



**Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica**

Métodos de Previsão do Comportamento da Carga na Recomposição de Sistemas de Energia Elétrica

Autora: Lia Toledo Moreira Mota

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Morelato França

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. André Luiz Morelato França (Presidente)	DSEE/FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. Djalma Mosqueira Falcão	UFRJ
Prof. Dr. José Vicente Canto dos Santos	UNISINOS
Prof. Dr. Vivaldo Fernando da Costa	DSCE/FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. Takaaki Ohishi	DENSIS/FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. Carlos Alberto Favarin Murari	DSEE/FEEC/UNICAMP

Campinas (SP), 29 de Março de 2005

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

M856m Mota, Lia Toledo Moreira
Métodos de previsão do comportamento da carga na
recomposição de sistemas de energia elétrica. / Lia Toledo
Moreira Mota. --Campinas, SP: [s.n.], 2005.

Orientador: André Luiz Morelato França.
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas,
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Sistemas de energia elétrica. 2. Lógica Difusa. 3.
Programação orientada a objetos (Computação). I. França,
André Luiz Morelato. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação. III. Título.

Titulo em Inglês: Methods to forecast load behaviour during power systems
restoration

Palavras-chave em Inglês: Power system restoration, Fuzzy logic, Object-oriented
programming (computer science)

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Doutora em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Djalma Mosqueira Falcão, José Vicente Canto dos Santos,
Vivaldo Fernando da Costa, Takaaki Ohishi e Carlos Alberto Favarin
Murari

Data da defesa: 29/03/2005

Resumo

Neste trabalho, foram desenvolvidos dois métodos para prever o comportamento da carga durante a reenergização de redes elétricas pós-blecaute total ou parcial e instantes posteriores. O primeiro consiste em um Método Heurístico Top-Down, baseado em regras extraídas da experiência de especialistas e eventos anteriores, caracterizado por uma capacidade de representação aproximada do comportamento da carga e por um baixo esforço computacional requerido em sua utilização. Nessa metodologia, as incertezas associadas às variáveis e regras são modeladas usando-se lógica fuzzy. O segundo método consiste em um Método Caixa-Branca Bottom-Up que permite a representação do comportamento da carga agregada de forma mais precisa, partindo-se da modelagem individual dos vários tipos de equipamentos e dos principais fenômenos físicos envolvidos na reenergização dos mesmos. Nessa metodologia, os modelos implementados levam em conta as parcelas de consumo residencial, comercial e industrial, bem como a classificação dos equipamentos quanto a seu tipo de controle (controlados termostaticamente, fixos e controlados manualmente). Testes e simulações foram realizados, visando a verificação da adequação dos métodos desenvolvidos, bem como uma análise comparativa entre eles, destacando vantagens e desvantagens da aplicação de cada um.

Palavras-chave: Recomposição de Sistemas de Energia Elétrica, Previsão da Carga, Lógica Nebulosa, Orientação a Objetos.

Abstract

This work is focused on developing methods to forecast the load behavior during power systems restoration. Two methodologies were implemented. The first one is the Top-Down Heuristic Method, based on rules extracted from expert experiences and also on past events, that yields an approximate representation of the load behavior at a low computational effort. In this method, the uncertainties associated to the variables and rules are modeled using fuzzy logic. The second method is the Bottom-Up White-Box Method that allows a more adequate representation of the load behavior, by modelling both the functioning of individual equipments and the physical phenomena involved with the reenergization process. In this methodology, the implemented models take into account the residential, the commercial and the industrial consume parcels and the control type of each equipment (thermostatically controlled, fixed and manually controlled). Tests and simulations were carried out in order to verify the adequacy of the proposed methodologies and to compare the advantages and disadvantages of each one.

Keywords: Power System Restoration, Load Forecasting, Fuzzy Logic, Object-Oriented.

*Para Alexandre.
Para meus pais, Gilceli e Loir,
minha madrinha, Antônia,
e meu irmão, Murilo.*

Agradecimentos

Ao professor André Luiz Morelato França, pela valiosa orientação, pela transmissão de seus conhecimentos e pela inestimável amizade ao longo desses anos.

Ao professor Alcir Monticelli (*in memorian*), pelo incentivo no início deste trabalho e pela grande oportunidade de aprendizagem.

Aos professores do DSEE, Carlos Alberto F. Murari, Fujio Sato, Carlos Alberto de Castro Jr. e Ariovaldo Verândio Garcia pelos fundamentais ensinamentos desde a graduação.

Aos colegas do DSEE que auxiliaram na confecção deste trabalho.

Às secretárias Edna Servidone e Alaíde Ramos, sempre solícitas e competentes.

Ao Alexandre, meu marido, pela dedicação, compreensão, carinho e amor constantes e por ser meu companheiro de todas as horas, incentivando-me a progredir sempre e, muitas vezes, guiando-me durante essa jornada.

Aos meus pais, Loir e Gilceli, pelos modelos de integridade que sempre foram, por tudo o que me ensinaram, pelos valores que me passaram, pelo apoio irrestrito a todos os meus projetos e por abdicarem de muitos dos seus sonhos para que os meus pudessem ser realizados, demonstrando, assim, seu amor incondicional e indiscutível.

À minha querida madrinha, Antônia, e ao meu irmão e amigo Murilo pelo apoio irrestrito em todas as etapas de minha vida e por terem sempre acreditado e torcido por meu sucesso.

À toda família do meu marido, da qual tenho o privilégio de fazer parte, por me estimular continuamente durante o desenvolvimento deste trabalho e por ter me acolhido sempre com tanto carinho.

À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio financeiro.

Índice

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1. Motivação	2
1.2. Objetivo	3
1.3. Organização do Trabalho	3
Capítulo 2 – Comportamento da Carga na Recomposição de Sistemas de Energia Elétrica	5
2.1. A Recomposição de Sistemas de Energia Elétrica.....	5
2.2. O Processo de Recomposição no Brasil.....	9
2.3. A Recomposição de Cargas	10
2.4. O Comportamento da Carga na Recomposição	12
2.4.1. Cargas Controladas Termostaticamente.....	12
2.4.2. Cargas Controladas Manualmente	15
2.4.3. Cargas Fixas.....	16
Capítulo 3 – Modelagem da Carga na Recomposição de Sistemas de Energia Elétrica	23
3.1. A Importância da Modelagem da Carga na Recomposição	23
3.2. Modelos de Carga Convencionais	24
3.3. Modelos de Carga na Recomposição: Um Breve Histórico	27
3.4. Técnicas de Modelagem.....	28
3.4.1. Modelagem Matemática.....	29
3.4.1.1. Modelagem “Caixa Branca”	29
3.4.1.2. Modelagem “Caixa Preta”	29
3.4.2. Modelagem Heurística	30
3.5. Abordagens para Modelagem da Carga	31
3.5.1. Abordagem “Top-down”	31
3.5.2. Abordagem “Bottom-up”	31
3.6. Adequação dos Modelos e Abordagens ao Problema da Modelagem da Carga na Recomposição	32
Capítulo 4 – Metodologia Heurística Top Down.....	39
4.1. Parâmetros Físicos	39
4.2. Metodologia Proposta	42
4.2.1. Primeira Etapa.....	47
4.2.1.1. Cálculos Preliminares	47

4.2.1.2. Cálculos da Primeira Etapa.....	54
4.2.2. Segunda Etapa.....	67
4.2.2.1. Cálculos da Segunda Etapa.....	68
4.2.3. Terceira Etapa	74
4.3. Aplicação	79
4.3.1. Resultados dos Cálculos Preliminares	82
4.3.2. Resultados dos Cálculos da Primeira Etapa.....	91
4.3.3. Resultados dos Cálculos da Segunda Etapa.....	101
4.3.4. Resultados dos Cálculos da Terceira Etapa	102
 Capítulo 5 – Metodologia Caixa-Branca Bottom-Up	107
5.1. Introdução	107
5.2. Programação Orientada a Objetos.....	109
5.2.1. Encapsulamento	110
5.2.2. Aplicação de POO na Modelagem da Carga.....	111
5.3. Modelos de Equipamentos.....	113
5.4. Métodos de Agregação.....	116
5.4.1. Métodos Convencionais de Agregação.....	116
5.4.2. Método Físico de Agregação	117
5.5. Aplicação	120
5.6. Comparação Entre as Metodologias Propostas.....	153
 Capítulo 6 - Conclusões	157
 Bibliografia.....	161
 Apêndice A - Publicações	167
 Apêndice B – Conceitos Básicos de Lógica Fuzzy.....	171
 Apêndice C – Modelagem de Equipamentos Controlados Termostaticamente....	179

Lista de Abreviaturas

SIN – Sistema Interligado Nacional
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico
CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz
MHTD – Metodologia Heurística Top-Down
MCBBU – Metodologia Caixa-Branca Bottom-Up
MHBU – Metodologia Heurística Bottom-Up
MCBTD – Metodologia Caixa-Branca Top-Down
MCPTD – Metodologia Caixa-Preta Top-Down
MCPBU – Metodologia Caixa-Preta Bottom-Up
CT – Controlados Termostaticamente
F – Cargas Fixas
CM – Controlados Manualmente
Eq – Conjunto dos Equipamentos
Cat – Conjunto das Categorias de Carga Agregada
Par – Conjunto das Parcelas de Consumo
ZIP – Modelo de Carga Polinomial
SE40 – Subestação 40 (Andorinha) da CPFL
POO – Programação Orientada a Objetos

Lista de Figuras

2.1. Curva aproximada do comportamento agregado de cargas controladas termostaticamente durante a recomposição	13
2.2. Comportamento de cargas controladas manualmente durante a recomposição	16
2.3. Comportamento de cargas fixas durante a recomposição	17
2.4. Comportamento de lâmpadas de sódio e de mercúrio durante a recomposição	17
2.5. Curva típica (potência ativa) de carga predominantemente comercial Tipo 1 - hotéis, serviços de higiene (barbearias, lavanderias), bancos comerciais, comércio atacadista de derivados do leite, estabelecimentos particulares de cursos livres e casas lotéricas	18
2.6. Curva típica (potência ativa) de carga predominantemente comercial Tipo 2 – reparação e manutenção de veículos e comércio varejista de produtos metalúrgicos	18
2.7. Curva típica (potência ativa) de carga predominantemente comercial Tipo 3 – transporte aéreo de carga, restaurantes e lanchonetes, bares, botequins e cafés e assistência médica	19
2.8. Curva típica (potência ativa) de carga predominantemente comercial Tipo 4 – transporte urbano de passageiros, rádio difusão e televisão, empresas de seguros e supermercados	19
2.9. Curva típica (potência ativa) de carga predominantemente industrial	20
2.10. Curva típica (potência ativa) de carga predominantemente residencial	20
3.1. Relação entre tipos de informação e metodologias de modelagem	34
3.2. Adequação das metodologias ao processo de recomposição	36
4.1. Comportamento agregado de cargas controladas termostaticamente durante a recomposição	40
4.2. Comportamento de cargas controladas manualmente durante a recomposição	40
4.3. Comportamento de cargas fixas durante a recomposição	40
4.4. Comportamento de cargas fixas durante a recomposição – Lâmpadas de sódio e de mercúrio	40
4.5. Primeira Etapa da metodologia proposta	45
4.6. Segunda Etapa da metodologia proposta	45
4.7. Terceira Etapa da metodologia proposta	46
4.8. Processo de obtenção do comportamento da carga agregada	46
4.9. Base de Regras - variáveis de entrada e de saída	58
4.10. Detalhamento do bloco “Cálculos da Primeira Etapa” ilustrado na Figura 4.5	60
4.11. Conjuntos nebulosos associados à variável “temperatura ambiente”	61
4.12. Curva aproximada para um grupo de equipamentos controlados termostaticamente	68
4.13. Curva aproximada para as geladeiras da categoria Res	70
4.14. Curva aproximada para um grupo de equipamentos com carga fixa	71

4.15. Curva aproximada para as lâmpadas incandescentes.....	72
4.16. Curva aproximada para um grupo de equipamentos controlados manualmente	73
4.17. Curva aproximada para as máquinas industriais da categoria de carga agregada <i>Ind</i>	73
4.18. Curva diária de potência ativa da SE40 – $P_{SE40}(t)$	82
4.19. Tela do aplicativo gráfico desenvolvido – Interface de Fuzzificação.....	92
4.20. Conjuntos nebulosos associados à variável “hora do dia”	93
4.21. Tela do aplicativo gráfico desenvolvido – Base de Regras.....	95
4.22. Tela do aplicativo gráfico desenvolvido – Interface de Defuzzificação.....	97
4.23. Tela do aplicativo gráfico desenvolvido – Modificadores para a Situação 1	98
4.24. Curva aproximada para as geladeiras da categoria de carga agregada <i>Res</i> - Situação 1.....	102
4.25. Curva aproximada do comportamento dos equipamentos controlados manualmente associados à categoria de carga agregada <i>Ind</i> - Situação 1	102
4.26. Curva aproximada do comportamento da categoria de carga agregada <i>Res</i> e do comportamento da parcela de consumo residencial- Situação 1.....	103
4.27. Curva aproximada para a parcela de consumo industrial - Situação 1	103
4.28. Curva aproximada para a parcela de consumo comercial - Situação 1.....	104
4.29. Curva aproximada para o comportamento da SE40 - Situação 1	104
4.30. Curva aproximada para o comportamento da SE40 - Situação 2	106
5.1. Aplicação da modelagem bottom-up ao problema da modelagem da carga.....	108
5.2. Definição de POO aplicada à modelagem da carga	111
5.3. Classe base para um equipamento elétrico genérico.....	114
5.4. Exemplos de equipamentos que podem ser utilizados na modelagem da carga de um alimentador.....	115
5.5. Funcionamento de uma geladeira da parcela residencial - sem interrupções	121
5.6. Funcionamento de um aparelho de ar-condicionado da parcela industrial - sem interrupções	122
5.7. Funcionamento de um aparelho de ar-condicionado da parcela comercial - sem interrupções.....	122
5.8. Comportamento agregado das geladeiras, freezers e aparelhos de ar-condicionado em uma residência – sem interrupções	123
5.9. Comportamento agregado das máquinas em uma indústria – sem interrupções	124
5.10. Detalhe do comportamento agregado das máquinas em uma indústria – sem interrupções	124
5.11. Comportamento agregado das geladeiras, freezers e aparelhos de ar-condicionado em uma loja – sem interrupções	125
5.12. Comportamento agregado das geladeiras, freezers e aparelhos de ar-condicionado de toda a parcela de consumo residencial – sem interrupções	125
5.13. Comportamento agregado dos chuveiros de toda a parcela de consumo residencial – sem interrupções.....	126

