

RESSALVA

Alertamos para ausência de páginas pré-textuais, não incluídas pelo(a) autor(a) no arquivo original.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: ESTIMAÇÃO DE CURVAS DE CARGA EM PONTOS DE CONSUMO E EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO

AUTOR: AISLAN ANTONIO FRANCISQUINI

ORIENTADOR: Prof. Dr. ANTONIO PADILHA FELTRIN

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA ELÉTRICA pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ANTONIO PADILHA FELTRIN

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. PABLO EDUARDO CUERVO FRANCO

Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade de Brasília

Data da realização: 03 de março de 2006.

Presidente da Comissão Examinadora
Prof. Dr. ANTONIO PADILHA FELTRIN

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus por ter me iluminado todos os dias, me ajudando a concluir mais uma etapa importante em minha vida profissional.

Aos meus pais José Antonio e Sonia, e meus irmãos Alieson e Adrian, pelo amor, carinho, dedicação, paciência e por acreditarem sempre em mim. Ficam guardados inúmeros momentos que tenho certeza que jamais esquecerei.

Ao professor Antonio Padilha Feltrin, pela dedicação, paciência, confiança e amizade durante a orientação deste trabalho, que será de suma importância em minha formação profissional.

Aos professores José Roberto Sanches Mantovani, Rubén Augusto Romero Lázaro, Sérgio Azevedo de Oliveira, Carlos Roberto Minussi e Edison Righeto, pelas sugestões e pela amizade durante a realização deste trabalho.

Aos meus companheiros do Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica – LaPSEE, pelas sugestões, pelo apoio e pelo convívio.

Aos meus amigos, em especial à Juliana, que me incentivaram e me apoiaram a realizar esta importante etapa de minha carreira profissional.

Aos amigos André, Ivan, Hallan e Roberto pelas conversas e discussões referentes à metodologia e aos resultados.

À Fundação de Ensino, Pesquisa e Extensão de Ilha Solteira, pelo apoio financeiro.

Resumo

Neste trabalho apresenta-se uma metodologia para estimação de curvas de carga diárias para consumidores de energia elétrica conectados em baixa tensão. A estimativa das curvas é baseada em medições reais e valores de consumo mensal de energia, fornecidos por empresas de distribuição de energia. Através do valor de consumo mensal de energia elétrica de uma unidade consumidora é possível estimar suas curvas de carga. Utilizando estas curvas de carga estimadas são feitas agregações visando obter as curvas estimadas para os transformadores de rede e para o alimentador. As curvas estimadas para o alimentador são comparadas com medições reais, realizadas tradicionalmente pelas empresas, obtendo um fator de correção, aplicado a cada curva de consumidor individual, visando obter estimativas de curvas mais próximas possíveis das reais.

Abstract

In this work a methodology for load curves estimation in a daily basis for consumers connected to low-voltage power distribution networks is presented. Curve estimation is based on actual measurements and monthly energy consumption values supplied by electric utilities. Thus, by using the monthly energy consumption of a given consumer unit, it is possible to estimate its corresponding load curves. Then, aggregations are performed with these estimated load curves aimed at obtaining estimated curves for network transformers and for the feeder. The latter are compared to real measurements, carried out traditionally by utilities, obtaining a correction factor applied to each individual consumer curve in order to reduce the mismatches between real and estimated curves.

Sumário

Agradecimentos	iii
Resumo	iv
Abstract.....	v
Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas.....	xii
Lista de Símbolos	xiii
Capítulo 1 – Introdução	1
Capítulo 2 – Sistemas de Distribuição.....	3
2.1- Introdução	3
2.2- Características dos Sistemas de Distribuição	5
2.2.1 Subestações de Distribuição	7
2.2.2 Alimentadores Radiais.....	7
2.2.3- Consumidores de Energia	9
2.2.3.1- Consumidores Residenciais	9
2.2.3.2- Consumidores Comerciais	12
2.2.3.3- Consumidores Industriais.....	14
Capítulo 3 – Metodologia para Estimação de Curvas de Carga na Distribuição	16
3.1. Introdução.....	16
3.2. Metodologias Encontradas	16
3.3. Análise Estatística	20
3.4. Metodologia Empregada	22
3.5. Curvas de Carga de Consumidores de Baixa Tensão	23
3.6. Curvas de Carga de Transformadores de Rede e do Alimentador	31
3.7. Ajuste nas Curvas de Cargas Estimadas.....	32
Capítulo 4 - Testes e Resultados	35
4.1. Curvas de Carga Individuais	35
4.2. Sistema de 4 Barras	41
4.3. Alimentador de 123 Barras.....	46

Capítulo 5 – Conclusões	61
Capítulo 6 – Referências Bibliográficas	63
Apêndice A – Distribuições Amostras	66
Apêndice B – Tratamento Estatístico das Curvas de Carga	68
Apêndice C – Curvas de Carga De Consumidores Residenciais.....	71
Apêndice D – Curvas de Carga De Consumidores Comerciais	82

Lista de Figuras

Figura 2.1: Fluxograma de Planejamento de Sistemas típico [1].	4
Figura 2.2: Sistema de Distribuição Simples.	6
Figura 2.3. Rede de distribuição típica.	8
Figura 2.4: Características das cargas residenciais.	10
Figura 2.5: Curva de Carga de um consumidor residencial.	11
Figura 2.6: Consumo de energia por habitante no ano de 2000.	12
Figura 2.7: Curva de carga de consumidor comercial.	14
Figura 2.8 Curvas de carga do setor industrial.	15
Figura 3.1: Distribuição Normal.	21
Figura 3.2: Curvas representativas de dias úteis da classe 301 a 500 kWh/mês.	23
Figura 3.3: Curvas representativas de sábados da classe 301 a 500 kWh/mês.	23
Figura 3.4: Curvas representativas de domingos da classe 301 a 500 kWh/mês.	24
Figura 3.5: Curvas representativas de dias úteis da classe 301 a 500 kWh/mês.	24
Figura 3.6: Curvas representativas de sábados da classe 301 a 500 kWh/mês.	25
Figura 3.7: Curvas representativas de domingos da classe 301 a 500 kWh/mês.	25
Figura 3.8: Curvas representativas de dias úteis para classe residencial.	26
Figura 3.9: Curvas representativas aos sábados para classe residencial.	27
Figura 3.10: Curvas representativas aos domingos para classe residencial.	27
Figura 3.11: Curvas representativas de dias úteis para classe comercial.	28
Figura 3.12: Curvas representativas aos sábados para classe comercial.	28
Figura 3.13: Curvas representativas aos domingos para classe comercial.	29
Figura 3.14: Curvas estimadas de dias úteis para consumidor de 339 kWh/mês.	30
Figura 3.15: Curvas estimadas com probabilidades de não ser excedidas.	33
Figura 4.1: Curvas para consumidores residenciais – classe menor que 100 kWh/mês.	36
Figura 4.2: Curvas para consumidores comerciais – classe menor que 100 kWh/mês.	36
Figura 4.3: Curvas para consumidores residenciais – classe 101 a 200 kWh/mês.	37
Figura 4.4: Curvas para consumidores comerciais – classe 101 a 200 kWh/mês.	37
Figura 4.5: Curvas para consumidores residenciais – classe 201 a 300 kWh/mês.	38
Figura 4.6: Curvas para consumidores comerciais – classe 201 a 300 kWh/mês.	38

Figura 4.7: Curvas para consumidores residenciais – classe 301 a 500 kWh/mês.....	39
Figura 4.8: Curvas para consumidores comerciais – classe 301 a 500 kWh/mês.	39
Figura 4.9: Curvas para consumidores residenciais – classe maior que 500 kWh/mês.	40
Figura 4.10: Curvas para consumidores comerciais – classe maior que 500 kWh/mês.	40
Figura 4.11: Alimentador fictício.	41
Figura 4.12: Curvas no alimentador.	42
Figura 4.13: Curvas de um consumidor.	42
Figura 4.14: Curva real e curva estimada (agregada) no Transformador 1.....	43
Figura 4.15: Curva real e curva estimada (agregada) no Transformador 2.....	43
Figura 4.16: Curva real e curva estimada (agregada) no Transformador 3.....	44
Figura 4.17: Curva real e curva estimada (agregada) no Transformador 4.....	44
Figura 4.18: Curvas do transformador 1 com probabilidades diferentes.	46
Figura 4.19: Alimentador real estudado.	Erro! Indicador não definido.
Figura 4.20: Curva de carga real de dia útil.	48
Figura 4.21: Curva de carga real de sábado.	48
Figura 4.22: Curva de carga real de domingo.	49
Figura 4.23: Transformador tipicamente comercial.	49
Figura 4.24: Transformador tipicamente residencial.....	50
Figura 4.25: Curva representativa de transformador de iluminação pública.....	50
Figura 4.26: Curva estimada de um transformador em um dia útil.....	51
Figura 4.27: Curva estimada de um transformador em um sábado.....	51
Figura 4.28: Curva estimada de um transformador em um domingo.....	52
Figura 4.29: Estimativa das perdas no alimentador.....	52
Figura 4.30: Curva estimada no início do alimentador.	53
Figura 4.31: Comparação entre as curvas estimada e real de dias úteis.....	53
Figura 4.32: Comparação entre as curvas estimada e real aos sábados.....	54
Figura 4.33: Comparação entre as curvas estimada e real aos domingos.....	54
Figura 4.34: Curvas estimada e corrigida de um consumidor.	55
Figura 4.35: Curvas de carga de transformador tipicamente residencial em dias úteis..	56
Figura 4.36: Curvas de carga de transformador tipicamente residencial aos sábados. ..	56
Figura 4.37: Curvas de Carga de transformador tipicamente residencial aos domingos.	57
Figura 4.38: Curvas de carga de transformador tipicamente comercial em dias úteis..	57
Figura 4.39: Curvas de carga de transformador tipicamente comercial aos sábados....	58
Figura 4.40: Curvas de carga de transformador tipicamente comercial aos domingos..	58

Figura 4.41: Análise das perdas na estimativa de curvas de consumidor individual.	59
Figura 4.42: Análise das perdas na estimativa de curvas de um transformador.....	60
Figura 4.43: Comparação entre distribuições amostrais de Gauss e de “Student” t.....	60
Figura B.1: Curvas de carga de consumidores reais.....	68
Figura B.2: Curvas média e de desvio padrão da classe de consumo.	69
Figura B.3: Curvas representativas da classe de consumo em “p.u.”.....	69
Figura B.4: Estimativa de curvas de carga da classe 301 a 500 kWh.	70
Figura C.1: Curvas representativas de dias úteis da classe menor que 100 kWh/mês. ..	72
Figura C.2: Curvas representativas aos sábados da classe menor que 100 kWh/mês.	73
Figura C.3: Curvas representativas aos domingos da classe menor que 100 kWh/mês.	73
Figura C.4: Curvas representativas de dias úteis da classe 101 a 200 kWh/mês.	74
Figura C.5: Curvas representativas aos sábados da classe 101 a 200 kWh/mês.	75
Figura C.6: Curvas representativas aos domingos da classe 101 a 200 kWh/mês.	75
Figura C.7: Curvas representativas de dias úteis da classe 201 a 300 kWh/mês.	76
Figura C.8: Curvas representativas aos sábados da classe 201 a 300 kWh/mês.	77
Figura C.9: Curvas representativas aos domingos da classe 201 a 300 kWh/mês.	77
Figura C.10: Curvas representativas de dias úteis da classe 301 a 500 kWh/mês.	78
Figura C.11: Curvas representativas aos sábados da classe 301 a 500 kWh/mês.	79
Figura C.12: Curvas representativas aos domingos da classe 301 a 500 kWh/mês.	79
Figura C.13: Curvas representativas de dias úteis da classe maior que 500 kWh/mês. .	80
Figura C.14: Curvas representativas aos sábados da classe maior que 500 kWh/mês. ..	81
Figura C.15: Curvas representativas aos domingos da classe maior que 500 kWh/mês.	81
Figura D.1: Curvas representativas de dias úteis da classe menor que 100 kWh/mês. ..	83
Figura D.2: Curvas representativas aos sábados da classe menor que 100 kWh/mês.	84
Figura D.3: Curvas representativas aos domingos da classe menor que 100 kWh/mês.	84
Figura D.4: Curvas representativas de dias úteis da classe 101 a 200 kWh/mês.	86
Figura D.5: Curvas representativas aos sábados da classe 101 a 200 kWh/mês.	86
Figura D.6: Curvas representativas aos domingos da classe 101 a 200 kWh/mês.	87
Figura D.7: Curvas representativas de dias úteis da classe 201 a 300 kWh/mês.	88
Figura D.8: Curvas representativas aos sábados da classe 201 a 300 kWh/mês.	89
Figura D.9: Curvas representativas aos domingos da classe 201 a 300 kWh/mês.	89
Figura D.10: Curvas representativas de dias úteis da classe 301 a 500 kWh/mês.	91
Figura D.11: Curvas representativas aos sábados da classe 301 a 500 kWh/mês.	91
Figura D.12: Curvas representativas aos domingos da classe 301 a 500 kWh/mês.	92

Figura D.13: Curvas representativas de dias úteis da classe maior que 500 kWh/mês.. 93

Figura D.14: Curvas representativas aos sábados da classe maior que 500 kWh/mês... 93

Figura D.15: Curvas representativas aos domingos da classe maior que 500 kWh/mês.94

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Consumo de energia – setor comercial.....	12
Tabela 2.2: Consumo de energia do setor industrial – Cidade de São Paulo.	14
Tabela 3.1: Frequência de distribuição das classes de consumo	22
Tabela 4.1: Erro máximo entre consumo das curvas real e estimada a cada dia (%).	45
Tabela 4.2: Maiores diferenças entre as curvas e os horários em que ocorrem.	45
Tabela 4.3: Menores diferenças entre as curvas e os horários em que ocorrem.....	45
Tabela C.1: Consumidores da classe de consumo menor que 100 kWh/mês.....	72
Tabela C.2: Consumidores da classe de consumo entre 101 e 200 kWh/mês.....	74
Tabela C.3: Consumidores da classe de consumo entre 201 e 300 kWh/mês.....	76
Tabela C.4: Consumidores da classe de consumo entre 301 e 500 kWh/mês.....	78
Tabela C.5: Consumidores da classe de consumo maior que 500 kWh/mês.	80
Tabela D.1: Consumidores da classe de consumo menor que 100 kWh/mês.	83
Tabela D.2: Consumidores da classe de consumo entre 101 e 200 kWh/mês.....	85
Tabela D.3: Consumidores da classe de consumo entre 201 e 300 kWh/mês.....	88
Tabela D.4: Consumidores da classe de consumo entre 301 e 500 kWh/mês.....	90
Tabela D.5: Consumidores da classe de consumo maior que 500 kWh/mês.	92

Lista de Símbolos

$X_1, X_2, \dots, X_N$	: Elementos de um conjunto.
N	: Número de elementos de um determinado conjunto
$\overline{X}$	: Média Aritmética de um conjunto.
s	: Desvio padrão de um conjunto.
z	: Coordenada de um número que representa sua probabilidade na curva Gaussiana.
$M(t)$	: Curva de carga média de um consumidor ou transformador.
$D(t)$	: Curva de desvio padrão de carga de um consumidor ou transformador.
P_{Base}	: Potência base de um determinado consumidor.
$m(t)$	: Curva de carga média representativa de uma classe de consumo (em p.u.).
$d(t)$	: Curva de desvio padrão de carga representativa de uma classe de consumo (em p.u.).
$M_i(t)$	: Curva de carga média de cada consumidor individual.
$D_i(t)$	: Curva de desvio padrão de carga de cada consumidor individual.
n_{cons}	: Número de consumidores conectados a um transformador.
j	: Horas de um dia, em valores inteiros.
$fator(j)$	: Fator de correção das curvas estimadas a cada hora.
$P_{real}(j)$	: Potência ativa real do alimentador a cada hora.
$P_{agregada}(j)$	: Agregação da potência ativa estimada de todos os consumidores conectados ao alimentador.
$F(t)$	: Curva de carga estimada com uma probabilidade de não ser excedida.
k	: Valor da tabela de distribuição normal referente à probabilidade da curva estimada não ser excedida.
$Perda(j)$	: Curva de perdas ativas nas linhas de transmissão.
Z	: Impedância do trecho da linha de transmissão.
$I(j)$	: Curva de corrente na linha de transmissão.

- $Pe_{trafo}(j)$: Curva de perdas estimadas nos transformadores.
- P_{Fe} : Perdas no ferro dos transformadores.
- P_{Cu} : Perdas no cobre dos transformadores.
- $P(j)$: Potência nos transformadores a cada hora.
- P_{nom} : Potência nominal do transformador.

Capítulo 1

Introdução

O planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica é o processo de estudo e análise em que uma concessionária de energia realiza para garantir que sua rede será confiável e viável, de acordo com suas funções de entrega de energia nos pontos de consumo. É o estudo essencial para garantir que mudanças de demanda de energia mantenham o sistema operando técnica e economicamente viável. Os sistemas necessitam de ferramentas rápidas e econômicas de planejamento para avaliar as consequências que uma mudança acarreta ao resto do sistema [1].

Um bom planejamento de sistema elétrico inicia-se diretamente no consumidor. São analisados demanda, tipo de carga (conexão), fator de carga e outros aspectos das cargas existentes. Quando as características dos consumidores são determinadas, elas são agrupadas para análises do sistema secundário e dos transformadores. Em seguida as informações de carga dos transformadores são utilizadas para o planejamento do sistema primário e para análise das subestações. As cargas do sistema determinam o tipo, potência e o local de instalação da subestação.

O conhecimento do consumo horário em cada ponto de entrega de energia é fundamental para as concessionárias de energia, tanto para o planejamento de curto quanto de médio prazo. Sem o conhecimento de valores horários nos pontos de consumo, as avaliações de tensão, corrente, perdas etc., através de cálculos de fluxo de potência ficam bastante prejudicadas, por apresentarem resultados que não representam nem aproximadamente o que de fato acontece na realidade do momento analisado. A busca de eficiência leva a necessidade de conhecimento detalhado da curva de carga diária de cada consumidor e da estimação confiável da curva de carga em cada transformador de rede.

A previsão de carga em sistemas de distribuição tem sido um desafio devido à sua sensibilidade em função da diversidade e natureza probabilística de carga de seus consumidores. Muitos fatores devem ser considerados, por exemplo: aspectos econômicos da região, aspectos geográficos, demanda de energia, dentre outros.

Neste trabalho, além de desenvolver um sistema que armazena os valores das curvas de carga por classe e nível de consumo, é desenvolvido um sistema para os respectivos transformadores de rede, nos quais incidem os fatores de carga para cada momento, uma vez que os fatores de carga variam em função dos meses do ano, da temperatura, de períodos de safras, férias, etc.

Por muitas décadas os engenheiros de empresas de distribuição de energia elétrica trabalharam com poucas ferramentas de análise, planejamento e operação das redes, como mostrado por W. H. Kersting [2]. Muitos destes desafios têm mudado nos últimos anos, com mais e melhores modelos de rede [3] e com possibilidades de consideração de geradores distribuídos [4], [5]. Além disto, outros desafios têm surgido com a busca da melhoria da qualidade do fornecimento sugerido pela ANEEL [6]. Estes avanços requerem mais e melhores dados das redes elétricas e dos pontos de consumo de energia elétrica.

Neste trabalho apresenta-se uma metodologia eficiente para estimação das curvas de carga de consumidores e de transformadores de rede. Recentes publicações têm buscado solução para este problema, porém com uso de redes neurais [7].

Capítulo 2

Sistemas de Distribuição

2.1- Introdução

A função de um sistema de distribuição de energia elétrica é fornecer energia das subestações de subtransmissão ou de pequenas estações geradoras a cada consumidor, transformando a tensão em valores apropriados para o consumo [1]. As concessionárias de energia elétrica têm como alvo a entrega de energia de qualidade com tarifas adequadas aos consumidores. Assim devem ser estudados aspectos técnicos e econômicos no planejamento, já que possíveis investimentos influenciam diretamente a tarifa de energia.

O planejamento de sistemas de distribuição de energia pode ser dividido em duas fases: *estratégica* ou *planejamento em longo prazo*, que visa investimentos futuros e em que se efetua análise das perspectivas de retorno destes investimentos, e *planejamento de rede* ou *planejamento em curto prazo*, que consiste em investimentos em projetos estruturais da rede de acordo com as disponibilidades da empresa [8].

O planejamento em longo prazo é uma parte essencial das atividades das empresas que fornecem energia. Suas utilidades específicas são: encontrar o arranjo ótimo da rede, seus investimentos, tempo de retorno de capital, possibilidades de aumento de demanda, possíveis trocas de equipamentos, substituição de cabos, dentre outros. Através dos estudos em longo prazo das redes é possível a construção de guias de planejamento, que servem para verificar possíveis decisões futuras, optando pela mais viável à empresa. Por exemplo, duas análises realizadas: substituição de transformador ou substituição de cabos.

O planejamento em curto prazo visa soluções mais urgentes de problemas, mesmo que haja um custo elevado. É também utilizado para análise de manutenção de rede, como troca de equipamentos. Este tipo de planejamento tenta buscar soluções de acordo com as possibilidades momentâneas das empresas.

Empresas do setor energético utilizam programas computacionais no planejamento de seus sistemas, baseados em fluxo de potência, análise de curto-circuito e faltas, queda de tensão, cálculo de impedâncias equivalentes. Utilizam também outras ferramentas, como previsão de carga, regulação de tensão, confiabilidade e algoritmos ótimos de planejamento [1].

Na figura 2.1 é mostrado o diagrama de blocos de um processo de planejamento de sistema de distribuição. O processo é repetido em tempo determinado pela concessionária de energia, de acordo com a necessidade [1].

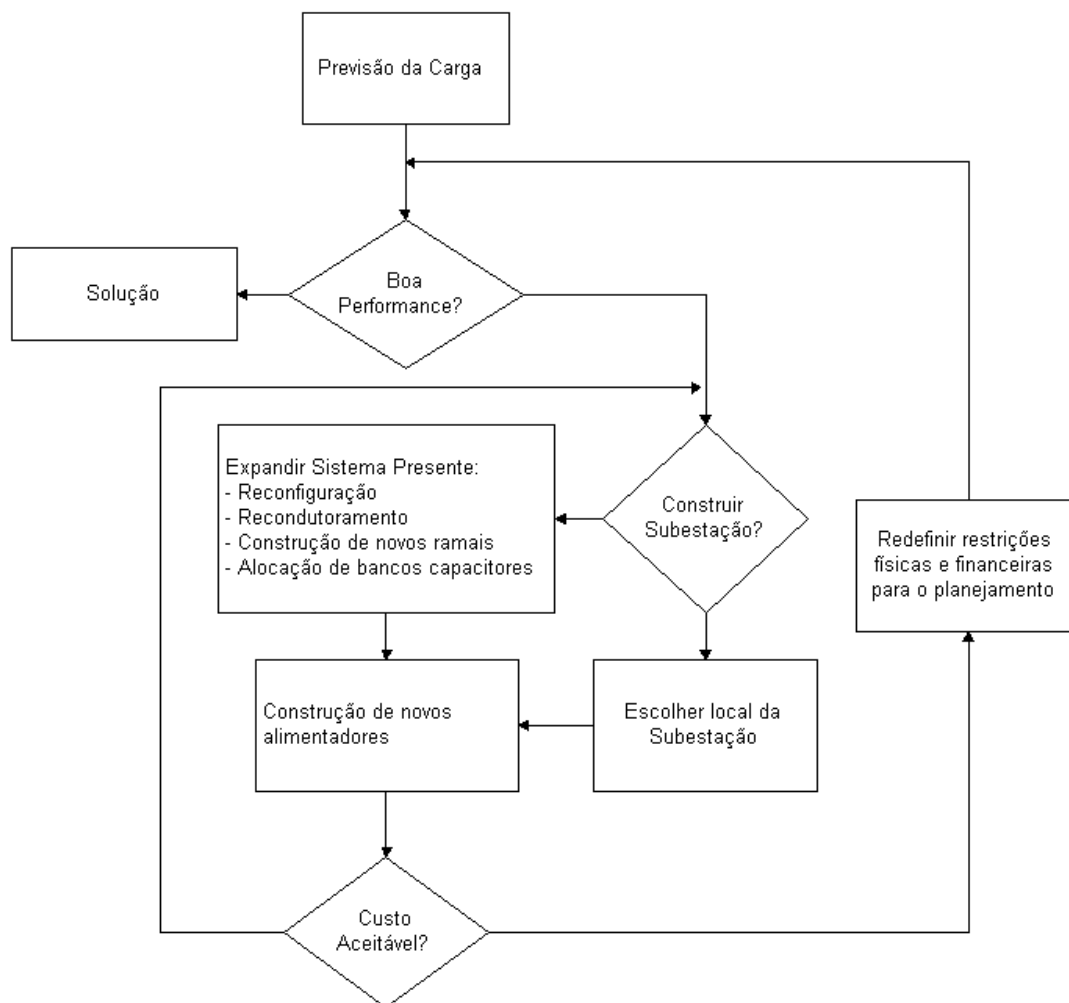


Figura 2.1: Fluxograma de Planejamento de Sistemas típico.

O estudo mais freqüente de um sistema elétrico, seja este de transmissão ou distribuição, é o cálculo das condições de operação em regime permanente a cada hora do dia. Neste estudo as grandezas de interesse são as tensões nas diferentes barras da rede, fluxos de potência ativa e reativa em todas as linhas, perdas nas linhas e nos transformadores, etc.

Em muitos casos, a análise efetuada em um sistema utiliza os valores de potência nominal dos transformadores ou valores médios de demanda. Geralmente um transformador não opera com carregamento próximo de sua potência nominal durante o dia todo, tornando os resultados da análise distantes da realidade de cada hora do dia.

Estudos desta natureza são de grande importância em sistemas já existentes, visando resolver problemas de operação econômica, regulação de tensão, características de carga, etc., como também no planejamento de novos sistemas, procurando verificar o comportamento dos elementos nas diversas alternativas.

A crescente necessidade de estudos mais refinados por parte das concessionárias de energia motiva o desenvolvimento de algoritmos especializados de análise para sistemas de distribuição. A associação de dados mais completos e modelagens mais específicas fornecem análises mais próximas da realidade do sistema, o que faz obter um melhor planejamento dos pontos de vista técnicos e econômicos.

2.2- Características dos Sistemas de Distribuição

As redes de distribuição apresentam características muito particulares e que as diferenciam das redes de transmissão. Entre estas características distinguem-se: a topologia radial, as múltiplas conexões, as cargas de distinta natureza, as linhas com resistências muitas vezes comparáveis à reatância e na maioria das vezes sem transposições.

Um sistema de distribuição geralmente começa na subestação, que é alimentada por uma linha de subtransmissão. Em alguns casos as subestações de distribuição são

alimentadas por linhas de transmissão (alta tensão). Cada subestação pode alimentar um ou mais alimentadores, que geralmente são radiais, o que faz com que haja apenas um caminho para a circulação de corrente elétrica [2]. Na figura 2.1 é mostrado um exemplo simples de sistema de distribuição.

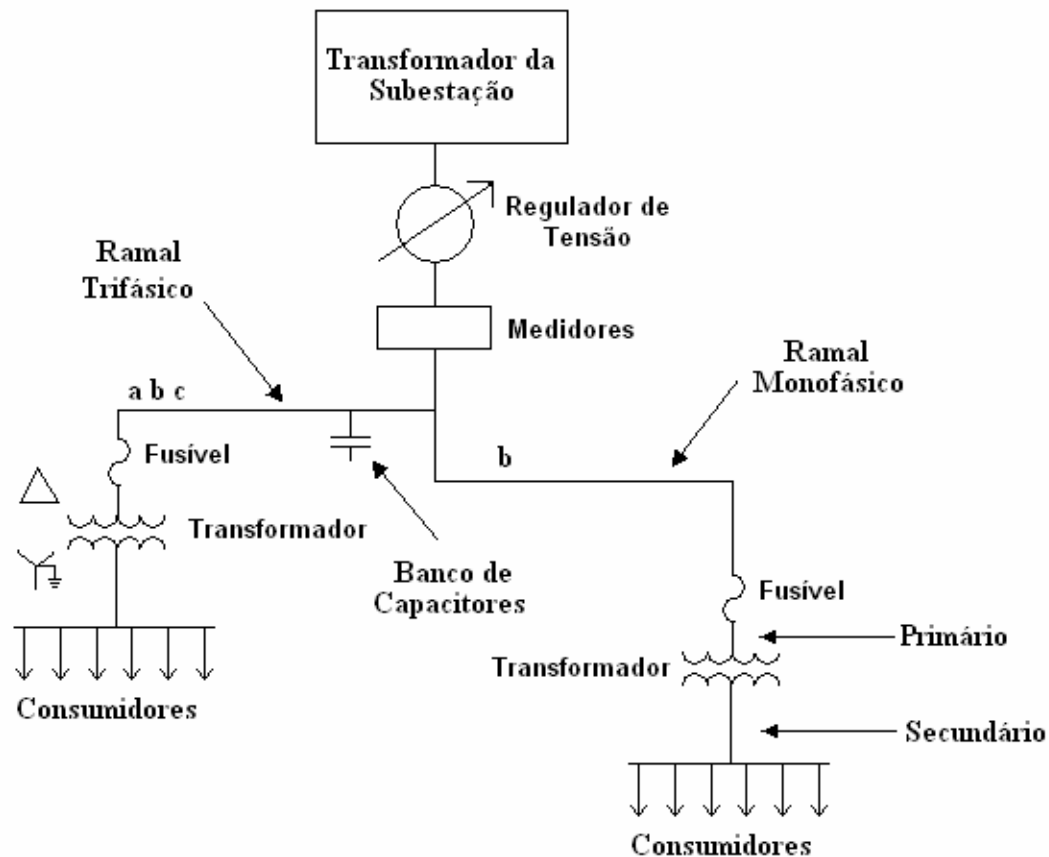


Figura 2.2: Sistema de Distribuição Simples.

A proteção dos sistemas de distribuição de energia elétrica é feita por equipamentos especificados, compondo um sistema coordenado e seletivo. É comum encontrar associações de relés, disjuntores, elos fusíveis, religadores, seccionadores, dentre outros equipamentos, que de forma coordenada e seletiva fazem a proteção dos sistemas.

2.2.1 Subestações de Distribuição

As redes elétricas são usualmente classificadas em três níveis: alta tensão – entre 69 e 230 kV, média tensão – de 1 a 69 kV e baixa tensão – menores de 1 kV, cada qual adaptada para interligar diferentes distâncias e consumidores [9]. Na subestação de distribuição é reduzida a tensão de subtransmissão à de média tensão (MT).

Comumente, utiliza-se para o controle de tensão no lado de MT um transformador com regulador com TAPs variáveis ou bancos de capacitores. O regulador automático com TAPs em transformadores de potência AT/MT de sistemas de distribuição permite efetuar a regulação com carga conectada (Load Tap Changer – LTC). Para um perfil de carga pesada, fluem mais correntes pelas linhas o que provoca uma maior queda de tensão. Este problema atenua-se em parte com o regulador de tensão (Voltage Regulator – VR) que eleva a tensão na barra da subestação de potência.

Uma subestação típica deve conter: transformador de potência (que recebe a energia da subtransmissão), chaves seccionadoras, chaves corta-circuito, reatores limitadores de corrente, transformadores de corrente, bancos capacitores série ou shunt, sistema de aterramento, sistemas de controle e proteção, dentre outros equipamentos [7].

2.2.2 Alimentadores Radiais

As redes de distribuição aéreas são tipicamente radiais, isto é, existe só um caminho para o fluxo de potência entre a subestação de distribuição (nó principal) e o consumidor, como mostrado na figura 2.3.

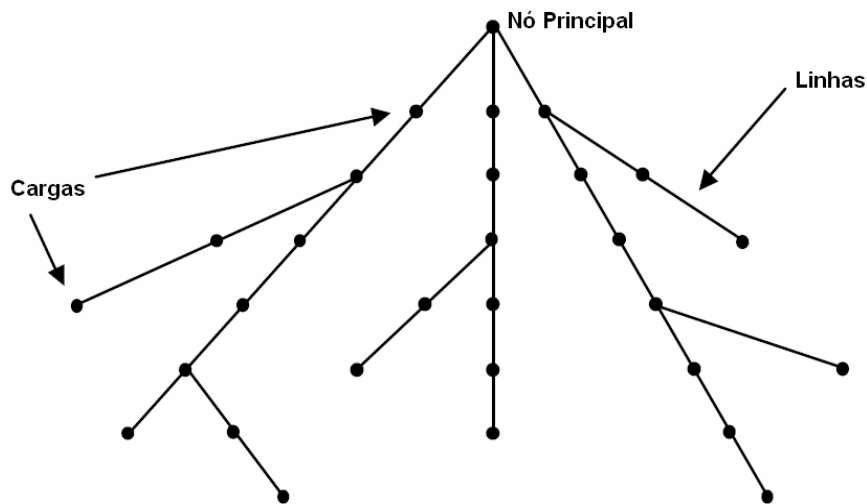


Figura 2.3. Rede de distribuição típica.

Um alimentador pode conter os seguintes componentes: sistema primário trifásico, ramais laterais (monofásicos, bifásicos ou trifásicos), reguladores de tensão, transformadores, bancos capacitores shunts, sistema secundário e cargas (monofásicas, bifásicas ou trifásicas).

As cargas num alimentador de distribuição são geralmente desbalanceadas, devido à existência de um número muito grande de cargas monofásicas conectadas. Por causa desta natureza das cargas, diversos programas de cálculo de fluxo de potência e análises de curto-circuito tornam-se inviáveis.

Na distribuição de energia a resistência das linhas é comparável à sua reatância. Geralmente a razão X/R tem uma ampla faixa de variação, ao contrário de sistemas de transmissão que em muitos casos possuem linhas em que apresentam apenas valores de reatância, permitindo em muitos casos desprezar o valor da resistência.

Além disso, na distribuição praticamente não existem transposições, devido ao comprimento das linhas serem geralmente menores que 50 km. Isto implica que as quedas de tensão devido aos acoplamentos entre as fases sejam desequilibradas.

2.2.3- Consumidores de Energia

O consumidor de energia é qualquer pessoa física ou jurídica, ou comunhão de fato ou de direito, legalmente representada, que solicita à distribuidora ou à comercializadora o fornecimento de energia elétrica e assume a responsabilidade pelo pagamento das faturas e pelas demais obrigações fixadas em normas e regulamentos da ANEEL, assim vinculando-se aos contratos de fornecimento, de conexão, de uso ou de adesão, conforme cada caso [9].

Nos sistemas de distribuição de energia podem-se encontrar muitos tipos de conexões: trifásicas, bifásicas ou monofásicas. No entanto, na baixa tensão encontram-se as mais variadas conexões, consequência da grande quantidade de cargas residenciais de natureza monofásica. As companhias de distribuição compensam esses desequilíbrios que são gerados na baixa tensão dividindo equitativamente as cargas nas três fases.

Outro aspecto interessante na distribuição é a presença de cargas de distinta natureza. Os tipos de carga que comumente se encontram são: residenciais, comerciais, industriais, rurais, iluminação pública e serviço público. Cada um desses segmentos caracteriza-se por possuir um fator de potência típico e um determinado comportamento frente às variações de tensão e temperatura.

2.2.3.1- Consumidores Residenciais

O setor residencial responde por cerca de 25% do consumo total de energia elétrica no país. Estudos realizados pelo Ministério da Ciência e Tecnologia em 2001 mostram que as características típicas das cargas de consumidores residenciais são conforme mostrado na figura 2.4 [10].

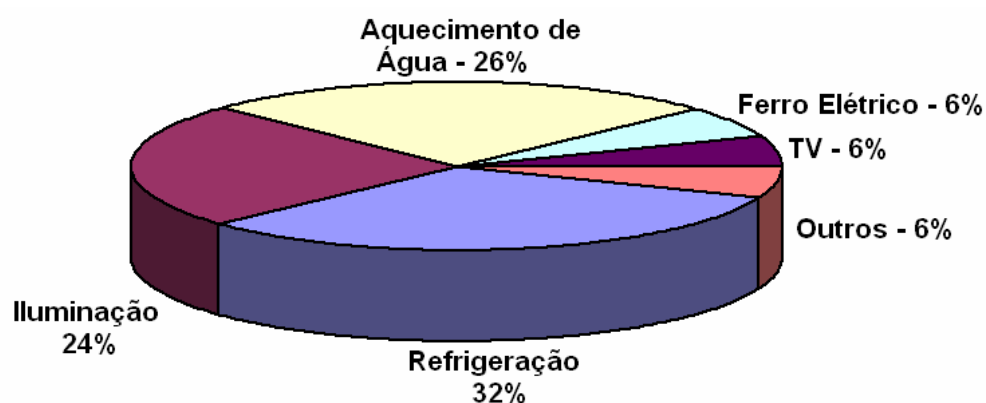


Figura 2.4: Características das cargas residenciais.

