.
- [12].CEMIG. ND-3.1 - Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas. 2014.
- [13].SALOMONSSON, D. Modeling, control and protection of low voltage DC microgrids. Tese de Doutorado - Royal Institute of Technology (KTH), Suécia, 2008.
- [14].HINGORANI, N. High-voltage dc transmission: a power electronics workhorse. IEEE Spectrum, vol. 33, no. 4, pp. 63-72, Apr. 1996.
- [15].EMERGE Alliance. <<http://www.emergealliance.org>>.

- [16].NILSSON, D. DC Distribution Systems. Tese de Doutorado - Chalmers University of Technology, Göteborg, Suécia, 2005.
- [17].MOHAN, N., UNDELAND, T. M., ROBBINS, W. P. Power Electronics - Converters, Applications, and Design, third edition, John Wiley & Sons, 2003.
- [18].OLIVEIRA, T. R. Estudo e desenvolvimento de nanorredes inteligentes de distribuição local de energia em corrente contínua para aplicações residenciais e comerciais. Exame de Qualificação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais. 2014.
- [19].LAGO, J. Redistribuidor de correntes para redes de distribuição em corrente contínua bipolares. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. 2011.
- [20].ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5410:2004 - Instalações elétricas de baixa tensão. 2005.
- [21].ANAND, S.; FERNANDES, B. G. Optimal voltage levels for dc microgrids. Proceedings of the 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON), pp. 3034-3039, November 2010.
- [22].KAKIGANO, H.; MIURA, Y.; ISE, T. Low-voltage bipolar-type dc microgrid for super high quality distribution. IEEE transactions on power electronics, v. 25, n. 12, p. 3066-3075, 2010.
- [23].HELDWEIN, M. L. Microrredes em corrente contínua: qualidade de fornecimento eficiência em futuras redes de distribuição. Florianópolis, Brasil: [s.n.], 2010. Monografia entregue ao concurso público 23080.012809/2009-83 da Universidade Federal de Santa Catarina.
- [24].RODRIGUES, M., MOURA, A., BORGES, L., ALMEIDA, P. M., ALMEIDA, P. S., VALLE, R. L., FERREIRA, R., FERREIRA, A., BARBOSA, P., BRAGA, H. Microrrede Híbrida CC/CA baseada em Fontes de Energia Renovável aplicada a um Edifício Sustentável. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática, CBA 2012.
- [25].EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2013 - Ano Base 2012, 2013. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf>. Acesso em: 01 Junho 2014.
- [26].EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Anuário estatístico de energia elétrica 2013, 2013. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/20130909_1.pdf>. Acesso em: 01 Junho 2014.

- [27].ELETROBRAS. PROCEL. Pesquisa de Pesquisa de Posse de Eletrodomésticos e Hábitos de Uso - Classe Residencial, Região Sudeste - Ano Base 2005. Setembro de 2007.
- [28].CEMIG. ND-5.1 - Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Secundária - Rede de Distribuição Aérea - Edificações Individuais. 2013.
- [29].MME, Ministério das Minas e Energia, MCT, Ministério da Ciência e Tecnologia, MDIC, Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio. Portaria Interministerial 1007 de 31 de dezembro de 2010.
- [30].INMETRO - Instituto Nacional de Normalização e Qualidade Industrial. Uso Eficiente do Chuveiro Elétrico. 2007. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/cartilhas/chuveiro/chuveiro.pdf>
- [31].FREITAS, P. C. F. D. Luminotécnica e Lâmpadas Elétricas. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2008.
- [32].MOREIRA, V. D. A. Iluminação e Fotometria. 3ª. ed. Belo Horizonte: Edgard Blucher Ltda., 1993.
- [33].PHILIPS, N. V. Manual de Iluminação. 3ª. ed. Eindhoven: UDC, 1996.
- [34].PINHEIRO, P. C. C.,CERQUEIRA,S. A. A. G. Uma abordagem Econômico Social do Uso do Chuveiro Elétrico para Aquecimento de Água. In: V Encontro Nacional de Ciências Térmicas (ENCIT-94), 07-09 Dezembro 1994, São Paulo, SP.
- [35].ARAÚJO, J. E.,BELCHIOR, F. N. Custos Associados à Substituição de Chuveiros Elétricos por Aquecedores Solares. Revista O Setor Elétrico, Edição 62 - Março de 2011.
- [36].ABINEE - Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. Sistema Híbrido Soma as Qualidades do Chuveiro Elétrico com as do Coletor Solar. Revista Abinee. Edição 53 - outubro de 2009.
- [37].BRAGA, N.C. - Service de Forno de Microondas. Disponível em: <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/eletronica/52-artigos-diversos/2990-art410>
- [38].IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, 1993. "Load Representation for Dynamic Performance Analysis" - IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, Nº 2, May, 472-482.
- [39].IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, 1995. "Bibliography on Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation" - IEEE Transactions on Power Systems, Feb., Vol.10, p. 523 - 538.