5.14. Comportamento agregado das lâmpadas de toda a parcela de consumo residencial – sem interrupções.....	126
5.15. Comportamento agregado da parcela residencial – sem interrupções	127
5.16. Comportamento agregado dos aparelhos de ar-condicionado de toda a parcela de consumo industrial – sem interrupções.....	127
5.17. Comportamento agregado dos chuveiros de toda a parcela de consumo industrial – sem interrupções	128
5.18. Comportamento agregado das lâmpadas de toda a parcela de consumo industrial – sem interrupções	129
5.19. Comportamento agregado das máquinas de toda a parcela de consumo industrial – sem interrupções	129
5.20. Comportamento agregado da parcela industrial – sem interrupções	130
5.21. Comportamento agregado das geladeiras, freezers e aparelhos de ar-condicionado de toda a parcela de consumo comercial – sem interrupções.....	130
5.22. Comportamento agregado das lâmpadas de toda a parcela de consumo comercial – sem interrupções.....	131
5.23. Comportamento agregado da parcela comercial – sem interrupções	131
5.24. Comportamento da carga agregada no alimentador – sem interrupções.....	132
5.25. Comportamento das cargas controladas termostaticamente (geladeiras, freezers e aparelhos de ar-condicionado) da parcela de consumo residencial - Situação 1	133
5.26. Comportamento das lâmpadas (incandescentes e fluorescentes) da parcela de consumo residencial- Situação 1	134
5.27. Comportamento dos chuveiros da parcela de consumo residencial- Situação 1.....	134
5.28. Comportamento da parcela de consumo residencial- Situação 1.....	135
5.29. Comportamento das cargas controladas termostaticamente (aparelhos de ar-condicionado) da parcela de consumo industrial- Situação 1	136
5.30. Comportamento das lâmpadas (mistas e fluorescentes) da parcela de consumo industrial- Situação 1	136
5.31. Comportamento dos chuveiros da parcela de consumo industrial- Situação 1.....	137
5.32. Comportamento das máquinas da parcela de consumo industrial- Situação 1	138
5.33. Comportamento da parcela de consumo industrial- Situação 1	138
5.34. Comportamento das cargas controladas termostaticamente (geladeiras freezers e aparelhos de ar-condicionado) da parcela de consumo comercial- Situação 1	139
5.35. Comportamento das lâmpadas da parcela de consumo comercial- Situação 1.....	140
5.36. Comportamento da parcela de consumo comercial- Situação 1	140
5.37. Comportamento da carga agregada no alimentador - Situação 1.....	141
5.38. Comportamento das cargas controladas termostaticamente (geladeiras, freezers e aparelhos de ar-condicionado) da parcela de consumo residencial- Situação 2	142
5.39. Comportamento das lâmpadas (incandescentes e fluorescentes) da parcela de consumo residencial- Situação 2	143
5.40. Comportamento dos chuveiros da parcela de consumo residencial- Situação 2.....	143
5.41. Comportamento da parcela de consumo residencial- Situação 2.....	144

5.42. Comportamento das cargas controladas termostaticamente (aparelhos de ar-condicionado) da parcela de consumo industrial- Situação 2.....	145
5.43. Comportamento das lâmpadas (mistas e fluorescentes) da parcela de consumo industrial- Situação 2.....	145
5.44. Comportamento dos chuveiros da parcela de consumo industrial- Situação 2.....	146
5.45. Comportamento das máquinas da parcela de consumo industrial- Situação 2.....	146
5.46. Comportamento da parcela de consumo industrial- Situação 2.....	147
5.47. Comportamento das cargas controladas termostaticamente (geladeiras, freezers e aparelhos de ar-condicionado) da parcela de consumo comercial - Situação 2.....	148
5.48. Comportamento das lâmpadas (incandescentes e fluorescentes) da parcela de consumo comercial- Situação 2.....	149
5.49. Comportamento da parcela de consumo comercial- Situação 2.....	149
5.50. Comportamento da carga agregada no alimentador - Situação 2.....	150
5.51. Comportamento da carga agregada no alimentador - Situação 3.....	151
5.52. Comportamento da parcela de consumo industrial - Situação 4.....	152
5.53. Comparação entre as metodologias propostas	156
 B.1. Número nebuloso trapezoidal.....	172
B.2. Número nebuloso triangular.....	172
B.3. Variável nebulosa ν (“temperatura”) e seus qualificativos.....	174
B.4. Implicação em uma regra nebulosa	176
B.5. Sistema de disparo paralelo de regras nebulosas.....	177
 C.1. Ciclo termostático de um equipamento de refrigeração.....	180
C.2. Alteração do ciclo termostático de um equipamento de refrigeração após a ocorrência de um blecaute	180
C.3. Diagrama de classe para um equipamento controlado termostaticamente.....	182

Lista de Tabelas

4.1. Relação entre parâmetros físicos e tipos de carga.....	41
4.2. Relação entre parâmetros físicos e parcelas de consumo.....	42
4.3. Dados de entrada e sua origem	52
4.4. Modificadores relacionados aos diferentes grupos de equipamentos por categoria de carga agregada	57
4.5. Variáveis e seus qualificativos lingüísticos	59
4.6. Grandezas obtidas para o exemplo adotado.....	62
4.7. Relação entre as grandezas calculadas pelo algoritmo e os parâmetros físicos da Figura 4.5.....	65
4.8. Parâmetros físicos obtidos ao final da Primeira Etapa da metodologia de modelagem proposta.....	67
4.9. Pontos necessários para a construção das curvas aproximadas das geladeiras, freezers e aparelhos de ar-condicionado – Categoria de Carga Agregada <i>Res</i>	70
4.10. Pontos necessários para a construção das curvas aproximadas das lâmpadas incandescentes, lâmpadas fluorescentes e chuveiros – Categoria de Carga Agregada <i>Res</i>	72
4.11. Pontos necessários para a construção da curva aproximada das máquinas industriais – Categoria de Carga Agregada <i>Ind</i>	74
4.12. Consumo médio mensal de um equipamento – Categoria de carga agregada <i>Res</i>	83
4.13. Consumo médio mensal de um equipamento – Categoria de carga agregada <i>Ind</i>	84
4.14. Consumo médio mensal de um equipamento – Categoria de carga agregada <i>Com</i> ...	84
4.15. Consumo médio mensal de um grupo de equipamentos – Categoria de carga agregada <i>Res</i>	85
4.16. Consumo médio mensal de um grupo de equipamentos – Categoria de carga agregada <i>Ind</i>	85
4.17. Consumo médio mensal de um grupo de equipamentos – Categoria de carga agregada <i>Com</i>	86
4.18. Duração dos ciclos termostáticos para os diversos equipamentos – Categorias de Carga Agregada <i>Res, Ind e Com</i>	87
4.19. Duração dos ciclos “ligado” para os diversos equipamentos – Categorias de Carga Agregada <i>Res, Ind e Com</i>	87
4.20. Duração dos ciclos “desligado” para os diversos equipamentos – Categorias de Carga Agregada <i>Res, Ind e Com</i>	87

4.21. Características da Situação 1	98
4.22. $P_{MEqCatRelig}$, $t_{onEqCatRelig}$ e $t_{offEqCatRelig}$ - Situação 1	99
4.23. Parâmetros físicos dos equipamentos controlados termostaticamente - Situação 1	100
4.24. Parâmetros físicos dos equipamentos com carga fixa - Situação 1.....	100
4.25. Parâmetros físicos dos equipamentos controlados manualmente - Situação 1	101
4.26. Características da Situação 2	105
5.1. Características da Situação 1	133
5.2. Características da Situação 2	142
5.3. Características da Situação 3	151
5.4. Características da Situação 4	152

Capítulo 1

Introdução

A ocorrência de interrupções no fornecimento de energia elétrica, tanto de pequeno quanto de grande porte, vem aumentando significativamente, nos últimos anos, em todo o mundo. Basta lembrar dos grandes blecautes ocorridos nos Estados Unidos, Reino Unido, Itália, Dinamarca e Suécia em 2003, sendo que apenas nos Estados Unidos, nos últimos cinco anos (1999 a 2004), ocorreram cerca de 130 blecautes de porte significativo [2]. Esse crescimento do número de falhas no abastecimento de energia se deve, entre outros fatores, ao processo de desregulamentação do setor elétrico, que reestruturou o sistema de investimentos das empresas; à operação do sistema mais próxima de seus limites, reduzindo investimentos em infra-estrutura; ao aumento da complexidade dos sistemas elétricos; ao envelhecimento da rede e ao corte de gastos realizado a partir da redução de profissionais muitas vezes bastante experientes. No Brasil, falhas técnicas e humanas foram responsáveis por blecautes de grandes proporções: o blecaute de 11/03/1999, com uma carga interrompida total de 25000 MW; o blecaute de 16/05/1999, que provocou a interrupção de 2000 MW e o blecaute de 21/01/2002 que totalizou uma carga interrompida de 25000 MW [32, 33].

Segundo a grande maioria dos estudiosos e especialistas em blecautes, uma forma de aumentar a confiabilidade do sistema consiste em tornar a rede elétrica fisicamente mais robusta e utilizar técnicas de simulação e controle mais adequadas, minimizando,

conseqüentemente, a ocorrência de interrupções no fornecimento de energia. Entretanto, já existem estudos bastante criteriosos, baseados na teoria do caos, que afirmam que mesmo que todas essas providências sejam tomadas, blecautes de grandes proporções continuarão a ocorrer em todo o mundo. Nesse contexto, independentemente de medidas relacionadas à prevenção de blecautes, é indispensável o desenvolvimento de estratégias que, admitindo a inevitável ocorrência dessas interrupções, permitam que a reenergização do sistema de energia elétrica seja realizada da forma mais eficiente possível [2]. Assim, os estudos sobre a recomposição da rede elétrica, visando desde o desenvolvimento de ferramentas de apoio em tempo real (durante a reenergização) até a implementação de funções computacionais para análise “off-line” (reconstrução de eventos), têm se tornado cada vez mais importantes.

1.1. Motivação

Um dos aspectos mais importantes dentro do processo de recomposição de sistemas de energia elétrica consiste no problema da reenergização das cargas após a ocorrência de blecautes totais ou parciais. Essa reenergização tem por objetivo tanto a estabilização do sistema em recomposição quanto a normalização do abastecimento de energia para todos os consumidores.

Esse problema vem sendo analisado há algumas décadas, apontando para a necessidade da realização de estudos mais aprofundados sobre o restabelecimento de cargas [1, 21]. Um dos principais problemas detectados durante esse processo refere-se ao grande aumento do nível de potência (quando comparado com a potência em condições normais de operação) no instante da reenergização de um bloco de carga. Esse comportamento pode ser observado não apenas na recomposição do sistema após um blecaute, mas também após interrupções programadas pelas concessionárias de energia, visando, por exemplo, a manutenção de equipamentos.

Dessa maneira, pode-se considerar que o conhecimento do comportamento da carga, especialmente durante a reenergização do sistema elétrico, é extremamente importante, uma vez que sua retomada inadequada pode gerar quedas de frequência, sobrecargas de linhas e

transformadores e situações nas quais a demanda seja maior que a capacidade de geração da rede elétrica, podendo reiniciar, assim, o processo de blecaute.

1.2. Objetivo

O objetivo deste trabalho consiste no desenvolvimento de metodologias capazes de representar (ou prever), de forma adequada, o comportamento da carga durante a reenergização da rede elétrica, caracterizando os principais fenômenos físicos inerentes ao seu restabelecimento. Essas metodologias devem contemplar aspectos fundamentais que reflitam sua adequação à representação do comportamento da carga na recomposição. Alguns desses aspectos são: tipo de informação requerida, complexidade da metodologia e capacidade de representação de fenômenos físicos.

O primeiro aspecto está associado ao principal tipo de informação que é requerida pelas metodologias como, por exemplo, medições do sistema, conhecimento prévio de fenômenos físicos e conhecimento de especialistas. O segundo aspecto é a complexidade da metodologia que está diretamente relacionada ao esforço computacional necessário para o processamento dos dados e informações empregados. Finalmente, o terceiro aspecto refere-se à capacidade da metodologia em representar fenômenos físicos, que deve ser a principal preocupação na previsão do comportamento da carga, especificamente durante o processo de reenergização, uma vez que a representação imprecisa desses fenômenos pode levar a uma retomada inadequada de carga.

1.3. Organização do Trabalho

O Capítulo 2 trata do comportamento da carga na reenergização de sistemas de energia elétrica, caracterizando-a de acordo com seu tipo de controle e descrevendo os fenômenos físicos associados a esse comportamento. Além disso, esse capítulo retrata importantes aspectos relacionados ao processo de recomposição no Brasil e no mundo, com destaque especial para a etapa de restabelecimento de cargas.

O Capítulo 3 aborda o problema da modelagem da carga na recomposição da rede elétrica, apresentando modelos de carga tradicionais, bem como um breve histórico relacionado a modelos de carga na recomposição. Esse capítulo descreve, também, diferentes técnicas de modelagem e uma discussão sobre a adequação de diversas metodologias ao problema da modelagem da carga durante a reenergização. Essa discussão resulta na escolha justificada de duas metodologias com características bastante distintas: a Metodologia Heurística Top-Down e a Metodologia Caixa-Branca Bottom-Up.

O Capítulo 4 trata da primeira metodologia, enfatizando seus principais conceitos, tais como a utilização de dados relativos à carga em condições normais de operação, o emprego do conhecimento de especialistas, representado em uma base de regras, e o uso de lógica nebulosa como forma de lidar com as imprecisões inerentes às variáveis envolvidas no processo de modelagem. Além disso, esse capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia, usando dados reais.

O Capítulo 5 refere-se ao desenvolvimento da Metodologia Caixa-Branca Bottom-Up, destacando a aplicação de técnicas de Programação Orientada a Objetos na obtenção dos modelos no nível de equipamentos e no método físico de agregação da carga proposto. São apresentados os resultados obtidos a partir da utilização de dados reais e uma comparação entre as metodologias Top-Down e Bottom-Up.

Finalmente, o Capítulo 6 descreve tanto as conclusões deste trabalho quanto algumas sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Comportamento da Carga na Recomposição de Sistemas de Energia Elétrica

2.1. A Recomposição de Sistemas de Energia Elétrica

Os sistemas de energia elétrica estão sujeitos a dois tipos de restrições: **restrições de carga**, associadas ao atendimento de toda a demanda do sistema e **restrições de operação**, que impõem que variáveis do sistema de energia, tais como fluxos de potência e tensões nodais, estejam dentro de certos limites [9]. Com base nessas restrições, o estado de operação de um sistema de energia elétrica pode ser classificado como [35]:

- **normal**, no qual todas as cargas são atendidas sem violação dos limites de nenhuma variável do sistema;
- **emergencial**, onde todas as cargas do sistema são atendidas, mas existe violação de alguns limites (como, por exemplo, de tensões e de fluxos nas linhas) e
- **restaurativo**, no qual algumas cargas do sistema não são atendidas, mas a parte do sistema que está em operação encontra-se em um estado normal.

O não atendimento das cargas pode ser ocasionado por contingências causadas, por exemplo, por descargas elétricas, falhas de geradores, falhas de equipamentos de proteção e falhas humanas. Uma vez que essas perturbações podem ocorrer freqüentemente, existem procedimentos e técnicas capazes de fazer com que o sistema continue operando mesmo quando da ocorrência das mesmas. Essa característica da rede de energia é denominada segurança do sistema [36]. Contudo, mesmo para sistemas com nível de segurança elevado, podem acontecer perturbações imprevistas, gerando uma situação de blecaute total ou parcial e determinando, conseqüentemente, que seu estado de operação passe a ser restaurativo. Nesse caso, torna-se necessária a tomada de ações de controle, geralmente planejadas com antecedência, que permitam a reenergização (ou recomposição) da rede elétrica.

A recomposição de um sistema elétrico é um problema bastante complexo, cujo objetivo é o restabelecimento rápido de todos os serviços para os consumidores de energia elétrica, a partir da maximização das cargas atendidas e da minimização do tempo requerido para a normalização do fornecimento de energia, respeitando os limites operacionais de todos os componentes da rede elétrica. Nessa situação, o tempo é um fator fundamental que influencia diretamente as conseqüências econômicas e sociais advindas da falha no abastecimento de energia. Quanto mais tempo o sistema ficar desenergizado, maiores serão as perdas econômicas e custos sociais infringidos à população, que, na vida moderna, são incomensuráveis, tendo em vista a dependência cada vez maior do uso da eletricidade.