Uma pesquisa nacional de avaliação de eletrodomésticos, conduzida em 1996, encontrou um total de cerca de nove lâmpadas por residência em média, com 29% das residências já usando pelo menos uma lâmpada fluorescente, sendo que esse número vem aumentando graças aos programas implementados pelo PROCEL. O uso de lâmpadas fluorescente diminui o consumo de energia mantendo uma boa iluminação. A análise estatística dessa pesquisa estimou que a iluminação consome, em média, 390 kWh ao ano por residência [10].

Esta pesquisa revelou que cerca de 80% das residências possuem refrigeradores, utilizados principalmente na conservação de alimentos. De acordo com os fabricantes de eletrodomésticos brasileiros, em 1993 os refrigeradores novos consumiam em média 90 kWh a menos por ano do que os refrigeradores novos produzidos em 1985 (redução de cerca de 15%). O PROCEL calcula que essas economias alcançaram, em média, quase 135 kWh por ano até 1996. O aumento da eficiência de refrigeradores e congeladores durante 1986-1996 resultou em uma economia de aproximadamente 2.560 GWh por ano, até 1996.

O aquecimento de água em residências é feito pelo uso do chuveiro elétrico, que possui potência nominal entre 2 e 6 kW e estão presentes em cerca de 80% das residências. Os chuveiros são muito usados durante o horário de demanda de ponta (entre 18 e 21 horas) e calcula-se que respondam por mais de 50% da demanda de ponta residencial. O uso de energia solar para o aquecimento de água é caro e de aplicação limitada.

A curva de carga de um consumidor residencial caracteriza-se por um consumo praticamente constante durante o dia inteiro com um aumento no fim da tarde e um pico de demanda, provocado pelo uso do chuveiro elétrico (entre 18 e 21 horas). Na figura 2.5 é mostrada a curva de carga de um dia útil de um consumidor real, que consome cerca de 330 kWh por mês.

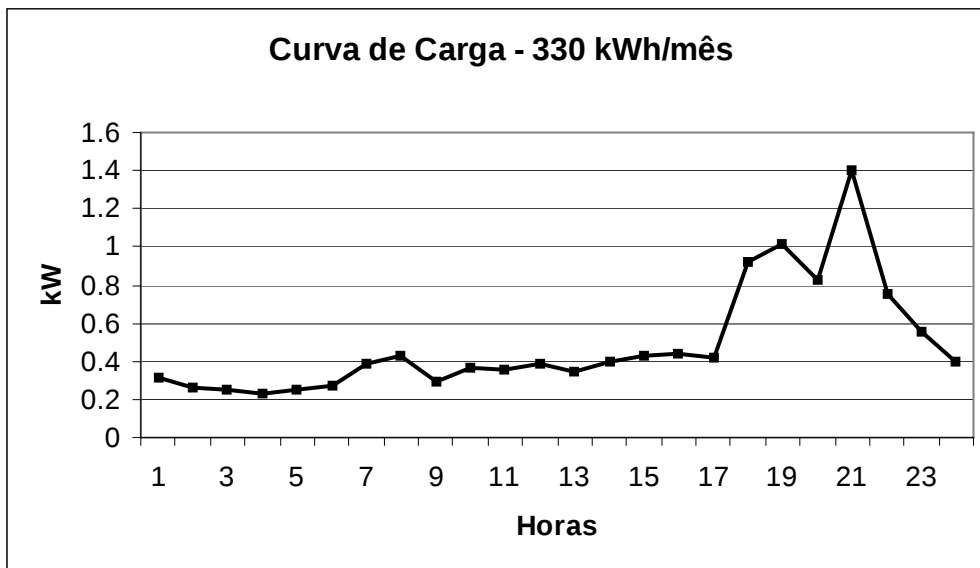


Figura 2.5: Curva de Carga de um consumidor residencial.

No Brasil, o consumo de energia elétrica por habitante é considerado baixo se comparado aos países mais desenvolvidos, dados estimados pelo Ministério de Minas e Energia [11], mostrado na figura 2.6.

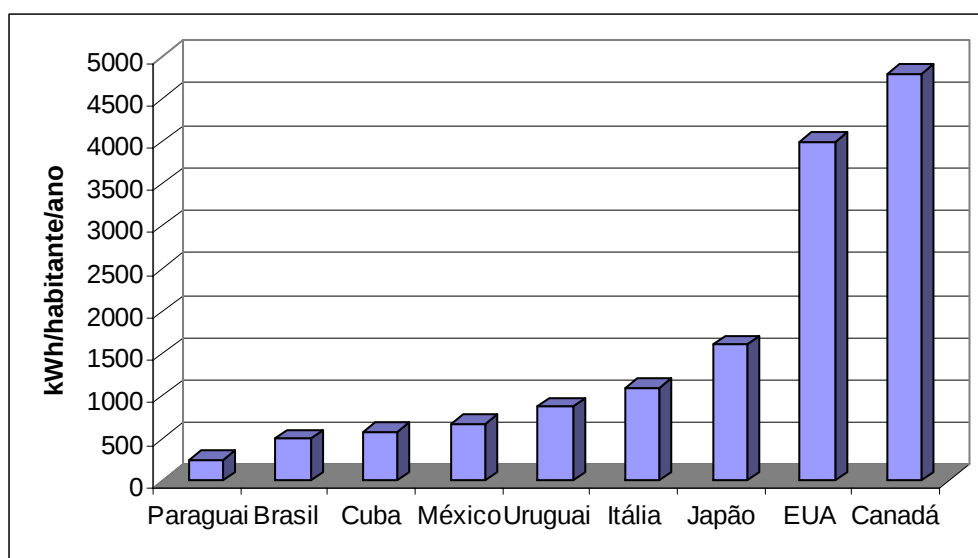


Figura 2.6: Consumo de energia por habitante no ano de 2000.

2.2.3.2- Consumidores Comerciais

Os consumidores comerciais respondem por cerca de 10% do consumo de energia elétrica [10]. São geralmente classificados por ramo de atividade e consumo mensal de energia elétrica. Na tabela 2.1 é mostrado o consumo de energia de consumidores comerciais de uma região predominantemente comercial da cidade de São Paulo [12], [13], [14].

Tabela 2.1: Consumo de energia – setor comercial.

Atividade Comercial	MWh/mês	Número de Consumidores
Bares	24935	44204
Restaurantes	15380	8335
Bancos	12317	2606
Lojas de Roupas/Calçados	11371	18060
Açougues	8663	7926
Supermercados	8134	2309
Postos de Gasolina	5276	2741

Algumas empresas do setor de comércio aumentaram a eficiência energética da iluminação, usando várias tecnologias de iluminação eficientes que foram introduzidas no Brasil na última década. A adoção de lâmpadas fluorescentes compactas (LFCs) em edifícios comerciais está crescendo rapidamente. As LFCs são usadas especialmente em hotéis, restaurantes, bancos e outros tipos de edifícios que oferecem um período de retorno de menos de um ano, devido ao número elevado de horas de operação [10].

A refrigeração de alimentos responde por cerca da metade do uso de eletricidade em supermercados e restaurantes, e quase 17% da demanda total de eletricidade em edifícios comerciais, onde os equipamentos de refrigeração comercial são relativamente ineficientes e a eletricidade é desperdiçada devido à má operação e manutenção [10].

Em todo o Brasil, os aparelhos de ar condicionado respondem por cerca de 20% do uso de eletricidade do setor comercial. Mas os aparelhos de ar condicionado podem ser responsáveis por mais da metade do uso total de eletricidade em grandes edifícios comerciais, hotéis, ou shopping centers. Calcula-se que os aparelhos de ar condicionado de janela gastem normalmente 1,6 kW e operem por 540 h/ano, em média, totalizando um consumo médio de eletricidade de 860 kWh/ano por aparelho [10].

A curva de carga de consumidores comerciais é caracterizada por ter uma demanda durante o horário comercial com um leve declínio no horário de almoço. Fora do horário comercial a demanda desses consumidores é praticamente para iluminação e refrigeração. Um exemplo de curva de carga para um consumidor comercial real é mostrado na figura 2.7.

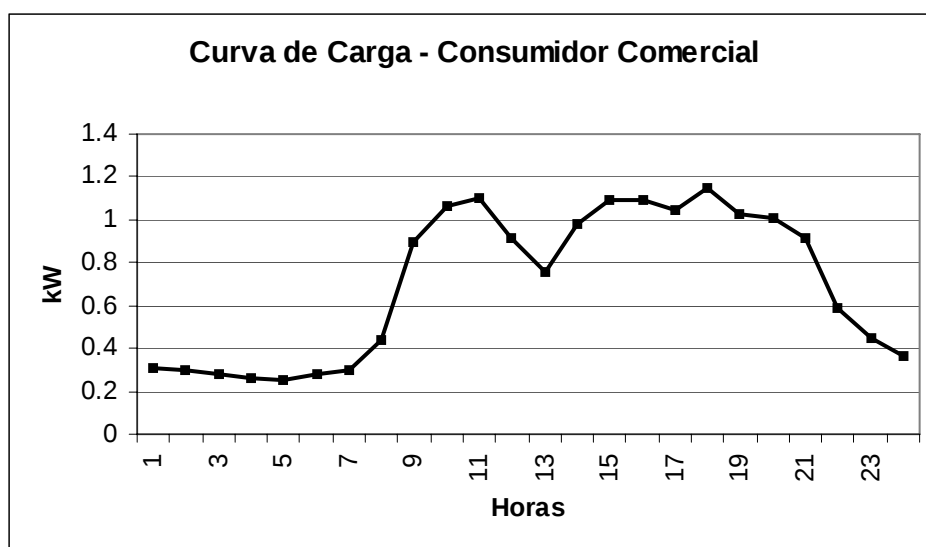


Figura 2.7: Curva de carga de consumidor comercial.

2.2.3.3- Consumidores Industriais

Os consumidores industriais respondem por cerca de 60% da energia elétrica consumida. São caracterizados por receberem energia em média tensão (13,8 kV), possuindo subestações abaixadoras internas. São classificados por ramo de atividade e por faixa de consumo de energia elétrica, como mostrado na tabela 2.2.

Tabela 2.2: Consumo de energia do setor industrial – Cidade de São Paulo.

Atividade Industrial	MWh/mês	Número de Consumidores
Padarias	27854	3471
Fábricas de Roupas	6460	5562
Construção Civil	2852	2099
Madeireiras	1691	3434
Fábricas de Móveis	1465	1614
Eletrônicos	874	349
Plásticos	821	220

A iluminação é responsável por boa parte do consumo de energia no setor industrial. A aceitação das lâmpadas de sódio (alta pressão) está crescendo regularmente para a iluminação industrial, mas também pode ser visto um crescente uso de lâmpadas fluorescentes tubulares. Estes tipos de lâmpadas diminuem o consumo de energia e mantêm uma boa eficiência luminosa [10].

Pesquisas indicaram que o consumo de motores representava aproximadamente 50% da energia consumida no setor industrial. Os fabricantes informaram que 78% das vendas de mercado para este setor no Brasil eram motores de indução trifásicos [11].

Motores com potências superiores a 200 hp são produzidos com materiais de alta qualidade como aço-silício e possuem uma eficiência do mesmo nível que os motores produzidos em países industrializados. Entretanto, são produzidos motores de indução entre 1 e 200 hp com baixa eficiência. Em suma, os materiais e os projetos de pequenos e médios motores são construídos para minimizar o custo inicial, conseqüentemente para o menor preço de mercado, e não para maximizar a sua eficiência. Além da baixa eficiência de motores elétricos, existem dois fatores adicionais que se somam ao baixo desempenho dos motores no setor industrial: especificação técnica imprópria e o fraco sistema de operação e manutenção dos motores [10].

Devido a uma enorme variação de atividades do setor industrial, as curvas representativas são estimadas por ramo de atividade e por localização. Na figura 2.8 é mostrada essa variação ao longo de um dia útil.

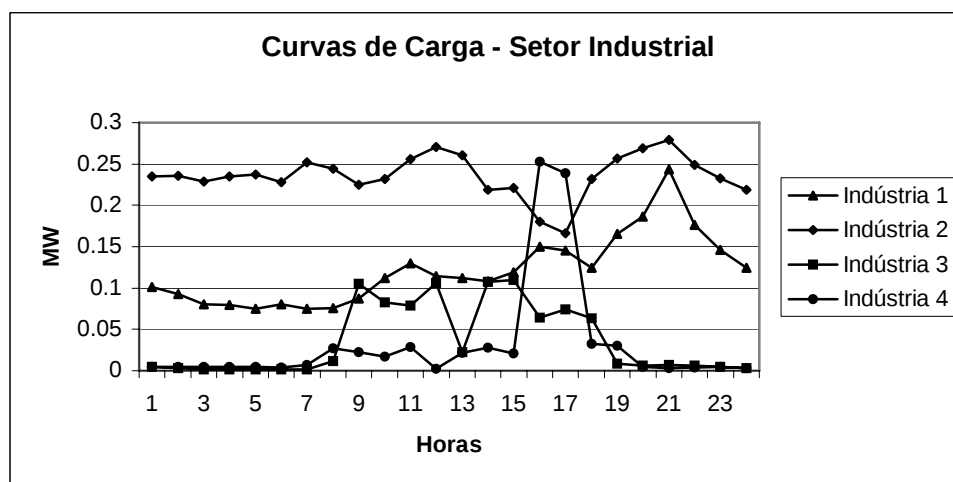


Figura 2.8 Curvas de carga do setor industrial.

Capítulo 3

Metodologia para Estimação de Curvas de Carga na Distribuição

3.1. Introdução

Neste capítulo serão apresentadas diversas metodologias encontradas sobre a estimação de curvas de carga, utilizando dados fornecidos por empresas do setor de distribuição de energia elétrica, como demanda, consumo mensal, aspectos econômicos, localização, dentre outros. Em seguida é apresentada a metodologia desenvolvida no trabalho, que envolve dados reais de consumidores de energia na estimação das curvas de carga de consumidores individuais e de transformadores de redes de distribuição.

3.2. Metodologias Encontradas

A. Andersson, A. Jansson e J. Klevas [15] em 1989 publicaram um trabalho que consiste na produção estatística de uma curva média e uma curva de dispersão para determinados tipos de consumidores de energia elétrica. Para esta análise foram utilizados dados coletados de consumidores individuais armazenados em um banco de dados. Alguns aspectos foram levados em consideração para a formação do banco de dados, como dia da semana, estação do ano, sensibilidade da demanda de acordo com a temperatura, consumo mensal (kWh/mês), aspectos econômicos, localização. É feita uma normalização das curvas de carga através de análise de demanda para cada tipo de consumidor, que pode ser por classe de consumo ou por região, escolhida de acordo com a necessidade do estudo. O objetivo do trabalho foi desenvolver uma ferramenta

simples e ao mesmo tempo precisa, utilizada em estudos de aspectos climáticos e econômicos.

J. A. Jardini, C. M. V. Tahan, S. U. Ahn e S. L. S. Cabral [12], no ano de 1994 apresentaram um trabalho de caracterização de curva de cargas de consumidores para dimensionamento de transformadores, levando em consideração pesquisa de campo, para identificação de posse de aparelhos eletrodomésticos e hábitos de seus consumidores, e medições da curva de carga através de equipamentos eletrônicos. Na metodologia empregada os consumidores residenciais foram agrupados por faixa de consumo (kWh/mês), sendo registradas curvas de consumo médio e seu respectivo desvio padrão para cada consumidor. A caracterização das curvas representativas dos consumidores em cada faixa de consumo é feita definindo-se curvas médias e de desvio padrão em p.u., utilizando uma base de potência, que passam a ser as curvas representativas para cada faixa de consumo. Com o consumo mensal de um determinado consumidor é possível estimar sua curva de carga multiplicando as curvas em p.u. de sua faixa de consumo pelo seu valor base. As curvas média e desvio padrão no transformador de rede podem ser obtidas pela agregação das curvas de cada consumidor, que podem ser utilizadas para seleção de potência e análise de queda de tensão no transformador.

Em 1995 J. A. Jardini, S. U. Ahn, C. M. V. Tahan e F. M. Figueiredo [13] elaboraram uma representação de curvas de carga diária residencial e comercial por função estatística. Uma pesquisa de campo foi realizada para determinar o comportamento estatístico das curvas de carga diária dos consumidores e dos transformadores relacionados. Os consumidores residenciais foram agrupados por faixa de consumo e os consumidores comerciais por atividade econômica. As curvas nos transformadores podem ser utilizadas para o cálculo de perda de vida útil dos transformadores de rede, cálculo de perda no cobre dos transformadores e de queda de tensão na rede de distribuição.

Em 2000 J. A. Jardini, C. M. V. Tahan, M. R. Gouvêa, S. U. Ahn e F. M. Figueiredo [14] apresentaram os resultados para a determinação de curvas de carga para consumidores residenciais, comerciais e industriais conectados em baixa tensão, baseados em medições de campo. A metodologia para agregação destas curvas para determinar a carga esperada em equipamentos ou em um determinado ponto da rede de

distribuição utiliza as curvas representativas de cada consumidor e seu respectivo consumo mensal de energia.

C. S. Chen, M. Y. Cho e Y. W. Chen [16] em 1994 desenvolveram uma metodologia que estima a curva diária de perdas, baseada na curva de carga dos consumidores de energia. A cada hora do dia é feito o levantamento das perdas no cobre do transformador, em seu núcleo e a perda total. Assim são levantadas curvas de perdas padrões para transformadores e para o alimentador em estudo. A metodologia pode ser utilizada no planejamento de sistemas de distribuição e na estimativa de vida útil dos transformadores.

D. M. Falcão e H. O. Henriques [17] em 2001 descrevem uma aplicação de redes neurais artificiais e lógica nebulosa que geram curvas de carga “padrão” para classes de consumo, baseadas em curvas típicas obtidas por companhias do setor energético e seus respectivos consumos de energia mensal. Por razões de estudos econômicos, em certos casos, são feitos ajustes em tempo real. Os dados são organizados por tipo de consumidor (residencial, comercial, etc.), localização, estação do ano, dia da semana, consumo mensal de energia e necessidade de ajuste em tempo real. A agregação das curvas é feita por uma rede neural bidimensional de Kohonen com mapeamento auto-organizável.

Muitos trabalhos utilizam lógica nebulosa na estimação de curvas de carga. D. Srinivasan, A. C. Liew, C. S. Chang [18] em 1994 mostram uma técnica de previsão de curvas de carga que consiste em redes neurais artificiais treinadas combinadas com lógica nebulosa. O treinamento das redes neurais artificiais é feito por técnicas “se-então-senão” (“if-then-else”), envolvendo aspectos climáticos e econômicos dos consumidores de energia elétrica. A lógica nebulosa proposta consiste em dados sobre consumo, atualizados frequentemente. Segundo os autores a estimativa convencional das curvas de carga faz uso de dados estáticos, obtendo estimativas ultrapassadas para o momento, sendo necessário atualizações diárias na metodologia. Ressaltam que programação não linear com inteligência artificial fornece ferramentas para um sistema eficiente de estimativa das curvas de carga.

T. Senjyu, S. Higa, K. Uezato [19] em 1998 destacam a importância da previsão de curvas de carga no planejamento de sistemas de energia. Apresentam uma

metodologia que modificam as curvas de carga de dias similares para obter as curvas do dia seguinte, utilizando lógica nebulosa. A proposta consiste em técnicas estatísticas e um sistema inteligente de análise das curvas de carga. Diferentemente de técnicas convencionais, a proposta utiliza redes neurais artificiais com técnicas de regressão, onde aspectos econômicos, climáticos e regionais incidem. Os resultados apresentam dias específicos, como feriados nacionais ou locais, sábados dias úteis, diferente de outras técnicas que fornecem apenas a estimativa de um dia.

R.-F. Chang, R.-C. Leou e C.-N. Lu [20] em 2002 mostram uma alternativa de estimação exata para curvas de carga para transformadores, através de construção de classes nebulosas sistemáticas de consumidores. Os dados de carga não são representados apenas por um único valor e sim por um intervalo de confiança. Para verificar o método foram utilizados valores de transformadores e alimentadores reais. Os resultados mostram que o método proporciona uma ferramenta bastante usual para construção de curvas de carga em transformadores que podem ser usadas no planejamento de redes de distribuição.

D. Gerbec, S. Gasperic, I. Smon e F. Gubina [21] em 2003 ressaltam a importância do conhecimento dos hábitos dos consumidores para uma efetiva reestruturação dos sistemas de Energia. Apresentaram um trabalho de estimação de curvas de carga utilizando curvas obtidas por medições de campo para consumidores individuais. São feitas duas análises, a primeira em relação a classes de consumo predefinidas, e a segunda em relação às curvas típicas de consumo de energia e por região. As estimativas são feitas por algoritmos de agrupamentos hierárquicos e uso de lógica nebulosa.

Em 2005 D. Gerbec, S. Gasperic, I. Smon e F. Gubina [7] apresentam um trabalho que faz estimativas de curvas de carga através de aspectos típicos dos consumidores, utilizando lógica nebulosa e faz uso de uma rede neural artificial treinada para classificar essas curvas em grupos predefinidos. A metodologia foi testada em uma companhia de distribuição de energia, obtendo grupos representativos consistentes.

T. Senjyu, P. Mandal, K. Uezato e T. Funabashi [22] em 2005 desenvolveram um trabalho de aproximação de curto prazo para curvas de carga, baseado em um método de correção híbrida das curvas obtidas através de uma rede neural artificial. O

método utiliza uma norma Euclidiana para a escolha dos dias mais semelhantes, através de fatores definidos anteriormente. O método de correção é feito através do treinamento da rede neural artificial que prioriza a correta colocação do pico de carga do transformador.

3.3. Análise Estatística

A metodologia proposta neste trabalho faz uso de algumas ferramentas de análise estatística no tratamento dos dados dos consumidores, descritas abaixo.

Média: a média ($\bar{X}$) é um valor típico ou representativo de um conjunto de dados. Como esses valores típicos tendem a se localizar em um ponto central, dentro de um conjunto de dados ordenados segundo suas grandezas, a média é denominada medida de tendência central [23].

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_N}{N} = \frac{\sum_{j=1}^N X_j}{N} \quad (3.1)$$

Desvio Padrão: o grau ao qual os dados numéricos tendem a dispersar-se em torno de um valor médio denomina-se dispersão de dados. Dispõe-se de várias medidas de dispersão, sendo das mais usadas, o desvio padrão (s). O desvio padrão de um conjunto de números é representado pela relação [23]:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}{N}} \quad (3.2)$$

e representa o desvio de cada um dos valores em relação à média.

Distribuição Normal: um dos mais importantes exemplos de uma distribuição contínua de probabilidade é a *distribuição normal*, definida pela curva mostrada na figura 3.1.

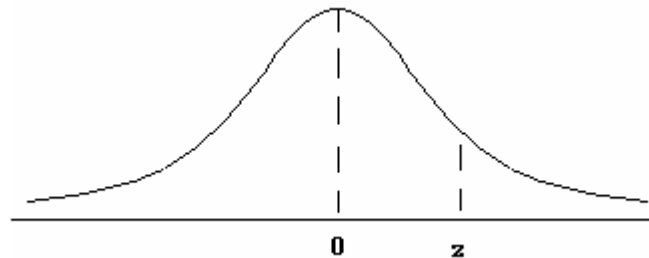


Figura 3.1: Distribuição Normal.

A área total da curva da figura 3.1 é igual a 1; portanto, a área sob a curva compreendida entre duas coordenadas (z e 0) representa a probabilidade de um número estar situado entre eles. A tabela mostrada no apêndice A mostra as áreas sob esta curva, compreendida entre a ordenada $z = 0$ e qualquer valor positivo de z . Por meio desta tabela pode-se determinar a área entre duas coordenadas quaisquer, em vista da simetria da curva em relação a $z = 0$ [23].

Distribuição de “Student” t: para pequenas amostras ($N < 30$) a utilização da distribuição normal pode fornecer resultados ruins, sendo piores com o decréscimo de N . Assim foram introduzidas modificações convenientes e obteve-se a *distribuição de “Student” t*, pelo matemático Gosset no início do século XX. Sua utilização é semelhante à *distribuição normal*, fornecendo resultados precisos para amostras pequenas. Para amostras com número de elementos próximo a 30 os resultados são muito próximos aos resultados da *distribuição normal*. A tabela da distribuição de “Student” t é mostrada no apêndice A.

3.4. Metodologia Empregada

A metodologia proposta neste trabalho baseia-se fundamentalmente nos trabalhos publicados por J. A. Jardini [12], [13] e [14] para a estimativa das curvas de carga individuais, com a inclusão de pequenas modificações e correções.

A fim de realizar a estimação de curvas de consumidores individuais e transformadores de rede de distribuição de energia, observou-se que as empresas distribuidoras de energia elétrica possuem uma base de dados muito boa, utilizada em campanhas de medições realizadas por solicitação da ANEEL. Estes dados serviram de base para a metodologia proposta neste trabalho.

As curvas de carga de consumidores individuais foram obtidas através de medições com equipamentos apropriados das concessionárias de energia (nestas campanhas da ANEEL). Em cada unidade consumidora foram feitas medições em dias úteis, sábados e domingos, sendo separadas em arquivos de dados. Para a metodologia empregada este conjunto de curvas foi organizado em sub-classes, de acordo com o consumo mensal de energia elétrica (kWh/mês): 0-100, 101-200, 201-300, 301-500 e acima de 500 kWh/mês. Na tabela 3.1 é mostrada a porcentagem de consumidores nas diferentes classes de consumo em uma região da cidade de São Paulo [14].

Tabela 3.1: Frequência de distribuição das classes de consumo

Classe (kWh/mês)	0-100	101-200	201-300	301-500	Acima de 500
Frequência (%)	18	35	25	16	6

Através de análise estatística das curvas de carga obtidas pelas concessionárias de energia foi possível obter um conjunto de curvas de carga representativas para cada sub-classe de consumo, sendo uma curva média ($M(t)$) e uma curva de desvio padrão ($D(t)$), para dias úteis, sábados e domingos.

3.5. Curvas de Carga de Consumidores de Baixa Tensão

Nas figuras 3.2 a 3.4 são mostradas as curvas representativas ($M(t)$ e $D(t)$) de consumidores residenciais da classe de consumo 301 a 500 kWh/mês, para dias úteis, sábados e domingos. As curvas representativas de consumidores residenciais de todas as classes de consumo são mostradas no apêndice C.

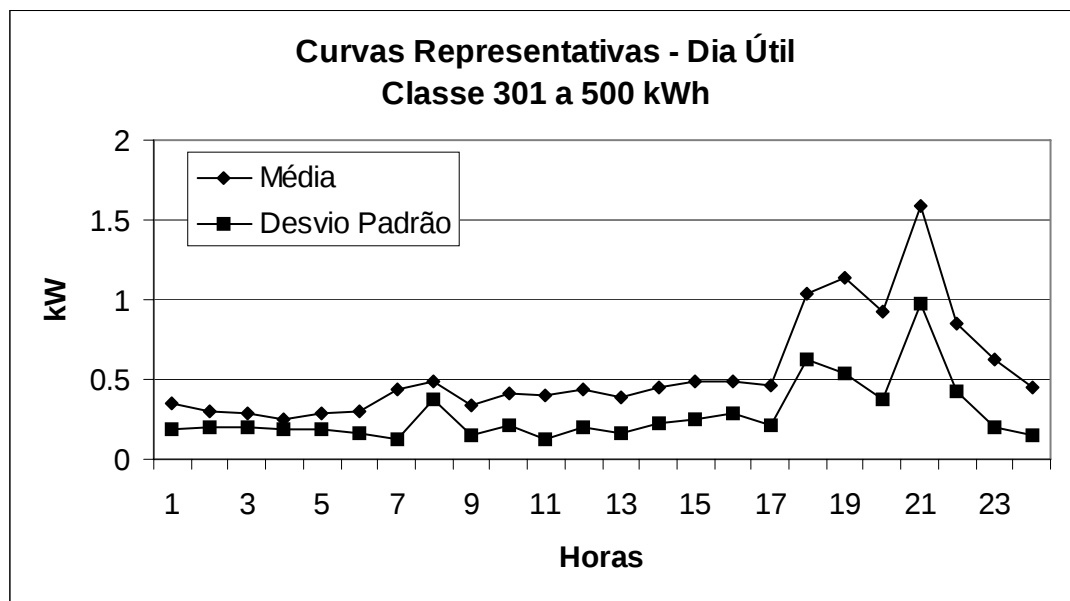


Figura 3.2: Curvas representativas de dias úteis da classe 301 a 500 kWh/mês.

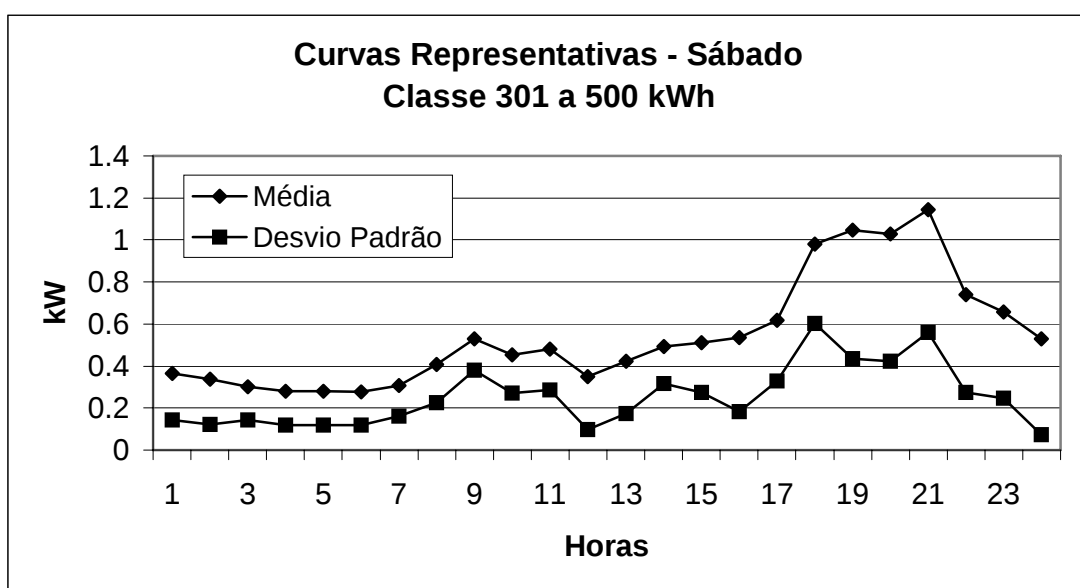


Figura 3.3: Curvas representativas de sábados da classe 301 a 500 kWh/mês.

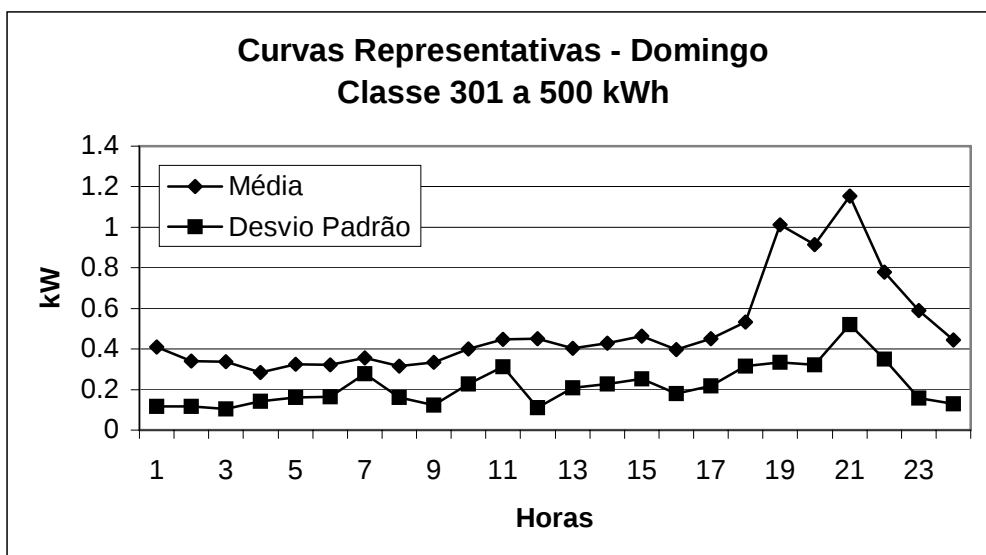


Figura 3.4: Curvas representativas de domingos da classe 301 a 500 kWh/mês.

Nas figuras 3.5 a 3.7 são mostradas as curvas representativas ($M(t)$ e $D(t)$) de consumidores comerciais da classe de consumo 301 a 500 kWh/mês, para dias úteis, sábados e domingos. As curvas representativas de consumidores comerciais de todas as classes de consumo são mostradas no apêndice D.

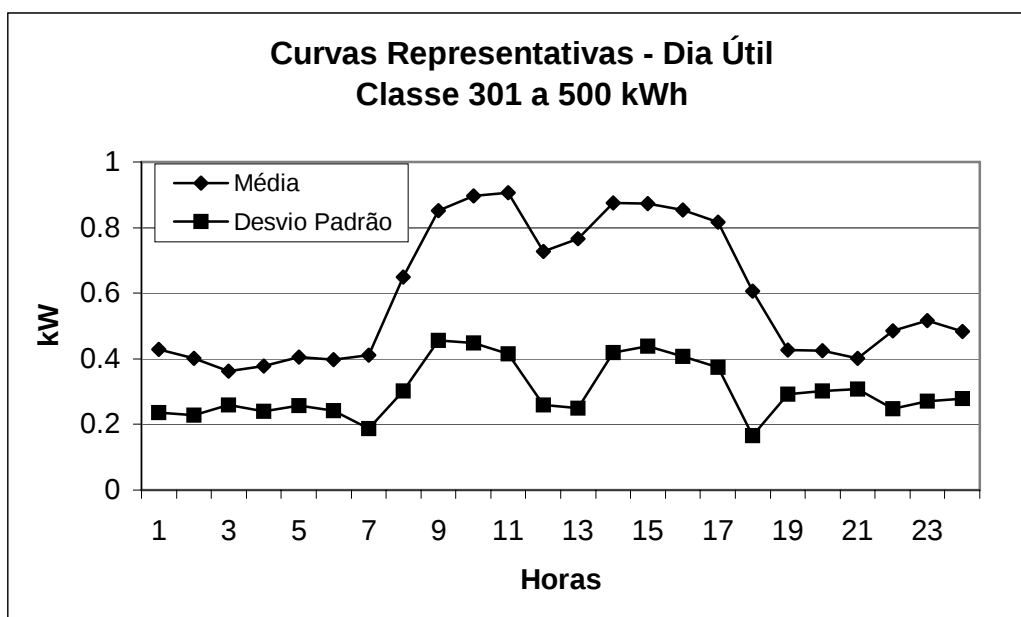


Figura 3.5: Curvas representativas de dias úteis da classe 301 a 500 kWh/mês.

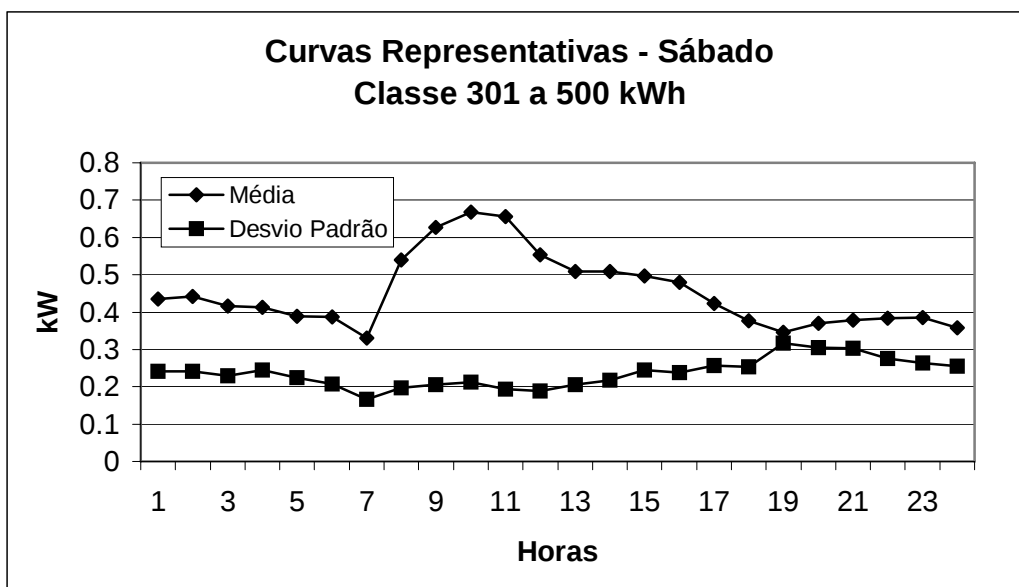


Figura 3.6: Curvas representativas de sábados da classe 301 a 500 kWh/mês.