- [40].SOUZA, M. M. P. Modelagem de Cargas para Estudos Dinâmicos. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Itajubá, 2010.
- [41].AMARAL, M. B. Modelagem Estática de Carga por Meio de Medição Direta: Proposição de uma Metodologia Sistematizada, seus Impactos e Benefícios. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Juiz de Fora, 2004.
- [42].NEVES, M. S. Modelagem de Cargas em Sistemas de Energia Elétrica: Modelo Matemático e sua Validação com Testes de Campo. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Juiz de Fora, 2008.
- [43].CEMIG. ND-2.9 – Instalações Básicas de Redes de Distribuição Aéreas Protegidas. 2001.
- [44].CEMIG. Especificação Técnica – Transformadores para Redes de Distribuição Aéreas – 15, 24,2 e 36,2kV, revisão de 02/02/2009.
- [45].PIRES, I. A. Caracterização de Harmônicos causados por Equipamentos Eletro-eletrônicos Residenciais e Comerciais no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.
- [46].NUNES, R. V. Análise da penetração harmônica em redes de distribuição desequilibradas devido às cargas residenciais e comerciais com a utilização do ATP. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- [47].ARRILAGA, J., WATSON, N. R. Power System Harmonics, second edition, University of Canterbury, 2003.
- [48].DUGAN, ROGER C., McGranaghan, Mark F. Electrical Power Systems Quality, Second edition, Editora: McGraw – Hill.
- [49].NDIAYE, M S. Modelagem de Cargas Não-Lineares por Fontes de Corrente Sincronizadas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2006.
- [50].STARKE, M.R.; TOLBERT, L.M.; OZPINECI, B. AC vs. DC distribution: A loss comparison. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008.
- [51].KAKIGANO, H.; NOMURA, M.; ISE, T. Loss evaluation of DC distribution for residential houses compared with AC system. International Power Electronics Conference (IPEC), 2010.
- [52].IEEE std. 519-1993, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Eletrical Power Systems, 1993.

Anexo I – Dados de Medição de Distorção Harmônica de Corrente de Equipamentos

Nas tabelas a seguir, são apresentados os dados de medição de distorção harmônica de corrente da maioria dos equipamentos considerados nas simulações. São mostrados a magnitude e o ângulo de fase de cada componente harmônica em relação à componente fundamental da tensão de alimentação.

Tabela A.1 - Dados de medição de harmônicos de uma lâmpada Osram Duluxstar 20W/865

Ordem	Magnitude		Ângulo (graus)
	pu	A	
1	1,000	0,1408	24
3	0,764	0,1075	-115
5	0,501	0,0705	126
7	0,439	0,0618	21
9	0,414	0,0583	-102
11	0,310	0,0437	137
13	0,233	0,0328	24
15	0,194	0,0273	-92
17	0,128	0,0180	142
19	0,050	0,0071	36
21	0,033	0,0047	-41
23	0,020	0,0029	-130
25	0,033	0,0047	175
27	0,043	0,0060	53
29	0,031	0,0044	-55
31	0,038	0,0053	-147
33	0,035	0,0049	96
35	0,022	0,0031	-15
37	0,019	0,0027	-106
39	0,022	0,0031	158
41	0,017	0,0024	57
43	0,022	0,0031	-34
45	0,019	0,0027	-146
47	0,017	0,0024	117
49	0,020	0,0029	18

Tabela A.2 - Dados de medição de harmônicos de uma lâmpada Philips "Twister" 23W/827

Ordem	Magnitude		Ângulo (graus)
	pu	A	
1	1,000	0,1795	31
3	0,759	0,1363	-95
5	0,498	0,0893	157
7	0,393	0,0705	59
9	0,300	0,0539	-50
11	0,174	0,0313	-148
13	0,112	0,0202	131
15	0,084	0,0151	61
17	0,095	0,0171	-5
19	0,112	0,0202	-103
21	0,107	0,0193	165
23	0,109	0,0195	75
25	0,112	0,0202	-16
27	0,114	0,0204	-109
29	0,122	0,0219	159
31	0,119	0,0213	59
33	0,115	0,0206	-38
35	0,119	0,0213	-137
37	0,100	0,0180	118
39	0,080	0,0144	22
41	0,067	0,0120	-75
43	0,049	0,0089	-169
45	0,038	0,0069	111
47	0,033	0,0060	21
49	0,030	0,0053	-59