No Brasil (assim como no mundo), o problema da recomposição pode ser dividido em três etapas [1]:

- Etapa 1: consiste no estudo e planejamento dos procedimentos que devem ser seguidos pelos participantes do Sistema Interligado Nacional (SIN) para o restabelecimento do fornecimento de energia. Nessa fase, as equipes de estudo tanto dos agentes homologados pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) quanto do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) são responsáveis pela elaboração de planos, denominados “planos de recomposição”, expressos por um conjunto de documentos, denominados “instruções operativas”,

que fazem parte dos Procedimentos de Rede do SIN [34]. Essas instruções compreendem um roteiro de ações que devem ser tomadas pelo operador do centro de controle, visando a reenergização segura do sistema, de acordo com certas condições esperadas para diferentes situações previstas de recomposição;

- Etapa 2: compreende as ações de controle que devem ser tomadas durante a ocorrência das perturbações com o intuito de salvar fontes de energia de extrema importância e
- Etapa 3: consiste na reenergização, propriamente dita, do sistema após a ocorrência da interrupção no fornecimento de energia.

Essa última etapa é composta por três estágios temporais [18]:

- Preparação: neste estágio, o estado do sistema (após a perturbação) é determinado. São definidos tanto o sistema no qual se quer chegar após a recomposição (sistema alvo) quanto uma estratégia para a reenergização da rede de transmissão. Além disso, são tomadas algumas medidas para o restabelecimento da geração. Geralmente, este estágio tem duração de 30 a 60 minutos.
- Recomposição do sistema: são reenergizadas as principais linhas de transmissão, ilhas (subsistemas já energizados) são sincronizadas e algumas cargas são restabelecidas, visando a estabilização da tensão e da geração. Comumente, a duração deste estágio pode atingir de 3 a 4 horas.
- Restabelecimento de carga: neste último estágio, a carga é restabelecida o mais rapidamente possível. Este estágio dura até a finalização de todo o processo de recomposição, ou seja, até que o fornecimento de energia a todos os consumidores esteja normalizado.

A principal diferença entre o estágio de *Restabelecimento de carga* e os dois primeiros estágios reside no fato de que seu principal objetivo é a reenergização irrestrita das cargas, enquanto que nos dois outros estágios, a retomada de cargas é realizada com restrições que visam manter a estabilidade dos subsistemas energizados.

Conforme citado anteriormente, recompor um sistema de energia após um blecaute (total ou parcial), no menor tempo possível, é um problema extremamente complexo, uma vez que a reenergização da rede elétrica envolve questões que abrangem desde a avaliação de fluxos de potência até a análise de transientes eletromagnéticos e eletromecânicos. Alguns dos principais problemas com os quais se deve lidar durante a recomposição do sistema são: balanço de reativos; tensões transitórias de chaveamento; balanço entre demanda e geração de energia; **determinação do comportamento da carga após a ocorrência da interrupção de energia**; localização da falta; resposta em frequência das usinas geradoras; coordenação entre o restabelecimento de carga e geração; determinação do sequenciamento ótimo para a reenergização das unidades geradoras e análise do estado dos dispositivos de chaveamento. A variedade e complexidade desses problemas demandam o desenvolvimento de funções e modelos computacionais capazes de fornecer soluções viáveis para o problema da reenergização da rede elétrica. As referências [3] e [9] demonstram a importância da implementação de ferramentas de análise para auxiliar o operador durante a recomposição de um sistema de energia elétrica e sugerem um ambiente, para a realização da recomposição, baseado nos centros de controle das empresas de energia. Nessas referências, os instrumentos de análise consistem em um conjunto de programas computacionais (que podem ser executados em tempo real ou não) utilizados para descrever o comportamento estático, dinâmico e transiente de um sistema de energia durante o processo de recomposição. Basicamente, as funções de análise de redes correspondentes a essas ferramentas são programas de:

- análise de observabilidade;
- estimação de estado;
- determinação do equivalente externo;
- fluxo de carga;
- estabilidade transiente;
- dinâmica de longa duração;
- transiente de tensão;
- transiente eletromagnético;
- curto-circuito;

- restabelecimento de cargas e
- coordenação da recomposição.

Além dessas ferramentas, a referência [1] destaca a importância do estabelecimento de técnicas para treinamento do operador do sistema, uma vez que, felizmente, a situação de blecaute é rara (e, portanto, o operador não possui muita experiência para lidar com essas situações) e está associada a um elevado grau de estresse, uma vez que grande parte da responsabilidade pelo restabelecimento de energia de forma adequada recai sobre ele.

2.2. O Processo de Recomposição no Brasil

No Brasil, os estudos relacionados ao processo de recomposição levam em conta aspectos associados à definição de limites de tensão, ao balanço entre geração e demanda e ao restabelecimento de “blocos de carga” capazes de manter a estabilidade do sistema. Inicialmente, esses estudos são fundamentados nos resultados obtidos através de programas de fluxo de carga e, posteriormente, na análise de transientes eletromecânicos e eletromagnéticos. Esses resultados são baseados em dois conceitos principais: áreas geo-elétricas e grau de confiabilidade [32].

As **áreas geo-elétricas** correspondem a configurações mínimas que contém pelo menos uma unidade geradora que possibilite o restabelecimento de cargas prioritárias. Já o conceito de **grau de confiabilidade** fornece informações qualitativas sobre a utilização de determinada unidade geradora no processo de recomposição. A cada unidade de geração está associado um grau de confiabilidade alto, médio ou baixo. Uma unidade com alto grau de confiabilidade é caracterizada por ser capaz de se reenergizar independentemente de qualquer abastecimento externo de energia, estando, inicialmente, totalmente desenergizada. O grau de confiabilidade médio está associado a unidades geradoras capazes de abastecer seus sistemas auxiliares, mas que precisam ser mantidas em funcionamento depois da ocorrência da perturbação. Finalmente, o grau de confiabilidade baixo refere-se às unidades geradoras que necessitam de abastecimento externo de energia (proveniente de

sistemas auxiliares). Esse conceito é utilizado para definir uma área geo-elétrica, uma vez que ela deve possuir, no mínimo, uma unidade com alto grau de confiabilidade.

A recomposição do sistema elétrico é coordenada pelo ONS e pode ser dividida em duas fases: **fluente e coordenada**. A primeira caracteriza-se pelas ações de controle que podem ser tomadas pelos operadores das diferentes concessionárias de energia de forma independente, sem a necessidade de comunicação entre as empresas envolvidas no processo de reenergização. Na literatura [32], pode-se encontrar recomendações para a elaboração de procedimentos para a **recomposição fluente**. Algumas dessas recomendações são, por exemplo:

- o restabelecimento de cargas prioritárias deve levar em consideração o balanço entre geração e demanda;
- a quantidade de carga a ser restabelecida em cada área geo-elétrica deve ser previamente determinada e
- a retomada de carga deve ser realizada em pequenas quantidades, visando manter a estabilidade do sistema.

Na **fase coordenada**, os operadores dos centros de controle das concessionárias de energia devem aguardar a comunicação de centros de controle de hierarquia mais elevada para a execução de qualquer ação. Em situações de blecaute total, essa fase tem início após o término da fase fluente e é caracterizada pela interconexão de ilhas e subsistemas previamente restabelecidos durante a mesma. É importante salientar que no caso de blecautes parciais, existe apenas a fase coordenada.

2.3. A Recomposição de Cargas

Conforme descrito no item 2.1, o problema da recomposição de cargas consiste na reenergização de cargas após a ocorrência de perturbações que resultem em blecautes totais ou parciais, objetivando tanto a estabilização do sistema em recomposição quanto a normalização do abastecimento de energia para todos os consumidores. Esse problema vem

sendo analisado há algumas décadas e existem relatos mostrando que, já nas décadas de 1940 e 1950, algumas empresas de energia enfrentaram dificuldades durante o religamento de disjuntores [19], apontando para a importância da realização de estudos acerca da reenergização da carga [11] e demonstrando preocupação com os picos de corrente ocasionados pela partida de motores.

O restabelecimento de cargas, após a ocorrência de uma interrupção, é designado, na literatura internacional, por “*cold load pickup*” (tomada de carga a frio) e pode ser dividido nas seguintes fases de acordo com a influência de diferentes fenômenos [19]:

- Fase 1: influência (durante alguns ciclos) das correntes de “inrush” nos filamentos de lâmpadas e em transformadores;
- Fase 2: influência (durante, aproximadamente, 1 segundo) das correntes de partida de motores;
- Fase 3: influência (durante, aproximadamente, 15 segundos) das correntes de aceleração de motores e
- Fase 4: influência (durante algumas horas) da perda de diversidade do estado dos dispositivos controlados termostaticamente.

Outros autores [21] preferem agrupar as três primeiras fases em apenas uma, resultando na subdivisão do problema da reenergização de cargas em apenas duas fases, onde a influência da perda de diversidade do estado dos dispositivos controlados termostaticamente caracteriza a segunda fase do processo.

A importância da reenergização de cargas pode ser verificada, no caso do processo de recomposição do sistema brasileiro, através das recomendações estabelecidas para a recomposição fluente, conforme citado no item 2.2. Essas recomendações advêm da possibilidade de ocorrência de algumas complicações durante o restabelecimento de cargas de um sistema de energia. Um dos principais problemas que podem surgir durante esse processo é o grande aumento do nível de potência (quando comparado com a potência em condições normais de operação) no instante da reenergização de um bloco de carga. Esse comportamento pode ser observado não apenas na recomposição do sistema após um blecaute (total ou parcial), mas também após interrupções programadas pelas

concessionárias de energia. Se esse comportamento não for levado em consideração durante o processo de recomposição, a retomada de cargas pode ocorrer de maneira inadequada, gerando sobrecargas de linhas e transformadores, quedas de frequência e situações onde a demanda seja maior que a capacidade de geração do sistema elétrico, o que pode conduzir ao reinício do blecaute.

2.4. O Comportamento da Carga na Recomposição

Com o intuito de facilitar o entendimento do comportamento das cargas durante a reenergização do sistema, pode-se classificá-las, basicamente, em três diferentes grupos quanto a seu tipo de controle: cargas controladas termostaticamente, cargas controladas manualmente e cargas fixas [4], que estão descritas nos itens a seguir.

2.4.1. Cargas Controladas Termostaticamente

Este grupo é composto por equipamentos acionados através de termostato como, por exemplo, refrigeradores, freezers, aquecedores e aparelhos de ar-condicionado. Esse tipo de carga pode ser considerado como o grande responsável pelo aumento do nível de potência no instante do religamento, que pode atingir valores muito maiores que o valor da sua potência em condições normais de operação [19]. Esse pico de potência, no momento da reenergização, se deve à perda de diversidade do estado dos dispositivos controlados termostaticamente. Esse fenômeno pode ser facilmente observado em áreas caracterizadas pela forte presença desse tipo de equipamento como, por exemplo, em **áreas predominantemente residenciais**. Nessas áreas, antes da ocorrência da interrupção do fornecimento de energia, existe uma diversidade natural do estado desses equipamentos, ou seja, existem tanto equipamentos (compressores) consumindo energia, ou seja, no ciclo “on” do seu ciclo termostático, quanto equipamentos (compressores) “desligados” ou no ciclo “off” do ciclo termostático. Entretanto, no instante da reenergização dessa área, dependendo de algumas variáveis (que serão descritas posteriormente), pode ocorrer uma

perda da diversidade do estado, ou seja, nesse instante, todos os equipamentos controlados termostaticamente podem estar prontos para iniciar seu ciclo “on” e, portanto, prontos para operar com potência máxima, ocasionando o grande aumento do nível de potência citado anteriormente.

De acordo com a referência [19], o comportamento de uma área composta, majoritariamente, por equipamentos termostaticamente controlados (como, por exemplo, uma área tipicamente residencial) pode ser representado pela curva aproximada (no sentido de que é representada por segmentos de reta) de potência ativa ilustrada na Figura 2.1.

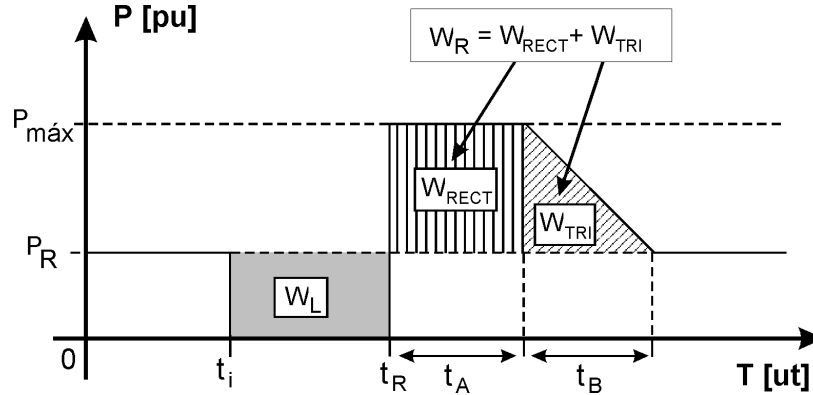


Figura 2.1: Curva aproximada do comportamento agregado de cargas controladas termostaticamente durante a reenergização

Nessa figura, a potência ativa é dada em p.u. (por unidade) e o tempo é dado em u.t. (unidades de tempo), e pode-se observar o comportamento peculiar desse tipo de carga durante a reenergização. Antes da ocorrência do blecaute ($t < t_i$), o nível de potência ativa em regime é representado por P_R . Entretanto, no momento do religamento ($t = t_R$), o nível de potência ($P_{máx}$) atinge um valor muito maior que P_R , conforme descrito anteriormente. Além disso, após seu religamento, esse tipo de carga possui um comportamento bastante característico: a energia perdida durante o blecaute (W_L) é recuperada (W_R) a partir do instante da reenergização, ou seja, $W_L = W_R$. Nessa curva, o patamar corresponde à perda total da diversidade do estado dos dispositivos controlados termostaticamente, t_A corresponde ao tempo necessário (a partir do instante da reenergização) para o início da

retomada dessa diversidade e $(t_A + t_B)$ ao tempo necessário para atingir o valor da potência em regime permanente (P_R).

Com base nessa curva, para uma determinada situação de blecaute, existem duas possibilidades. Na primeira, a energia perdida durante o blecaute não acarreta a perda total de diversidade do estado dos equipamentos controlados termostaticamente, ou seja, W_L é, no máximo, igual à energia associada à área do maior triângulo possível ($W_L \leq W_{TRI}$). Nesse caso, a curva de potência não inclui o patamar ilustrado na Figura 2.1. A segunda possibilidade é que a energia perdida durante o blecaute acarrete perda total de diversidade do estado desses equipamentos, ou seja, W_L é maior que a energia associada à área do maior triângulo possível ($W_L > W_{TRI}$) e, nesse caso, a curva de potência tem a forma da curva descrita na Figura 2.1.

É importante ressaltar que o comportamento aproximado da potência reativa pode ser considerado como possuindo a mesma forma descrita na Figura 2.1, uma vez que essa curva corresponde à agregação de diversos equipamentos termostaticamente controlados cujos fatores de potência, em regime permanente, podem ser admitidos como constantes.

Na literatura [11, 20], pode-se encontrar a descrição da influência de algumas variáveis no comportamento de equipamentos termostaticamente controlados e de áreas predominantemente residenciais durante a recomposição da rede elétrica. Uma delas é a **duração do blecaute** que influencia, de forma significativa, o valor do pico de potência no instante do religamento. Quanto maior a duração da interrupção, maior o pico de potência nesse instante, uma vez que o tempo decorrido desde o momento da falha no abastecimento de energia até o instante da reenergização determina diretamente a quantidade de equipamentos termostáticos que estarão prontos para operar com potência máxima. Em outras palavras, com o aumento da duração do blecaute, ocorre uma perda gradativa da diversidade entre os equipamentos controlados termostaticamente, a qual se reflete no aumento do pico de potência nos instantes imediatamente posteriores ao restabelecimento da carga até atingir a perda total da diversidade e o nível de potência igual a $P_{máx}$. Além disso, quanto maior a duração do blecaute, maior o tempo necessário para o restabelecimento do regime permanente ($t_A + t_B$).