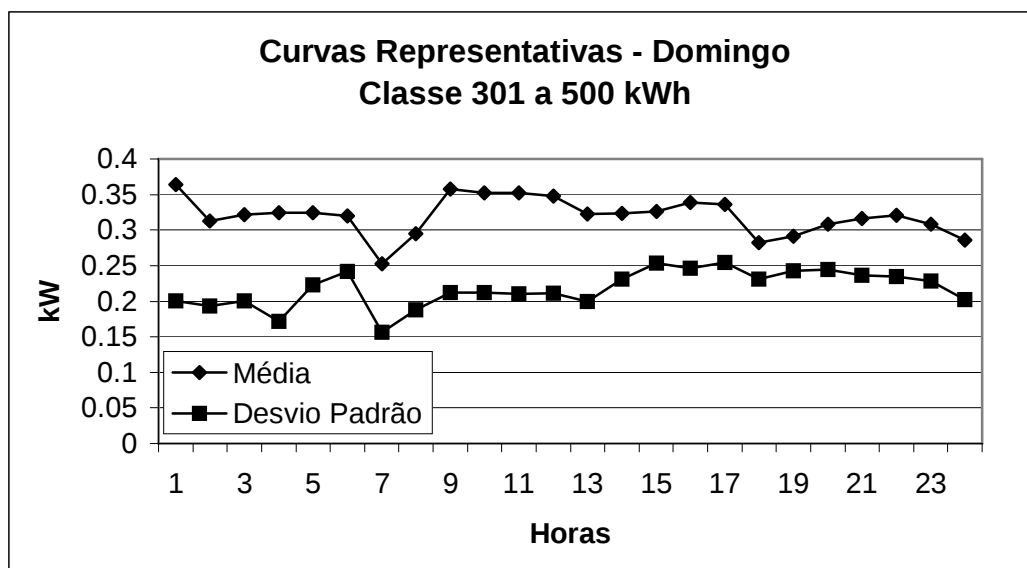


Figura 3.7: Curvas representativas de domingos da classe 301 a 500 kWh/mês.

Na metodologia proposta, os consumidores industriais conectados aos alimentadores são considerados consumidores comerciais, devido à existência de um número pequeno de indústrias conectadas em baixa tensão, e estas quando existentes, têm consumo e comportamento de carga semelhantes aos estabelecimentos comerciais. Outro fato relevante é que nas indústrias de grande porte há, geralmente, equipamentos

de medição em suas subestações. Através destas medições cada indústria tem seu histórico de consumo de energia, não sendo necessário fazer estimativas de suas curvas de carga.

Para fazer a estimativa das curvas de carga de consumidores individuais é necessário que todas as curvas representativas estejam a uma mesma base. Assim estas curvas são divididas por uma base, denominada potência base (P_{Base}) [14], dada por:

$$P_{Base} = \frac{1}{24} \int_1^{24} M(t)dt = \frac{\text{consumo mensal (kWh)}}{24 \times 30} \quad (3.3)$$

As curvas representativas divididas por suas respectivas potências base são denominadas curvas representativas das classes de consumo, dadas em valores “por unidade” (p.u.), sendo uma curva média ($m(t)$) e uma curva de desvio padrão ($d(t)$). Estas curvas representativas foram armazenadas em um arquivo de dados, utilizado na estimativa das curvas de carga de consumidores individuais.

Nas figuras 3.8 a 3.10 são mostradas as curvas representativas da classe 301 a 500 kWh/mês para consumidores residenciais.

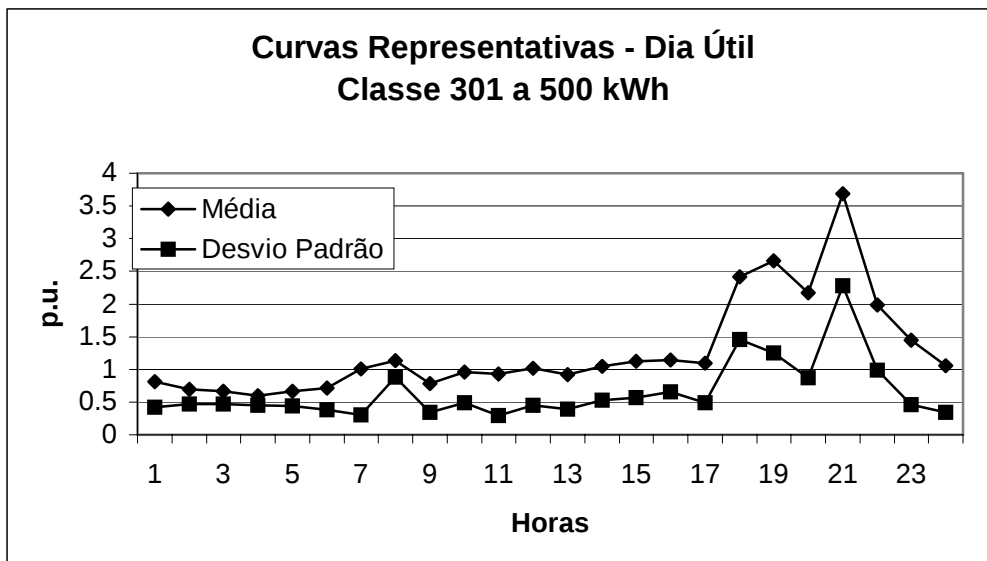


Figura 3.8: Curvas representativas de dias úteis para classe residencial.

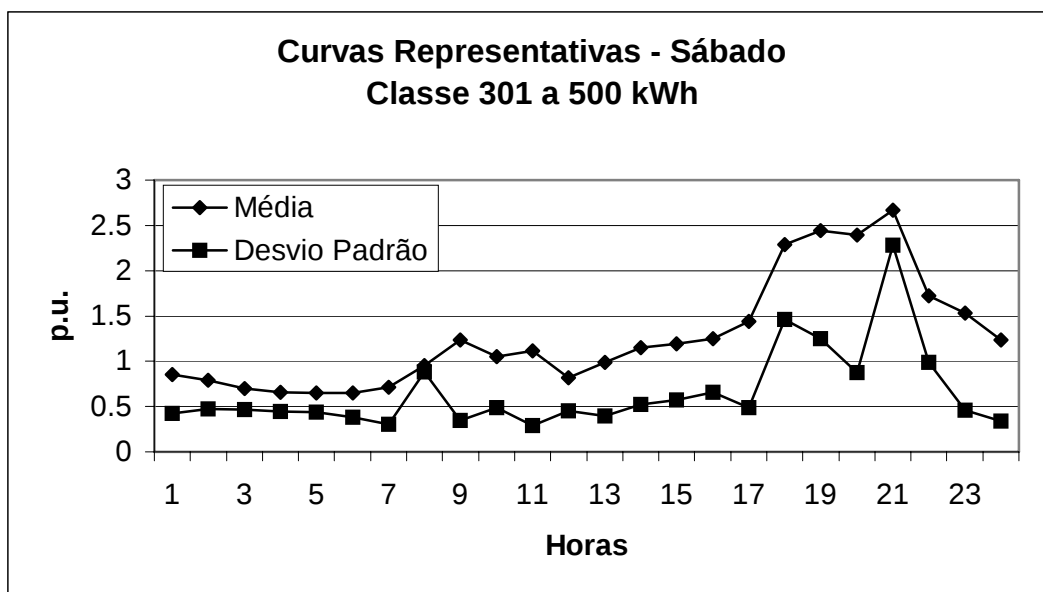


Figura 3.9: Curvas representativas aos sábados para classe residencial.

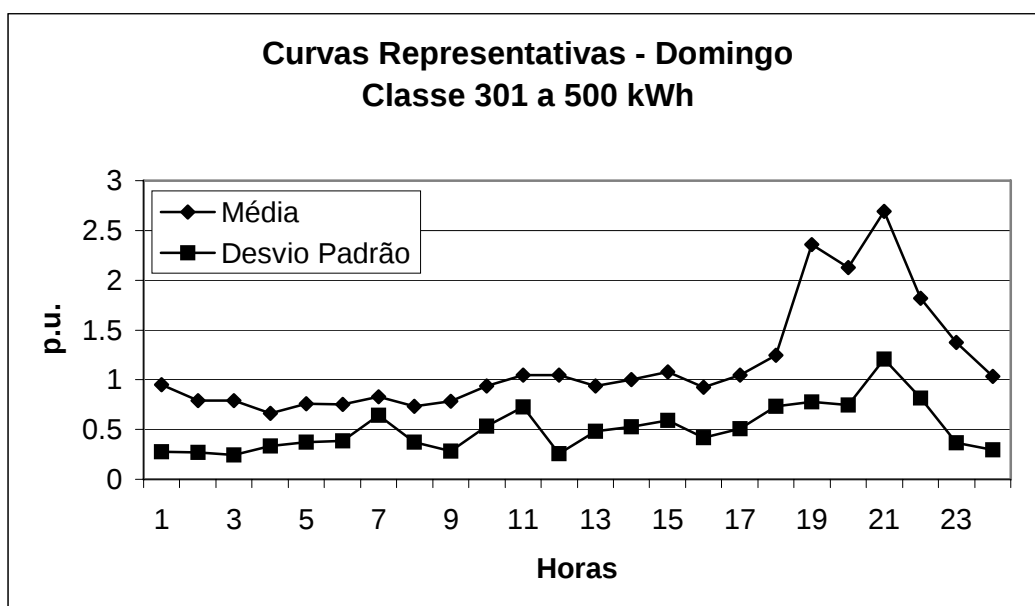


Figura 3.10: Curvas representativas aos domingos para classe residencial.

Nas figuras 3.11 a 3.13 são mostradas as curvas representativas para consumidores comerciais da mesma classe.

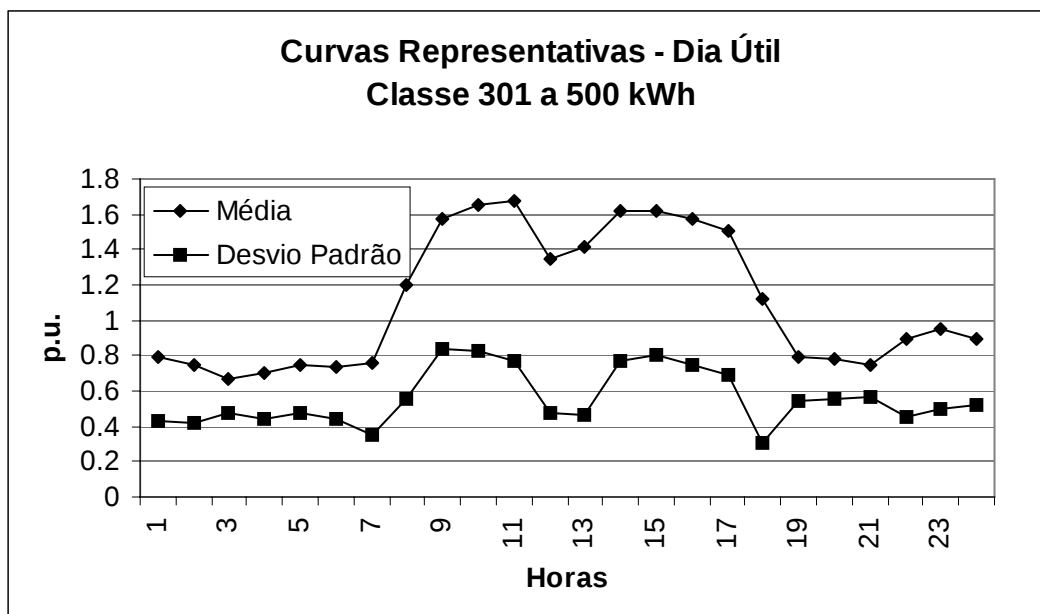


Figura 3.11: Curvas representativas de dias úteis para classe comercial.

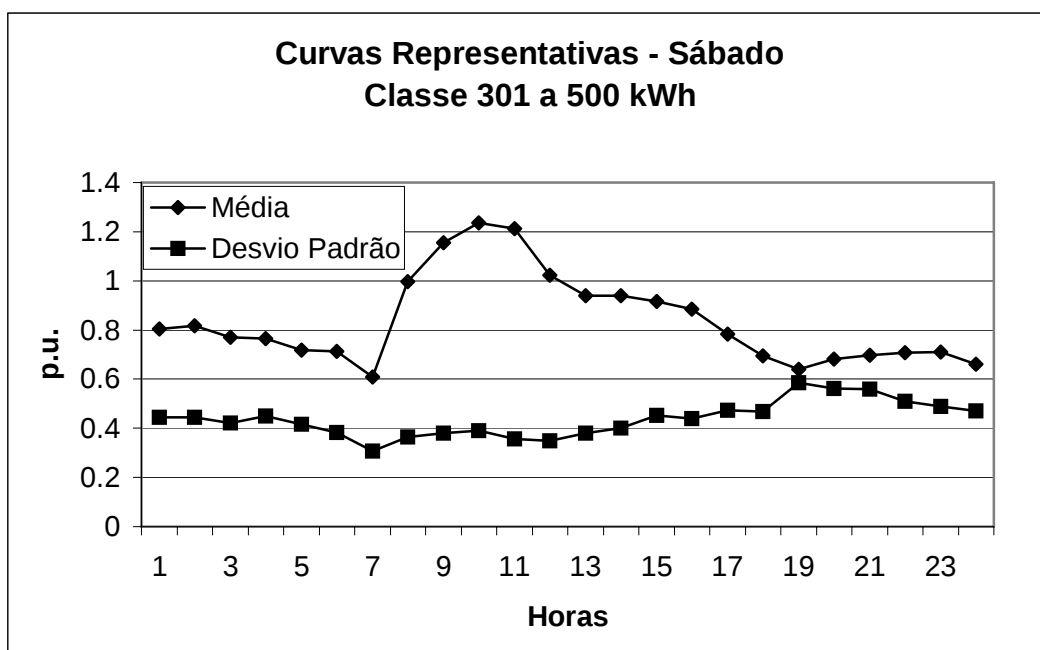


Figura 3.12: Curvas representativas aos sábados para classe comercial.

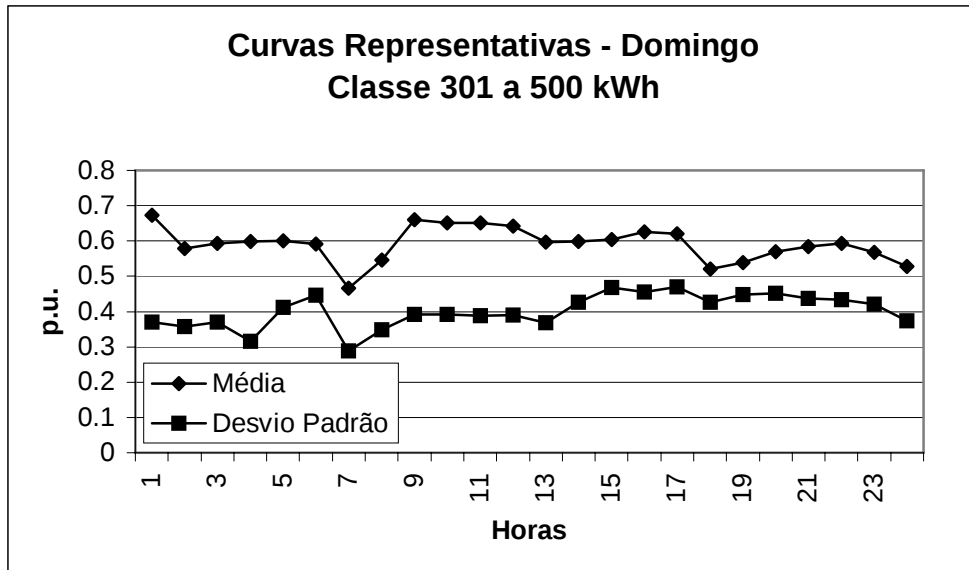


Figura 3.13: Curvas representativas aos domingos para classe comercial.

A estimativa de curvas de carga ($\mu(t)$ e $\sigma(t)$) de consumidores individuais é feita utilizando as curvas representativas ($m(t)$ e $d(t)$) das classes e o valor do consumo mensal de energia elétrica no mês (kWh/mês) pela unidade consumidora. A escolha das curvas representativas é obtida pelo valor do consumo mensal de energia. Em seguida é feito o cálculo da potência base, utilizando a expressão (3.3), que é multiplicada pela curva representativa, obtendo assim a curva estimada para o consumidor, conforme as relações:

$$\mu_i = m(t)P_{Base} \quad (3.4)$$

$$\sigma_i = d(t)P_{Base} \quad (3.5)$$

Na figura 3.14 é mostrado o exemplo da estimativa da curva de carga de um consumidor que possui um consumo mensal de 339 kWh por mês. As curvas representativas identificadas são referentes à classe 301 a 500 kWh/mês. O valor da potência base é 0,470833. Assim, multiplicando as curvas representativas da classe pela potência base calculada obtém-se a curva mostrada abaixo.

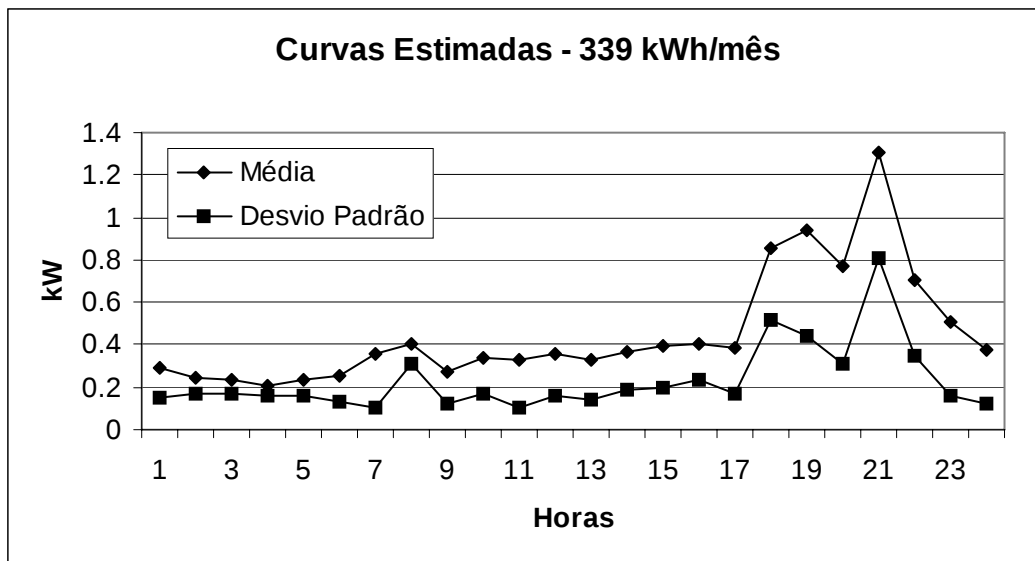


Figura 3.14: Curvas estimadas de dias úteis para consumidor de 339 kWh/mês.

Pode-se estabelecer a curva diária de um ponto de consumo de energia da rede de distribuição, supondo uma distribuição Normal de valores (Distribuição Gaussiana), com uma certa probabilidade de não ser excedida, de acordo com a expressão abaixo [14]:

$$F(t) = \mu(t) + k\sigma(t) \quad (3.6)$$

sendo k o valor de tabela da distribuição normal que estabelece a probabilidade (pr) da curva obtida não ser excedida (por exemplo, $k=1,3$, $pr=90\%$, $k=2,0$, $pr=98\%$). Deve-se escolher uma probabilidade da curva estimada não ser excedida de acordo com a aplicação em que a curva for submetida, sendo requerida maior ou menor segurança. Em aplicações simples, que requerem pouca segurança, utiliza-se probabilidade de 50%, que neste caso o valor de k é zero.

A estimativa de curvas de carga de consumidores individuais pode ser descrita conforme o algoritmo:

1. Obtenção de curvas de carga medidas pelas empresas distribuidoras, e divisão em classes e sub-classes;

2. Cálculo de curvas representativas em “p.u.” (média – $m(t)$ – e desvio padrão – $d(t)$), para cada sub-classe;
3. Com o valor da Potência Base (P_{Base}), obtenção das curvas μ_i e σ_i ;
4. Com o valor do consumo mensal (kWh/mês) obter a estimativa de curva de carga ($F(t)$) do Consumidor.

3.6. Curvas de Carga de Transformadores de Rede e do Alimentador

Após serem estimadas as curvas para consumidores individuais são feitas agregações, visando obter a estimativa das curvas de carga dos transformadores. Cada transformador possui um arquivo de dados contendo o consumo mensal de cada consumidor conectado a ele. Assim as curvas de cada consumidor são estimadas e agregadas às curvas do transformador, utilizando as seguintes expressões [14]:

$$\mu_T(t) = \sum_{i=1}^{ncons} \mu_i(t) \quad (3.7)$$

$$\sigma_T^2(t) = \sum_{i=1}^{ncons} (\sigma_i(t))^2 \quad (3.8)$$

sendo:

$\mu_T(t)$: curva média estimada do transformador;

$\mu_i(t)$: curva média estimada de cada consumidor;

$\sigma(t)$: curva de desvio padrão estimada do transformador;

$\sigma_i(t)$: curva de desvio padrão estimada de cada consumidor;

n_{cons} : número total de consumidores.

Ao mesmo tempo em que é feita a agregação das curvas individuais nos transformadores, também é feita uma agregação destas curvas no início do alimentador, visando obter a curva de carga estimada para o alimentador, utilizando também as expressões (3.7) e (3.8).

3.7. Ajuste nas Curvas de Cargas Estimadas

A curva de carga estimada do alimentador é comparada a uma curva real do mesmo, medida pela concessionária de energia. Esta medição é normalmente realizada no início dos alimentadores. Através desta comparação é feito o cálculo de um fator de correção para cada hora do dia, visando melhorar a estimativa das curvas de carga individuais e dos transformadores, já que utiliza dados reais para fazer a correção. O fator de correção proposto é definido pela seguinte expressão:

$$fator(j) = \frac{P_{real}(j)}{P_{agregada}(j)} \quad (3.9)$$

sendo:

$fator(j)$: fator de correção para cada hora do dia;

$P_{real}(j)$: potência verificada na curva real do alimentador na hora j ;

$P_{agregada}(j)$: potência verificada na curva estimada do alimentador na hora j .

O fator de correção proposto é aplicado às curvas de carga estimadas de todos os consumidores individuais conectados ao alimentador em estudo. Em seguida é feita uma nova agregação nos transformadores e no início do alimentador. Esse processo é feito visando aproximar as curvas estimadas dos transformadores às suas respectivas curvas reais.

Na figura 3.15 são mostradas as curvas estimadas para um consumidor individual que consome 373 kWh por mês, variando a probabilidade da estimativa não exceder.

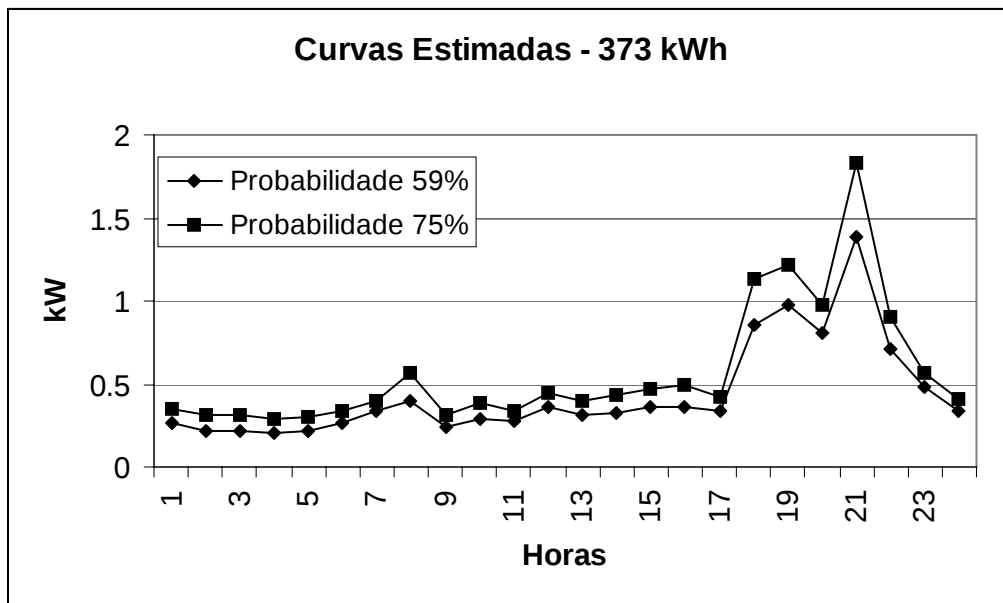


Figura 3.15: Curvas estimadas com probabilidades de não ser excedidas.

Para alimentadores de grande porte é necessário considerar as perdas envolvidas no sistema na estimação das curvas de carga. Estas perdas variam ao longo do dia, conforme o carregamento do sistema. A estimativa das perdas nas linhas da rede é feita utilizando a seguinte expressão [24]:

$$Perda(j) = |Z \cdot I^2(j)| \quad (3.10)$$

sendo:

$Perda(j)$: perda nas linhas a cada hora do dia;

Z : impedância da linha;

$I(j)$: corrente que passa na linha a cada hora.

Estas perdas são calculadas com um fluxo de potência, considerando as curvas de carga anteriores ao ajuste, pois estas perdas devem fazer parte da obtenção da curva de carga do alimentador.

As perdas nos transformadores são compostas por perdas no ferro e perdas no núcleo (cobre) dos transformadores. As perdas no ferro podem ser consideradas

constantes ao longo do dia. As perdas no núcleo variam de acordo com o carregamento de cada transformador [25]. Assim a estimativa das perdas no transformador é obtida utilizando a seguinte expressão:

$$Pe_{trafo}(j) = P_{Fe} + P_{Cu} \times \left(\frac{P(j)}{P_{nom}} \right) \quad (3.11)$$

sendo:

$Pe_{trafo}(j)$: perda no transformador a cada hora;

P_{Fe} : perda típica no ferro do transformador, encontrado em tabelas de fabricantes;

P_{Cu} : perda típica no cobre do transformador, encontrado em tabelas de fabricantes;

$P(j)$: potência verificada a cada hora no transformador;

P_{nom} : potência nominal do transformador.

A estimativa das curvas de carga nos transformadores pode ser descrita conforme o algoritmo:

1. Agregação das curvas de carga de todos os consumidores individuais conectados ao transformador;
2. Com as curvas estimadas nos transformadores obter uma curva de perdas (perdas no ferro e no cobre dos transformadores);
3. Estimativa da curva de carga no alimentador por agregação das curvas de carga dos transformadores conectados no respectivo alimentador (ou ramal) mais as perdas (perdas nas linhas e nos transformadores);
4. Comparação das curvas real e estimada no alimentador, obtendo o fator de correção;
5. Ajuste da estimativa das curvas de carga de consumidores individuais;
6. Agregação das curvas corrigidas nos transformadores e nos ramais de interesse.

Capítulo 4

Testes e Resultados

A metodologia proposta no capítulo 3 foi aplicada a alguns valores de consumo de energia, obtendo as estimativas de curvas de carga individuais, tanto residenciais quanto comerciais. Também foram realizados testes em um pequeno alimentador e em um alimentador real, cujos dados foram fornecidos por uma empresa distribuidora de energia.

4.1. Curvas de Carga Individuais

A estimativa das curvas de carga de consumidores individuais é o passo inicial da metodologia proposta. A estimativa é feita utilizando o valor do consumo mensal de cada unidade consumidora e arquivos de dados com as curvas representativas das classes de consumo. Através do valor de consumo mensal de energia é possível identificar a classe de consumo a que pertence e obter o valor de sua potência base. Assim a potência base é multiplicada pelas respectivas curvas representativas, obtendo as curvas de carga estimadas. Nas figuras 4.1 a 4.10 são mostradas as estimativas de curva de carga de consumidores individuais (residenciais e comerciais) de cada classe de consumo em um dia útil.

- Classe menor que 100 kWh/mês.

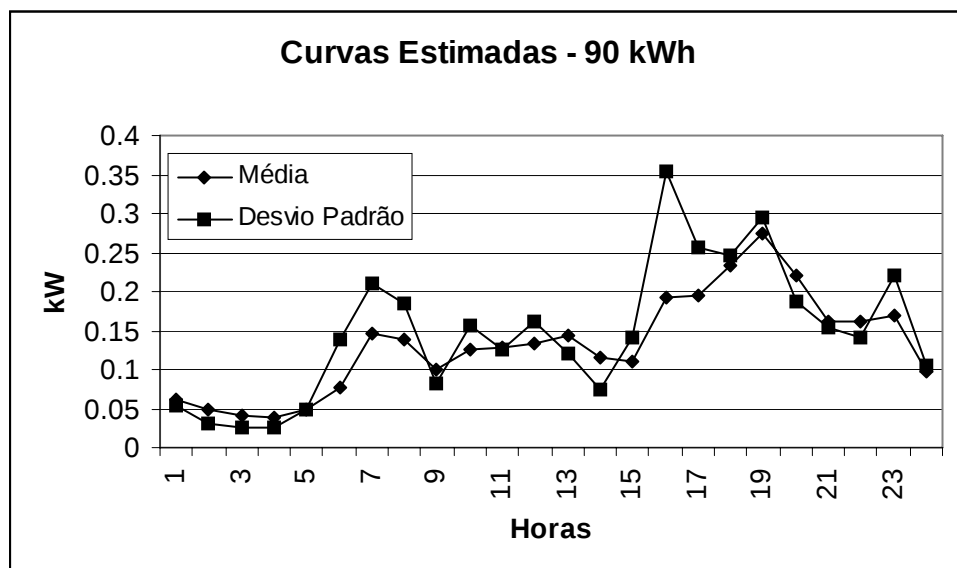


Figura 4.1: Curvas para consumidores residenciais – classe menor que 100 kWh/mês.

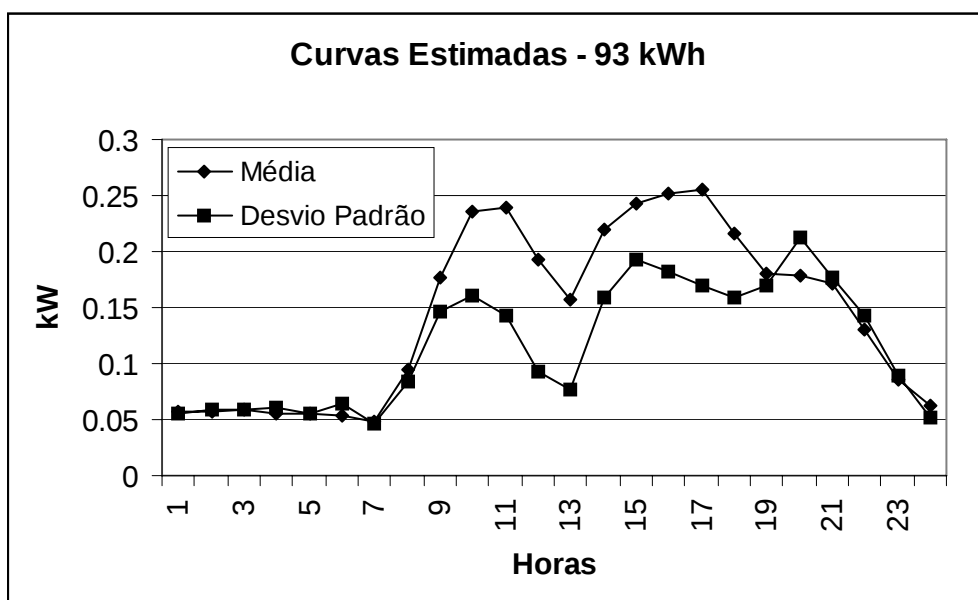


Figura 4.2: Curvas para consumidores comerciais – classe menor que 100 kWh/mês.

- Classe 101 a 200 kWh/mês.

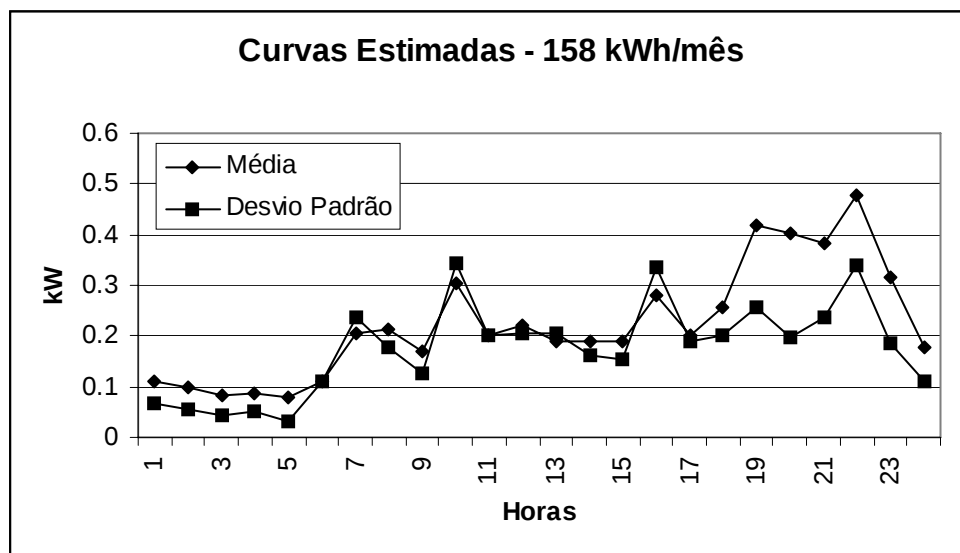


Figura 4.3: Curvas para consumidores residenciais – classe 101 a 200 kWh/mês.

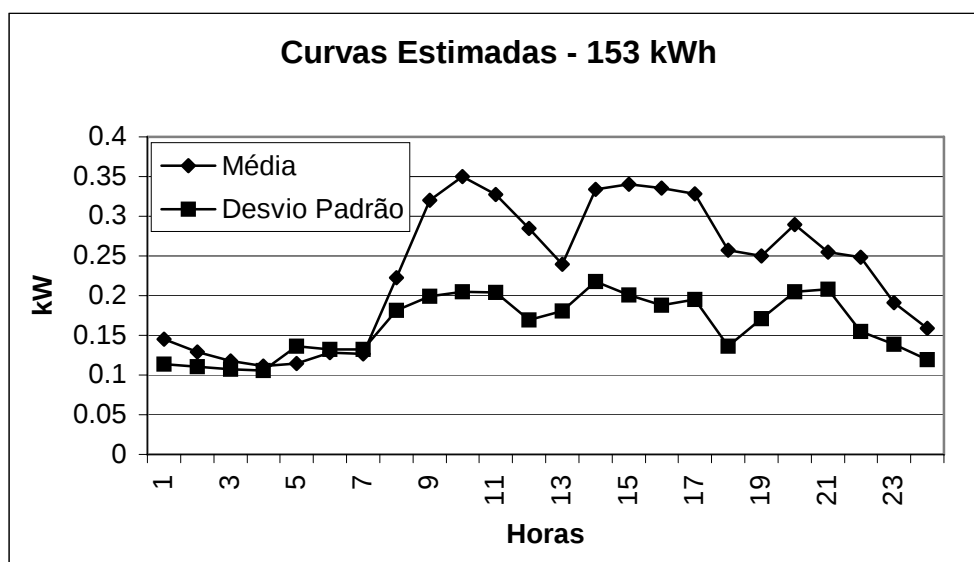


Figura 4.4: Curvas para consumidores comerciais – classe 101 a 200 kWh/mês.

- Classe 201 a 300 kWh/mês.