Tabela A.3 - Dados de medição de harmônicos de uma lâmpada Soleil 25W/x27

Ordem	Magnitude		Ângulo (graus)
	pu	A	
1	1,000	0,2192	21
3	0,744	0,1631	-122
5	0,436	0,0955	114
7	0,338	0,0740	12
9	0,310	0,0681	-110
11	0,211	0,0463	126
13	0,122	0,0268	18
15	0,090	0,0197	-89
17	0,038	0,0084	156
19	0,022	0,0049	125
21	0,033	0,0073	26
23	0,034	0,0075	-58
25	0,052	0,0113	-164
27	0,051	0,0111	83
29	0,042	0,0093	-19
31	0,046	0,0100	-122
33	0,041	0,0091	131
35	0,039	0,0086	31
37	0,044	0,0098	-77
39	0,036	0,0080	179
41	0,036	0,0080	75
43	0,034	0,0075	-37
45	0,029	0,0064	-143
47	0,022	0,0049	125
49	0,023	0,0051	16

Tabela A.4 - Dados de medição de harmônicos de uma lâmpada Philips SON-T 150W

Ordem	Magnitude		Ângulo (graus)
	pu	A	
1	1,0000	0,7337	-7
3	0,1927	0,1414	-54
5	0,3387	0,2485	86
7	0,0713	0,0523	-58
9	0,0172	0,0126	-66
11	0,0592	0,0434	117
13	0,0450	0,0330	-164
15	0,0296	0,0217	47
17	0,0801	0,0587	158
19	0,0356	0,0262	63
21	0,0360	0,0264	-159
23	0,0492	0,0361	38
25	0,0000	0,0000	0
27	0,0000	0,0000	0
29	0,0263	0,0193	-151

Tabela A.5 - Dados de medição de harmônicos de um refrigerador Continental 270 litros

Ordem	Magnitude		Ângulo (graus)
	pu	A	
1	1,000	1,332	-50
3	0,145	0,192	87
5	0,044	0,059	85
7	0,010	0,014	-97

Tabela A.6 - Dados de medição de harmônicos de um refrigerador. Brastemp 320 litros

Ordem	Magnitude		Ângulo (graus)
	pu	A	
1	1,000	1,973	-53
3	0,041	0,081	55
5	0,036	0,072	109
7	0,021	0,041	-62

Tabela A.7 - Dados de medição de harmônicos de um condicionador 7500BTU (ventilador apenas)

Ordem	Magnitude		Ângulo (graus)
	pu	A	
1	1,0000	0,5125	7
3	0,0368	0,0188	110
5	0,0688	0,0352	-69

Tabela A.8 - Dados de medição de harmônicos de um condicionador 7500BTU (ventilador e compressor)

Ordem	Magnitude		Ângulo (graus)
	pu	A	
1	1,0000	4,0730	-8
3	0,0908	0,3698	120
5	0,1126	0,4588	-57

Tabela A.9 - Dados de medição de harmônicos de uma lavadora Brastemp 7kg

Ordem	Magnitude		Ângulo (graus)
	pu	A	
1	1,000	2,5246	-2
3	0,089	0,225	35
5	0,089	0,224	-164
7	0,039	0,099	-112
9	0,013	0,032	-146
11	0,014	0,035	-141

Tabela A.10 - Dados de medição de harmônicos de um liquidificador Walita

Ordem	Magnitude		Ângulo (graus)
	pu	A	
1	1,000	2,7456	-15
3	0,157	0,4306	110
5	0,039	0,1066	-152
7	0,010	0,0273	-86

Tabela A.11 - Dados de medição de harmônicos de um aspirador de pó Electrolux

Ordem	Magnitude		Ângulo (graus)
	pu	A	
1	1,000	7,7250	-10
3	0,199	1,5384	140
5	0,011	0,0888	-142
7	0,021	0,1598	-68

Tabela A.12 - Dados de medição de harmônicos de um chuveiro eletrônico 5500W @ 3600W