Outra variável que exerce grande influência no comportamento desse tipo de carga é a **temperatura ambiente**. No caso de áreas compostas por uma grande quantidade de dispositivos de refrigeração, quanto maior a temperatura ambiente, maior será o tempo t_A necessário para o início da retomada da diversidade do estado desses equipamentos. Já no caso de predominância de dispositivos de aquecimento, quanto menor a temperatura ambiente, maior será t_A .

2.4.2. Cargas Controladas Manualmente

Esse grupo é constituído por equipamentos que, após a ocorrência do blecaute, só podem ser religados manualmente. É o caso, por exemplo, da maioria dos **equipamentos industriais**, os quais possuem dispositivos de proteção capazes de isolá-los da rede quando da ocorrência de perturbações. Nessas situações, esses equipamentos são desenergizados ou passam a ser alimentados por outras fontes de energia (“backups”), sendo reenergizados somente manualmente, pelos responsáveis por seu funcionamento, após a normalização do fornecimento de energia. Assim, o comportamento, durante a recomposição, de áreas com forte presença desse tipo de equipamento como, por exemplo, **áreas predominantemente industriais**, é bastante distinto do descrito no item 2.4.1., uma vez que esses equipamentos estarão desligados no momento da reenergização, ocasionando uma diminuição do nível de potência nesse instante. Dependendo da atividade industrial desenvolvida e da duração do blecaute, a retomada do nível de potência de regime permanente pode levar muitas horas ou até mesmo dias, ocasionando grandes prejuízos econômicos decorrentes do atraso da produção. Conforme a referência [19], o comportamento de uma área composta, de forma predominante, por equipamentos manualmente controlados (como uma área tipicamente industrial) pode ser representado pela curva aproximada de potência ativa ilustrada na Figura 2.2. Nessa figura, P_R e t_B correspondem, respectivamente, à potência em regime permanente e ao tempo necessário (a partir do instante da reenergização) para a retomada do regime permanente.

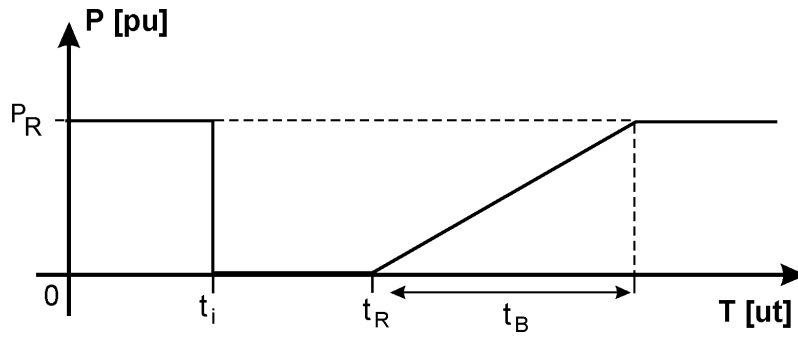


Figura 2.2: Comportamento de cargas controladas manualmente durante a recomposição

Novamente, a curva aproximada de potência reativa pode ser considerada como apresentando comportamento semelhante ao da curva da Figura 2.2, uma vez que se admite que esses equipamentos manualmente controlados possuem fatores de potência constantes em regime permanente.

2.4.3. Cargas Fixas

Essas cargas consistem em equipamentos que não são desconectados durante o blecaute, comportando-se da mesma forma antes e depois da reenergização. É o caso, por exemplo, de **computadores**, **equipamentos eletro-eletrônicos** e **lâmpadas** (incandescentes e fluorescentes). Além disso, podem ser incluídos, nesse grupo, equipamentos que, durante o blecaute, são alimentados por outras fontes de energia, mas que a partir do instante da reenergização, voltam a ser alimentados pela rede elétrica. A Figura 2.3 ilustra a curva aproximada de potência ativa, representando a agregação de vários equipamentos desse tipo. Mais uma vez, P_R corresponde à potência em regime permanente. Nos casos em que o comportamento desses equipamentos também está associado a uma curva aproximada de potência reativa, pode-se, novamente, considerar que ela segue o mesmo formato que a curva da Figura 2.3, uma vez que se admite que os equipamentos, em regime permanente, possuem fatores de potência constantes.

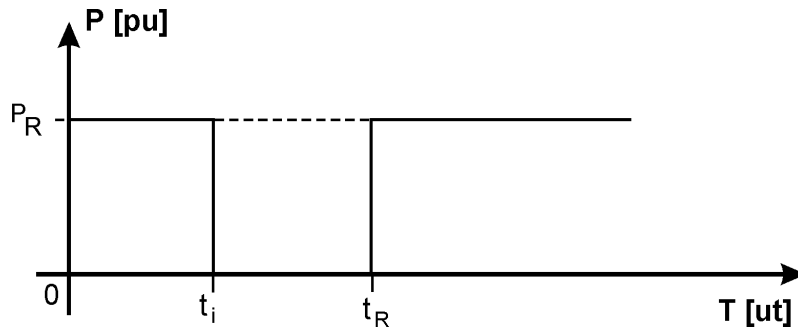


Figura 2.3: Comportamento de cargas fixas durante a recomposição

Nesse grupo, podem ser incluídas, ainda, as **lâmpadas de sódio e de mercúrio** que são, geralmente, utilizadas para a **iluminação pública**. Entretanto, seu comportamento difere do ilustrado na Figura 2.3, uma vez que essas lâmpadas levam algum tempo (até alguns minutos) para atingirem o nível de potência antes da ocorrência da perturbação. A Figura 2.4 ilustra a agregação de diversas lâmpadas de mercúrio, onde P_R e t_B correspondem, respectivamente, à potência ativa em regime permanente e ao tempo necessário (a partir do instante da reenergização) para a retomada do regime permanente. Deve-se destacar que embora o comportamento desse tipo de equipamento se assemelhe bastante ao ilustrado na Figura 2.2, o tempo t_B é bem menor no caso da Figura 2.4.

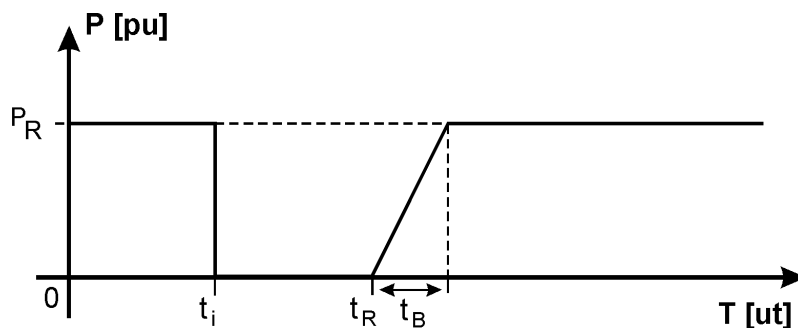


Figura 2.4: Comportamento de lâmpadas de sódio e de mercúrio durante a recomposição

É importante ressaltar que as cargas fixas estão presentes tanto em áreas predominantemente residenciais quanto em áreas com composição tipicamente industrial.

Em especial, as **cargas tipicamente comerciais** possuem um comportamento que depende, fortemente, do tipo das atividades comerciais desempenhadas nessa área. As

Figuras 2.5, 2.6, 2.7 e 2.8 ilustram o comportamento de cargas comerciais típicas, em condições normais de operação, relacionadas a diferentes tipos de atividade (Tipos 1, 2, 3 e 4), através das curvas diárias da média e do desvio padrão, associadas à medidas de potência ativa. Já a Figura 2.9 representa o comportamento de cargas industriais, considerando a rede elétrica em estado de operação normal. A Figura 2.10 apresenta a curva de potência ativa (média e desvio padrão) para uma carga predominantemente residencial [17].

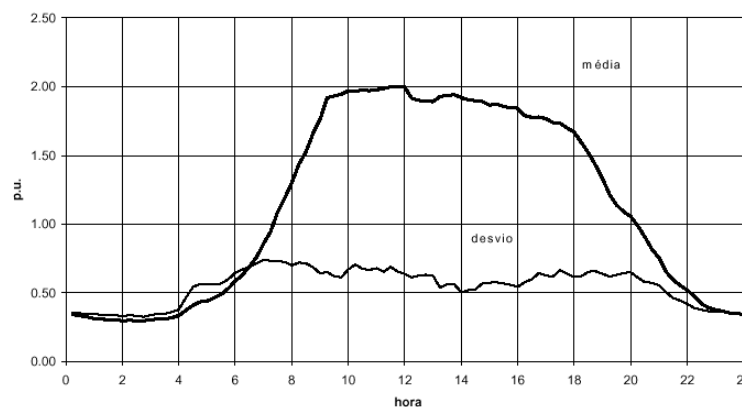


Figura 2.5: Curva típica (potência ativa) de carga predominantemente comercial Tipo 1 - hotéis, serviços de higiene (barbearias, lavanderias), bancos comerciais, comércio atacadista de derivados do leite, estabelecimentos particulares de cursos livres e casas lotéricas

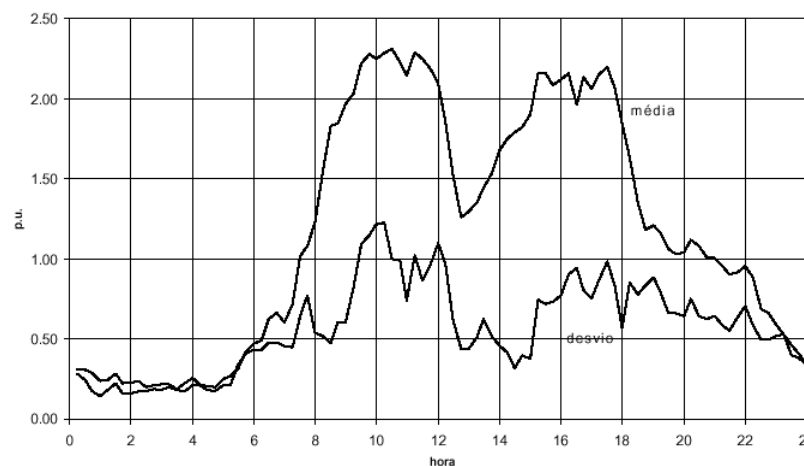


Figura 2.6: Curva típica (potência ativa) de carga predominantemente comercial Tipo 2 – reparação e manutenção de veículos e comércio varejista de produtos metalúrgicos

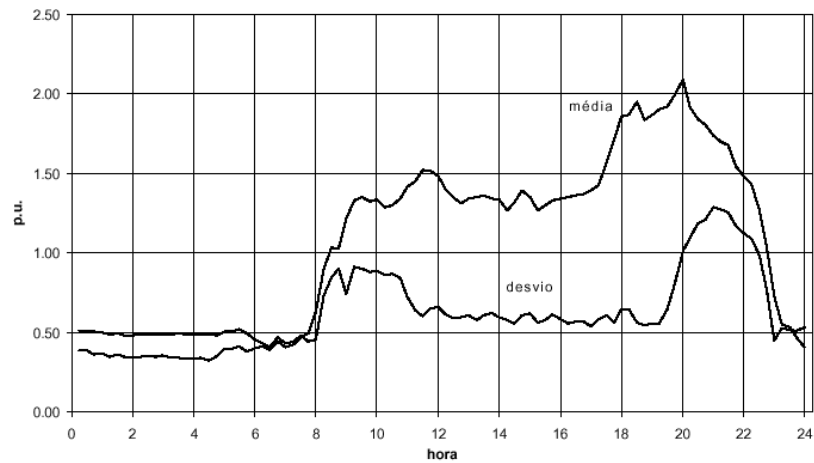


Figura 2.7: Curva típica (potência ativa) de carga predominantemente comercial Tipo 3 – transporte aéreo de carga, restaurantes e lanchonetes, bares, botequins e cafés e assistência médica

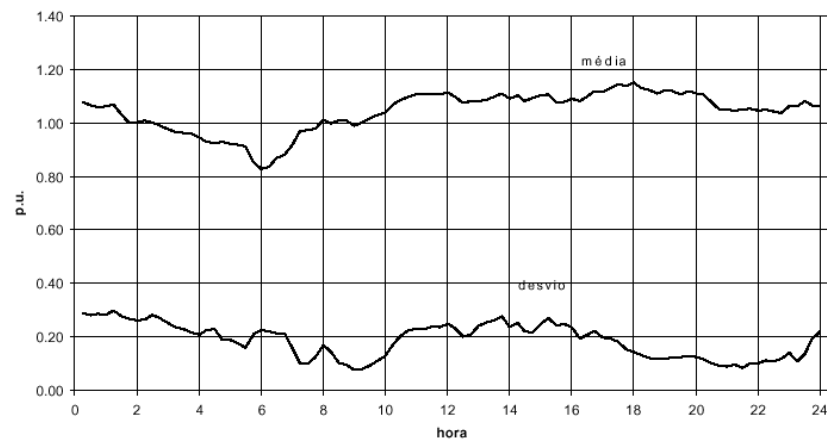


Figura 2.8: Curva típica (potência ativa) de carga predominantemente comercial Tipo 4 – transporte urbano de passageiros, rádio difusão e televisão, empresas de seguros e supermercados

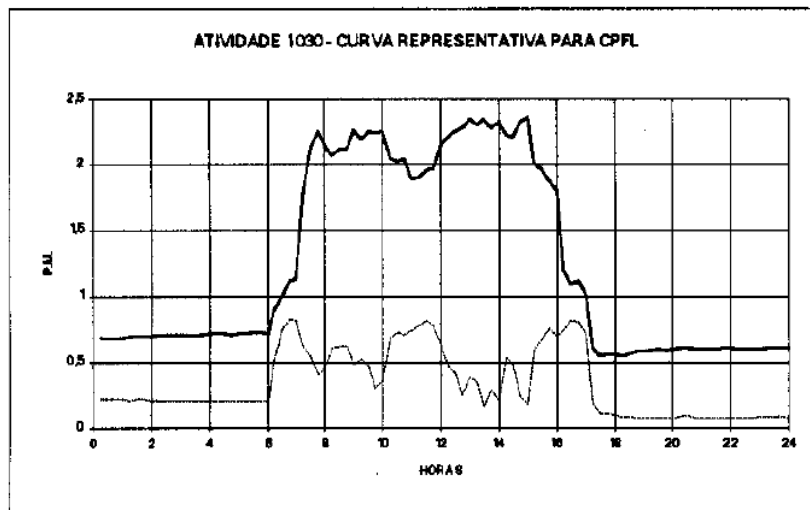


Figura 2.9: Curva típica (potência ativa) de carga predominantemente industrial

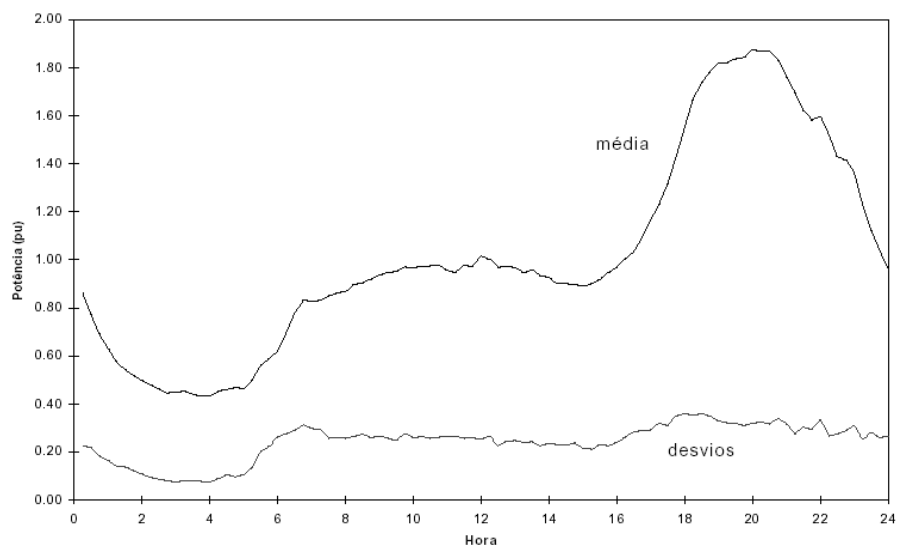


Figura 2.10: Curva típica (potência ativa) de carga predominantemente residencial

Na Figura 2.9, o traço mais grosso representa a média das medidas de potência ativa, enquanto o traço mais fino está relacionado ao desvio padrão das mesmas. A partir da análise dessas curvas (2.5 a 2.10), pode-se observar que a carga tipicamente comercial pode se comportar, em condições normais de operação, de maneira semelhante à carga residencial (no caso da carga tipicamente comercial do Tipo 3), à carga industrial (no caso

da carga comercial do Tipo 2) ou mesmo de forma distinta de ambas (no caso das cargas tipicamente comerciais dos Tipos 1 e 4).