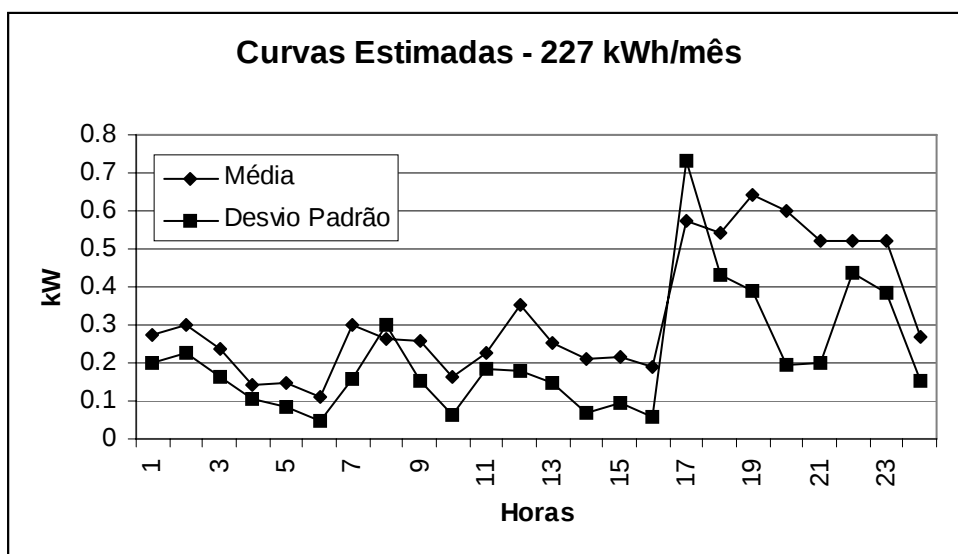


Figura 4.5: Curvas para consumidores residenciais – classe 201 a 300 kWh/mês.

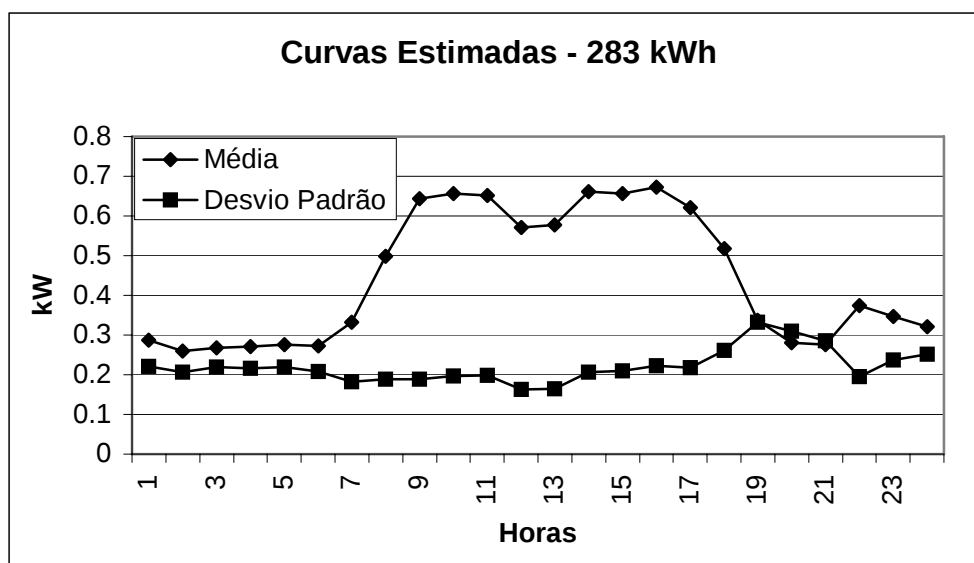


Figura 4.6: Curvas para consumidores comerciais – classe 201 a 300 kWh/mês.

- Classe 301 a 500 kWh/mês.

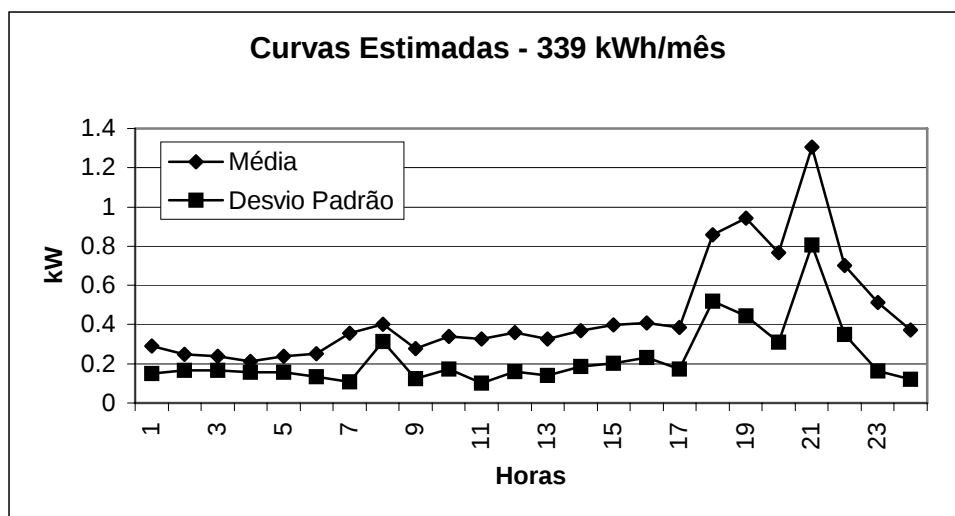


Figura 4.7: Curvas para consumidores residenciais – classe 301 a 500 kWh/mês.

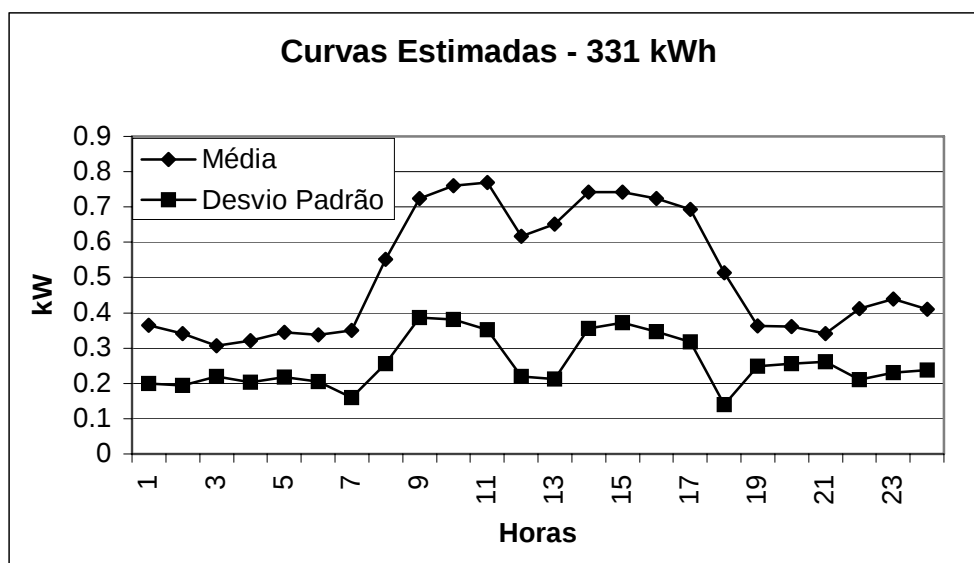


Figura 4.8: Curvas para consumidores comerciais – classe 301 a 500 kWh/mês.

- Classe maior que 500 kWh/mês.

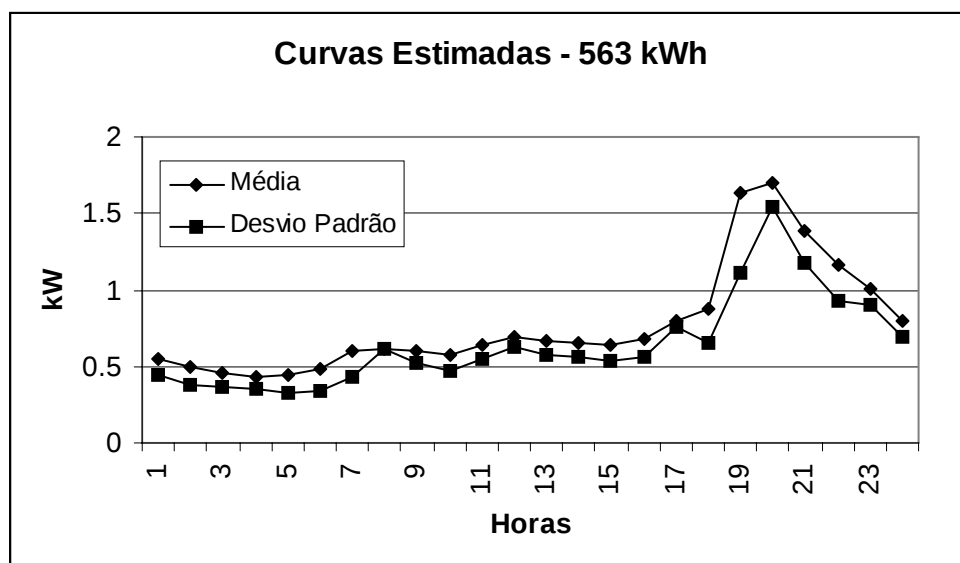


Figura 4.9: Curvas para consumidores residenciais – classe maior que 500 kWh/mês.

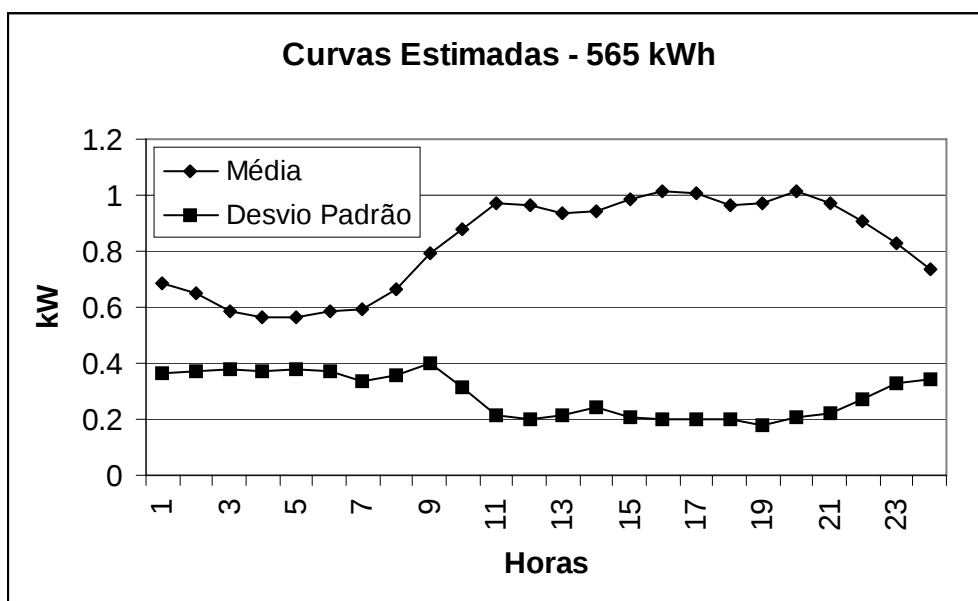


Figura 4.10: Curvas para consumidores comerciais – classe maior que 500 kWh/mês.

4.2. Sistema de 4 Barras

A metodologia descrita no capítulo 3 foi aplicada a um pequeno alimentador, com 4 transformadores de distribuição, com 121 consumidores conectados, dispostos conforme figura 4.11. Este alimentador é fictício e pequeno (apenas um trecho de um alimentador maior), porém construído a partir de dados reais de consumidores, obtidos de concessionárias de energia. Foram realizadas medições nas 121 unidades consumidoras do alimentador, o que tornou possível a verificação dos resultados. Um alimentador pequeno como este, permite uma avaliação e interpretação mais fácil dos resultados. Isto foi fundamental nos testes iniciais da metodologia proposta neste trabalho.

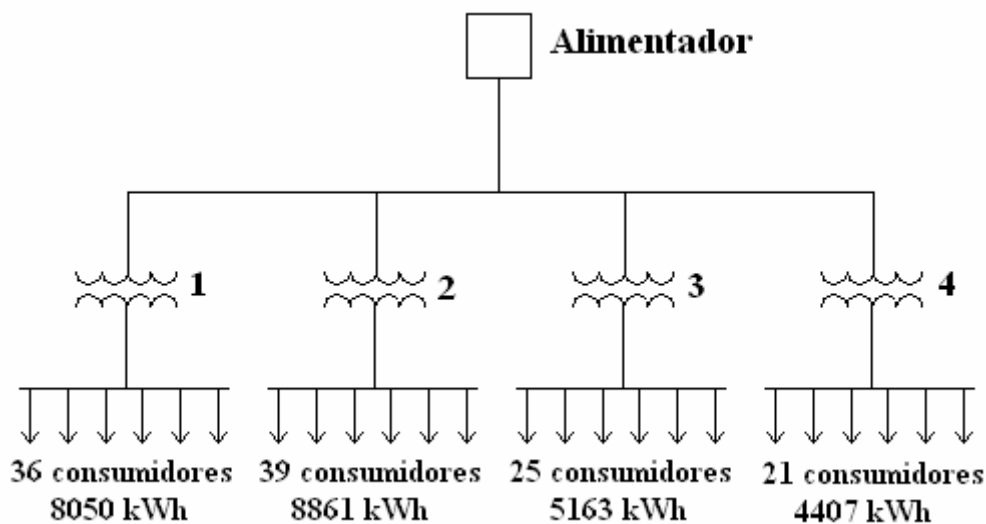


Figura 4.11: Alimentador fictício.

Analisando os consumidores do alimentador da figura 4.11 foi possível notar que predominavam os consumidores da classe entre 101 e 200 kWh/mês, com cerca de 37 %. Os consumidores da classe 201 a 300 kWh/mês representam 28% e os da classe abaixo de 100 kWh 22%. As classes com maior consumo mensal representam apenas 13% dos consumidores, sendo 9% pertencentes à classe 301 a 500 kWh/mês e 4% à classe acima de 500 kWh/mês.

De acordo com a energia consumida pelos 121 consumidores conectados ao alimentador (dados reais), foi possível estimar cada curva individual e agregá-las aos transformadores e à subestação (curva estimada da figura 4.12). Como esse alimentador é pequeno as perdas envolvidas foram desprezadas. Utilizando a curva medida pela concessionária de energia (curva real da figura 4.12) foi feita a comparação com a curva estimada. Através desta comparação pôde-se calcular o fator de correção, que foi aplicado a cada consumidor, como mostra o exemplo da figura 4.13.

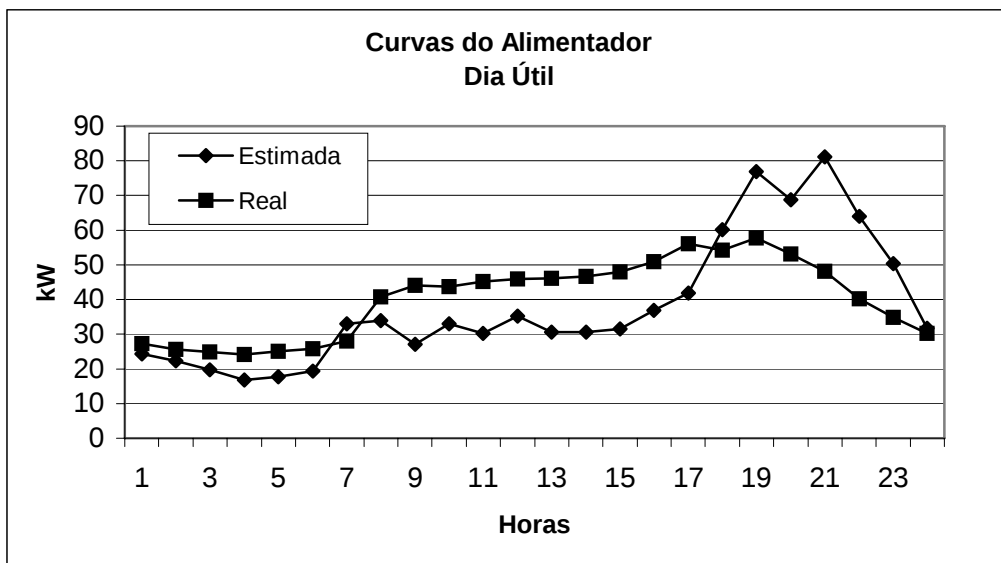


Figura 4.12: Curvas no alimentador.

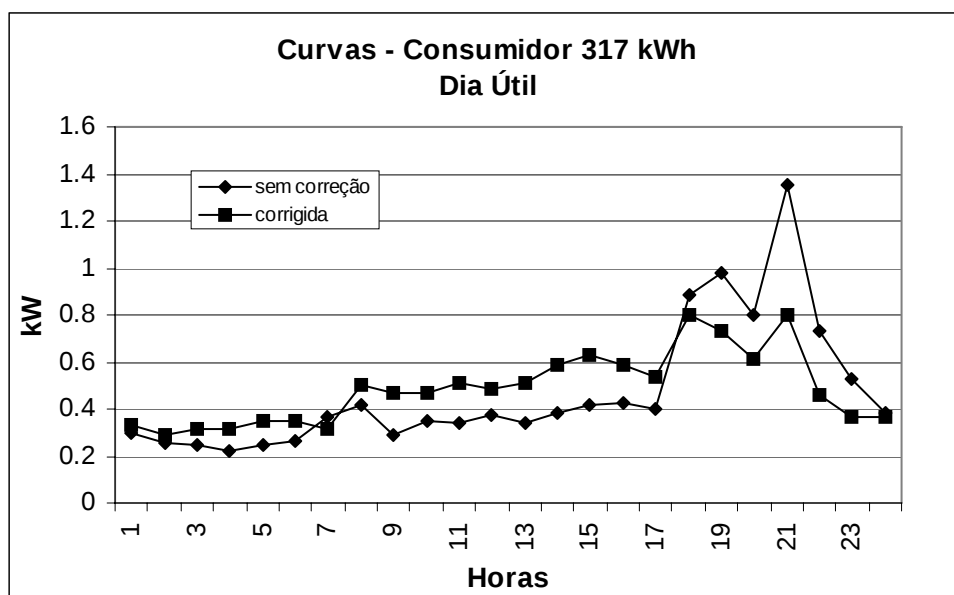


Figura 4.13: Curvas de um consumidor.

Após a correção das curvas individuais foram feitas análises nas curvas agregadas dos transformadores mostrados na figura 4.11. Nas figuras 4.14 a 4.17 mostram a comparação entre a curva real e a curva estimada (agregada) de cada transformador. É possível notar que as curvas possuem forma e amplitude semelhantes.

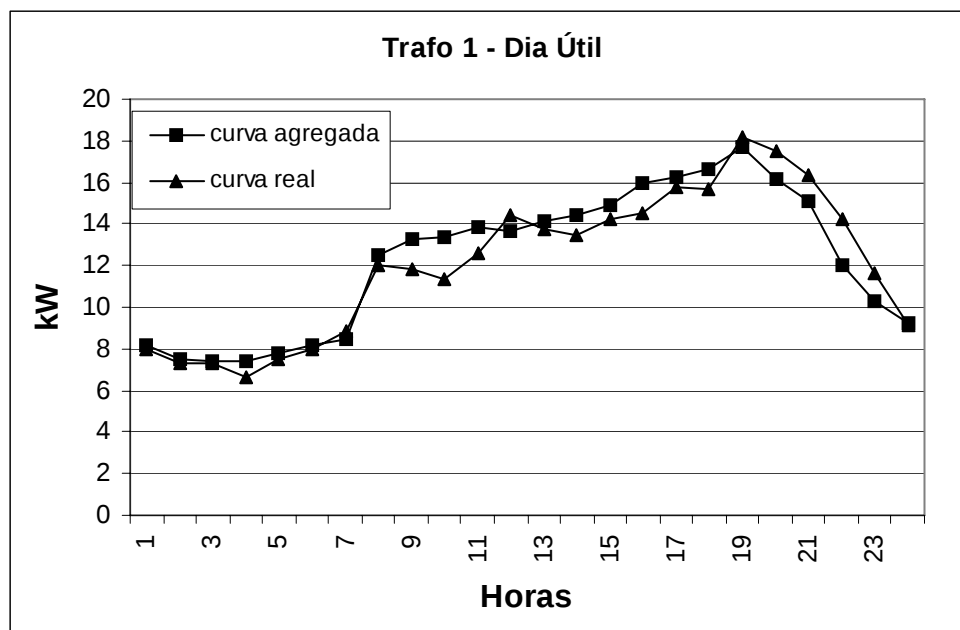


Figura 4.14: Curva real e curva estimada (agregada) no Transformador 1.

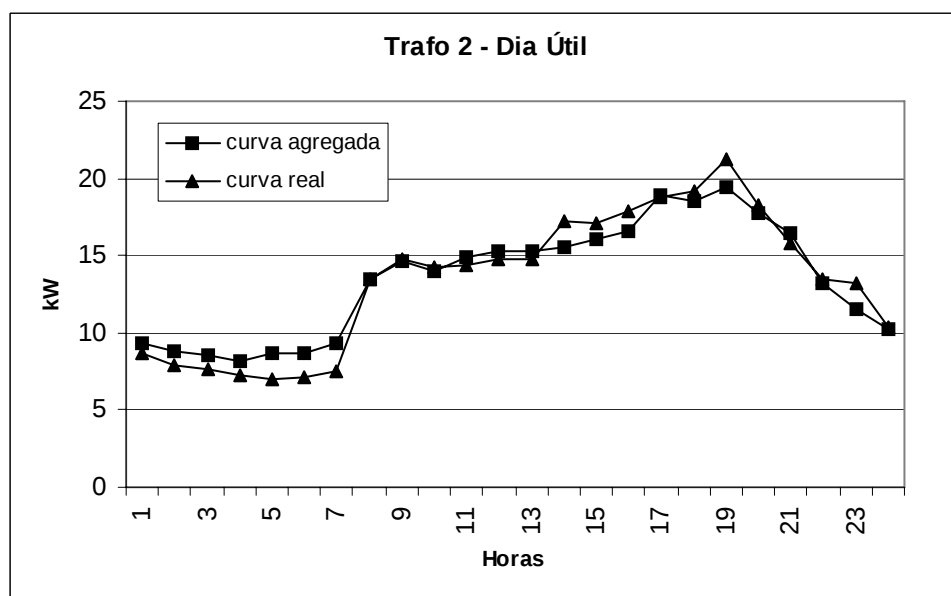


Figura 4.15: Curva real e curva estimada (agregada) no Transformador 2.

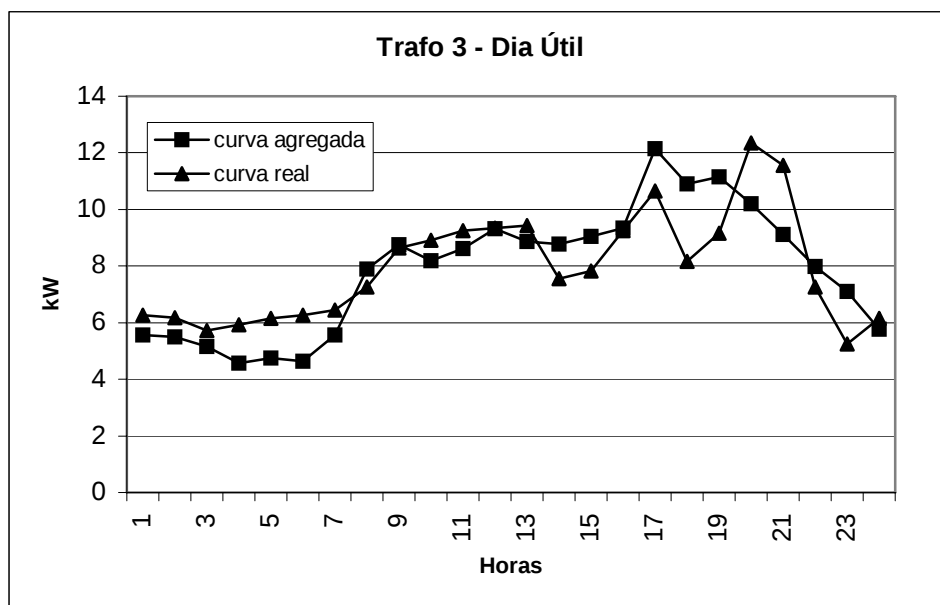


Figura 4.16: Curva real e curva estimada (agregada) no Transformador 3.

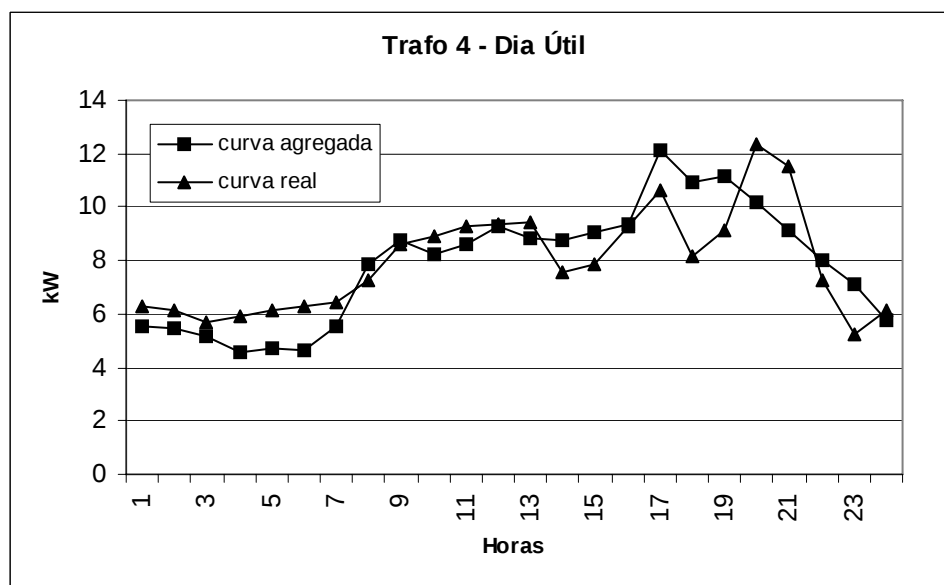


Figura 4.17: Curva real e curva estimada (agregada) no Transformador 4.

Para cada transformador foi feito o cálculo do erro no cálculo do consumo diário (kWh/dia) e da diferença entre as curvas reais e agregadas, a cada hora do dia, como mostram as tabelas 4.1, 4.2 e 4.3.

Tabela 4.1: Erro máximo entre consumo das curvas real e estimada a cada dia (%).

	Transf. 1	Transf. 2	Transf. 3	Transf. 4
Dia Útil	1,36	0,48	1,05	2,13
Sábado	6,79	1,81	6,84	1,34
Domingo	12,09	12,77	4,51	6,09

Tabela 4.2: Maiores diferenças entre as curvas e os horários em que ocorrem.

	Transf. 1		Transf. 2		Transf. 3		Transf. 4	
	Hora	kW	Hora	kW	Hora	kW	Hora	kW
Dia Útil	22	2,25	19	1,80	18	2,75	20	4,04
Sábado	20	2,86	20	2,56	20	3,31	20	3,01
Domingo	18	1,87	21	2,70	20	2,01	20	1,94

Tabela 4.3: Menores diferenças entre as curvas e os horários em que ocorrem.

	Transf. 1		Transf. 2		Transf. 3		Transf. 4	
	Hora	kW	Hora	kW	Hora	kW	Hora	kW
Dia Útil	24	0,11	8	0,02	12	0,02	1	0,09
Sábado	24	0,04	19	0,04	18	0,04	4	0,01
Domingo	20	0,02	7	0,12	6	0,05	3	0,06

Após a correção das curvas dos transformadores é possível escolher a probabilidade que as curvas estimadas não sejam excedidas. Para cada necessidade é escolhida essa probabilidade, dependendo da segurança exigida na aplicação. Um exemplo é mostrado na figura 4.18.

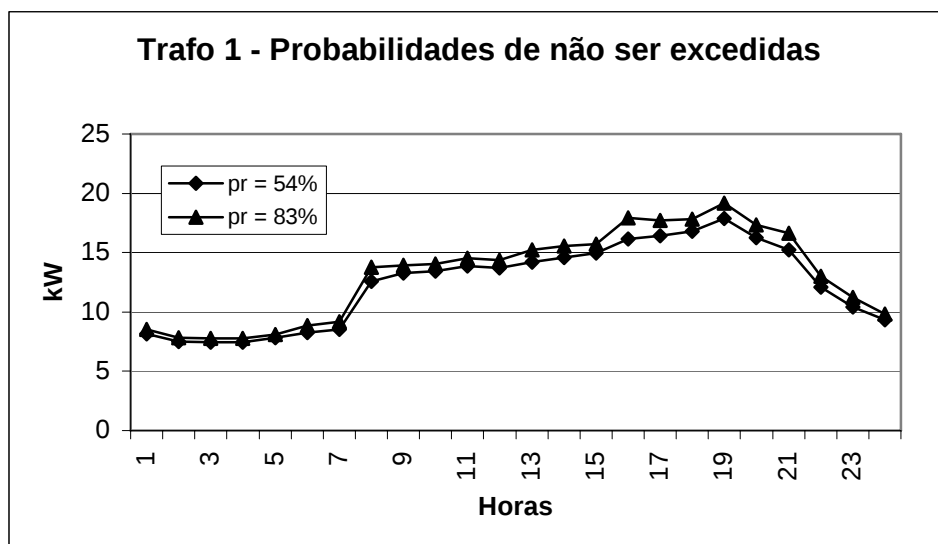


Figura 4.18: Curvas do transformador 1 com probabilidades diferentes.

4.3. Alimentador de 123 Barras

A metodologia também foi aplicada ao um alimentador real, mostrado na figura 4.19. Este alimentador é trifásico, com 87 transformadores e possui consumidores residenciais, comerciais e industriais conectados a ele.

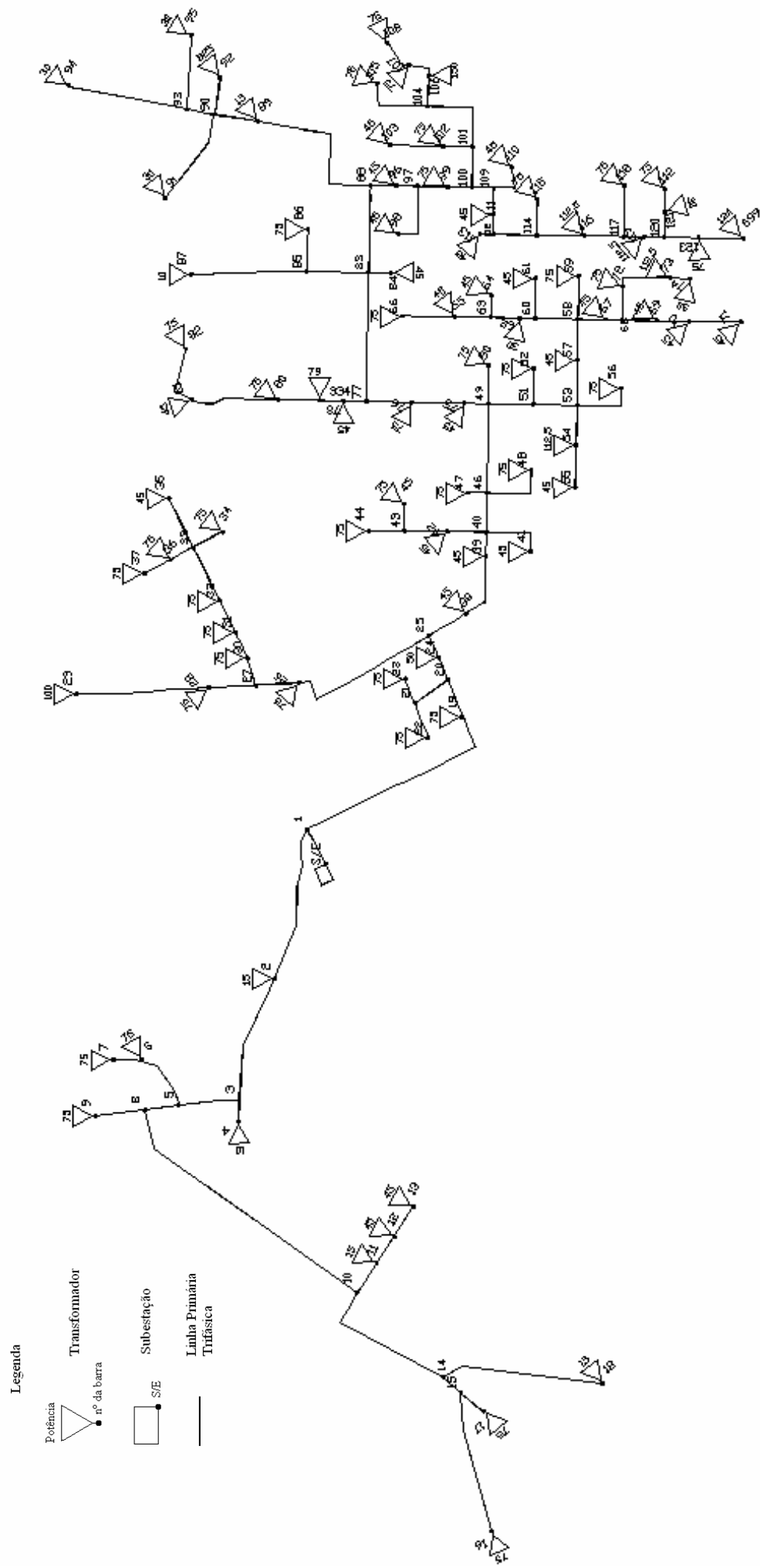


Figura 4.19: Alimentador real testado.

As características do sistema foram verificadas com o auxílio de cálculo de fluxo de potência [26]. Nas figuras 4.10 a 4.12 são mostradas as curvas de carga reais da subestação do alimentador, obtidas através de medições fornecidas pela concessionária de energia.

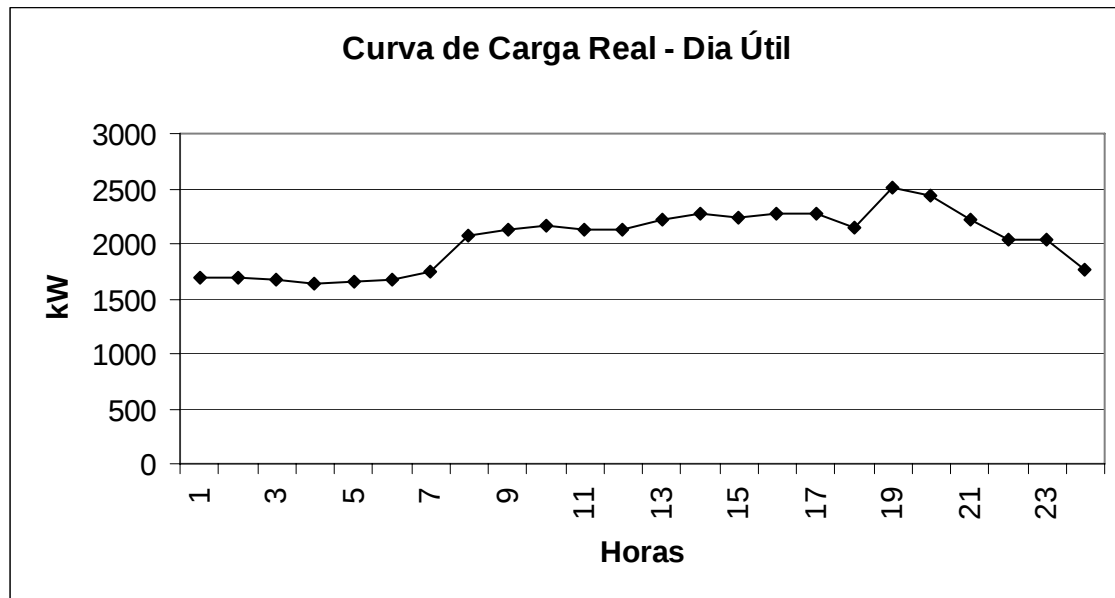


Figura 4.20: Curva de carga real de dia útil.