Ordem	Magnitude		Ângulo (graus)
	pu	A	
1	1,0000	30,55500	-13
3	0,2466	7,5350	84
5	0,0898	2,7441	-111
7	0,0742	2,2676	71
9	0,0404	1,2353	-112
11	0,0378	1,1559	76
13	0,0271	0,8294	-108
15	0,0257	0,7853	67
17	0,0211	0,6441	-118
19	0,0214	0,6529	65
21	0,0162	0,4941	-125
23	0,0150	0,4588	55
25	0,0115	0,3529	-133
27	0,0104	0,3176	48

Tabela A.13 - Dados de medição de harmônicos de um chuveiro eletrônico 5500W @4500W

Ordem	Magnitude		Ângulo (graus)
	pu	A	
1	1,0000	37,1500	-8
3	0,1546	5,7440	137
5	0,0582	2,1617	54
7	0,0409	1,5176	-65
9	0,0439	1,6323	150
11	0,0283	1,0500	30
13	0,0221	0,8206	-88
15	0,0219	0,8118	141
17	0,0171	0,6353	16
19	0,0128	0,4765	-111
21	0,0145	0,5382	135
23	0,0133	0,4941	5
25	0,0088	0,3265	-122
27	0,0109	0,4059	117

Tabela A.14 - Dados de medição de harmônicos de um televisor Philips LED 40" (40PFL6615D/78)

Ordem	Magnitude		Ângulo (graus)
	pu	A	
1	1,000	0,4686	11
3	0,209	0,0980	-163
5	0,124	0,0581	-134
13	0,018	0,0084	103
17	0,013	0,0062	33
21	0,017	0,0078	-87
25	0,010	0,0049	119
27	0,011	0,0053	-123
37	0,010	0,0049	68

Tabela A.15 - Dados de medição de harmônicos de um televisor Philips LCD 32" (32PFL3805D/78)

Ordem	Magnitude		Ângulo (graus)
	pu	A	
1	1,000	0,9866	6
3	0,117	0,1153	175
5	0,084	0,0833	-155
7	0,020	0,0193	-163
9	0,025	0,0250	-162

Tabela A.16 - Dados de medição de harmônicos de um televisor Philips CRT 20" (20PT4331D/78)

Ordem	Magnitude		Ângulo (graus)
	pu	A	
1	1,000	0,4063	6
3	0,773	0,3139	-175
5	0,441	0,1791	13
7	0,151	0,0614	-133
9	0,139	0,0563	138
11	0,169	0,0685	-18
13	0,106	0,0432	179
15	0,046	0,0188	68
17	0,068	0,0275	-52
19	0,056	0,0228	142
21	0,019	0,0075	5
23	0,030	0,0122	-67
25	0,035	0,0142	129
27	0,017	0,0071	-29
29	0,014	0,0055	-96
31	0,025	0,0100	106
33	0,016	0,0064	-66
37	0,011	0,0044	93

Tabela A.17 - Dados de medição de harmônicos de um aparelho de som Philips MC320

Ordem	Magnitude		Ângulo (graus)
	pu	A	
1	1,000	0,2753	-7
3	0,582	0,1603	179
5	0,260	0,0716	-21
7	0,056	0,0153	53
9	0,112	0,0308	174
11	0,074	0,0204	-39
13	0,031	0,0084	56
15	0,044	0,0122	173
17	0,031	0,0084	-53
19	0,019	0,0053	53
21	0,021	0,0058	159
23	0,016	0,0044	-73
25	0,010	0,0029	39

Tabela A.18 - Dados de medição de harmônicos de um forno de microondas Electrolux 28 litros

Ordem	Magnitude		Ângulo (graus)
	pu	A	
1	1,000	11,404	-28
3	0,125	1,427	-117
5	0,114	1,303	-71
7	0,020	0,233	-46

Tabela A.19 - Dados de medição de harmônicos de um notebook HP DM1 (tela de 10,1", fonte de 45W)

Ordem	Magnitude		Ângulo (graus)
	pu	A	
1	1,000	0,3695	18
3	0,852	0,3147	-141
5	0,625	0,2309	73
7	0,441	0,1629	-63
9	0,366	0,1351	169
11	0,345	0,1276	38
13	0,299	0,1104	-100
15	0,246	0,0909	130
17	0,225	0,0830	-1
19	0,205	0,0759	-133
21	0,174	0,0645	88
23	0,136	0,0503	-43
25	0,112	0,0415	-172
27	0,103	0,0380	61
29	0,082	0,0305	-71
31	0,065	0,0238	165
33	0,066	0,0243	39
35	0,056	0,0207	-91
37	0,042	0,0155	135
39	0,030	0,0110	21
41	0,032	0,0119	-105
43	0,031	0,0115	129
45	0,025	0,0093	-7
47	0,020	0,0075	-129
49	0,022	0,0079	117