Portanto, espera-se que durante o processo de reenergização, as cargas tipicamente comerciais se comportem como cargas predominantemente residenciais (por possuírem muitos equipamentos termostaticamente controlados), predominantemente industriais (por possuírem muitos equipamentos controlados manualmente) ou como uma composição desses dois tipos de consumidor.

É importante ressaltar que existem outros tipos de consumidores que podem ser considerados na composição da carga que será reenergizada como, por exemplo, o consumidor rural e as repartições públicas. Entretanto, este trabalho concentra seus esforços na determinação do comportamento da carga, durante o processo de recomposição, levando em conta apenas os três principais tipos de consumidor descritos na literatura (residencial, industrial e comercial) [1].

Capítulo 3

Modelagem da Carga na Recomposição de Sistemas de Energia Elétrica

3.1. A Importância da Modelagem da Carga na Recomposição

A modelagem da carga é um problema que vem sendo tratado com especial atenção desde o início da década de 1940, uma vez que seu comportamento influencia, de forma significativa, a análise e operação de sistemas de energia elétrica [37]. Particularmente, nas últimas três décadas, tem havido um crescente interesse no desenvolvimento de modelos de carga mais precisos, visto que, devido ao processo de desregulamentação mundial do setor elétrico, os sistemas passaram a operar mais próximos de seus limites operacionais.

Se em condições normais de operação, a modelagem da carga é extremamente importante, durante o processo de recomposição ela é crucial. Conforme descrito no Capítulo 2, a etapa de restabelecimento da carga desempenha um papel fundamental no processo de recomposição de sistemas de energia elétrica. A reenergização adequada de blocos de carga, após a ocorrência de blecautes totais ou parciais, permite a estabilização da rede elétrica em recomposição e, conseqüentemente, a normalização dos serviços para os consumidores. A reenergização de blocos muito pequenos de carga torna a recomposição

bastante demorada. Em contrapartida, a reenergização de um montante de carga excessivo pode ocasionar problemas como a violação de limites de frequência (desbalanço geração-carga) e de carregamento de linhas, podendo dar início, assim, a uma nova situação de blecaute. Dessa maneira, para que o restabelecimento de cargas possa ocorrer de forma rápida e segura, visando a minimização do tempo requerido para a recomposição do sistema e a maximização do número de consumidores atendidos, é necessário um conhecimento adequado do comportamento da carga durante o processo de reenergização. A determinação desse comportamento está relacionada à utilização de modelos (matemáticos ou não) que sejam capazes de representar aspectos e características intrínsecos ao comportamento de diferentes tipos de carga no decorrer do processo de recomposição do sistema elétrico.

Conforme descrito no item 2.4 do capítulo anterior, nessa situação, a carga pode apresentar um comportamento bastante peculiar, dependendo da sua composição. Geralmente, o caso mais crítico corresponde ao comportamento de cargas constituídas por uma grande quantidade de equipamentos controlados termostaticamente, como as cargas tipicamente residenciais. Nesse caso, o modelo empregado para a determinação de seu comportamento deve ser capaz de prever o possível aumento nos níveis de potência no instante da reenergização, dentre outras características descritas pela curva aproximada da Figura 2.1. De forma similar, o modelo deve permitir a representação de aspectos e parâmetros característicos tanto de cargas manualmente controladas, ou seja, de cargas tipicamente industriais (representadas na Figura 2.2) quanto de cargas predominantemente comerciais, que podem se assemelhar a parâmetros residenciais, industriais ou a uma combinação dos mesmos.

3.2. Modelos de Carga Convencionais

Existem modelos bastante difundidos na literatura [38, 39], visando a modelagem da carga sob condições normais de operação ou para a realização de estudos que levam em conta características dinâmicas do sistema elétrico e o fenômeno do colapso de tensão. Em todas essas situações, a modelagem da carga pode ser considerada como um problema bastante complexo, uma vez que existe uma grande variedade de cargas distribuídas ao

longo da rede elétrica; por um lado, a composição dessas cargas depende de variáveis como condições climáticas, dia da semana, época do ano, dentre outras e, por outro, é comum faltarem informações detalhadas referentes à composição dessas cargas, caracterizada por parcelas (ou porcentagens) associadas a seus diferentes tipos de consumidor (residencial, industrial e comercial). Basicamente, os principais modelos de carga descritos na literatura (para as aplicações citadas anteriormente) são denominados, neste trabalho, como **modelos convencionais** e classificados em duas categorias gerais: **modelos estáticos** e **modelos dinâmicos**.

Dentre os **modelos estáticos**, destacam-se o modelo ZIP (que corresponde a um modelo polinomial), o modelo Exponencial e os modelos dependentes da frequência. No modelo de carga **ZIP**, as potências nodais (ativa e reativa) são compostas por três diferentes parcelas: uma parcela associada à impedância constante (que varia quadraticamente com a magnitude da tensão nodal); uma parcela referente à corrente constante (que varia linearmente com a magnitude da tensão nodal) e uma parcela de potência constante (que não varia com a tensão nodal). Esse modelo está representado pelas equações (3.1) e (3.2).

$$P_L = P_0 \cdot \left[a + b \cdot \left(\frac{V}{V_0} \right) + c \cdot \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \quad (3.1)$$

$$Q_L = Q_0 \cdot \left[d + e \cdot \left(\frac{V}{V_0} \right) + f \cdot \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \quad (3.2)$$

Nessas equações, a , b , c , d , e e f são coeficientes que relacionam cada uma dessas parcelas às potências nodais P_L e Q_L (ativa e reativa, respectivamente) e P_0 , Q_0 e V_0 correspondem, respectivamente, aos valores nominais das potências ativa e reativa e da magnitude da tensão nodal.

No modelo **Exponencial**, as potências nodais ativa e reativa relacionam-se à magnitude da tensão nodal através de uma função exponencial, conforme descrito nas equações (3.3) e (3.4).

$$P_L = P_0 \cdot \left(\frac{V}{V_0} \right)^a \quad (3.3)$$

$$Q_L = Q_0 \cdot \left(\frac{V}{V_0} \right)^b \quad (3.4)$$

Nessas equações, P_L , Q_L , P_0 , Q_0 e V_0 correspondem a grandezas que já foram descritas no modelo ZIP e a e b são parâmetros que representam os expoentes dessas equações.

Finalmente, os **modelos dependentes da frequência**, permitem a inclusão, nas equações (3.1), (3.2), (3.3) e (3.4), de um fator de multiplicação (F) capaz de relacionar as potências nodais ativa e reativa à frequência da tensão nodal. Esse fator está representado pela equação (3.5).

$$F = [1 + a_f(f - f_0)], \quad (3.5)$$

Nessa equação, a_f corresponde ao coeficiente de sensibilidade do modelo; f é a frequência da tensão nodal e f_0 é a frequência nominal.

Dentre os **modelos dinâmicos**, um modelo de carga amplamente utilizado é o modelo **Dinâmico Exponencial**, no qual a potência nodal ativa apresenta uma dependência não-linear com relação à magnitude da tensão nodal, conforme representado pelas equações (3.6) e (3.7) [45].

$$T_p \cdot \frac{dP_r}{dt} + P_r = P_0 \cdot \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\alpha_s} - P_0 \cdot \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\alpha_r} \quad (3.6)$$

$$P_L = P_r + P_0 \cdot \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\alpha_t} \quad (3.7)$$

Nessas equações, P_0 e V_0 correspondem, respectivamente, à potência ativa nodal e à magnitude de tensão nodal; P_r corresponde à potência ativa de recuperação; T_p é a constante de tempo associada à recuperação de potência ativa; α_t reflete a dependência transitória entre a potência ativa e a magnitude da tensão; α_s reflete a dependência em

regime permanente entre a potência ativa e a magnitude da tensão e P_L corresponde à potência ativa nodal.

3.3. Modelos de Carga na Recomposição: Um Breve Histórico

Existe, na literatura, uma ampla gama de modelos utilizados para tentar representar o comportamento da carga, tanto **agregada** em alimentadores ou subestações quanto **individualmente** (em nível de equipamentos) durante a recomposição da rede elétrica. Da análise desses modelos, pode-se identificar a presença de, pelo menos, **três categorias de modelos**.

A **Categoria 1** pode ser identificada a partir de algumas referências [19, 21, 24, 25, 26, 27, 28] que tratam da modelagem fenomenológica individual (baseada no conhecimento das leis físicas que regem o fenômeno ou o funcionamento do equipamento) de diferentes equipamentos como motores e lâmpadas e da reenergização de equipamentos controlados termostaticamente em dias frios (mais comuns no hemisfério norte), quando existe uma grande quantidade de aquecedores ligados. Apesar desses modelos serem adequados para a representação do comportamento individual de diferentes tipos de equipamentos, eles não fornecem indicativos quanto ao comportamento da carga agregada que é a grandeza de real interesse durante a reenergização da rede elétrica.

A **Categoria 2** encontra-se representada em algumas referências [19, 22, 30] que, após a modelagem individual dos equipamentos, apresentam técnicas para a agregação desses modelos na tentativa de representar a carga agregada em um alimentador, subestação ou em uma área residencial, por exemplo. Essa agregação é realizada, na maior parte dos casos, através de métodos estatísticos aplicados às cargas que apresentam características e comportamentos dinâmicos similares. Dessa maneira, a aplicação desses métodos traz limitações para a representação do comportamento da carga agregada, uma vez que não preserva as características individuais de cada carga envolvida no processo de reenergização [21, 22, 24, 40].

Finalmente, a **Categoria 3** está relacionada a algumas referências [20, 30, 41] que tratam da modelagem da carga agregada, considerando-a como sendo composta por apenas

um tipo de consumidor como residencial, industrial ou comercial. Entretanto, na maioria dos casos, as parcelas que compõem a carga (referentes aos diferentes tipos de consumidor) são significativas e não devem ser desconsideradas em favor de apenas uma delas, conforme a referência [21].

Portanto, pode-se concluir que apesar desses modelos representarem avanços no problema da modelagem da carga durante a recomposição do sistema elétrico, enfocando parâmetros e aspectos diferentes em cada uma das três categorias descritas, todos eles apresentam limitações que podem acarretar distorções na previsão do comportamento desejado. Assim, o desenvolvimento de modelos e métodos capazes de superar essas limitações e de representar o comportamento da carga de forma mais precisa, torna-se uma tarefa de fundamental importância, constituindo-se no principal objetivo deste trabalho. Nesse contexto, é indispensável realizar uma análise detalhada das principais **técnicas e abordagens** de modelagem utilizadas, comumente, neste tipo de problema.

3.4. Técnicas de Modelagem

Este item trata das principais técnicas de modelagem empregadas para a obtenção de modelos representativos dos mais diferentes tipos de sistemas reais, ou seja, essas técnicas são utilizadas na modelagem de problemas de diferentes naturezas e, portanto, também podem ser empregadas para tentar representar, da forma mais fiel possível, o comportamento da carga na recomposição da rede elétrica. É importante ressaltar que um modelo possui algumas das características que representam o sistema real, mas não todas. Assim, pode-se dizer que um modelo desenvolvido para determinado sistema é uma **representação aproximada** do mesmo e, conseqüentemente, para tentar representar um sistema da forma mais precisa possível, é necessário, na maioria das vezes, o desenvolvimento de um **conjunto de modelos** que possuam diferentes características e, portanto, diferentes desempenhos [13].

3.4.1. Modelagem Matemática

Nos itens 3.4.1.1 e 3.4.1.2 são descritas as principais características das modelagens matemáticas “**caixa branca**” e “**caixa preta**”, destacando as vantagens e desvantagens relacionadas à sua aplicação.

3.4.1.1. Modelagem “Caixa Branca”

A modelagem “**caixa branca**” também é conhecida por modelagem **fenomenológica**, **conceitual** ou **pela física ou natureza do processo**. Esse tipo de modelagem baseia-se no **profundo conhecimento do comportamento físico do sistema** a ser modelado, bem como nas relações matemáticas que descrevem os fenômenos envolvidos no funcionamento desse sistema. É uma modelagem analítica, baseada em leis da Física, como, por exemplo, as leis de Newton ou as leis de Ohm. Entretanto, nem sempre é possível conhecer tão bem o comportamento do sistema real e, nesses casos, deve-se utilizar outras técnicas de modelagem matemática, como a modelagem “caixa preta” descrita a seguir.

3.4.1.2. Modelagem “Caixa Preta”

A modelagem “**caixa preta**” também é conhecida como modelagem **empírica** e tem como principal característica o fato de **não ser necessário o conhecimento do funcionamento do sistema real** para a determinação de um modelo matemático que o descreva. Esse tipo de modelagem começou a ser usado, de forma mais significativa, a partir de meados da década de 1990, devido, principalmente, à:

- Crescente necessidade de obtenção de modelos baseados em dados medidos (ou observados) e não apenas em equações utilizadas para descrever o sistema;
- Dificuldade em encontrar equações que descrevessem os sistemas reais, uma vez que são, muitas vezes, bastante complexos;

- Facilidade de acesso a computadores capazes de processar os dados medidos diretamente dos sistemas reais, até mesmo em tempo real.

Embora os modelos obtidos a partir da modelagem “caixa preta” sejam de determinação relativamente simples e de fácil utilização, esse tipo de modelagem apresenta algumas dificuldades, tais como [14]:

- Dificuldades na modelagem de sistemas com dinâmicas não-lineares;
- Problemas para medir variáveis ou sinais de extrema importância no comportamento do sistema;
- Presença de ruído nos dados medidos;
- Esse tipo de modelo tem validade limitada, ou seja, é válido para determinado ponto de operação, para determinada entrada, etc;
- Os parâmetros desse tipo de modelo não possuem significado físico.