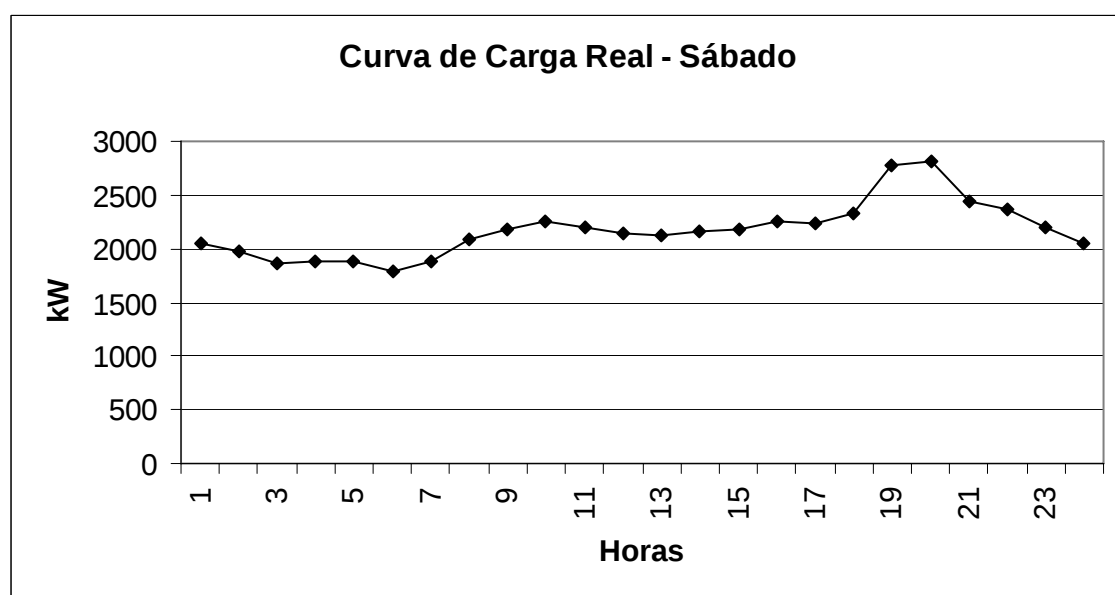


Figura 4.21: Curva de carga real de sábado.

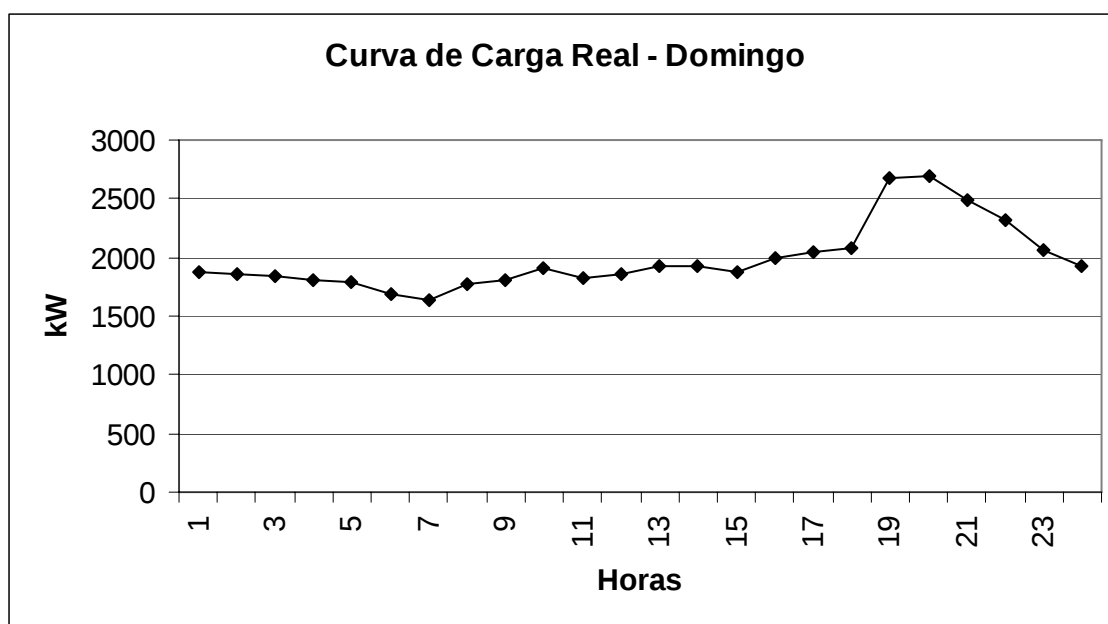


Figura 4.22: Curva de carga real de domingo.

Este alimentador encontra-se em uma região central de uma cidade, possuindo características tipicamente comerciais, porém alguns transformadores possuem características típicas de setores residenciais, como mostrado nas figuras 4.23 e 4.24.

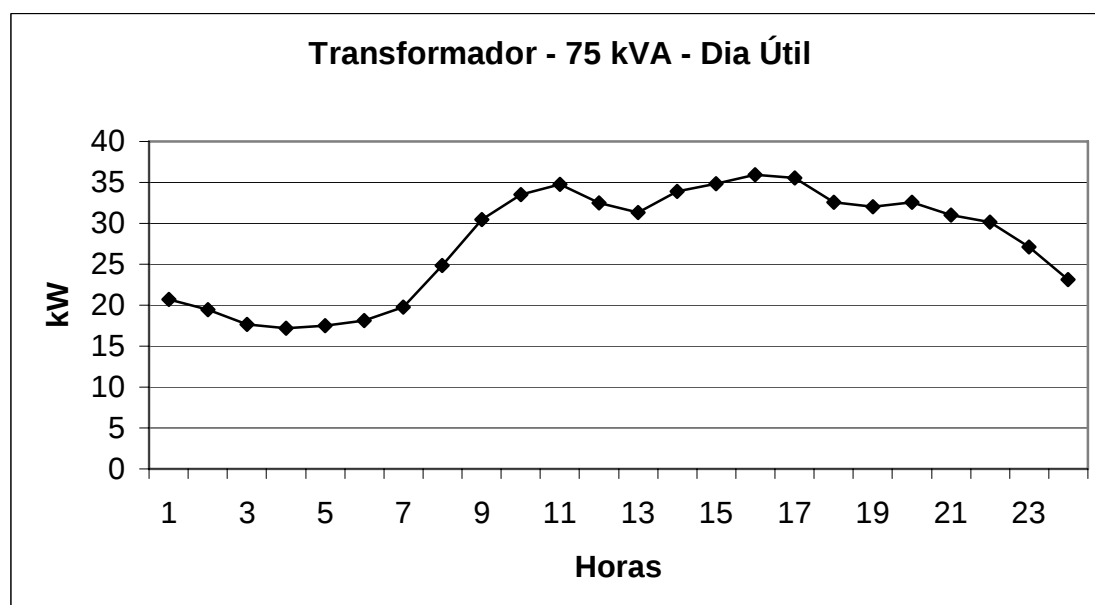


Figura 4.23: Transformador tipicamente comercial.

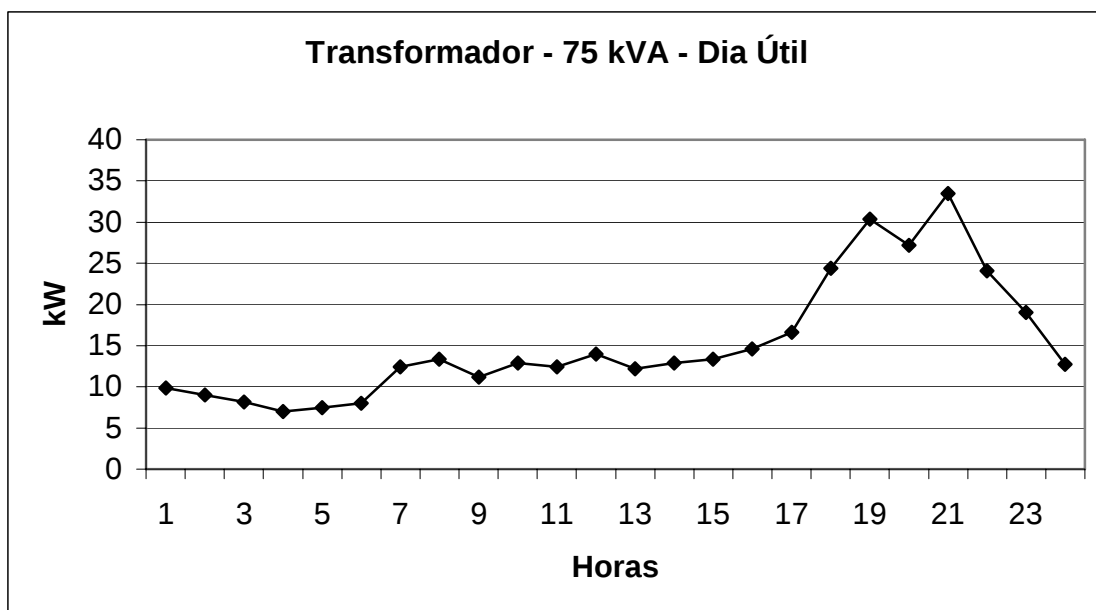


Figura 4.24: Transformador tipicamente residencial.

Além dos transformadores tipicamente residenciais e comerciais, também é utilizada uma curva representativa de transformadores de iluminação pública, que é mostrada na figura 4.25.

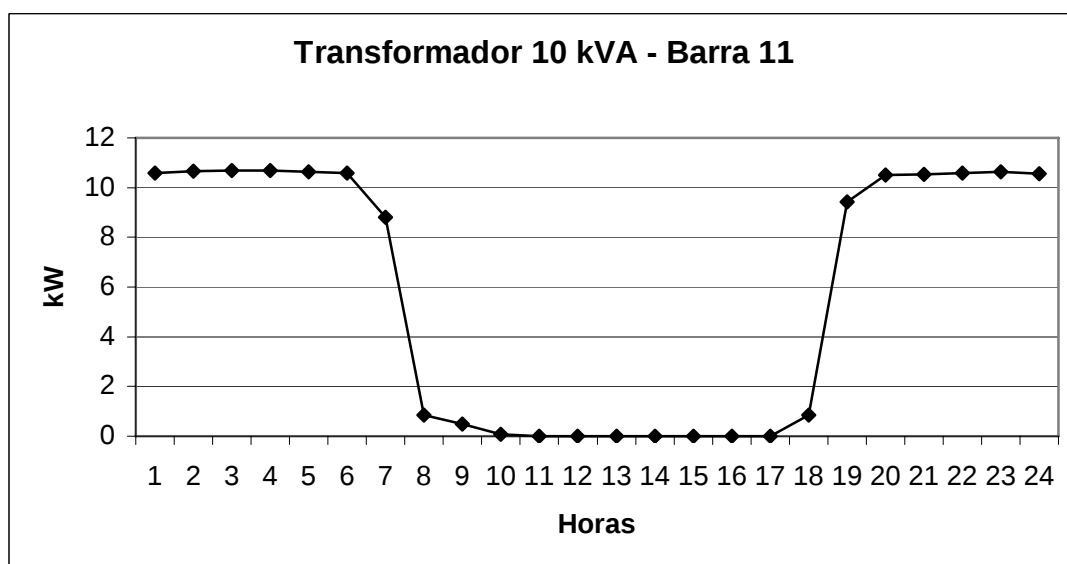


Figura 4.25: Curva representativa de transformador de iluminação pública.

Para cada transformador é realizada uma estimativa de curva de carga de cada consumidor conectado a ele, utilizando os respectivos valores de consumo mensal de energia. Assim é feita a agregação das curvas no transformador, utilizando as equações (3.7) e (3.8), avaliando as estimativas de cada consumidor conectado a ele. Nas figuras 4.26 a 4.28 são mostradas as estimativas de curva de carga de um transformador de 45 kVA, para dia útil, sábado e domingo.

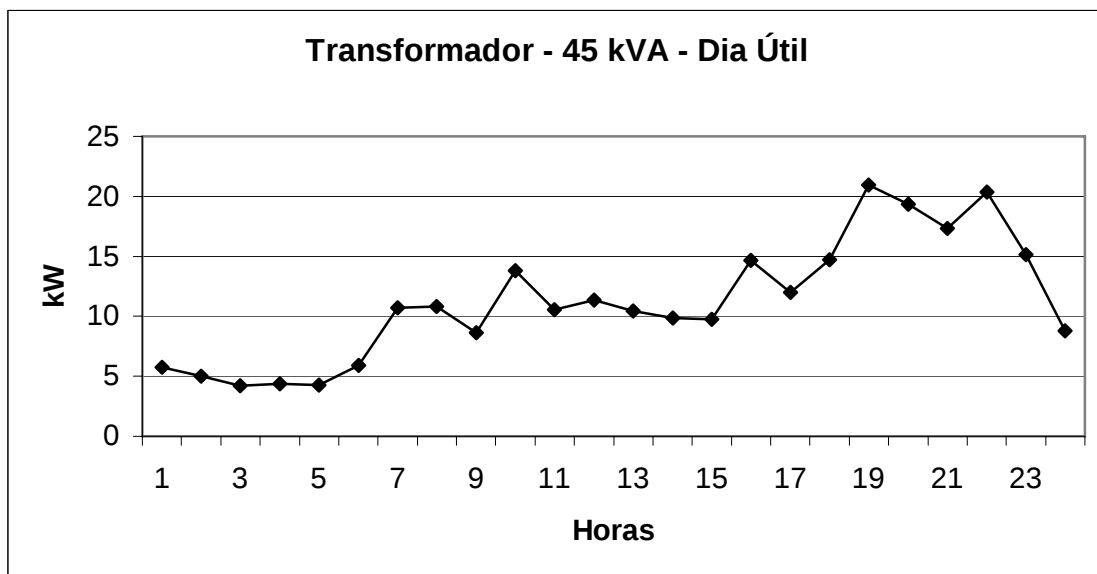


Figura 4.26: Curva estimada de um transformador em um dia útil.

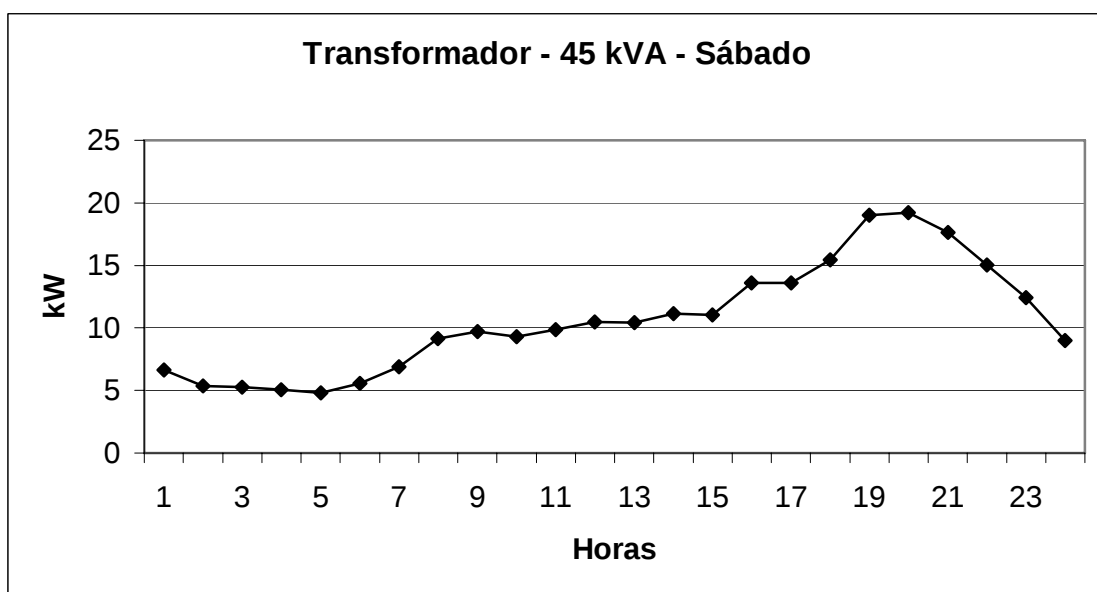


Figura 4.27: Curva estimada de um transformador em um sábado.

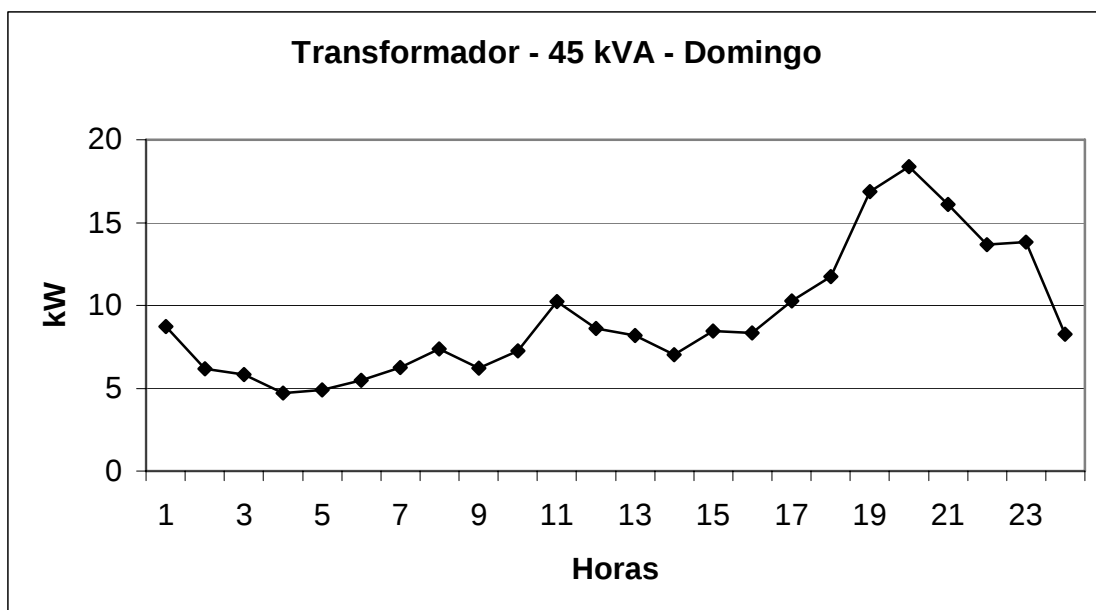


Figura 4.28: Curva estimada de um transformador em um domingo.

Após estimar as curvas de todos os transformadores é feita a agregação destas curvas no alimentador na saída da subestação. Esta agregação é feita utilizando as relações (3.7) e (3.8), analisando as curvas dos transformadores e a estimativa de perdas nos transformadores e nas linhas, mostradas na figura 4.29. Na figura 4.30 é mostrada a estimativa de curva de carga no alimentador.

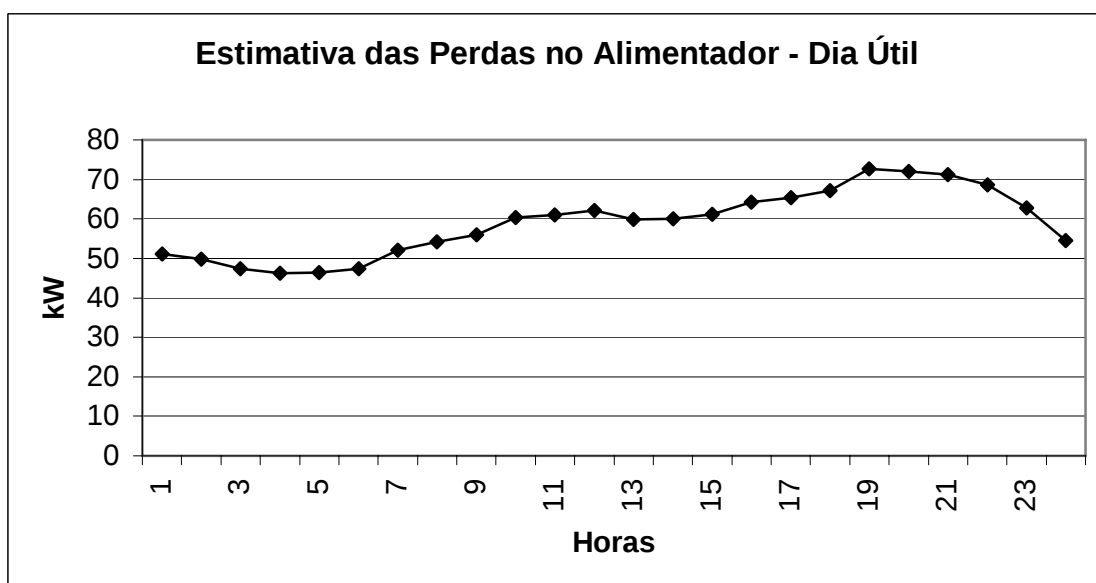


Figura 4.29: Estimativa das perdas no alimentador.

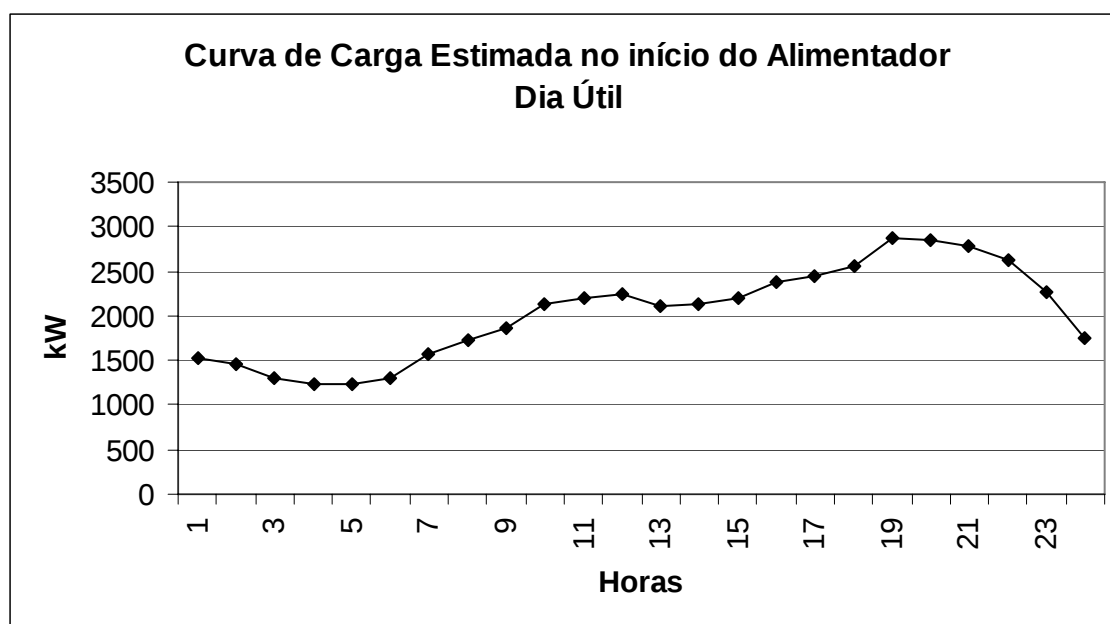


Figura 4.30: Curva estimada no início do alimentador.

Após a agregação das curvas no início do alimentador é feita uma análise comparativa entre a curva real, fornecida pela concessionária, e a curva estimada. Desta análise é feito o cálculo do fator de correção das curvas, utilizando a expressão (3.9). Nas figuras 4.31 a 4.33 são mostradas as comparações entre as curvas estimada e real do alimentador.

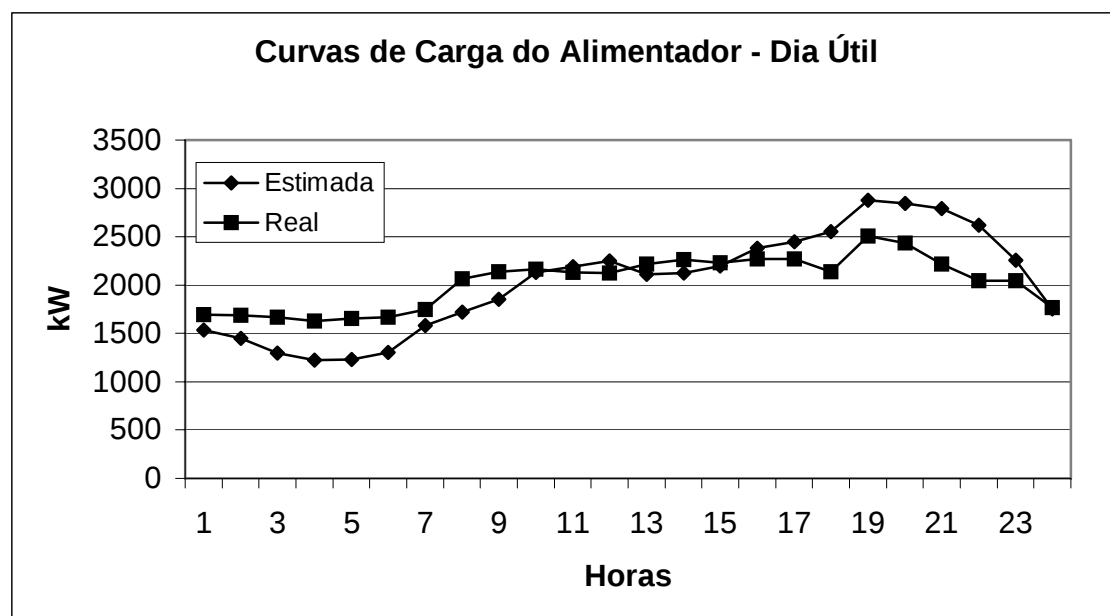


Figura 4.31: Comparação entre as curvas estimada e real de dias úteis.

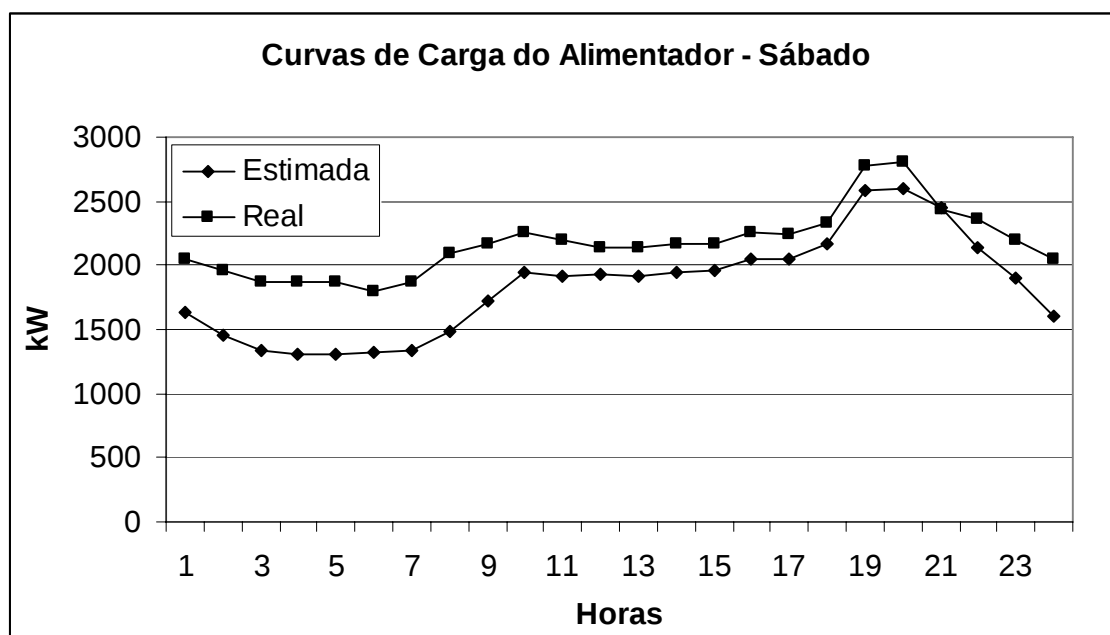


Figura 4.32: Comparação entre as curvas estimada e real aos sábados.

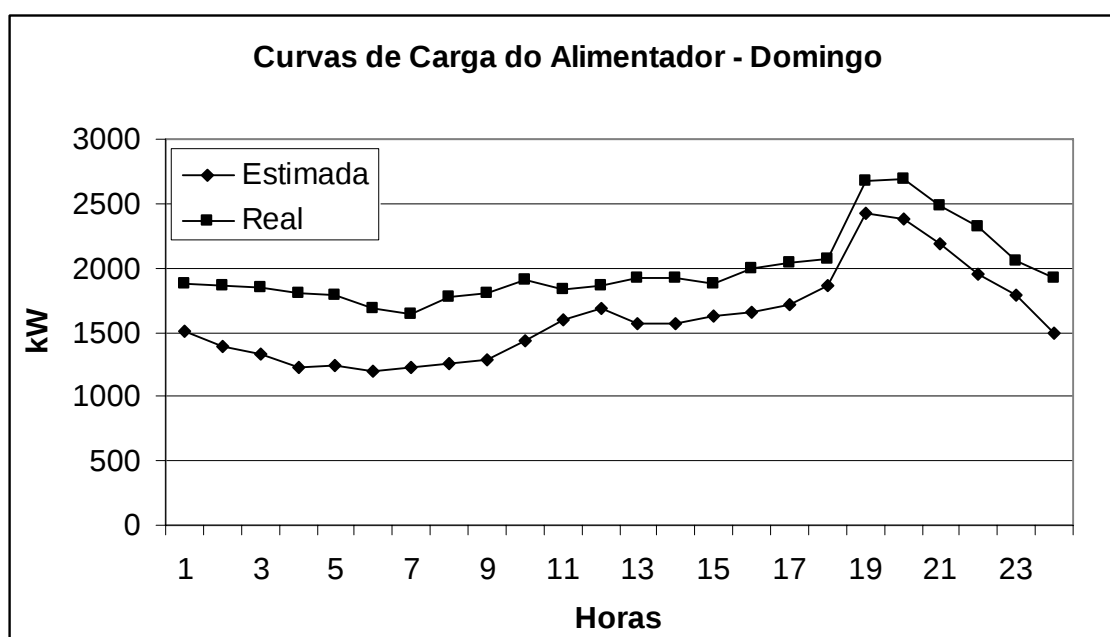


Figura 4.33: Comparação entre as curvas estimada e real aos domingos.

Assim é feita a correção da estimativa. A curva de carga de cada consumidor é corrigida pelo fator de correção e, em seguida, agregada ao transformador. Na figura

4.34 é mostrada a estimativa de curva de carga de um consumidor e a curva corrigida pelo fator de correção.

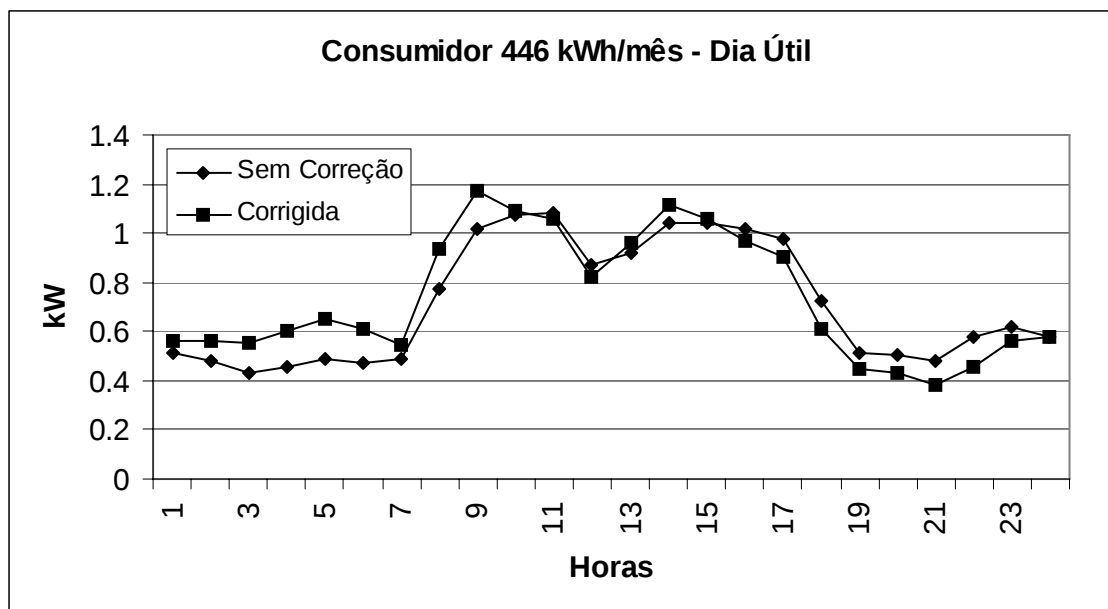


Figura 4.34: Curvas estimada e corrigida de um consumidor.

Nas figuras 4.35 a 4.40 são mostradas as curvas de carga dos transformadores tipicamente residenciais e comerciais sob a influência do fator de correção proposto, em dias úteis, sábados e domingos.

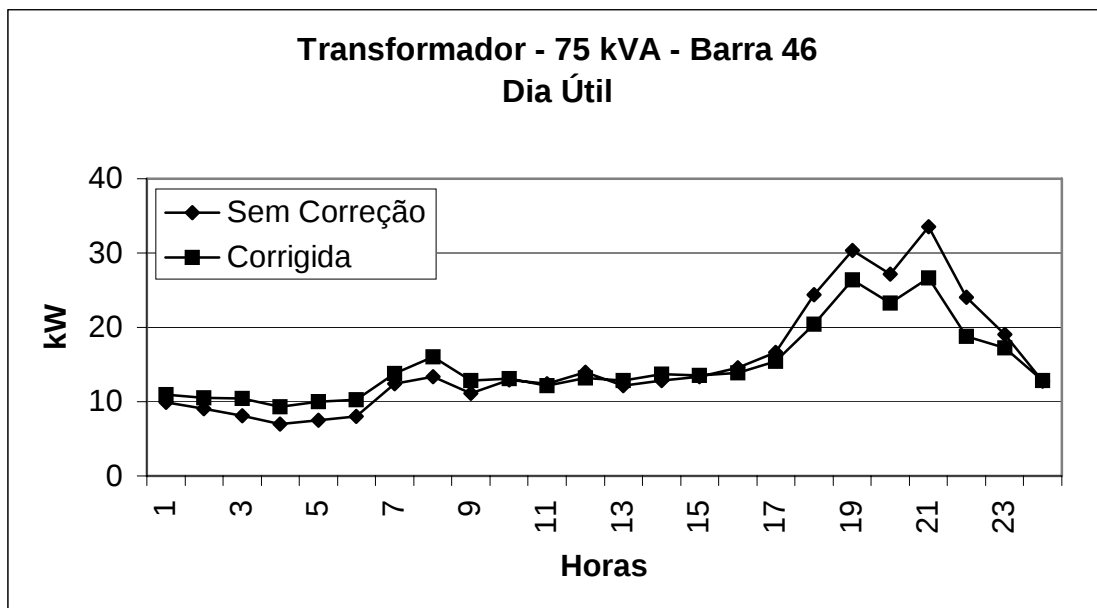


Figura 4.35: Curvas de carga de transformador tipicamente residencial em dias úteis.

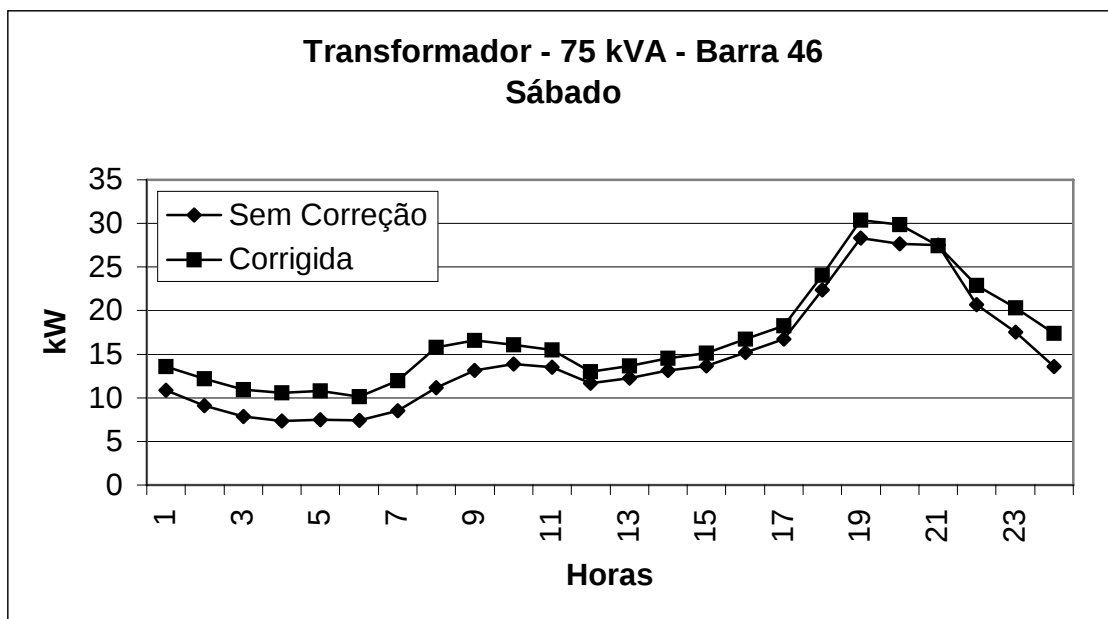


Figura 4.36: Curvas de carga de transformador tipicamente residencial aos sábados.