Tabela A.20 - Dados de medição de harmônicos de um notebook Dell D630 (tela de 14,1", fonte de 65W)

Ordem	Magnitude		Ângulo (graus)
	pu	A	
1	1,000	0,5477	19
3	0,839	0,4597	-129
5	0,622	0,3408	96
7	0,482	0,2642	-28
9	0,460	0,2518	-153
11	0,442	0,2422	77
13	0,376	0,2061	-56
15	0,314	0,1717	177
17	0,281	0,1541	46
19	0,240	0,1312	-86
21	0,178	0,0977	143
23	0,129	0,0705	20
25	0,103	0,0564	-104
27	0,080	0,0440	135
29	0,055	0,0299	17
31	0,047	0,0255	-99
33	0,045	0,0247	143
35	0,027	0,0150	18
37	0,021	0,0114	-81
39	0,021	0,0114	165
41	0,021	0,0114	40
43	0,014	0,0079	-86
45	0,011	0,0062	-170
47	0,014	0,0079	47

Tabela A.21 - Dados de medição de harmônicos de um microcomputador "genérico" (fonte de "400W") e monitor Samsung 17

Ordem	Magnitude		Ângulo (graus)
	pu	A	
1	1,000	1,155	17
3	0,764	0,883	-134
5	0,420	0,485	81
7	0,123	0,142	-46
9	0,083	0,096	-78
11	0,110	0,127	171
13	0,092	0,107	60
15	0,077	0,089	-45
17	0,068	0,078	-147
19	0,064	0,074	110
21	0,060	0,070	-3
23	0,046	0,054	-116
25	0,032	0,037	150
27	0,028	0,033	41
29	0,019	0,022	-62
31	0,016	0,018	-143
33	0,018	0,021	119
37	0,016	0,018	8

Tabela A.22 - Dados de medição de harmônicos de um microcomputador Dell Optiplex 755DT (fonte de 275W) e monitor Dell E178FP (17")

Ordem	Magnitude		Ângulo (graus)
	pu	A	
1	1,000	0,582	5
3	0,682	0,397	171
5	0,263	0,153	-25
7	0,070	0,041	40
9	0,108	0,063	174
11	0,037	0,021	-54
13	0,052	0,030	14
15	0,052	0,030	162
17	0,027	0,016	-80
19	0,024	0,014	23
21	0,013	0,008	126
23	0,017	0,010	-129
25	0,011	0,007	16
29	0,013	0,008	-169

Tabela A.23 - Dados de medição de harmônicos de um DVD player Philips

Ordem	Magnitude		Ângulo (graus)
	pu	A	
1	1,000	0,0521	13
3	0,808	0,0421	-158
5	0,574	0,0299	40
7	0,306	0,0160	-111
9	0,174	0,0091	130
11	0,183	0,0095	5
13	0,187	0,0098	-138
15	0,140	0,0073	79
17	0,115	0,0060	-51
19	0,119	0,0062	178
21	0,106	0,0055	33
23	0,081	0,0042	-109
25	0,055	0,0029	119
27	0,060	0,0031	-7
29	0,043	0,0022	-141
31	0,047	0,0024	68
33	0,021	0,0011	-12
35	0,026	0,0013	-167
37	0,026	0,0013	48
39	0,017	0,0009	-118
41	0,017	0,0009	-208
43	1,000	0,0521	13
45	0,808	0,0421	-158
47	0,574	0,0299	40

Tabela A.24 - Dados de medição de harmônicos de um receptor de TV via satélite Zapper

Ordem	Magnitude		Ângulo (graus)
	pu	A	
1	1,000	0,0760	22
3	0,860	0,0654	-151
5	0,671	0,0510	50
7	0,455	0,0346	-103
9	0,292	0,0222	119
11	0,230	0,0175	-14
13	0,207	0,0157	-149
15	0,169	0,0129	68
17	0,122	0,0093	-65
19	0,114	0,0086	166
21	0,114	0,0086	32
23	0,105	0,0080	-111
25	0,090	0,0069	104
27	0,079	0,0060	-25
29	0,064	0,0049	-156
31	0,052	0,0040	59
33	0,055	0,0042	-63
35	0,038	0,0029	166
37	0,044	0,0033	31
39	0,032	0,0024	-120
41	0,035	0,0027	111
43	0,020	0,0016	-12
45	0,015	0,0011	-132
47	0,026	0,0020	93
49	0,017	0,0013	-23