3.4.2. Modelagem Heurística

A modelagem heurística é baseada em **regras** que associam certas **condições** (denominadas antecedentes ou variáveis de entrada) a determinadas **conclusões** (denominadas conseqüentes ou variáveis de saída). Essas regras são, geralmente, obtidas através de **experiência prática e prévia de especialistas no assunto**, possibilitando o desenvolvimento de uma **função não-matemática** para realizar o mapeamento de entrada-saída do sistema sob análise. Esse tipo de modelagem tem como vantagem a possibilidade de modelar sistemas complexos sem a necessidade de realização de simplificações, sendo utilizada em alguns sistemas inteligentes como, por exemplo, os sistemas especialistas. A principal diferença entre as modelagens matemática e heurística é que a primeira trata da modelagem do sistema ou processo em análise, enquanto que a modelagem heurística tenta **modelar o operador do sistema real** através da representação de seu conhecimento [16].

3.5. Abordagens para Modelagem da Carga

Os itens 3.5.1 e 3.5.2 tratam de duas abordagens bastante utilizadas no problema da modelagem da carga de uma forma geral. Essas abordagens referem-se a duas “visões” distintas que podem ser empregadas como ponto de partida para o desenvolvimento de modelos de carga durante a reenergização da rede elétrica. Por se tratarem de **abordagens genéricas**, podem ser **utilizadas para a elaboração tanto de modelos matemáticos** (“caixa branca” ou “caixa preta”) **quanto de modelos empíricos**.

3.5.1. Abordagem “Top-down”

A modelagem “top-down” consiste na obtenção de um modelo capaz de representar o comportamento dos componentes do sistema real quando agregados. Em outras palavras, essa abordagem focaliza o todo e procura decompô-lo em suas partes. No caso da modelagem da carga, essa abordagem possibilita a determinação de um **modelo para a carga agregada em uma subestação ou em um alimentador**, por exemplo. Apresenta a vantagem de dispensar a necessidade de um conhecimento profundo do funcionamento individual de cada equipamento para que o comportamento da carga de uma subestação seja determinado. Contudo, a abordagem “top-down” não permite a obtenção de modelos tão detalhados quanto os obtidos pela modelagem “bottom-up”, conforme será visto a seguir.

3.5.2. Abordagem “Bottom-up”

A modelagem “bottom-up” parte da determinação de modelos individuais para cada componente do sistema real. Ou seja, essa abordagem visa construir o todo a partir das partes. No caso da modelagem da carga, ela consiste na obtenção de **modelos individuais para os equipamentos e dispositivos que compõem a carga analisada** como, por exemplo, geladeiras, motores, aparelhos de ar condicionado e lâmpadas. Essa abordagem

tem como desvantagem a necessidade do conhecimento prévio acerca do funcionamento de cada equipamento que se deseja modelar, além da necessidade de aplicação de técnicas de agregação quando deseja-se conhecer, por exemplo, o comportamento da carga de uma residência (composta por vários equipamentos) ou de uma área residencial (composta por várias residências). Entretanto, esse tipo de modelagem possui a importante vantagem de permitir a construção de modelos mais detalhados para cada equipamento, resultando numa maior precisão quando sua agregação é realizada adequadamente.

3.6. Adequação dos Modelos e Abordagens ao Problema da Modelagem da Carga na Recomposição

Uma vez descritas as principais técnicas e abordagens que podem ser utilizadas no problema da modelagem da carga (itens 3.4 e 3.5), é importante a realização de uma análise de suas características fundamentais, visando verificar a adequação de cada possível metodologia ao problema de previsão do comportamento da carga durante a recomposição da rede elétrica. Essa análise é realizada neste item, levando-se em conta características intrínsecas ao processo de reenergização que podem influenciar na escolha da metodologia de modelagem (que compreende a técnica e a abordagem de modelagem a serem adotadas) mais adequada para atingir o objetivo proposto neste trabalho. Serão analisados, portanto, todos os tipos de métodos de previsão que podem ser derivados com base nas técnicas e abordagens descritas anteriormente. Essas metodologias podem ser classificadas nos seguintes grupos:

- **Grupo 1:** Metodologias Caixa-Branca Top-Down (MCBTD)→ nesse grupo pode ser incluído o Modelo Exponencial Dinâmico Top-Down;
- **Grupo 2:** Metodologias Caixa-Preta Top-Down (MCPTD)→ nesse grupo podem ser incluídos os Modelos ZIP Top-Down e Exponencial Top-Down;
- **Grupo 3:** Metodologias Heurísticas Top-Down (MHTD);
- **Grupo 4:** Metodologias Caixa-Branca Bottom-Up (MCBBU);

- **Grupo 5:** Metodologias Caixa-Preta Bottom-Up (MCPBU)→ nesse grupo podem ser incluídos os Modelos ZIP Bottom-Up e Exponencial Bottom-Up e
- **Grupo 6:** Metodologias Heurísticas Bottom-Up (MHBU).

A análise é conduzida com relação a **três aspectos** fundamentais que refletem a adequação da metodologia de modelagem do comportamento da carga na recomposição e que, portanto, devem ser considerados na sua escolha: **tipo de informação requerida, complexidade da modelagem e capacidade de representação de fenômenos físicos**.

O primeiro aspecto refere-se ao principal **tipo de informação** que é requerida por cada um dos métodos analisados. Basicamente, existem três tipos de informação que podem ser empregados.

- O primeiro tipo corresponde a **medições** de grandezas referentes ao sistema elétrico em recomposição, como potências ativa e reativa e magnitude de tensão. Esse tipo de informação nem sempre é fácil de ser obtido, uma vez que, durante o processo de reenergização, o sistema de aquisição dessas medições pode ser afetado, comprometendo, assim, a coleta desses dados (perda de observabilidade).
- O segundo tipo de informação está associado ao **conhecimento a priori dos fenômenos físicos** referentes ao funcionamento de equipamentos ou ao comportamento de uma carga agregada como, por exemplo, o conhecimento dos fenômenos inerentes ao comportamento de uma carga tipicamente residencial, que possui diversos parâmetros relacionados à perda parcial de diversidade do estado dos equipamentos controlados termostaticamente. Apesar desse tipo de conhecimento não ser trivial, ele pode ser obtido através da realização de análises e estudos que não dependem de uma massa de dados medidos como no caso anterior.
- O terceiro tipo de informação corresponde ao **conhecimento que pode ser extraído dos operadores, técnicos e engenheiros** dos centros de controle das concessionárias de energia, acerca da experiência acumulada, ao longo dos anos, relacionada a processos de reenergização ocorridos após blecautes. Esse

conhecimento pode ser convertido em **regras** que podem, então, “guiar” a modelagem a ser realizada.

Portanto, pode-se concluir que o tipo de informação mais difícil de ser obtido corresponde às medições em condições de recomposição, acarretando dificuldades no emprego de modelos que se utilizam das mesmas, como os modelos “caixa-preta” (tanto na abordagem “top-down” quanto na abordagem “bottom-up”), descritos anteriormente. Os demais tipos de dados são mais fáceis de serem obtidos, sendo que as regras ainda dependem de informações disponibilizadas por especialistas, mas o conhecimento dos fenômenos físicos pode ser obtido através de consultas à literatura, uma vez que esses fenômenos encontram-se descritos em diversas referências bibliográficas. A Figura 3.1 ilustra a relação entre os diferentes tipos de informação e os seis grupos de metodologias descritas anteriormente.

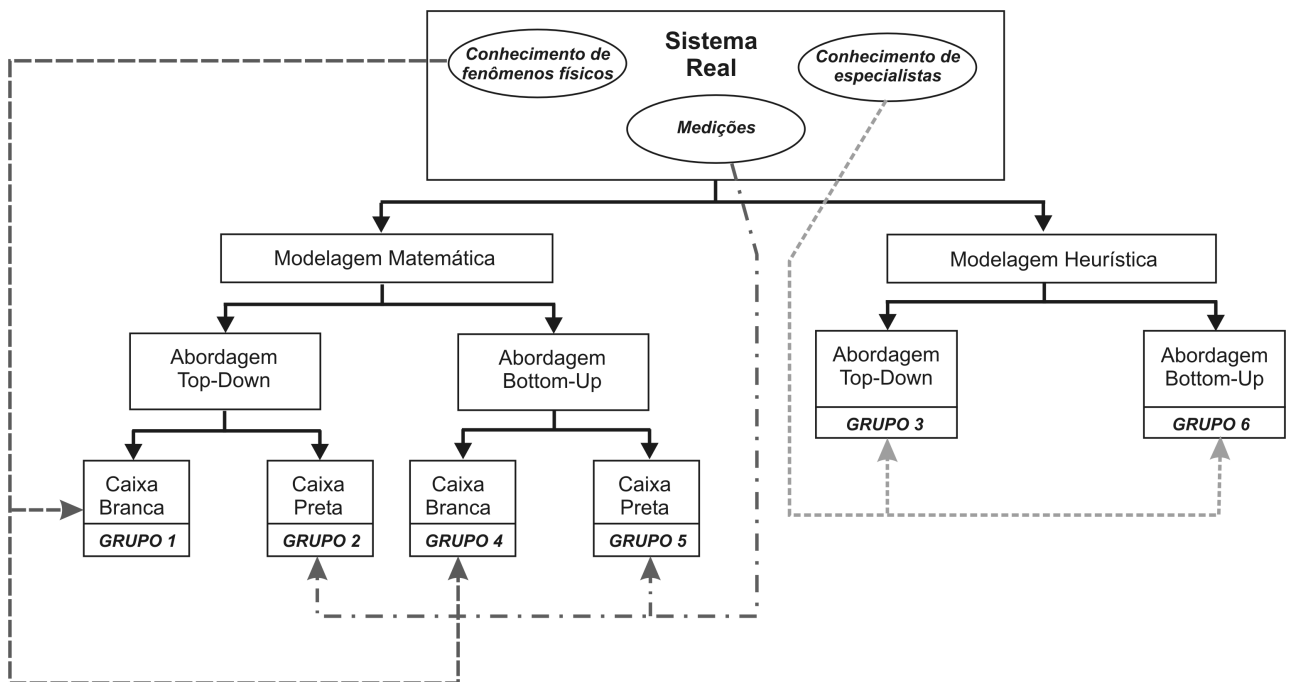


Figura 3.1: Relação entre tipos de informação e metodologias de modelagem

O segundo aspecto a ser analisado é a **complexidade da modelagem** que, neste trabalho, está diretamente associada ao esforço computacional requerido para o processamento dos dados e informações empregados na utilização da metodologia de previsão do comportamento da carga. De forma simplificada, pode-se verificar que essa complexidade cresce à medida que são introduzidos, nas metodologias, equações e cálculos que permitem a representação mais precisa dos fenômenos físicos envolvidos.

Finalmente, o terceiro e mais importante aspecto a ser considerado consiste na **capacidade de representação de fenômenos físicos**, que é a principal preocupação na modelagem da carga, especificamente durante o processo de reenergização, uma vez que, conforme descrito anteriormente, a representação inadequada ou imprecisa desses fenômenos pode levar a uma retomada de carga incorreta e, conseqüentemente, reiniciar o blecaute.

A Figura 3.2 representa, de forma qualitativa, a adequação das diferentes metodologias abordadas neste capítulo, considerando os aspectos descritos anteriormente, à situação de recomposição de sistemas de energia elétrica. Quanto maior o número de estrelas, maior o grau de adequação do aspecto analisado com relação às características do processo de reenergização.

Metodologias	Obtenção da Informação	Complexidade do Modelo	Representação de fen. físicos
GRUPO 1: MCBTD Caixa-Branca Top-Down	☆☆☆ Conhecimento do fen. físico	☆ Muitos cálculos e equações	☆☆☆ Alta capacidade de representação
GRUPO 2: MCPTD Caixa-Preta Top-Down	☆ Medições	☆☆☆ Cálculos simples (paramétricos)	☆ Baixa capacidade de representação
GRUPO 3: MHTD Heurística Top-Down	☆☆ Conhecimento de especialistas	☆☆☆ Implicações lógicas	☆☆☆ Alta capacidade de representação
GRUPO 4: MCBBU Caixa-Branca Bottom-Up	☆☆☆ Conhecimento do fen. físico	☆ Muitos cálculos e equações	☆☆☆ Alta capacidade de representação
GRUPO 5: MCPBU Caixa-Preta Bottom-Up	☆ Medições	☆☆☆ Cálculos simples (paramétricos)	☆ Baixa capacidade de representação
GRUPO 6: MHB Heurística Bottom-Up	☆☆ Conhecimento de especialistas	☆☆ Muitas implicações lógicas	☆☆ Média capacidade de representação

☆☆☆	Alto grau de adequação
☆☆	Médio grau de adequação
☆	Baixo grau de adequação

Figura 3.2: Adequação das metodologias ao processo de recomposição

Assim, uma modelagem “ideal” para a representação do comportamento da carga durante a reenergização da rede elétrica deve requerer informações que possam ser facilmente obtidas (conhecimento prévio de fenômenos físicos ou regras extraídas do conhecimento de especialistas), deve apresentar baixa complexidade de cálculos e deve ser capaz de representar, de forma adequada, os principais fenômenos físicos relacionados à recomposição da carga.

Além desses três importantes aspectos, a escolha da metodologia deve contemplar a possível necessidade de representação do comportamento da carga em diferentes níveis hierárquicos e de detalhamento. Isso implica na escolha de métodos que permitam modelar características associadas ao comportamento tanto da carga agregada quanto de equipamentos individualmente. Dessa forma, deve-se atentar para a escolha de não um só modelo, mas para um conjunto de modelos que possibilite a representação dessas características. Esse objetivo pode ser atingido através da escolha de uma abordagem “top-down”, para modelar o comportamento da carga agregada, e de uma abordagem “bottom-up” para também modelar o comportamento da carga agregada, mas partindo da representação do comportamento individual de diferentes tipos de equipamentos.

Considerando-se, então, todos esses aspectos e analisando a Figura 3.2, pode-se concluir que para o caso da **abordagem “top-down”**, a **Metodologia Heurística Top-Down (Grupo 3)** pode ser considerada como sendo a mais adequada, por se aproximar da definição de modelagem “ideal” descrita anteriormente, uma vez que as informações requeridas são baseadas em regras extraídas da experiência de especialistas (de obtenção relativamente fácil), a complexidade associada à modelagem é baixa (característica de modelagens heurísticas) e a capacidade de representação de fenômenos físicos é elevada (tão elevada quanto a precisão e qualidade das regras elaboradas).

Já para o caso da **abordagem “bottom-up”**, alguma dúvida pode ser gerada entre a escolha da Metodologia Heurística Bottom-Up (Grupo 6) e da Metodologia Caixa-Branca Bottom-Up (Grupo 4). Entretanto, considera-se que o aspecto mais importante na escolha dos métodos de modelagem do comportamento da carga consiste na capacidade de representação de fenômenos físicos, por razões citadas previamente neste mesmo item. Neste trabalho, considerou-se que no caso da modelagem do comportamento individual dos

equipamentos, o conhecimento dos operadores dos centros de controle pode não ser suficiente para a representação adequada do funcionamento dos mesmos, uma vez que estão familiarizados, geralmente, com o comportamento de cargas agregadas e não individuais. Essa característica pode ser observada na Figura 3.2, com relação ao grau de adequação associado à capacidade de representação de fenômenos físicos das Metodologias Heurísticas Bottom-Up (médio grau de adequação). Assim, a escolha da **Metodologia Caixa-Branca Bottom-Up** para a representação do comportamento da carga, nesse nível hierárquico, pode ser considerada como sendo a mais adequada, apesar da complexidade associada à mesma ser maior que a da Metodologia Heurística Bottom-Up. A elaboração dos dois métodos selecionados para previsão do comportamento da carga durante a recomposição da rede elétrica é abordada, em detalhes, nos Capítulos 4 e 5.