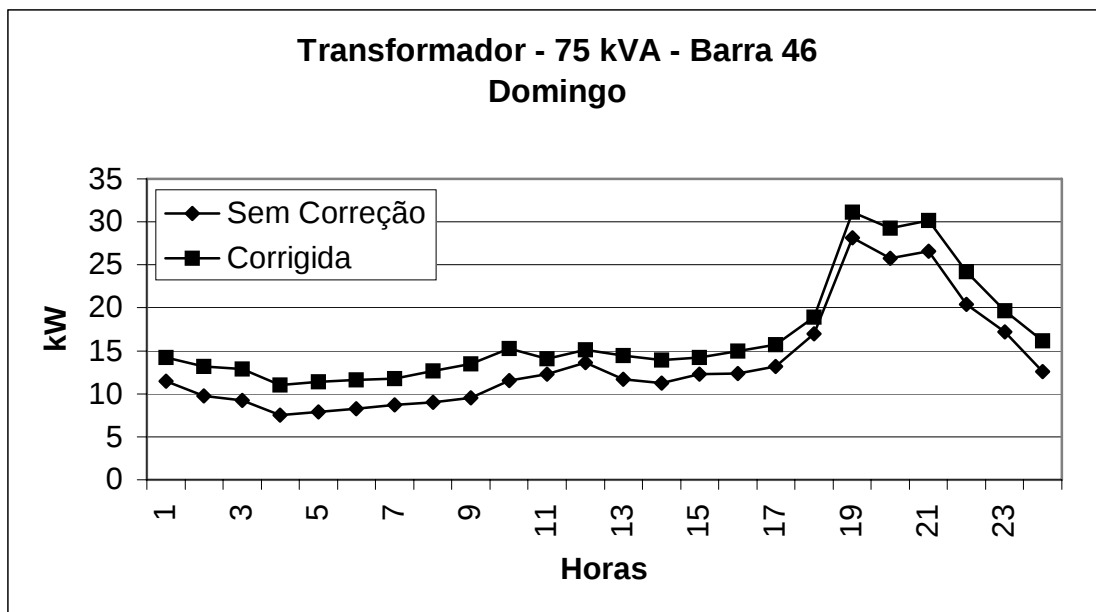


Figura 4.37: Curvas de Carga de transformador tipicamente residencial aos domingos.

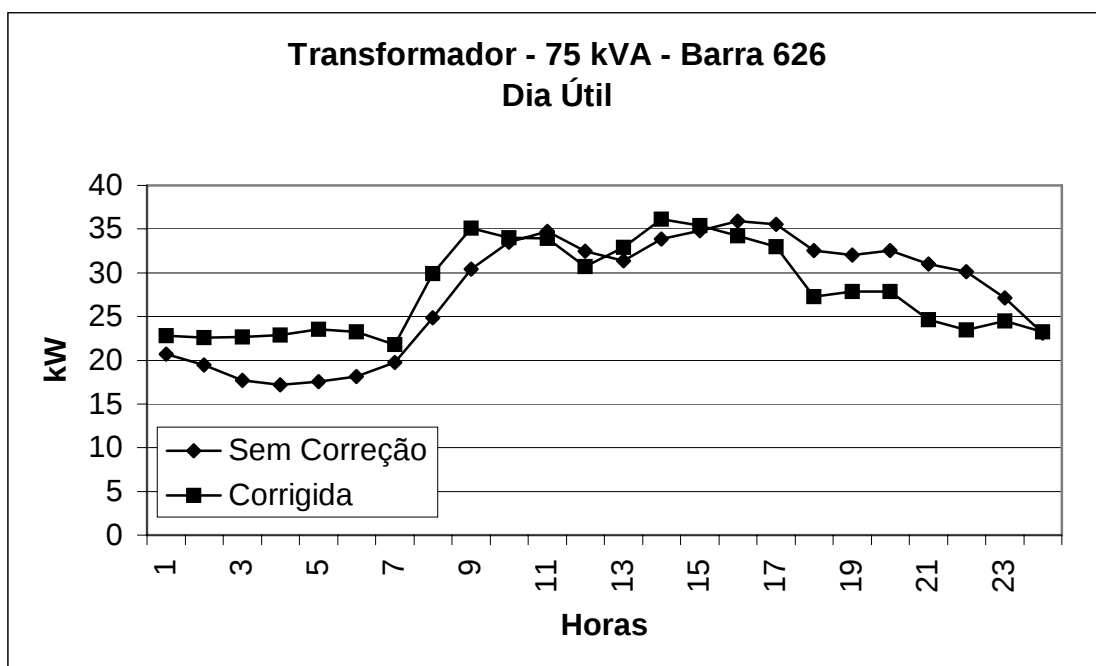


Figura 4.38: Curvas de carga de transformador tipicamente comercial em dias úteis.

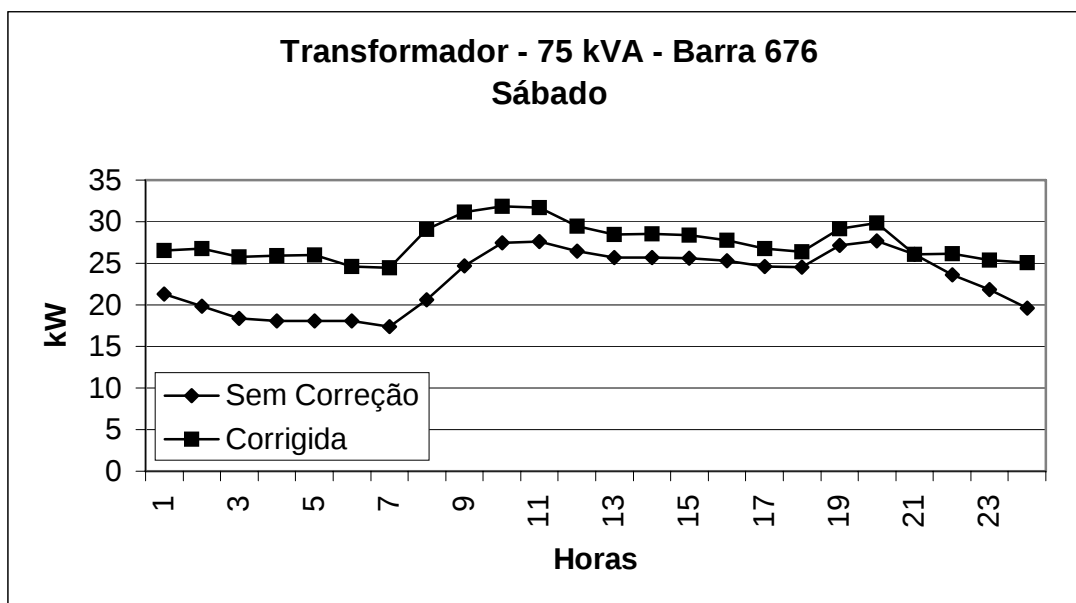


Figura 4.39: Curvas de carga de transformador tipicamente comercial aos sábados.

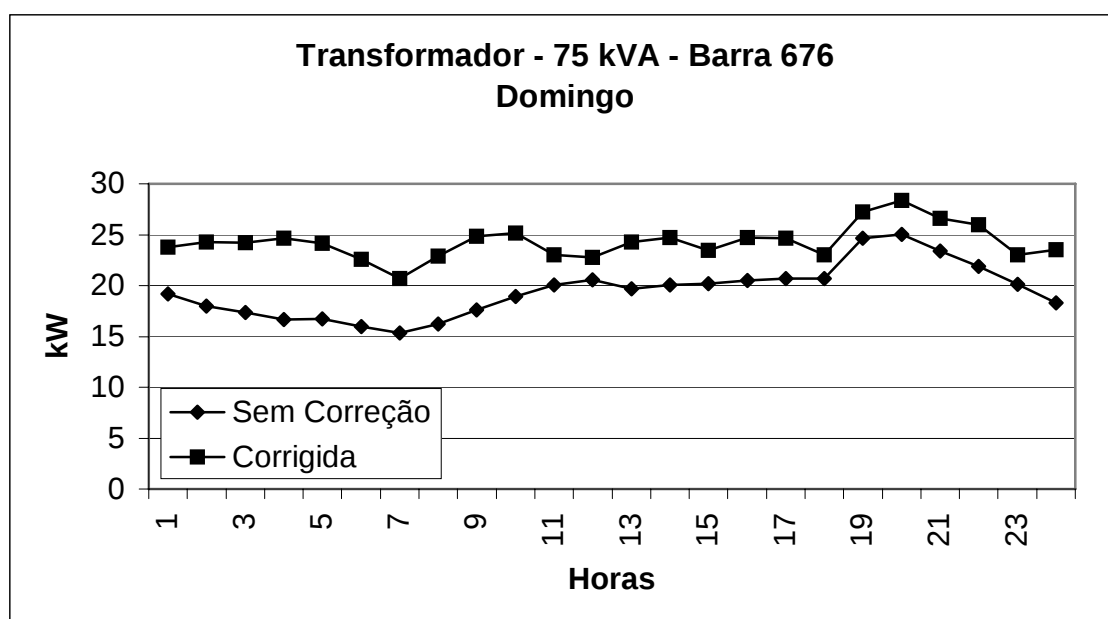


Figura 4.40: Curvas de carga de transformador tipicamente comercial aos domingos.

Na estimativa das perdas não é necessário fazer correção já que são calculadas de acordo com o carregamento dos transformadores. Uma vez que a estimativa do transformador já sofreu influência do fator de correção, a estimativa das perdas é feita sobre a curva corrigida do transformador. No caso de iluminação pública, a estimativa

não é corrigida pelo fator de correção devido ao fato do comportamento da curva não necessitar alteração.

Se as perdas do sistema (perdas nas linhas e perdas nos transformadores) não forem consideradas, as curvas de carga estimadas têm um pequeno aumento, já que são tratadas como um consumidor a mais conectado ao alimentador. É possível notar este aumento na estimativa de curva de carga de um consumidor individual (figura 4.41) e na estimativa de curva de carga de um transformador (figura 4.42).

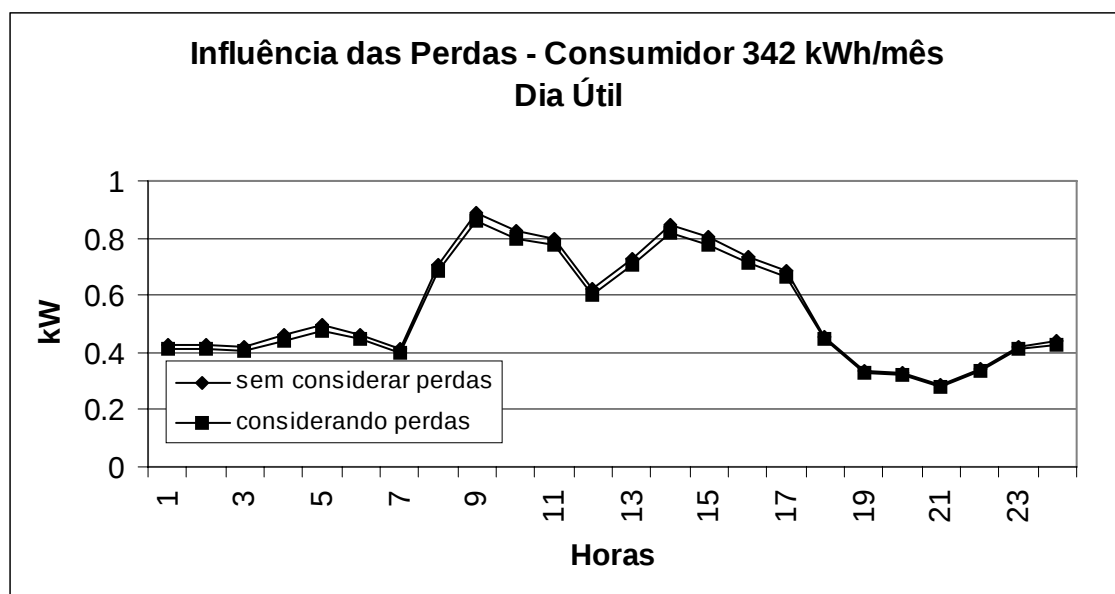


Figura 4.41: Análise das perdas na estimativa de curvas de consumidor individual.

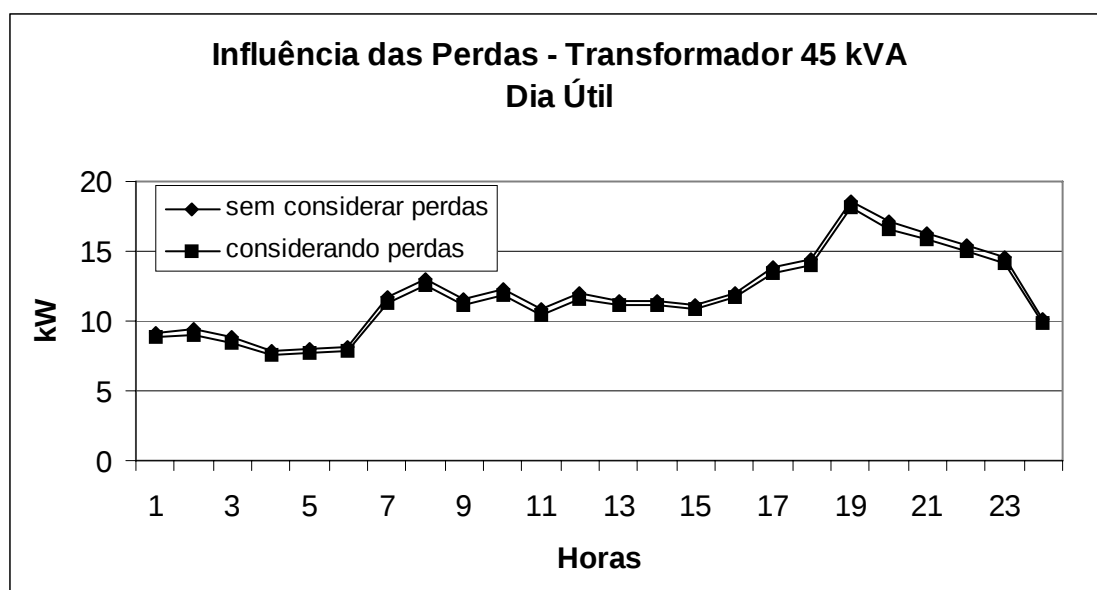


Figura 4.42: Análise das perdas na estimativa de curvas de um transformador.

Na figura 4.43 são mostradas as curvas de carga estimadas ($F_T(t)$) de um transformador, utilizando as distribuições *normal* (*Gauss*) e de “*Student*” *t*, com probabilidade de não ser excedida em 90%. Utilizando a *distribuição normal* o valor de *k* foi de 1,28 enquanto que utilizando a *distribuição de “Student” t* o valor de *k* foi 1,37.

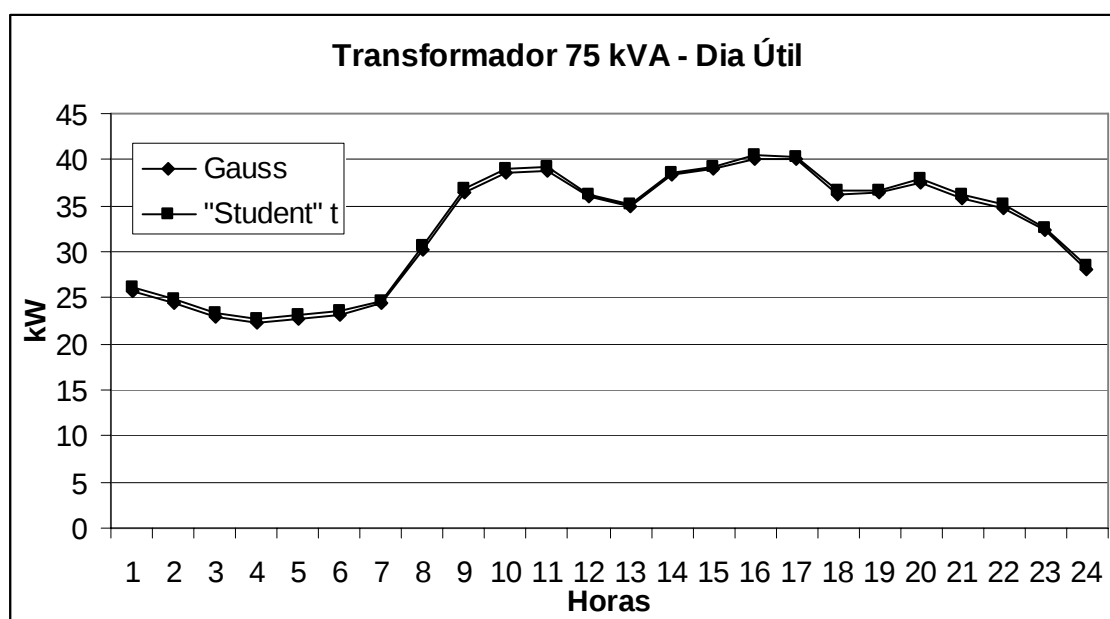


Figura 4.43: Comparação entre distribuições amostrais de Gauss e de “*Student*” *t*.

Capítulo 5

Conclusões

A metodologia proposta visa estimar as curvas de carga nos pontos de consumo de energia e dos transformadores de distribuição. O tratamento estatístico de curvas reais obtidas por medições das concessionárias foi essencial para obtenção das curvas representativas das classes de consumidores, usadas nas estimativas das curvas de carga de consumidores individuais.

A estimação das curvas de carga nos transformadores é feita pela soma das curvas estimadas dos consumidores individuais. Este procedimento pode ser verificado através de medições nos transformadores, realizadas pelas concessionárias de energia.

O fator de correção proposto, mesmo que simples, mostrou resultados satisfatórios na estimativa das curvas de carga dos transformadores e dos consumidores individuais, já que utiliza a curva de carga real do início do alimentador para corrigir cada curva.

As curvas estimadas devem ser utilizadas na forma estatística, isto é, média e desvio padrão. Assim pode-se escolher uma probabilidade da curva não ser excedida. Esta probabilidade depende da aplicação da curva, podendo requerer maior ou menor segurança na aplicação.

A utilização de distribuições amostrais na obtenção das curvas de carga, tanto *distribuição normal* quanto *distribuição de “Student” t* forneceram resultados muito próximos. Estas distribuições amostrais fornecem resultados diferentes somente para amostras pequenas.

As perdas envolvidas no sistema (perdas nas linhas e perdas nos transformadores), apesar de influenciarem pouco na estimativa das curvas individuais,

devem ser consideradas, pois o objetivo é obter curvas estimadas mais próximas possíveis das curvas reais.

A utilização de um alimentador pequeno no início do desenvolvimento da metodologia foi de extrema importância, pois possibilita uma melhor compreensão dos resultados. Outra importância deste pequeno alimentador foi a obtenção das curvas reais dos transformadores para a verificação dos resultados. Já a utilização de um alimentador real maior foi essencial para a verificação dos resultados da metodologia proposta, visando oferecer uma ferramenta de planejamento de sistemas eficaz para as concessionárias de energia.

Vale lembrar que as concessionárias de energia elétrica estão melhorando cada vez mais sua base de dados das redes e dos consumidores. Graças a esses dados estão sendo desenvolvidas melhores ferramentas de análise para os sistemas, melhorando a qualidade da energia fornecida.

Sugestões para Trabalhos Futuros

A possibilidade de utilizar inteligência artificial na estimativa de curvas de carga está sendo muito utilizada por pesquisadores da área de sistemas de energia elétrica. Muitos são os artigos publicados nos últimos anos, com destaque para a utilização de redes neurais artificiais (*Neural Networks*) e lógica nebulosa (*Fuzzy Logic*).

Capítulo 6

Referências Bibliográficas

- [1] T. Gonen, *Electric Power Distribution System Engineering*. McGraw-Hill, USA, 1986.
- [2] W. H. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis*. CRC Press, USA, 2002.
- [3] R. Ciric, A. Padilha-Feltrin, and L. F. Ochoa, *Power Flow in Four-Wire Distribution Networks-General Approach*. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 18, no. 4, pp. 1283-1290, 2003.
- [4] R. Ciric, A. Padilha-Feltrin, I. F. E. D. Denis and L. F. Ochoa, *Integration of the Dispersed Generators in the Distribution Management System*. In Proceedings of the IEEE Bologna Power Tech Conference, Bologna, Italy. Paper n. 61, 2003.
- [5] I. F. E. D. Denis, *Métodos de Alocação de Perdas em Sistemas de Distribuição com Geradores Distribuídos*. Tese de Doutorado. UNESP - Ilha Solteira, 2003.
- [6] ANEEL. Resolução 505. Agência Nacional de Energia Elétrica. <http://www.aneel.gov.br> (disponível em maio de 2005).
- [7] D. Gerbec, S. Gasperic, I. Smon, F. Gubina, *Allocation of the Load Profiles to Consumers Using Probabilistic Neural Network*. IEEE Transactions on Power Systems, v. 20 no. 2, 2005.
- [8] E. Lakervi, E. J. Holmes, *Electricity Distribution Network Design*. Peter Peregrinus Ltd., England, 1989.

- [9] ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo I. <http://www.aneel.gov.br> (disponível em janeiro de 2006).
- [10] MCT. Tecnologias Disponíveis. Ministério da Ciência e Tecnologia. <http://www.mct.gov.br> (disponível em outubro de 2005).
- [11] MME. Estudo de Campanhas de Eficiência Energética. Ministério de Minas e Energia. <http://www.mme.gov.br> (disponível em outubro de 2005).
- [12] J. A. Jardini, C. M. V. Tahan, S. U. Ahn and S. L. S. Cabral, *Determination of the Typical Daily Load Curve for Residential Area Based on Field Measurements*. In IEEE Proceedings Supplements, T&D, Chicago, 1994.
- [13] J. A. Jardini, S. U. Ahn, C. M. V. Tahan and F. M. Figueiredo, *Residential and Commercial Daily Load Curve Representation by Statistical Function for Engineering Studies Purposes*. In CIRED International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Brussels, Belgium, 1995.
- [14] J. A. Jardini, C. M. V. Tahan, M. R. Gouvêa, S. U. Ahn and F. M. Figueiredo, *Daily Load Profiles for Residential, Commercial and Industrial Low Voltage Consumers*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol 15 no. 1, 2000.
- [15] A. Andersson, A. Jansson and J. Klevas, *Model for Load Simulations by Means of Load Pattern Curves*. In CIRED International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Brighton, UK, 1989.
- [16] C. S. Chen, M. Y. Cho and Y. W. Chen, *Development of Simplified Loss Models for Distribution Analysis*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol 9 no. 3, 1994.
- [17] D. M. Falcão and H. O. Henriques, *Load Estimation in Radial Distribution Systems Using Neural Networks and Fuzzy Set Techniques*. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, vol 2, 2001.
- [18] D. Srinivasan, A. C. Liew, C. S. Chang, *Forecasting Daily Load Curves Using a Hybrid Fuzzy-neural Approach*. Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings – Vol. 141, Issue 6, Nov. 1994.

- [19] T. Senjyu, S. Higa, K. Uezato, *Future load curve shaping based on similarity using fuzzy logic approach*. Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings- Vol. 145, Issue 4, July 1998.
- [20] R.-F. Chang, R.-C. Leou and C.-N. Lu, *Distribution Transformer Load Modeling Using Load Research Data*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol 17 no. 2, 2002.
- [21] D. Gerbec, S. Gasperic, I. Smon and F. Gubina, *Consumers' Load Profiles Determination Based on Different Classification Methods*. IEEE Power Engineering Society General Meeting, vol 2 13-17, 2003.
- [22] T. Senjyu, P. Mandal, K. Uezato and T. Funabashi, *Next Day Load Curve Forecasting Using Hybrid Correction Method*. IEEE Transactions on Power Systems, v. 20 no. 1, 2005.
- [23] M. R. Spiegel, *Estatística*. Editora McGraw-Hill do Brasil LTDA. São Paulo, 1976.
- [24] O. I. Elgerd, *Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica*. Editora McGraw-Hill do Brasil LTDA. São Paulo, 1976.
- [25] A. Martignoni, *Transformadores*. 8ª Edição. Editora Globo, São Paulo, 1991.
- [26] L. F. Ochoa, *Cálculo de Fluxo de Potência em Redes de Distribuição com Modelagem a Quatro Fios*. Dissertação de Mestrado. UNESP - Ilha Solteira, 2003.
- [27] ELETROBRÁS, *Planejamento de Sistemas de Distribuição*. Volume 1. Editora Campus, Rio de Janeiro, 1982.
- [28] A. Monticelli, *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*. Editora Edgard Blücher LTDA. São Paulo, 1983.

Apêndice A

Distribuições Amostrais

Tabela A.1: *Distribuição normal (de Gauss) de valores.*

z_c	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,0000	0,0040	0,0080	0,0120	0,0160	0,0199	0,0239	0,0279	0,0319	0,0359
0,1	0,0398	0,0438	0,0478	0,0517	0,0557	0,0596	0,0636	0,0675	0,0714	0,0753
0,2	0,0793	0,0832	0,0871	0,0910	0,0948	0,0987	0,1026	0,1064	0,1103	0,1141
0,3	0,1179	0,1217	0,1255	0,1293	0,1331	0,1368	0,1406	0,1443	0,1480	0,1517
0,4	0,1554	0,1591	0,1628	0,1664	0,1700	0,1736	0,1772	0,1808	0,1844	0,1879
0,5	0,1915	0,1950	0,1985	0,2019	0,2054	0,2088	0,2123	0,2157	0,2190	0,2224
0,6	0,2257	0,2291	0,2324	0,2357	0,2389	0,2422	0,2454	0,2486	0,2517	0,2549
0,7	0,2580	0,2611	0,2642	0,2673	0,2704	0,2734	0,2764	0,2794	0,2823	0,2852
0,8	0,2881	0,2910	0,2939	0,2967	0,2995	0,3023	0,3051	0,3078	0,3106	0,3133
0,9	0,3159	0,3186	0,3212	0,3238	0,3264	0,3289	0,3315	0,3340	0,3365	0,3389
1,0	0,3413	0,3438	0,3461	0,3485	0,3508	0,3531	0,3554	0,3577	0,3599	0,3621
1,1	0,3643	0,3665	0,3686	0,3708	0,3729	0,3749	0,3770	0,3790	0,3810	0,3830
1,2	0,3849	0,3869	0,3888	0,3907	0,3925	0,3944	0,3962	0,3980	0,3997	0,4015
1,3	0,4032	0,4049	0,4066	0,4082	0,4099	0,4115	0,4131	0,4147	0,4162	0,4177
1,4	0,4192	0,4207	0,4222	0,4236	0,4251	0,4265	0,4279	0,4292	0,4306	0,4319
1,5	0,4332	0,4345	0,4357	0,4370	0,4382	0,4394	0,4406	0,4418	0,4429	0,4441
1,6	0,4452	0,4463	0,4474	0,4484	0,4495	0,4505	0,4515	0,4525	0,4535	0,4545
1,7	0,4554	0,4564	0,4573	0,4582	0,4591	0,4599	0,4608	0,4616	0,4625	0,4633
1,8	0,4641	0,4649	0,4656	0,4664	0,4671	0,4678	0,4686	0,4693	0,4699	0,4706
1,9	0,4713	0,4719	0,4726	0,4732	0,4738	0,4744	0,4750	0,4756	0,4761	0,4767
2,0	0,4772	0,4778	0,4783	0,4788	0,4793	0,4798	0,4803	0,4808	0,4812	0,4817
2,1	0,4821	0,4826	0,4830	0,4834	0,4838	0,4842	0,4846	0,4850	0,4854	0,4857
2,2	0,4861	0,4864	0,4868	0,4871	0,4875	0,4878	0,4881	0,4884	0,4887	0,4890
2,3	0,4893	0,4896	0,4898	0,4901	0,4904	0,4906	0,4909	0,4911	0,4913	0,4916
2,4	0,4918	0,4920	0,4922	0,4925	0,4927	0,4929	0,4931	0,4932	0,4934	0,4936
2,5	0,4938	0,4940	0,4941	0,4943	0,4945	0,4946	0,4948	0,4949	0,4951	0,4952
2,6	0,4953	0,4955	0,4956	0,4957	0,4959	0,4960	0,4961	0,4962	0,4963	0,4964
2,7	0,4965	0,4966	0,4967	0,4968	0,4969	0,4970	0,4971	0,4972	0,4973	0,4974
2,8	0,4974	0,4975	0,4976	0,4977	0,4977	0,4978	0,4979	0,4979	0,4980	0,4981
2,9	0,4981	0,4982	0,4982	0,4983	0,4984	0,4984	0,4985	0,4985	0,4986	0,4986
3,0	0,4987	0,4987	0,4987	0,4988	0,4988	0,4989	0,4989	0,4989	0,4990	0,4990
3,10 ou +	0,4999									

Tabela A.2: Distribuição de “Student” t de valores.

\	25%	10%	5%	2,5%	1%	0,5%	\	25%	10%	5%	2,5%	1%	0,5%
1	1,0000	3,0777	6,3138	12,7062	31,8207	63,6574	46	0,6799	1,3002	1,6787	2,0129	2,4102	2,6870
2	0,8165	1,8856	2,9200	4,3027	6,9646	9,9248	47	0,6797	1,2998	1,6779	2,0117	2,4083	2,6846
3	0,7649	1,6377	2,3534	3,1824	4,5407	5,8409	48	0,6796	1,2994	1,6772	2,0106	2,4066	2,6822
4	0,7407	1,5332	2,1318	2,7764	3,7469	4,6041	49	0,6795	1,2991	1,6766	2,0096	2,4049	2,6800
5	0,7267	1,4759	2,0150	2,5706	3,3649	4,0322	50	0,6794	1,2987	1,6759	2,0086	2,4033	2,6778
6	0,7176	1,4398	1,9432	2,4469	3,1427	3,7074	51	0,6793	1,2984	1,6753	2,0076	2,4017	2,6757
7	0,7111	1,4149	1,8946	2,3646	2,9980	3,4995	52	0,6792	1,2980	1,6747	2,0066	2,4002	2,6737
8	0,7064	1,3968	1,8595	2,3060	2,8965	3,3554	53	0,6791	1,2977	1,6741	2,0057	2,3988	2,6718
9	0,7027	1,3830	1,8331	2,2622	2,8214	3,2498	54	0,6791	1,2974	1,6736	2,0049	2,3974	2,6700
10	0,6998	1,3722	1,8125	2,2281	2,7638	3,1693	55	0,6790	1,2971	1,6730	2,0040	2,3961	2,6682
11	0,6974	1,3634	1,7959	2,2010	2,7181	3,1058	56	0,6789	1,2969	1,6725	2,0032	2,3948	2,6665
12	0,6955	1,3562	1,7823	2,1788	2,6810	3,0545	57	0,6788	1,2966	1,6720	2,0025	2,3936	2,6649
13	0,6938	1,3502	1,7709	2,1604	2,6503	3,0123	58	0,6787	1,2963	1,6716	2,0017	2,3924	2,6633
14	0,6924	1,3450	1,7613	2,1448	2,6245	2,9768	59	0,6787	1,2961	1,6711	2,0010	2,3912	2,6618
15	0,6912	1,3406	1,7531	2,1315	2,6025	2,9467	60	0,6786	1,2958	1,6706	2,0003	2,3901	2,6603
16	0,6901	1,3368	1,7459	2,1199	2,5835	2,9208	61	0,6785	1,2956	1,6702	1,9996	2,3890	2,6589
17	0,6892	1,3334	1,7396	2,1098	2,5669	2,8982	62	0,6785	1,2954	1,6698	1,9990	2,3880	2,6575
18	0,6884	1,3304	1,7341	2,1009	2,5524	2,8784	63	0,6784	1,2951	1,6694	1,9983	2,3870	2,6561
19	0,6876	1,3277	1,7291	2,0930	2,5395	2,8609	64	0,6783	1,2949	1,6690	1,9977	2,3860	2,6549
20	0,6870	1,3253	1,7247	2,0860	2,5280	2,8453	65	0,6783	1,2947	1,6686	1,9971	2,3851	2,6536
21	0,6864	1,3232	1,7207	2,0796	2,5177	2,8314	66	0,6782	1,2945	1,6683	1,9966	2,3842	2,6524
22	0,6858	1,3212	1,7171	2,0739	2,5083	2,8188	67	0,6782	1,2943	1,6679	1,9960	2,3833	2,6512
23	0,6853	1,3195	1,7139	2,0687	2,4999	2,8073	68	0,6781	1,2941	1,6676	1,9955	2,3824	2,6501
24	0,6848	1,3178	1,7109	2,0639	2,4922	2,7969	69	0,6781	1,2939	1,6672	1,9949	2,3816	2,6490
25	0,6844	1,3163	1,7081	2,0595	2,4851	2,7874	70	0,6780	1,2938	1,6669	1,9944	2,3808	2,6479
26	0,6840	1,3150	1,7056	2,0555	2,4786	2,7787	71	0,6780	1,2936	1,6666	1,9939	2,3800	2,6469
27	0,6837	1,3137	1,7033	2,0518	2,4727	2,7707	72	0,6779	1,2934	1,6663	1,9935	2,3793	2,6459
28	0,6834	1,3125	1,7011	2,0484	2,4671	2,7633	73	0,6779	1,2933	1,6660	1,9930	2,3785	2,6449
29	0,6830	1,3114	1,6991	2,0452	2,4620	2,7564	74	0,6778	1,2931	1,6657	1,9925	2,3778	2,6439
30	0,6828	1,3104	1,6973	2,0423	2,4573	2,7500	75	0,6778	1,2929	1,6654	1,9921	2,3771	2,6430
31	0,6825	1,3095	1,6955	2,0395	2,4528	2,7440	76	0,6777	1,2928	1,6652	1,9917	2,3764	2,6421
32	0,6822	1,3086	1,6939	2,0369	2,4487	2,7385	77	0,6777	1,2926	1,6649	1,9913	2,3758	2,6412
33	0,6820	1,3077	1,6924	2,0345	2,4448	2,7333	78	0,6776	1,2925	1,6646	1,9908	2,3751	2,6403
34	0,6818	1,3070	1,6909	2,0322	2,4411	2,7284	79	0,6776	1,2924	1,6644	1,9905	2,3745	2,6395
35	0,6816	1,3062	1,6896	2,0301	2,4377	2,7238	80	0,6776	1,2922	1,6641	1,9901	2,3739	2,6387
36	0,6814	1,3055	1,6883	2,0281	2,4345	2,7195	81	0,6775	1,2921	1,6639	1,9897	2,3733	2,6379
37	0,6812	1,3049	1,6871	2,0262	2,4314	2,7154	82	0,6775	1,2920	1,6636	1,9893	2,3727	2,6371
38	0,6810	1,3042	1,6860	2,0244	2,4286	2,7116	83	0,6775	1,2918	1,6634	1,9890	2,3721	2,6364
39	0,6808	1,3036	1,6849	2,0227	2,4258	2,7079	84	0,6774	1,2917	1,6632	1,9886	2,3716	2,6356
40	0,6807	1,3031	1,6839	2,0211	2,4233	2,7045	85	0,6774	1,2916	1,6630	1,9883	2,3710	2,6349
41	0,6805	1,3025	1,6829	2,0195	2,4208	2,7012	86	0,6774	1,2915	1,6628	1,9879	2,3705	2,6342
42	0,6804	1,3020	1,6820	2,0181	2,4185	2,6981	87	0,6773	1,2914	1,6626	1,9876	2,3700	2,6335
43	0,6802	1,3016	1,6811	2,0167	2,4163	2,6951	88	0,6773	1,2912	1,6624	1,9873	2,3695	2,6329
44	0,6801	1,3011	1,6802	2,0154	2,4141	2,6923	89	0,6773	1,2911	1,6622	1,9870	2,3690	2,6322
45	0,6800	1,3006	1,6794	2,0141	2,4121	2,6896	90	0,6772	1,2910	1,6620	1,9867	2,3685	2,6316
							100	0,677	1,290	1,660	1,984	2,364	2,626
							120	0,677	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617
							∞	0,674	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576

Apêndice B

Tratamento Estatístico das Curvas de Carga

Os consumidores residenciais foram classificados de acordo com o consumo mensal de energia (kWh/mês), sendo as classes: 0-100, 101-200, 201-300, 301-500 e acima de 500 kWh/ mês. Na figura B.1 são mostradas as curvas de carga de 7 consumidores reais da classe 301 a 500 kWh/mês, obtidas através de medições em um dia útil, fornecidas pelas concessionárias de energia elétrica

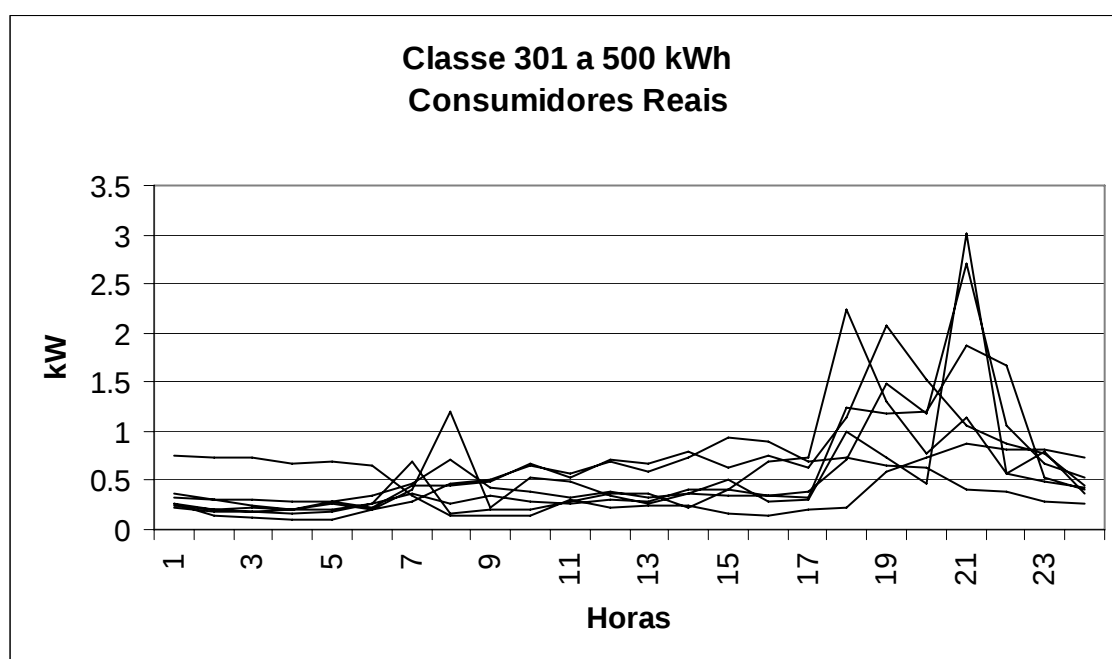


Figura B.1: Curvas de carga de consumidores reais.