Tabela A.25 - Dados de medição de harmônicos de um carregador de telefone celular (5W)

Ordem	Magnitude		Ângulo (graus)
	pu	A	
1	1,000	0,04344	23
3	0,832	0,03613	-127
5	0,597	0,02593	96
7	0,449	0,01951	-33
9	0,362	0,01574	-153
11	0,332	0,01441	78
13	0,270	0,01175	-50
15	0,194	0,00842	-165
17	0,168	0,00732	72
19	0,158	0,00687	-57
21	0,107	0,00466	-176
23	0,102	0,00443	71
25	0,092	0,00399	-44
27	0,092	0,00399	-164
29	0,071	0,00310	71
31	0,061	0,00266	-43
33	0,066	0,00288	-173
35	0,056	0,00244	64
37	0,046	0,00199	-40
39	0,051	0,00222	-148
41	0,036	0,00155	72
43	0,020	0,00089	-56
45	0,020	0,00089	-149
47	0,026	0,00111	88
49	0,020	0,00089	-53

Apêndice I - Dados dos Cabos de Baixa Tensão

Cabos Triplex - 0,6/1kV - Série Métrica

Triplex 2x1x16+16mm² XLPE

Consistem de dois condutores de alumínio isolados, torcidos sobre um condutor neutro de sustentação.

Descrição

Condutor Fase

Cabos formados por fios de alumínio nu, têmpera dura, encordoamento classe A.

Isolação

Constituída por Polietileno Termoplástico (PE) ou Termofixo (XLPE).

Identificação

Os condutores fase podem ser identificados da seguinte forma:

- Por números impressos sobre a isolação
- Por meio de cores (fases com cores diferentes)
- Por meio de frisos

A identificação por cores oferece uma série de vantagens:

- Melhor identificação das fases
- Rapidez na instalação dos cabos
- Facilidade na conexão entre cabos
- Facilidade para localização de eventuais falhas
- Aprimoramento Estético

Condutor Neutro

Para os cabos com seções entre 10mm² a 25mm² (inclusive) devem ser utilizados cabos de alumínio, têmpera dura, sem alma de aço (CA).

Para os cabos com seções acima de 35mm² (inclusive) devem ser utilizados cabos de alumínio liga 6201 (CAL).

A NEXANS poderá fabricar cabos multiplex com condutor mensageiro em cabo de alumínio com alma de aço e, também poderá fabricar cabos com mensageiro isolado.

Acondicionamento

Os cabos multiplex são acondicionados em carretéis de madeira fabricados conforme norma ABNT NBR 11137. Podem também ser fornecidos em rolos. Neste caso sua massa deve ser limitada em 40kg.



Especificação

Nacional ABNT NBR 8182/03



Tensão
0,6 / 1 kV

Cabos Triplex - 0,6/1kV - Série Métrica

Triplex 2x1x16+16mm² XLPE

Características

Características construtivas	
Tipo do condutor fase	CA - Cabo de Alumínio
Forma do condutor fase	Circular compactado
Tipo do neutro	CA - Cabo de Alumínio
Isolação	XLPE (chemical)
Tipo de construção	2x1x16+16
Características dimensionais	
Seção do condutor fase	16 mm ²
Diâmetro do condutor fase	4,7 mm
Espessura da isolação	1,2 mm
Seção do condutor neutro	16 mm ²
Diâmetro do condutor neutro	5,1 mm
Diâmetro Externo	15,6 mm
Massa aproximada	181 kg/km
Características elétricas	
Resistência elétrica máxima CC a 20°C	1,91 Ohm/km
Reatância indutiva	0,1022 Ohm/km
Ampacidade	70,0 A
Tensão	0,6 / 1 kV
Características mecânicas	
Carga de ruptura	292.0 kgf
Características de utilização	
Acondicionamento	Rolo ou Bobina

Informação Sobre Entregas

Condições para cálculo da ampacidade

Temperatura ambiente: 40°C

Intensidade da radiação solar: 1000W/m²

Velocidade do vento: nula

Temperatura no condutor: PE 70°C e XLPE 90°C



Tensão
0,6 / 1 kV

Cabos Quadruplex - 0,6/1kV - Série Métrica

Quadruplex 3x1x16+16mm² XLPE

Consistem de três condutores de alumínio isolados, torcidos sobre um condutor neutro de sustentação.