Capítulo 4

Metodologia Heurística Top-Down

Este capítulo trata do desenvolvimento de uma Metodologia Heurística Top-Down que seja capaz de representar o comportamento da **carga agregada** (em um alimentador ou subestação) durante o processo de recomposição **até a retomada do regime permanente**. Esse comportamento pode ser representado por alguns parâmetros, descritos no Capítulo 2, que refletem os principais fenômenos físicos, inerentes ao processo de restabelecimento de cargas, e as diferenças no comportamento de diversos tipos de carga nessa situação.

Assim, a idéia central na elaboração desse método consiste na determinação desses parâmetros, a partir da utilização do conhecimento de especialistas, considerando a carga agregada como sendo composta por **parcelas associadas a três grupos de consumidores (residencial, industrial e comercial)**, denominadas **parcelas de consumo**, em que pode haver a predominância ou não de um deles.

4.1. Parâmetros Físicos

Conforme descrito no Capítulo 2, pode-se definir algumas curvas aproximadas que caracterizam o comportamento de diferentes tipos de carga, classificadas de acordo com seu tipo de controle, durante a reenergização. As Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 representam

essas curvas aproximadas (para os diferentes tipos de carga) já descritas no Capítulo 2, mas reproduzidas, aqui, para conveniência do leitor.

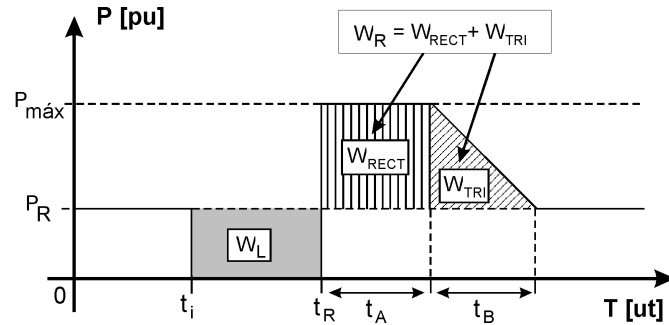


Figura 4.1: Comportamento agregado de cargas controladas termostaticamente durante a recomposição

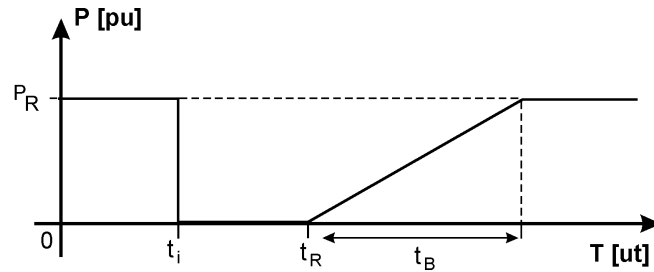


Figura 4.2: Comportamento de cargas controladas manualmente durante a recomposição

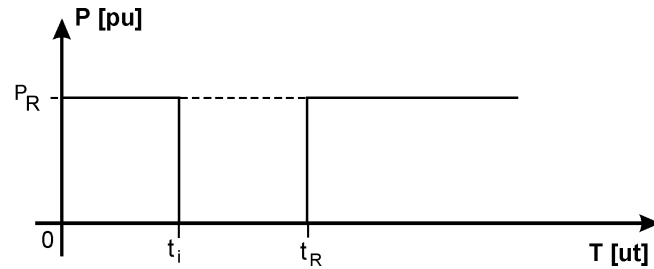


Figura 4.3: Comportamento de cargas fixas durante a recomposição

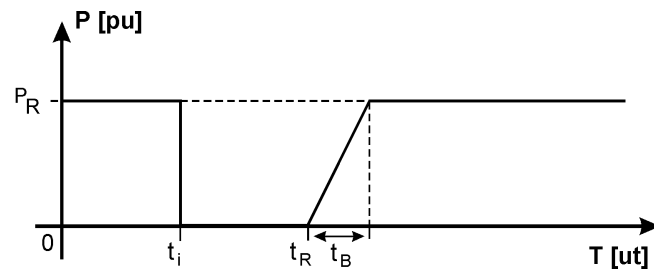


Figura 4.4: Comportamento de cargas fixas durante a recomposição – Lâmpadas de sódio e de mercúrio

Nessas figuras, t_i corresponde ao momento em que ocorreu a interrupção no fornecimento de energia, t_R é o instante em que ocorreu a reenergização, t_A corresponde ao tempo necessário (a partir de t_R) até o início da retomada da diversidade do estado dos dispositivos controlados termostaticamente, t_B é o tempo necessário (a partir de t_A no caso dos dispositivos controlados termostaticamente e a partir de t_R no caso dos equipamentos controlados manualmente) para a retomada do regime permanente, $P_{máx}$ é o nível de potência no momento do religamento (para os equipamentos controlados termostaticamente) e P_R corresponde ao nível de potência em regime permanente após a reenergização. Em todas as curvas, pode-se notar que o nível de potência antes da ocorrência do blecaute é igual ao nível de potência (em regime permanente) após a reenergização. Entretanto, dependendo de algumas variáveis como, por exemplo, a duração da interrupção ($t_R - t_i$), esses níveis podem ser bastante distintos. Da análise dessas figuras, pode-se observar que esses parâmetros, que descrevem os principais fenômenos físicos durante o restabelecimento de energia, dependem do tipo de carga, conforme descrito na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Relação entre parâmetros físicos e tipos de carga

Tipo de carga	Parâmetros Físicos
Controladas Termostaticamente	t_A , t_B , $P_{máx}$ e P_R
Controladas Manualmente	t_B e P_R
Fixas	P_R
Fixas – Lâmpada de Sódio e de Mercúrio	t_B e P_R

Entretanto, o objetivo da elaboração desse método heurístico é a representação do comportamento da carga de acordo com sua composição, em termos das diferentes parcelas de consumo. Assim, torna-se necessária a realização de uma análise que possibilite a associação entre as parcelas de consumo da carga e os tipos de carga (quanto ao tipo de controle) que a constituem. A Tabela 4.2 apresenta essa associação, além da representação dos principais tipos de equipamentos e parâmetros físicos relacionados a cada tipo de carga.

Tabela 4.2: Relação entre parâmetros físicos e parcelas de consumo

Parcelas de Consumo	Tipos de Carga (quanto ao controle)
Parcela Residencial	<u>Controladas Termostaticamente:</u> geladeiras, freezers e aparelhos de ar-condicionado $\rightarrow t_A, t_B, P_{\text{máx}}$ e P_R <u>Fixas:</u> computadores, equipamentos eletro-eletrônicos, lâmpadas (incandescentes e fluorescentes) e chuveiros $\rightarrow P_R$
Parcela Industrial	<u>Controladas Termostaticamente:</u> geladeiras, freezers e aparelhos de ar-condicionado $\rightarrow t_A, t_B, P_{\text{máx}}$ e P_R <u>Controladas Manualmente:</u> máquinas e equipamentos com motores que possuem dispositivos de desligamento automático $\rightarrow t_B$ e P_R <u>Fixas:</u> computadores, equipamentos eletro-eletrônicos e lâmpadas (incandescentes e fluorescentes) $\rightarrow P_R$
Parcela Comercial	<u>Controladas Termostaticamente:</u> geladeiras, freezers e aparelhos de ar-condicionado $\rightarrow t_A, t_B, P_{\text{máx}}$ e P_R <u>Controladas Manualmente:</u> máquinas e equipamentos com motores que possuem dispositivos de desligamento automático $\rightarrow t_B$ e P_R <u>Fixas:</u> computadores, equipamentos eletro-eletrônicos e lâmpadas (incandescentes e fluorescentes) $\rightarrow P_R$

Uma vez que as lâmpadas de sódio e de mercúrio são utilizadas, geralmente, para a iluminação pública, seu comportamento não foi considerado na composição de nenhuma das três parcelas de consumo analisadas. Além disso, os aquecedores também não foram considerados, uma vez que, no Brasil, com exceção de algumas regiões no sul do país, esses equipamentos não são usualmente utilizados, mesmo nos dias mais frios. Finalmente, é importante ressaltar que os chuveiros foram considerados como sendo cargas fixas, pois apesar de apresentarem um controle manual (na eventual ocorrência de uma interrupção são desligados e ligados, manualmente, somente após a normalização do abastecimento de energia), seu comportamento durante o processo de reenergização segue a curva representada pela Figura 4.3 (cargas fixas).

4.2. Metodologia Proposta

A idéia central do desenvolvimento deste método consiste na **determinação do comportamento descrito por curvas aproximadas** (definidas por segmentos de retas) e dos respectivos parâmetros físicos referentes a uma carga global agregada (em uma

subestação ou alimentador), composta por diferentes **categorias de carga agregada**, associadas às parcelas de consumo residencial, industrial e comercial.

Entende-se, aqui, por **categoria de carga agregada**, um conjunto de consumidores, em um mesmo alimentador, cujos **perfis de consumo apresentam um razoável grau de similaridade**. Tomando-se como exemplo um alimentador composto por parcelas associadas ao consumo residencial e industrial, pode-se considerar que todos os consumidores residenciais podem ser tratados como uma única carga agregada, pois seus perfis de consumo são similares o suficiente para viabilizar essa agregação. Por outro lado, se nesse mesmo alimentador estiverem presentes atividades industriais de natureza muito diferente (por exemplo, fabricação de móveis de madeira e fabricação de produtos de padaria), essa agregação torna-se inviável e, dependendo do seu porte (nível de consumo), cada uma das indústrias pode ser caracterizada, separadamente, como uma carga agregada. Assim, para esse exemplo, a carga agregada no alimentador pode ser considerada como sendo composta por três categorias de carga agregada: consumidores residenciais (categoria *Res*), indústria de fabricação de móveis de madeira e indústria de fabricação de produtos de padaria (categorias *Ind1* e *Ind2* respectivamente). Essas categorias podem ser representadas através da definição do conjunto “*Cat*”, composto pelas categorias de carga agregada do alimentador (ou subestação) em análise. Para o exemplo citado, o conjunto “*Cat*” pode ser representado como segue:

$$Cat = [Res, Ind1, Ind2] \quad (4.1)$$

Entretanto, para facilitar o entendimento da metodologia proposta, considera-se, doravante, que existe apenas uma categoria de carga agregada associada a cada uma das três parcelas de consumo (residencial, industrial e comercial), conforme descrito pela expressão a seguir:

$$Cat = [Res, Ind, Com] \quad (4.2)$$

A estratégia geral da metodologia de modelagem pode ser resumida nos seguintes pontos:

- (a) o objetivo final é obter a curva (aproximada) de comportamento pós-reenergização da carga agregada correspondente a uma subestação de distribuição;
- (b) parte-se de dados gerais da subestação, da composição percentual de cada parcela de consumo (residencial, industrial e comercial), bem como dos dados de segmentação nos vários tipos de carga quanto a seu controle (cargas controladas termostaticamente, cargas controladas manualmente e cargas fixas). Todos esses dados são relacionados a uma **situação normal de operação** (sem ocorrência de interrupções) → *Etapa 1*;
- (c) considera-se as variáveis que caracterizam o blecaute (“temperatura ambiente” e “hora do dia”) e as variáveis que definem os parâmetros das curvas de comportamento (níveis de potência e tempos) como **variáveis nebulosas** (ou fuzzy) descritas por qualificativos lingüísticos → *Etapa 1*;
- (d) constrói-se uma **base de regras nebulosas** (base de conhecimento) que representem a influência das variáveis “temperatura ambiente” e “hora do dia” nas variáveis “níveis de potência” e “tempos” → *Etapa 1*;
- (e) determinam-se as **curvas de comportamento** da carga agregada **em diferentes níveis hierárquicos** → *Etapas 2 e 3*;
- (f) agregam-se (ponto a ponto) as curvas de comportamento anteriores, obtendo-se a **curva de comportamento da carga agregada global associada à subestação** → *Etapa 3*.

A metodologia é implementada em três etapas, como segue.

A **Primeira Etapa** consiste na determinação dos parâmetros físicos das cargas, classificadas quanto ao tipo de controle, para cada uma das categorias de carga agregada de forma separada. A Figura 4.5 ilustra essa Primeira Etapa, onde os índices “CT”, “CM” e “F” estão associados, respectivamente, às cargas controladas termostaticamente, manualmente e fixas e os índices “Res”, “Ind” e “Com” referem-se às categorias de carga agregada que compõem o conjunto “Cat”. Dessa maneira, o índice “CTRes” está associado às cargas controladas termostaticamente da primeira categoria de carga agregada,

representada na expressão (4.2). O índice “*FInd*” refere-se às cargas fixas da segunda categoria de carga agregada, representada nessa mesma expressão, e assim por diante. Além disso, os dados referentes às parcelas de consumo residencial, industrial e comercial, definidos como dados de entrada dessa Primeira Etapa, encontram-se descritos, com maiores detalhes, no item 4.2.1.1.

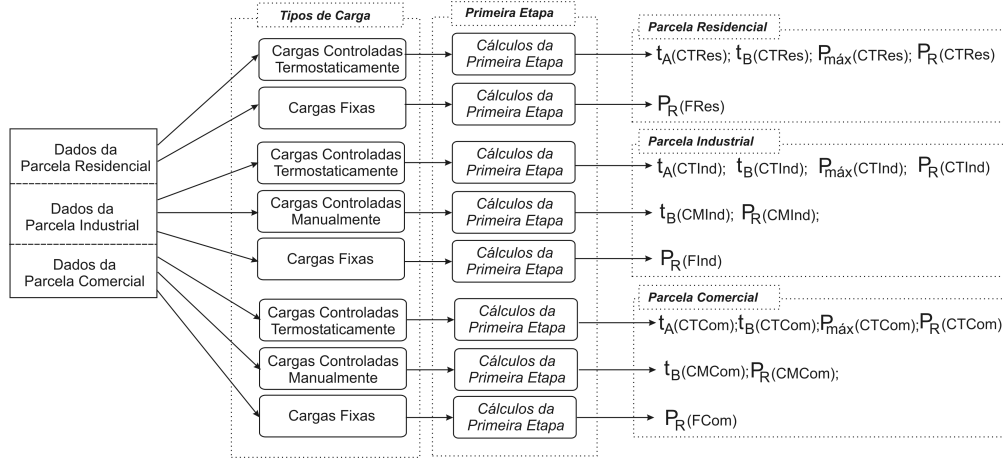


Figura 4.5: Primeira Etapa da metodologia proposta

A **Segunda Etapa** consiste na determinação, a partir desses parâmetros, da curva aproximada para cada grupo de equipamentos do mesmo tipo. A Figura 4.6 ilustra essa Segunda Etapa.