A análise estatística é feita a cada hora do dia, obtendo-se duas curvas: a curva média e a curva de desvio padrão [10], [24], mostradas na figura B.2. Isto é feito para obtenção das curvas representativas de cada classe de consumo de energia.

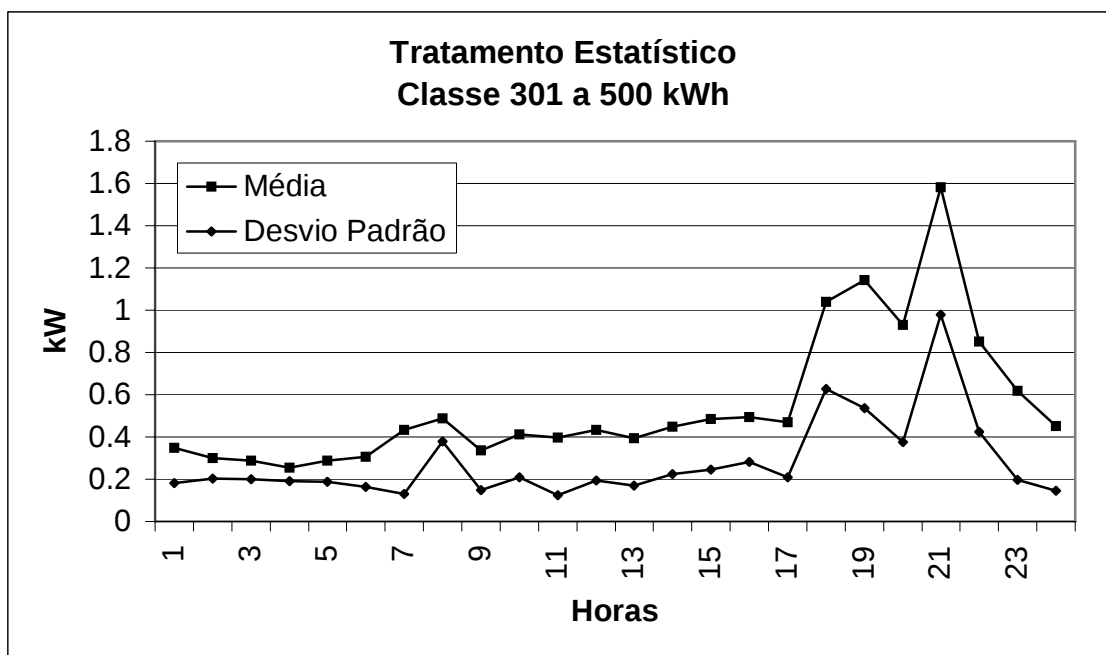


Figura B.2: Curvas média e de desvio padrão da classe de consumo.

Em seguida as curvas média e de desvio padrão devem ser transformadas em curvas em “p.u.”, utilizando a relação (3.3) [10], para ficarem todas na mesma base.

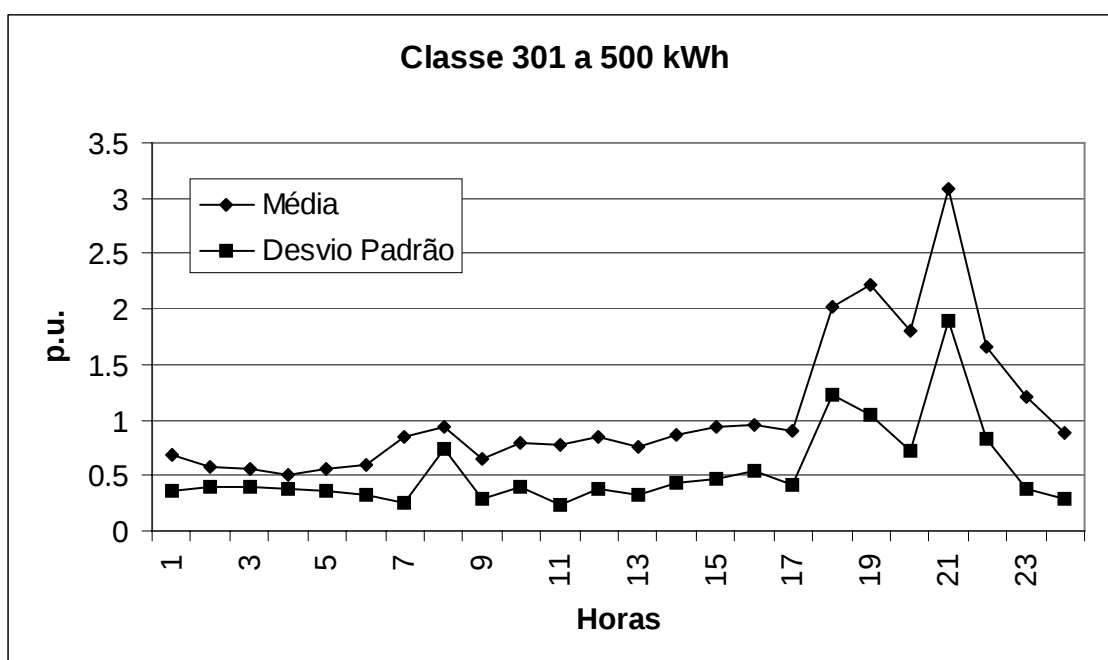


Figura B.3: Curvas representativas da classe de consumo em “p.u.”.

Este tratamento estatístico das curvas de carga é feito para todas as classes de consumo, sendo armazenados em um arquivo de dados para aplicação da metodologia proposta no capítulo 3. Cada classe possui um conjunto de curvas média e de desvio padrão para dias úteis, sábados e domingos. Estas curvas são denominadas curvas representativas ou características das classes, as quais são utilizadas na estimativa de carga dos consumidores individuais e dos transformadores de rede.

Na figura B.4 são apresentadas as estimativas de curva de carga para dias úteis de dois consumidores da classe 301 a 500 kWh/mês, um com 419 kWh/mês e outro com 323 kWh/mês.

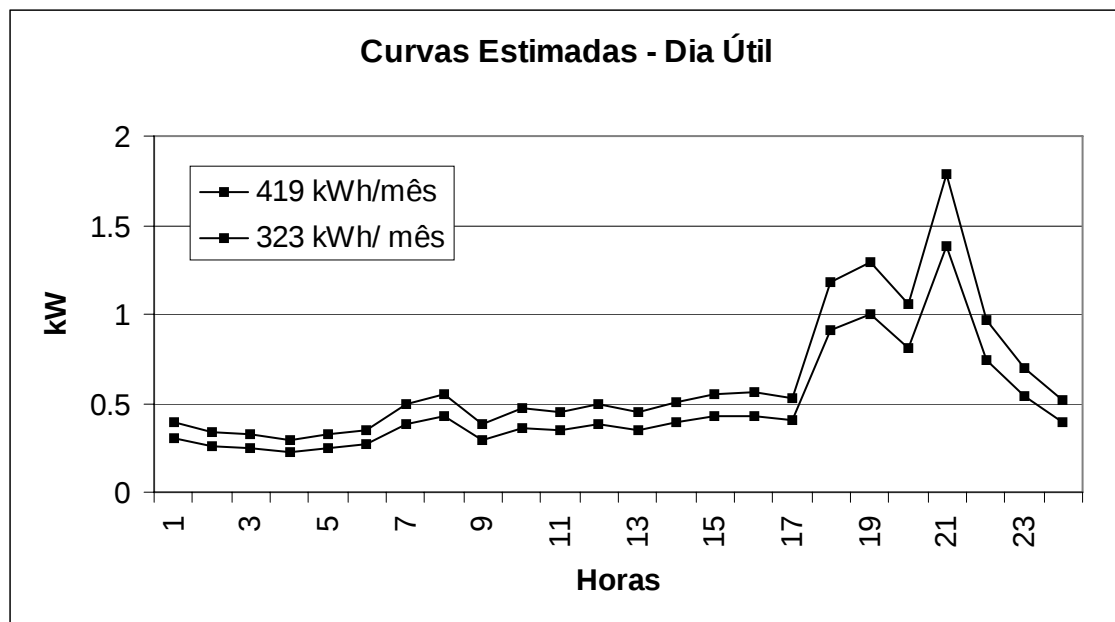


Figura B.4: Estimativa de curvas de carga da classe 301 a 500 kWh.

Apêndice C

Curvas de Carga De Consumidores Residenciais

As curvas representativas das classes de consumo para consumidores residenciais foram obtidas através de medições em dias úteis, sábados e domingos, fornecidas pelas concessionárias de energia, feitas em campanhas de revisão tarifária solicitadas pela ANEEL. Os consumidores residenciais foram classificados de acordo com o consumo mensal de energia (kWh/mês). Para cada classe de consumo foi obtida uma curva média e uma curva de desvio padrão. Estas curvas são denominadas curvas representativas das classes de consumo.

- Classe de consumo menor que 100 kWh/mês.

Para a classe de consumo abaixo de 100 kWh/mês a ANEEL solicitou medição em 15 consumidores. Na tabela C.1 são mostrados os valores de consumo mensal de energia de cada consumidor individual. Através das curvas individuais medidas foi possível calcular as curvas representativas da classe, mostradas nas figuras C.1 a C.3.

Tabela C.1: Consumidores da classe de consumo menor que 100 kWh/mês.

Consumidor	kWh/mês
1	87
2	75
3	37
4	44
5	94
6	90
7	51
8	66
9	93
10	83
11	91
12	100
13	72
14	49
15	29

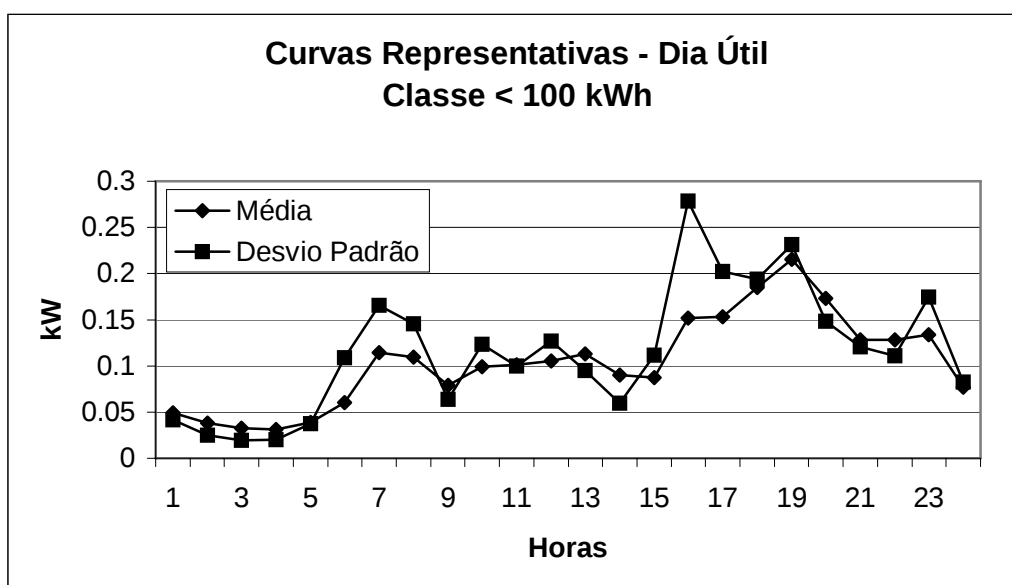


Figura C.1: Curvas representativas de dias úteis da classe menor que 100 kWh/mês.

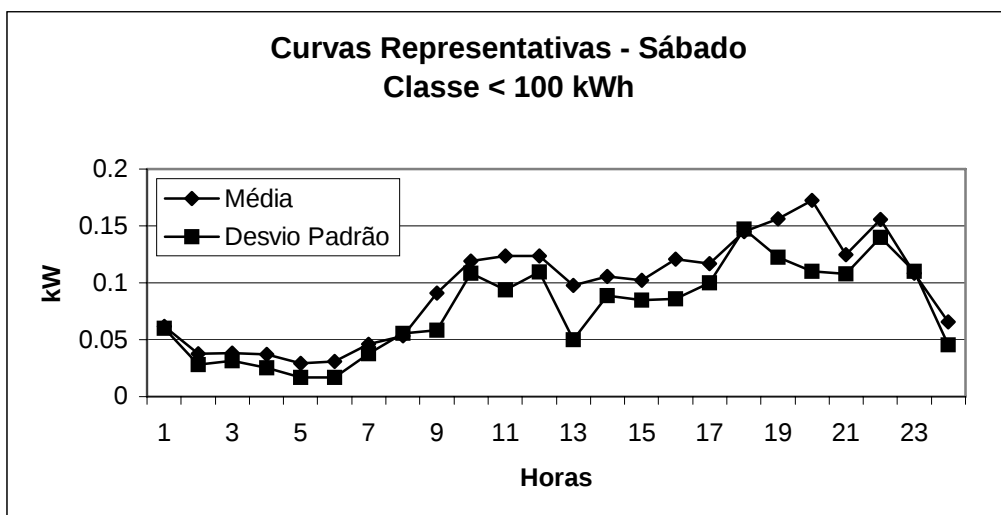


Figura C.2: Curvas representativas aos sábados da classe menor que 100 kWh/mês.

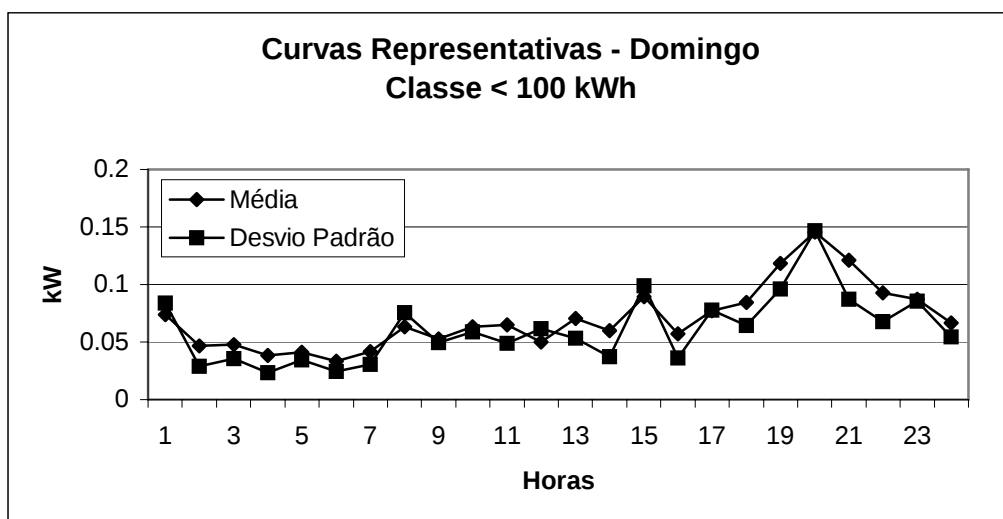


Figura C.3: Curvas representativas aos domingos da classe menor que 100 kWh/mês.

- Classe de consumo entre 101 e 200 kWh/mês.

Para a classe de consumo entre 101 e 200 kWh/mês a ANEEL solicitou medições em 13 consumidores. Na tabela C.2 são mostrados os valores de consumo mensal de energia de cada consumidor individual. Através das curvas individuais

medidas foi possível calcular as curvas representativas da classe, mostradas nas figuras C.4 a C.6.

Tabela C.2: Consumidores da classe de consumo entre 101 e 200 kWh/mês.

Consumidor	KWh/mês
1	148
2	174
3	132
4	186
5	91
6	129
7	107
8	143
9	195
10	142
11	141
12	128
13	15

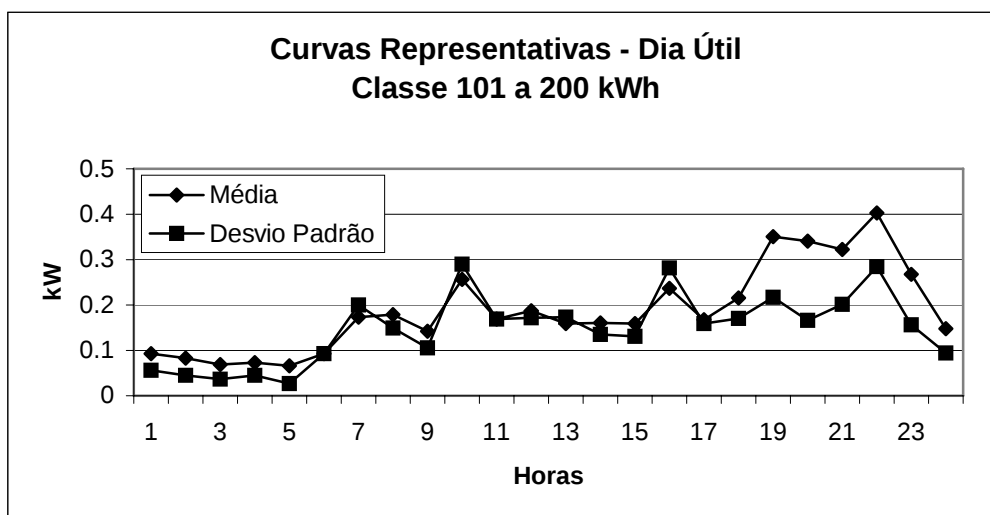


Figura C.4: Curvas representativas de dias úteis da classe 101 a 200 kWh/mês.

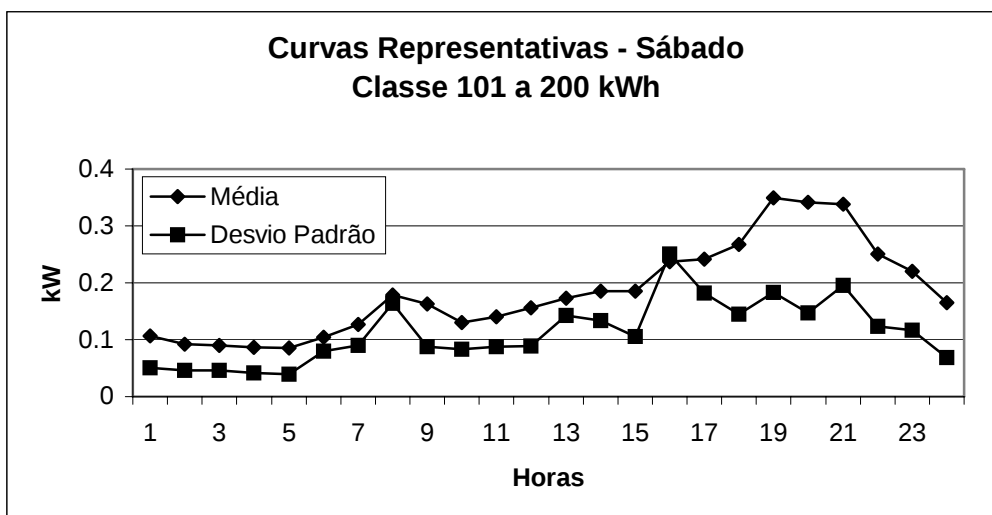


Figura C.5: Curvas representativas aos sábados da classe 101 a 200 kWh/mês.

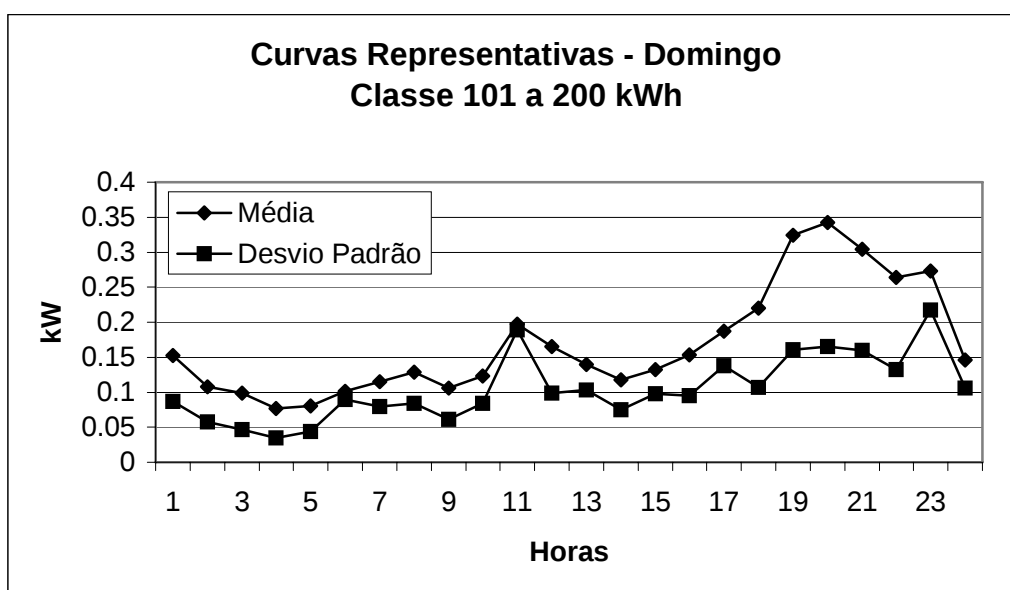


Figura C.6: Curvas representativas aos domingos da classe 101 a 200 kWh/mês.

- Classe de consumo entre 201 e 300 kWh/mês.

Para a classe de consumo entre 201 e 300 kWh/mês a ANEEL solicitou medições em 7 consumidores. Na tabela C.3 são mostrados os valores de consumo mensal de energia de cada consumidor individual. Através das curvas individuais

obtidas foi possível calcular as curvas representativas da classe, mostradas nas figuras C.7 a C.9.

Tabela C.3: Consumidores da classe de consumo entre 201 e 300 kWh/mês.

Consumidor	kWh/mês
1	152
2	251
3	282
4	249
5	214
6	229
7	251

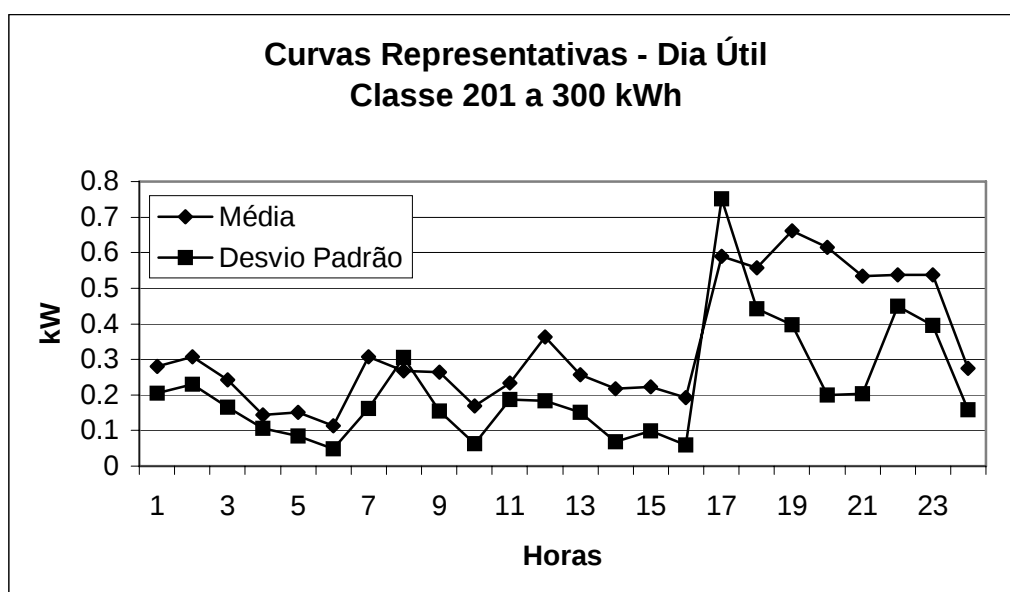


Figura C.7: Curvas representativas de dias úteis da classe 201 a 300 kWh/mês.

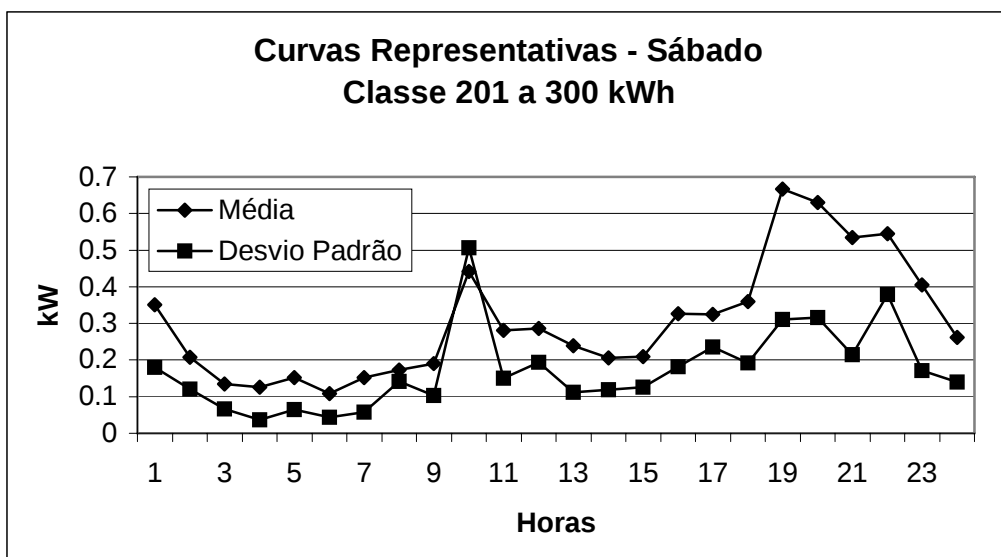


Figura C.8: Curvas representativas aos sábados da classe 201 a 300 kWh/mês.

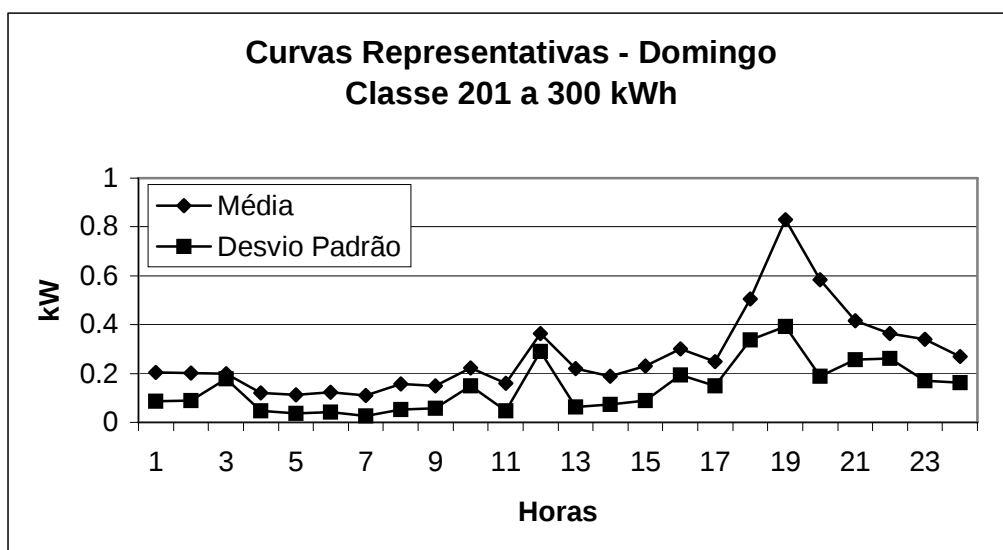


Figura C.9: Curvas representativas aos domingos da classe 201 a 300 kWh/mês.

- Classe de consumo entre 301 e 500 kWh/mês.

Para a classe de consumo entre 301 e 500 kWh/mês a ANEEL solicitou medições em 9 consumidores. Na tabela C.4 são mostrados os valores de consumo mensal de energia de cada consumidor individual. Através das curvas individuais

obtidas foi possível calcular as curvas representativas da classe, mostradas nas figuras C.10 a C.12.

Tabela C.4: Consumidores da classe de consumo entre 301 e 500 kWh/mês.

Consumidor	kWh/mês
1	329
2	339
3	469
4	386
5	373
6	372
7	461
8	390
9	315

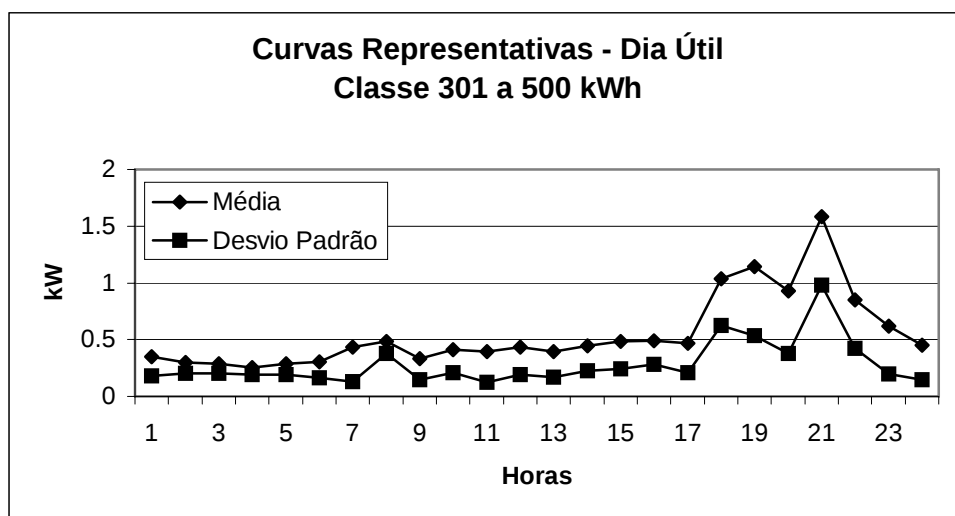


Figura C.10: Curvas representativas de dias úteis da classe 301 a 500 kWh/mês.

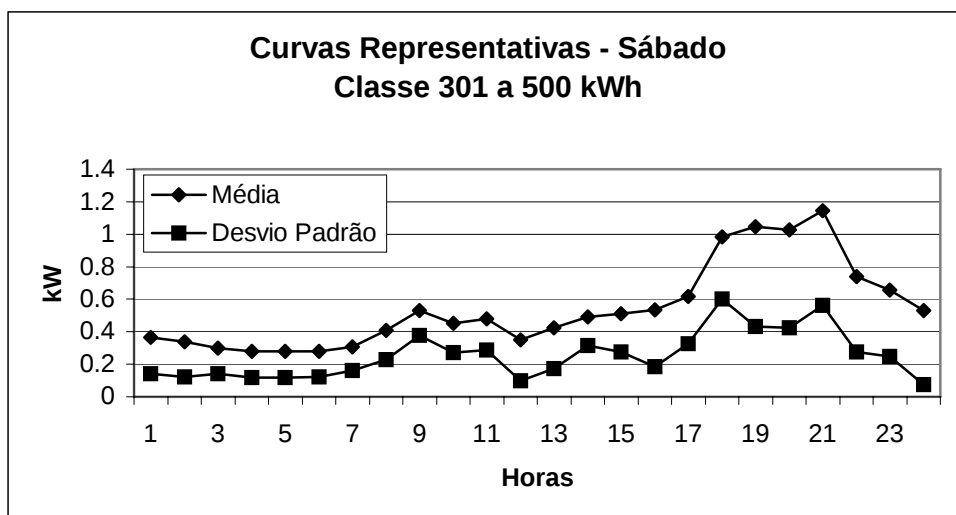


Figura C.11: Curvas representativas aos sábados da classe 301 a 500 kWh/mês.

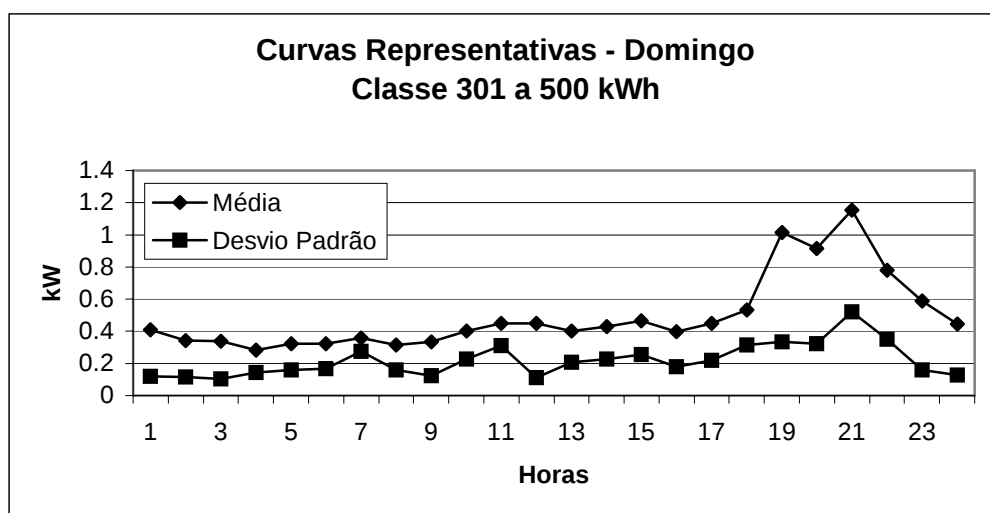


Figura C.12: Curvas representativas aos domingos da classe 301 a 500 kWh/mês.

- Classe de consumo acima de 500 kWh/mês.

Para a classe de consumo acima de 500 kWh/mês a ANEEL solicitou medições em 12 consumidores. Na tabela C.5 são mostrados os valores de consumo mensal de energia de cada consumidor individual. Através das curvas individuais obtidas foi possível calcular as curvas representativas da classe, mostradas nas figuras C.13 a C.15.

Tabela C.5: Consumidores da classe de consumo maior que 500 kWh/mês.