Descrição

Condutor Fase

Cabos formados por fios de alumínio nu, têmpera dura, encordoamento classe A.

Isolação

Constituída por Polietileno Termoplástico (PE) ou Termofixo (XLPE).

Identificação

Os condutores fase podem ser identificados da seguinte forma:

- Por números impressos sobre a isolação
- Por meio de cores (fases com cores diferentes)
- Por meio de frisos

A identificação por cores oferece uma série de vantagens:

- Melhor identificação das fases
- Rapidez na instalação dos cabos
- Facilidade na conexão entre cabos
- Facilidade para localização de eventuais falhas
- Aprimoramento Estético

Condutor Neutro

Para os cabos com seções entre 10mm² a 25mm² (inclusive) devem ser utilizados cabos de alumínio, têmpera dura, sem alma de aço (CA).

Para os cabos com seções acima de 35mm² (inclusive) devem ser utilizados cabos de alumínio liga 6201 (CAL).

A NEXANS poderá fabricar cabos multiplex com condutor mensageiro em cabo de alumínio com alma de aço e, também poderá fabricar cabos com mensageiro isolado.

Acondicionamento

Os cabos multiplex são acondicionados em carretéis de madeira fabricados conforme norma ABNT NBR 11137. Podem também ser fornecidos em rolos. Neste caso sua massa deve ser limitada em 40kg.



Especificação

Nacional ABNT NBR 8182/03



Tensão
0,6 / 1 kV

Cabos Quadruplex - 0,6/1kV - Série Métrica

Quadruplex 3x1x16+16mm² XLPE

Características

Características construtivas	
Tipo do condutor fase	CA - Cabo de Alumínio
Forma do condutor fase	Circular compactado
Tipo do neutro	CA - Cabo de Alumínio
Isolação	XLPE (chemical)
Tipo de construção	3x1x16+16
Características dimensionais	
Seção do condutor fase	16 mm ²
Diâmetro do condutor fase	4,7 mm
Espessura da isolação	1,2 mm
Seção do condutor neutro	16 mm ²
Diâmetro do condutor neutro	5,1 mm
Diâmetro Externo	17,5 mm
Massa aproximada	250 kg/km
Características elétricas	
Resistência elétrica máxima CC a 20°C	1,91 Ohm/km
Reatância indutiva	0,1022 Ohm/km
Ampacidade	60,0 A
Tensão	0,6 / 1 kV
Características mecânicas	
Carga de Ruptura	2,86 kN
Características de utilização	
Acondicionamento	Rolo ou Bobina

Informação Sobre Entregas

Condições para cálculo da ampacidade

Temperatura ambiente: 40°C

Intensidade da radiação solar: 1000W/m²

Velocidade do vento: nula

Temperatura no condutor: PE 70°C e XLPE 90°C



Tensão
0,6 / 1 kV

Cabos Triplex - 0,6/1kV - Série Métrica

Triplex 2x1x70+70mm² XLPE

Consistem de dois condutores de alumínio isolados, torcidos sobre um condutor neutro de sustentação.

Descrição

Condutor Fase

Cabos formados por fios de alumínio nu, têmpera dura, encordoamento classe A.

Isolação

Constituída por Polietileno Termoplástico (PE) ou Termofixo (XLPE).

Identificação

Os condutores fase podem ser identificados da seguinte forma:

- Por números impressos sobre a isolação
- Por meio de cores (fases com cores diferentes)
- Por meio de frisos

A identificação por cores oferece uma série de vantagens:

- Melhor identificação das fases
- Rapidez na instalação dos cabos
- Facilidade na conexão entre cabos
- Facilidade para localização de eventuais falhas
- Aprimoramento Estético

Condutor Neutro

Para os cabos com seções entre 10mm² a 25mm² (inclusive) devem ser utilizados cabos de alumínio, têmpera dura, sem alma de aço (CA).

Para os cabos com seções acima de 35mm² (inclusive) devem ser utilizados cabos de alumínio liga 6201 (CAL).

A NEXANS poderá fabricar cabos multiplex com condutor mensageiro em cabo de alumínio com alma de aço e, também poderá fabricar cabos com mensageiro isolado.

Acondicionamento

Os cabos multiplex são acondicionados em carretéis de madeira fabricados conforme norma ABNT NBR 11137. Podem também ser fornecidos em rolos. Neste caso sua massa deve ser limitada em 40kg.



Especificação

Nacional ABNT NBR 8182/03



Tensão
0,6 / 1 kV

Cabos Triplex - 0,6/1kV - Série Métrica

Triplex 2x1x70+70mm² XLPE

Características

Características construtivas	
Tipo do condutor fase	CA - Cabo de Alumínio
Forma do condutor fase	Circular compactado
Tipo do neutro	CAL - Cabo de Alumínio Liga 6201
Isolação	XLPE (chemical)
Tipo de construção	2x1x70+70
Características dimensionais	
Seção do condutor fase	70 mm ²
Diâmetro do condutor fase	9,75 mm
Espessura da isolação	1,8 mm
Seção do condutor neutro	70 mm ²
Diâmetro do condutor neutro	10,35 mm
Diâmetro Externo	29,2 mm
Massa aproximada	675 kg/km
Características elétricas	
Resistência elétrica máxima CC a 20°C	0,443 Ohm/km
Reatância indutiva	0,0948 Ohm/km
Ampacidade	180,0 A
Tensão	0,6 / 1 kV
Características mecânicas	
Carga de ruptura	2169.0 kgf
Características de utilização	
Acondicionamento	Bobina

Informação Sobre Entregas

Condições para cálculo da ampacidade

Temperatura ambiente: 40°C

Intensidade da radiação solar: 1000W/m²

Velocidade do vento: nula

Temperatura no condutor: PE 70°C e XLPE 90°C



Tensão
0,6 / 1 kV

Cabos Quadruplex - 0,6/1kV - Série Métrica

Quadruplex 3x1x70+70mm² XLPE

Consistem de três condutores de alumínio isolados, torcidos sobre um condutor neutro de sustentação.

Descrição

Condutor Fase

Cabos formados por fios de alumínio nu, têmpera dura, encordoamento classe A.

Isolação

Constituída por Polietileno Termoplástico (PE) ou Termofixo (XLPE).

Identificação

Os condutores fase podem ser identificados da seguinte forma:

- Por números impressos sobre a isolação
- Por meio de cores (fases com cores diferentes)
- Por meio de frisos

A identificação por cores oferece uma série de vantagens:

- Melhor identificação das fases
- Rapidez na instalação dos cabos
- Facilidade na conexão entre cabos
- Facilidade para localização de eventuais falhas
- Aprimoramento Estético

Condutor Neutro

Para os cabos com seções entre 10mm² a 25mm² (inclusive) devem ser utilizados cabos de alumínio, têmpera dura, sem alma de aço (CA).

Para os cabos com seções acima de 35mm² (inclusive) devem ser utilizados cabos de alumínio liga 6201 (CAL).

A NEXANS poderá fabricar cabos multiplex com condutor mensageiro em cabo de alumínio com alma de aço e, também poderá fabricar cabos com mensageiro isolado.

Acondicionamento

Os cabos multiplex são acondicionados em carretéis de madeira fabricados conforme norma ABNT NBR 11137. Podem também ser fornecidos em rolos. Neste caso sua massa deve ser limitada em 40kg.



Especificação

Nacional ABNT NBR 8182/03



Tensão
0,6 / 1 kV

Cabos Quadruplex - 0,6/1kV - Série Métrica

Quadruplex 3x1x70+70mm² XLPE

Características

Características construtivas	
Tipo do condutor fase	CA - Cabo de Alumínio
Forma do condutor fase	Circular compactado
Tipo do neutro	CAL - Cabo de Alumínio Liga 6201
Isolação	XLPE (chemical)
Tipo de construção	3x1x70+70
Características dimensionais	
Seção do condutor fase	70 mm ²
Diâmetro do condutor fase	9,75 mm
Espessura da isolação	1,8 mm
Seção do condutor neutro	70 mm ²
Diâmetro do condutor neutro	10,35 mm
Diâmetro Externo	32,7 mm
Massa aproximada	931 kg/km
Características elétricas	
Resistência elétrica máxima CC a 20°C	0,443 Ohm/km
Reatância indutiva	0,0948 Ohm/km
Ampacidade	160,0 A
Tensão	0,6 / 1 kV
Características mecânicas	
Carga de Ruptura	21,27 kN
Características de utilização	
Acondicionamento	Bobina

Informação Sobre Entregas

Condições para cálculo da ampacidade

Temperatura ambiente: 40°C

Intensidade da radiação solar: 1000W/m²

Velocidade do vento: nula

Temperatura no condutor: PE 70°C e XLPE 90°C



Tensão
0,6 / 1 kV