Consumidor	kWh mês
1	1002
2	1510
3	647
4	2040
5	775
6	563
7	883
8	630
9	1256
10	772
11	912
12	532

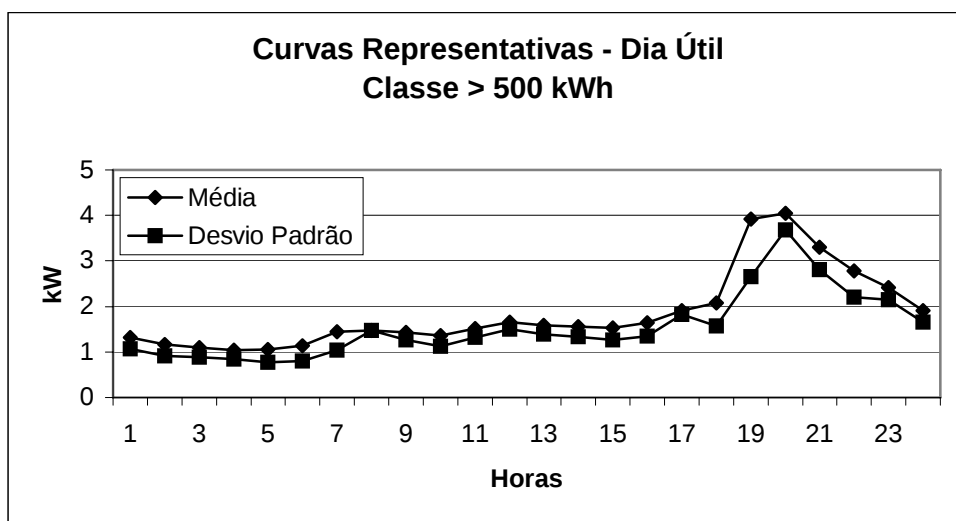


Figura C.13: Curvas representativas de dias úteis da classe maior que 500 kWh/mês.

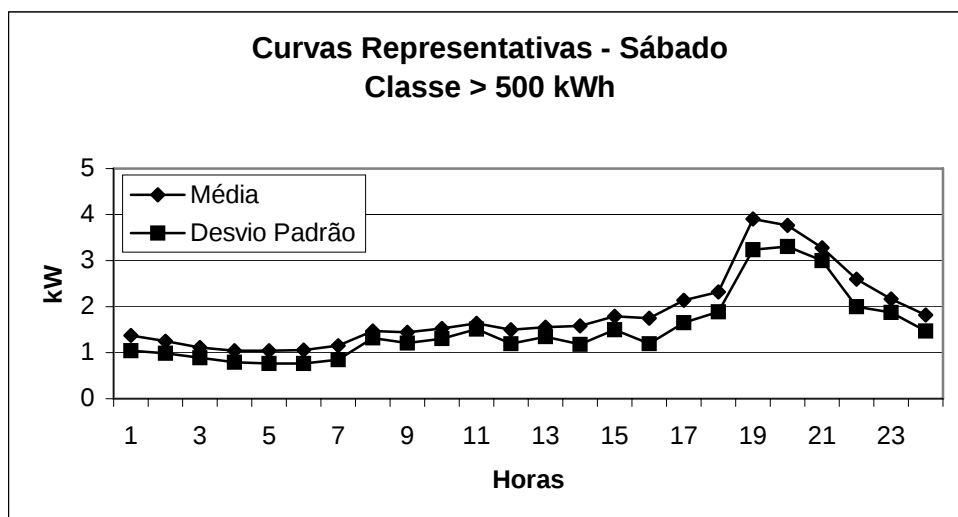


Figura C.14: Curvas representativas aos sábados da classe maior que 500 kWh/mês.

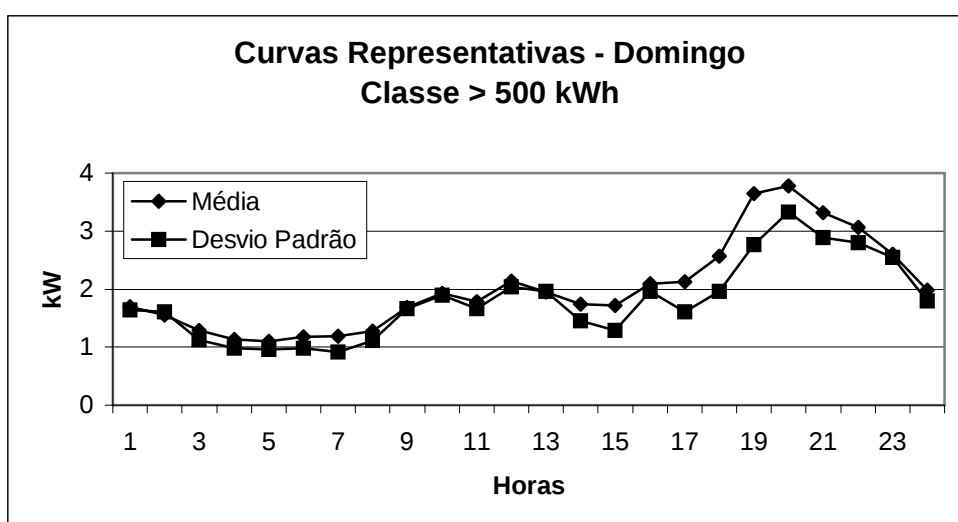


Figura C.15: Curvas representativas aos domingos da classe maior que 500 kWh/mês.

Apêndice D

Curvas de Carga De Consumidores Comerciais

As curvas representativas das classes de consumo para consumidores comerciais foram obtidas através de medições em dias úteis, sábados e domingos, fornecidas pelas concessionárias de energia, feitas em campanhas de revisão tarifária solicitadas pela ANEEL. Os consumidores comerciais foram classificados de acordo com o consumo mensal de energia (kWh/mês). Para cada classe de consumo foi obtida uma curva média e uma curva de desvio padrão. Estas curvas são denominadas curvas representativas das classes de consumo.

- Classe de consumo menor que 100 kWh/mês.

Para a classe de consumo abaixo de 100 kWh/mês a ANEEL solicitou medições em 11 consumidores. Na tabela D.1 são mostrados os valores de consumo mensal de energia de cada consumidor individual. Através das curvas individuais obtidas foi possível calcular as curvas representativas da classe, mostradas nas figuras D.1 a D.3.

Tabela D.1: Consumidores da classe de consumo menor que 100 kWh/mês.

Consumidor	kWh mês
1	19
2	41
3	24
4	16
5	65
6	80
7	13
8	69
9	85
10	46
11	29

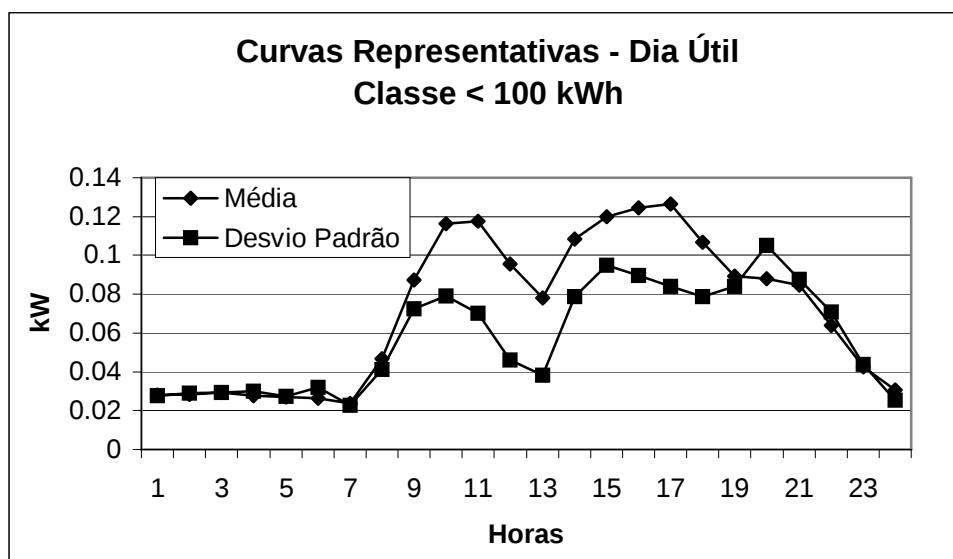


Figura D.1: Curvas representativas de dias úteis da classe menor que 100 kWh/mês.

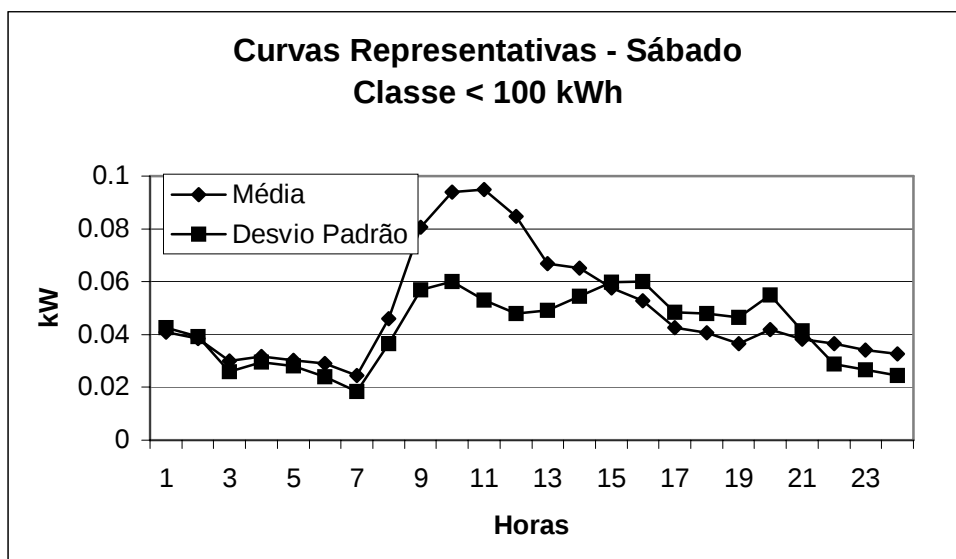


Figura D.2: Curvas representativas aos sábados da classe menor que 100 kWh/mês.

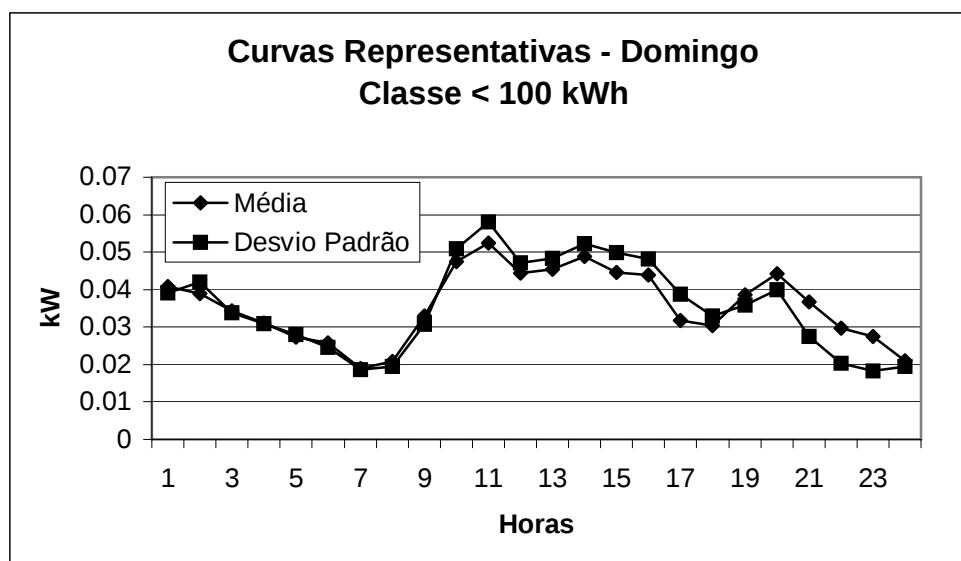


Figura D.3: Curvas representativas aos domingos da classe menor que 100 kWh/mês.

- Classe de consumo entre 101 e 200 kWh/mês.

Para a classe de consumo entre 101 e 200 kWh/mês a ANEEL solicitou medições em 18 consumidores. Na tabela D.2 são mostrados os valores de consumo mensal de energia de cada consumidor individual. Através das curvas individuais obtidas foi possível calcular as curvas representativas da classe, mostradas nas figuras D.4 a D.6.

Tabela D.2: Consumidores da classe de consumo entre 101 e 200 kWh/mês.

Consumidor	kWh mês
1	141
2	116
3	106
4	161
5	56
6	98
7	24
8	67
9	103
10	157
11	31
12	85
13	120
14	87
15	157
16	145
17	209
18	86

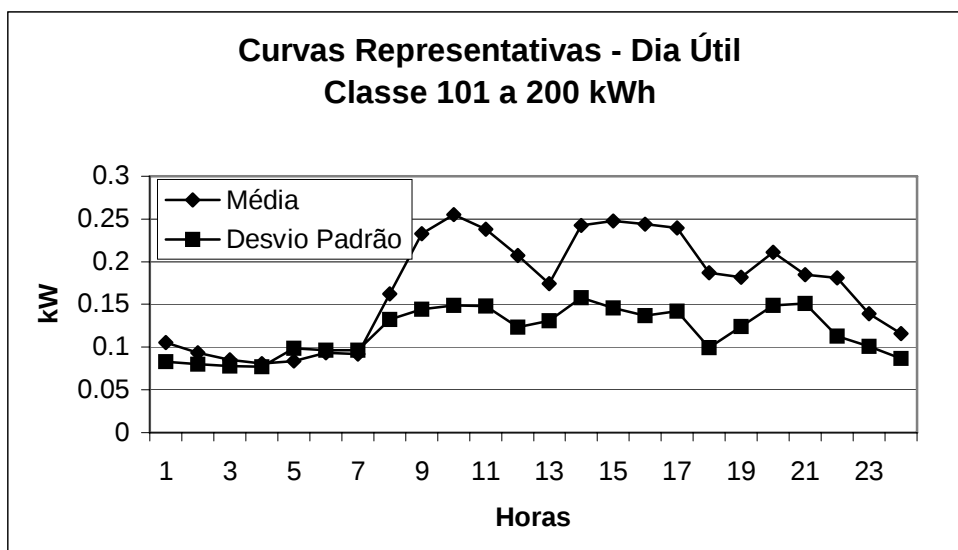


Figura D.4: Curvas representativas de dias úteis da classe 101 a 200 kWh/mês.

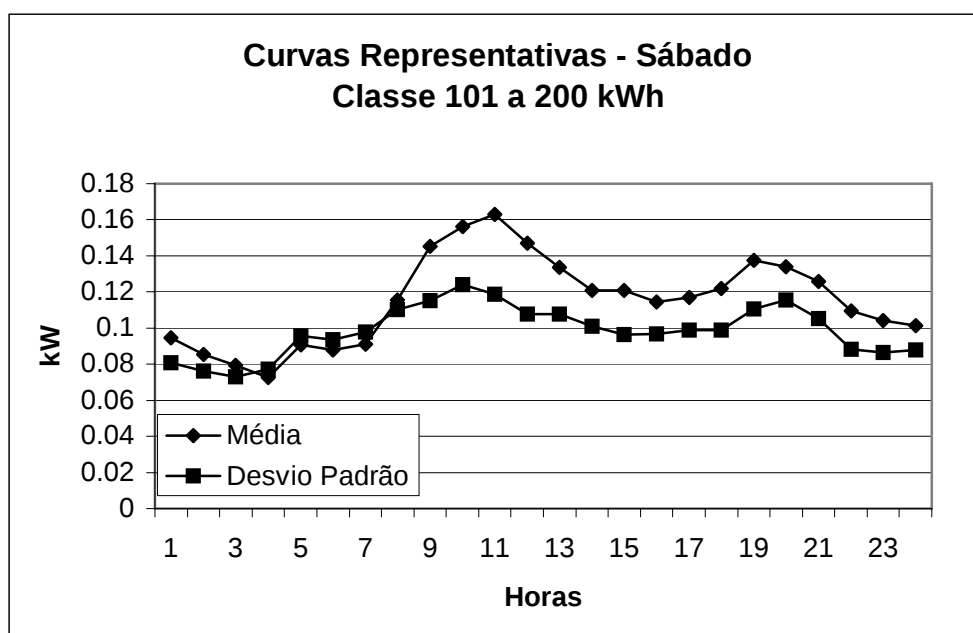


Figura D.5: Curvas representativas aos sábados da classe 101 a 200 kWh/mês.

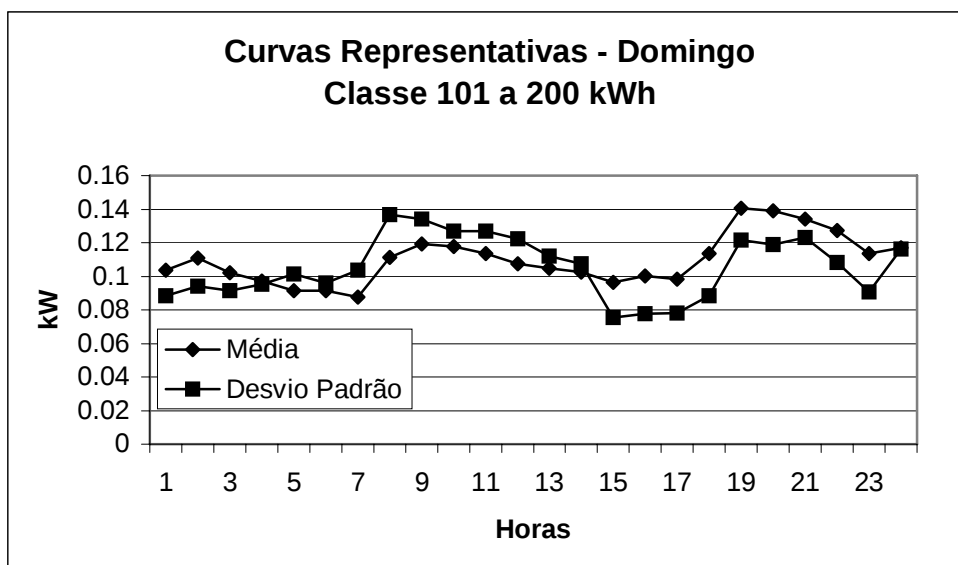


Figura D.6: Curvas representativas aos domingos da classe 101 a 200 kWh/mês.

- Classe de consumo entre 201 e 300 kWh/mês.

Para a classe de consumo entre 201 e 300 kWh/mês a ANEEL solicitou medições em 13 consumidores. Na tabela D.2 são mostrados os valores de consumo mensal de energia de cada consumidor individual. Através das curvas individuais obtidas foi possível calcular as curvas representativas da classe, mostradas nas figuras D.7 a D.9.

Tabela D.3: Consumidores da classe de consumo entre 201 e 300 kWh/mês.

Consumidor	kWh/mês
1	339
2	157
3	202
4	232
5	339
6	319
7	131
8	184
9	324
10	272
11	246
12	241
13	267

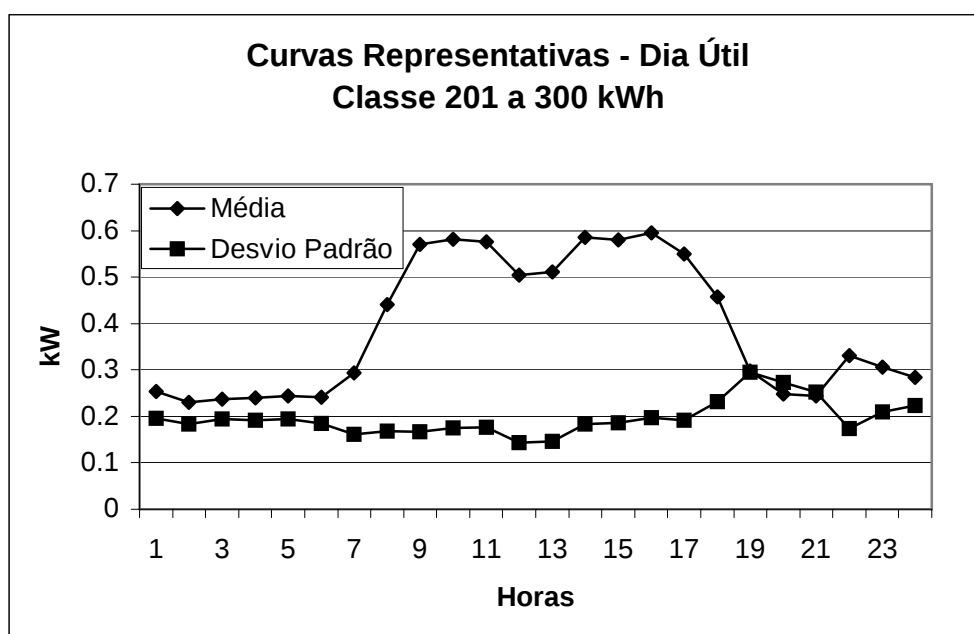


Figura D.7: Curvas representativas de dias úteis da classe 201 a 300 kWh/mês.

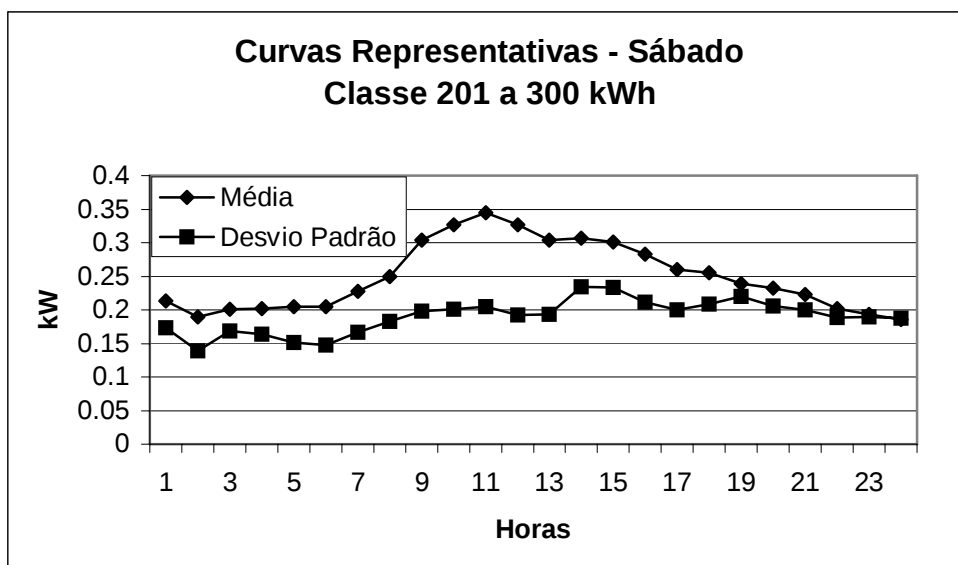


Figura D.8: Curvas representativas aos sábados da classe 201 a 300 kWh/mês.

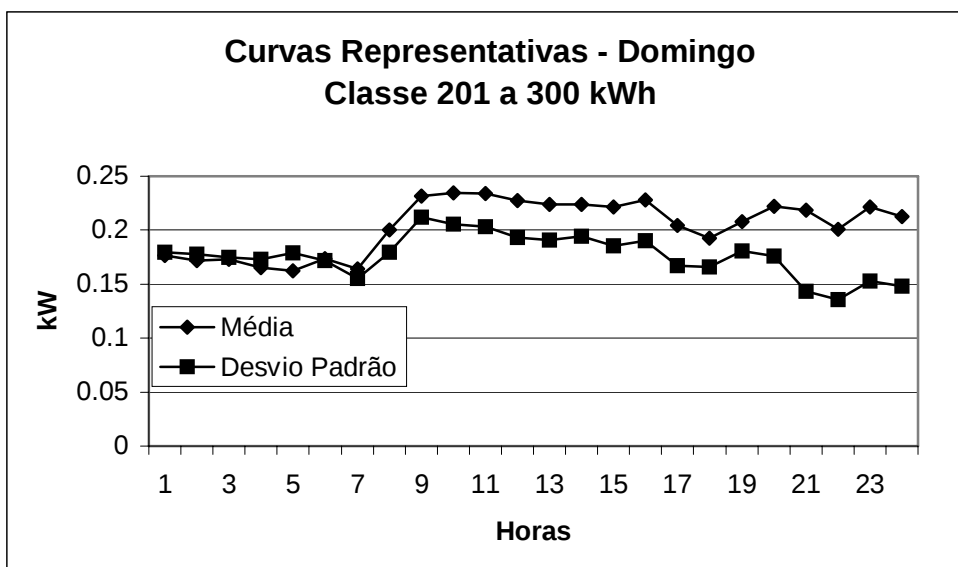


Figura D.9: Curvas representativas aos domingos da classe 201 a 300 kWh/mês.

- Classe de consumo entre 301 e 500 kWh/mês.

Para a classe de consumo entre 301 e 500 kWh/mês a ANEEL solicitou medições em 13 consumidores. Na tabela D.4 são mostrados os valores de consumo mensal de energia de cada consumidor individual. Através das curvas individuais obtidas foi possível calcular as curvas representativas da classe, mostradas nas figuras D.10 a D.12.

Tabela D.4: Consumidores da classe de consumo entre 301 e 500 kWh/mês.

Consumidor	kWh/mês
1	497
2	195
3	238
4	317
5	460
6	350
7	435
8	386
9	421
10	462
11	503
12	373
13	430

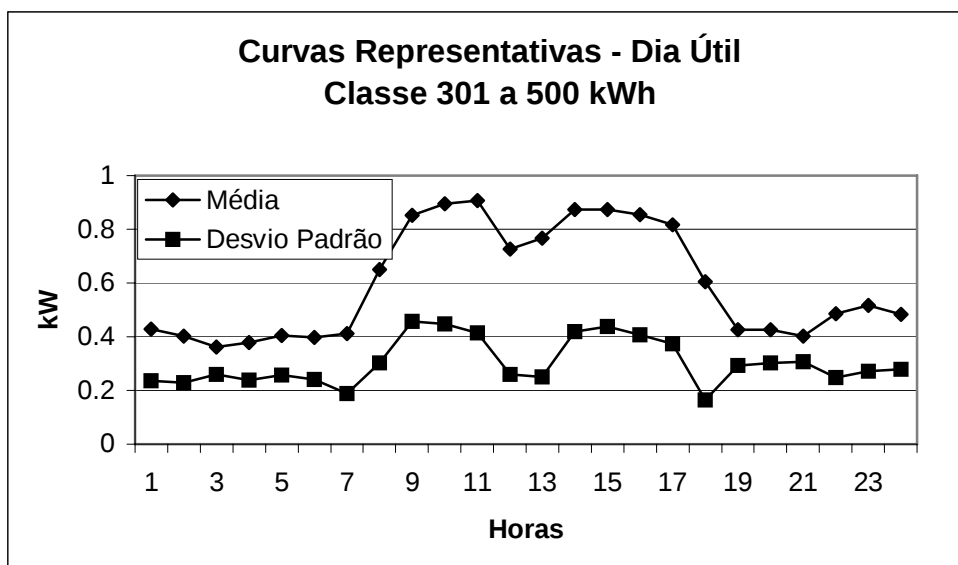


Figura D.10: Curvas representativas de dias úteis da classe 301 a 500 kWh/mês.

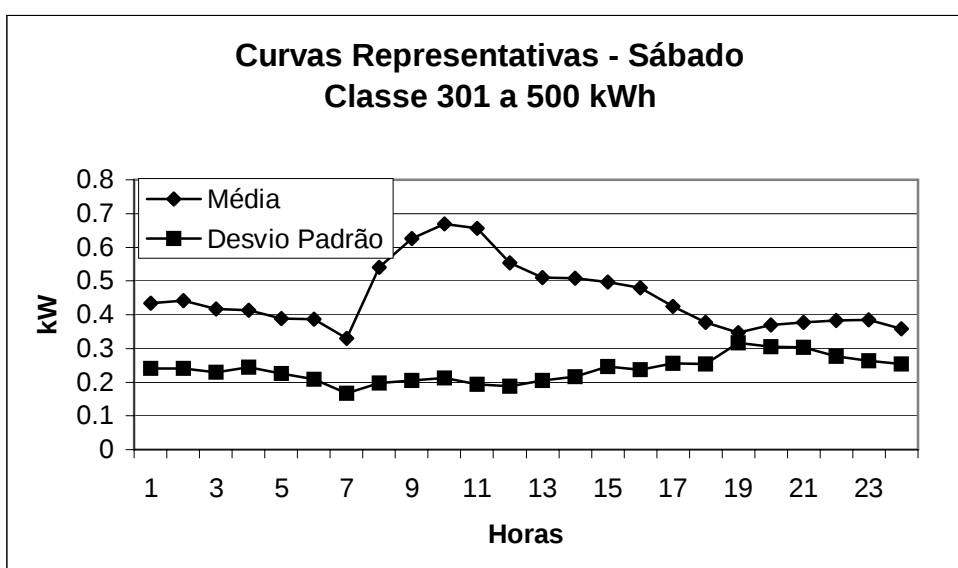


Figura D.11: Curvas representativas aos sábados da classe 301 a 500 kWh/mês.

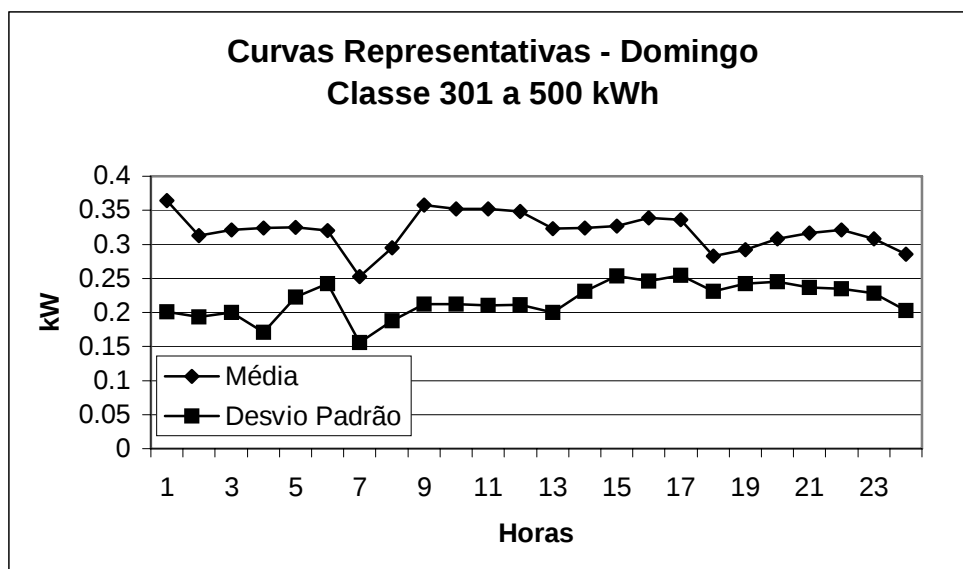


Figura D.12: Curvas representativas aos domingos da classe 301 a 500 kWh/mês.

- Classe de consumo maior que 500 kWh/mês.

Para a classe de consumo acima de 500 kWh/mês a ANEEL solicitou medições em 10 consumidores. Na tabela D.5 são mostrados os valores de consumo mensal de energia de cada consumidor individual. Através das curvas individuais obtidas foi possível calcular as curvas representativas da classe, mostradas nas figuras D.13 a D.15.

Tabela D.5: Consumidores da classe de consumo maior que 500 kWh/mês.

Consumidor	kWh/mês
1	786
2	566
3	1290
4	1057
5	649
6	679
7	4101
8	2669
9	1164
10	2645

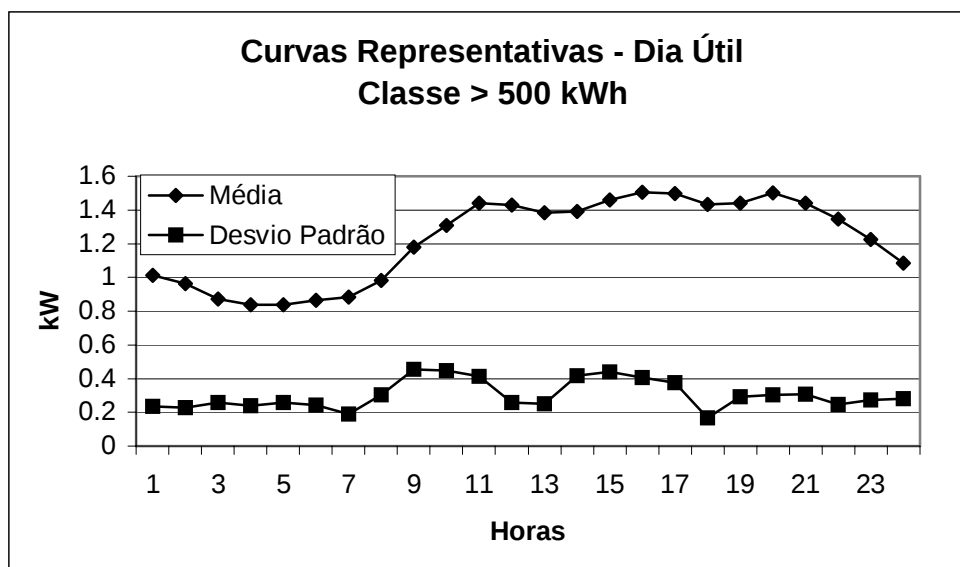


Figura D.13: Curvas representativas de dias úteis da classe maior que 500 kWh/mês.

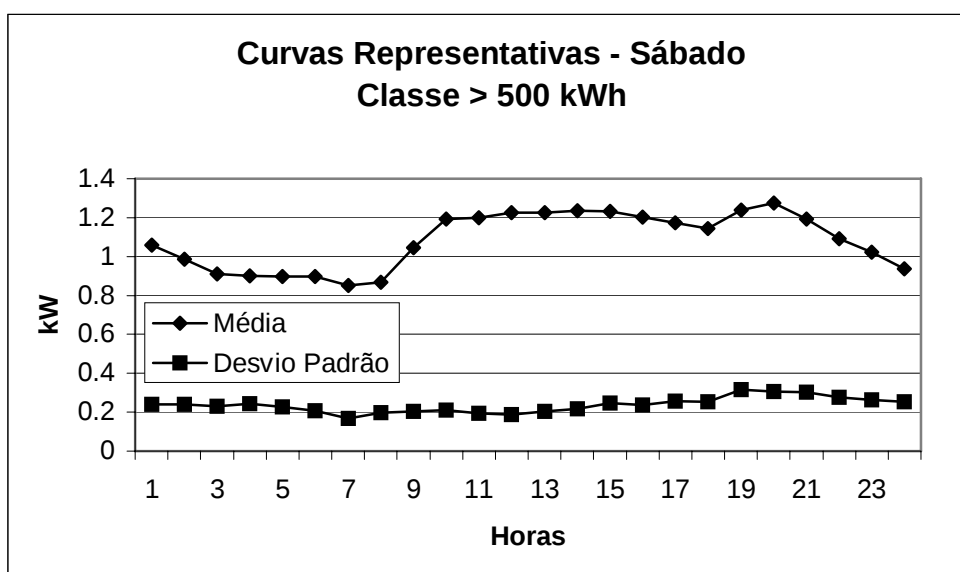


Figura D.14: Curvas representativas aos sábados da classe maior que 500 kWh/mês.

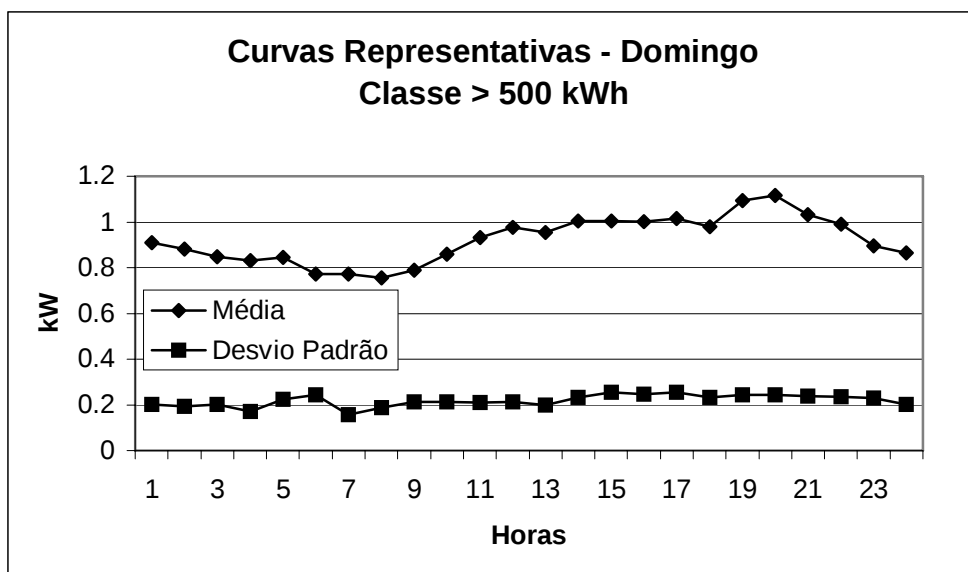


Figura D.15: Curvas representativas aos domingos da classe maior que 500 kWh/mês.