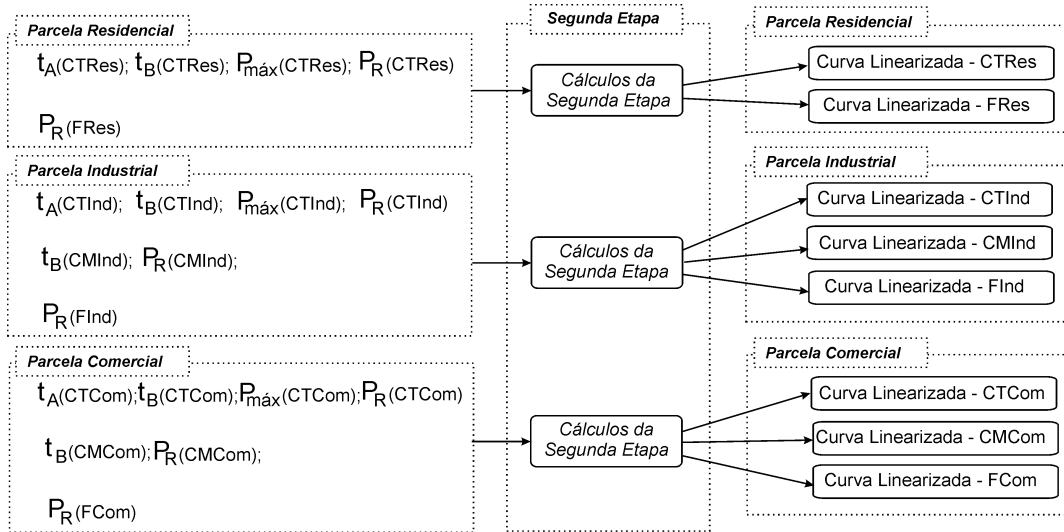


Figura 4.6: Segunda Etapa da metodologia proposta

Finalmente, a **Terceira Etapa** corresponde a uma etapa de agregação que visa a obtenção da curva aproximada que descreve o comportamento da carga agregada em uma subestação ou alimentador a partir das curvas obtidas na etapa anterior. A Figura 4.7 ilustra essa Terceira Etapa.

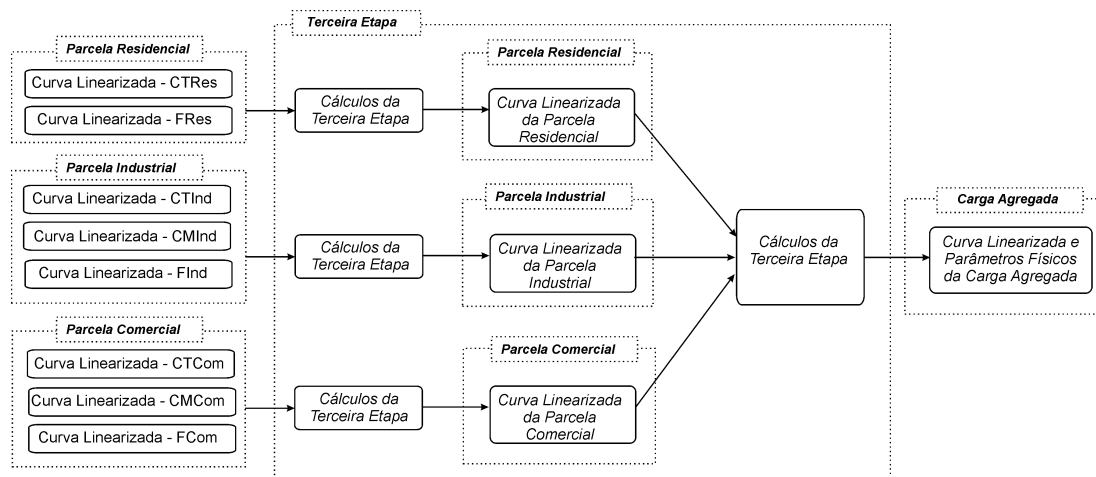


Figura 4.7: Terceira Etapa da metodologia proposta

A Figura 4.8 sintetiza todas as etapas do processo de obtenção da curva aproximada e dos parâmetros físicos relacionados à carga agregada.

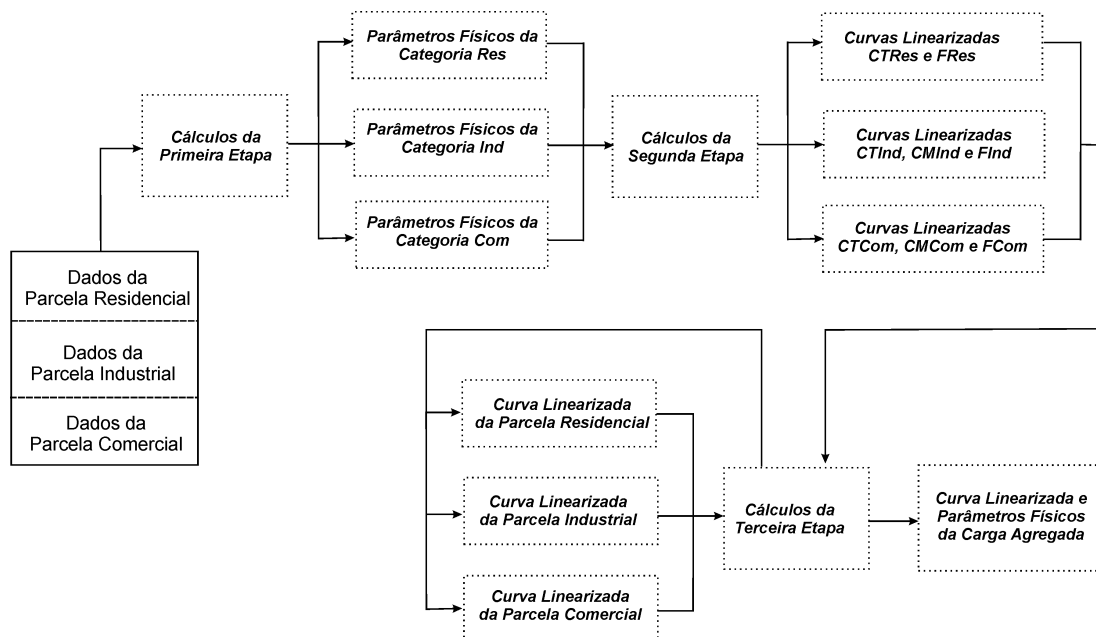


Figura 4.8: Processo de obtenção do comportamento da carga agregada

Os itens, a seguir, tratam da descrição mais detalhada dessas etapas.

4.2.1. Primeira Etapa

A Primeira Etapa da metodologia de modelagem proposta é constituída por duas sub-etapas de cálculos, denominadas de “**Cálculos Preliminares**” e “**Cálculos da Primeira Etapa**”, que serão descritas nos itens 4.2.1.1 e 4.2.1.2.

4.2.1.1. Cálculos Preliminares

A) Dados de Entrada:

A Etapa de Cálculos Preliminares usa como dados de entrada informações referentes às parcelas residencial, industrial e comercial que compõem a carga agregada. A metodologia a ser descrita considera, como dados de entrada, informações associadas à carga agregada em **uma subestação**. Entretanto, a mesma metodologia pode ser aplicada, considerando-se a carga agregada em um alimentador (ou em outros níveis), desde que os dados necessários para o desenvolvimento do método estejam disponíveis.

Assim, no caso da **modelagem da carga agregada em uma subestação de distribuição**, essa etapa tem como **dados de entrada** as seguintes informações, levando-se em conta que se deseja determinar o comportamento da carga agregada na Subestação Z (SEZ):

1) Curva diária de potência ativa da SEZ. Essa grandeza é representada por $P_{SEZ}(t)$ e pode ser obtida a partir da disponibilização, por parte da concessionária de energia, de medições registradas durante o período de um dia inteiro (24 horas).

2) Consumo de energia associado à curva diária de potência ativa da SEZ. Esse dado de entrada, representado por C_{SEZ} , é calculado a partir da seguinte equação:

$$C_{SEZ} = \int_0^{24h} P_{SEZ}(t) dt \quad (4.3)$$

3) Consumo médio mensal da SEZ. Essa informação, representada por C_{MSEZ} , é obtida diretamente dos dados de medição da concessionária de energia elétrica e corresponde à média de consumo de energia da SEZ nos últimos 12 meses, em MWh. O índice “M” indica um valor médio (nesse caso, o consumo).

4) Consumo médio mensal associado a cada parcela de consumo da SEZ. Essa informação, representada por $C_{MParSEZ}$, também é obtida diretamente dos dados de medição da concessionária de energia elétrica. O índice “Par” refere-se ao conjunto composto pelas três diferentes parcelas de consumo da SEZ (parcela residencial ou “Pres”, parcela industrial ou “Pind” e parcela comercial ou “Pcom”), ou seja, $C_{MPresSEZ}$, $C_{MPindSEZ}$ e $C_{MPcomSEZ}$ correspondem, respectivamente aos consumos médios mensais das parcelas residencial, industrial e comercial da SEZ.

5) Composição da SEZ. Essa informação, representada pelo vetor $comp_{SEZ}$, é calculada através das seguintes equações:

$$\alpha_{SEZ} = \frac{C_{MPresSEZ}}{C_{MSEZ}} \quad (4.4)$$

$$\beta_{SEZ} = \frac{C_{MPindSEZ}}{C_{MSEZ}} \quad (4.5)$$

$$\gamma_{SEZ} = \frac{C_{MPcomSEZ}}{C_{MSEZ}} \quad (4.6)$$

em que α_{SEZ} , β_{SEZ} e γ_{SEZ} correspondem às porcentagens (que caracterizam a composição da SEZ) relacionadas às parcelas de consumo residencial, industrial e comercial, respectivamente, da SEZ. Com base nessas porcentagens, pode-se definir o vetor:

$$comp_{SEZ} = \begin{bmatrix} \alpha_{SEZ} \\ \beta_{SEZ} \\ \gamma_{SEZ} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

6) Consumo médio mensal de um único equipamento. Essa grandeza, representada por C_{MIEq} , é obtida a partir de tabelas disponíveis na literatura [15]. O índice “Eq” refere-se ao conjunto dos equipamentos a serem considerados na modelagem da carga agregada. Por exemplo, se $Eq = [G, Fr, AC, Li, Lf, C, Maq]$, os índices “G”, “Fr”, “AC”, “Li”, “Lf”, “C” e “Maq” referem-se, respectivamente, aos equipamentos geladeira, freezer, aparelho de ar condicionado, lâmpada incandescente, lâmpada fluorescente, chuveiro e máquina industrial. Assim, C_{MIG} é o consumo médio mensal de uma geladeira, C_{MIFr} é o consumo médio mensal de um freezer, etc.

7) Consumo médio mensal de um grupo de equipamentos de um mesmo tipo para uma mesma categoria de carga agregada. Essa informação, representada por C_{MEq} , é de forma direta (a partir de medições ou de tabelas disponíveis na literatura [15]), ou pode ser calculada com base no valor de C_{MIEq} , através da seguinte expressão:

$$C_{MEq} = n_{Eq} \cdot \lambda \cdot C_{MIEq} = n_{Cat} \cdot n_{equip1Cat} \cdot \lambda \cdot C_{MIEq} \quad (4.8)$$

em que n_{Eq} corresponde ao número médio de equipamentos de um mesmo tipo dentro de uma categoria de carga agregada; n_{Cat} corresponde ao número de consumidores de uma determinada categoria de carga agregada; $n_{equip1Cat}$ corresponde ao número de equipamentos de um mesmo tipo presentes em um consumidor de uma categoria de carga agregada e λ é o fator de penetração do tipo de equipamento em questão no universo de consumidores que compõe a categoria de carga agregada em análise.

Essas grandezas podem ser obtidas a partir de tabelas disponíveis na literatura e de dados da concessionária de energia (inclusive levantados em campo) [17, 42, 43]. Considerando-se, por exemplo, o cálculo do consumo médio mensal relacionado às geladeiras da categoria de carga agregada *Res* (C_{MG}) e utilizando-se $C_{MIG} = 45$ kWh, referente ao consumo médio mensal de uma geladeira residencial, $n_{Res} = 10500$ (número de residências que compõem a categoria de carga agregada *Res*), $n_{GIRes} = 1$ (número de

geladeiras presentes em uma residência da categoria de carga agregada Res) e $\lambda_G = 87,3\%$, referente ao percentual médio de residências com geladeira no Brasil, tem-se: $C_{MG} = (10500).(1).(0,873).(45) = 412492,5 \text{ kWh}$.

8) Consumo médio mensal de uma determinada categoria de carga agregada. Essa grandeza, representada por C_{MCat} , também é determinada através de consulta a tabelas disponíveis na literatura ou dos dados de faturamento da concessionária de energia [17].

9) Consumo médio mensal de um consumidor de uma determinada categoria de carga agregada. Essa grandeza, representada por C_{M1Cat} , pode ser obtida diretamente de tabelas da literatura, de dados da concessionária de energia ou pode ser calculada através da seguinte equação:

$$C_{M1Cat} = \frac{C_{MCat}}{n_{Cat}} \quad (4.9)$$

10) Composição de uma determinada parcela de consumo. Essa informação, representada pelo vetor $comp_{Par}$, pode ser calculada a partir das seguintes expressões:

$$comp_{Par} = \begin{bmatrix} \varphi_{Cat1} \\ \varphi_{Cat2} \\ \varphi_{Cat3} \\ \vdots \\ \varphi_{CatN} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

em que os índices $Cat1$, $Cat2$, etc., correspondem às diversas categorias de carga agregada que compõem uma mesma parcela de consumo e o índice N refere-se ao número total dessas diferentes categorias de carga agregada. φ_{CatN} corresponde à porcentagem representativa da categoria de carga agregada N dentro da parcela de consumo Par . Essa informação pode ser calculada a partir da equação a seguir:

$$\varphi_{CatN} = \frac{C_{MCatN}}{C_{MPar}} \quad (4.11)$$

Considerando os conjuntos Par e Cat adotados, anteriormente, como exemplo neste trabalho, tem-se que:

$$Par = [Pres, Pind, Pcom] \text{ e } Cat = [Res, Ind, Com]$$

$$comp_{Pres} = [\phi_{Res}] = 1 \quad (4.12)$$

$$comp_{Pind} = [\phi_{Ind}] = 1 \quad (4.13)$$

$$comp_{Pcom} = [\phi_{Com}] = 1 \quad (4.14)$$

11) Ciclo termostático dos diferentes equipamentos controlados termostaticamente de determinada categoria de carga agregada. Essa grandeza, representada por t_{EqCat} , pode ser extraída de tabelas encontradas na literatura [42].

12) Tempo ligado do ciclo termostático dos diferentes equipamentos controlados termostaticamente de determinada categoria de carga agregada. Essa informação, representada por $t_{onEqCat}$, pode ser obtida diretamente de tabelas encontradas na literatura [42] ou pode ser calculada a partir da seguinte equação:

$$t_{onEqCat} = perc_{onEqCat} \cdot t_{EqCat} \quad (4.15)$$

em que $perc_{onEqCat}$ corresponde ao percentual de tempo (com relação à duração do ciclo termostático) durante o qual o equipamento permanece ligado. Essa grandeza pode, também, ser extraída da literatura [42].

13) Tempo desligado do ciclo termostático dos diferentes equipamentos controlados termostaticamente de determinada categoria de carga agregada. Essa informação, representada por $t_{offEqCat}$, pode ser obtida diretamente de tabelas encontradas na literatura [42] ou pode ser calculada a partir da seguinte equação:

$$t_{offEqCat} = perc_{offEqCat} \cdot t_{EqCat} \quad (4.16)$$

em que $perc_{offEqCat}$ corresponde ao percentual de tempo (com relação à duração do ciclo termostático) durante o qual o equipamento permanece desligado. Essa grandeza pode, também, ser extraída da literatura [42]. É importante ressaltar que independentemente da maneira com que foram obtidos os dados referentes ao ciclo termostático dos equipamentos, deve-se obedecer a relação $t_{EqCat} = t_{onEqCat} + t_{offEqCat}$.

14) Tipo de indústria predominante em determinada categoria de carga agregada. Essa informação, representada por $tipo_{IndústriaPredomCat}$, pode ser obtida a partir de dados da concessionária de energia.

15) Tipo de comércio predominante em determinada categoria de carga agregada. Essa informação, representada por $tipo_{ComércioPredomCat}$, pode ser obtida a partir de dados da concessionária de energia.

A Tabela 4.3 sintetiza os dados de entrada utilizados para a realização dos “Cálculos Preliminares”, relacionando-os com sua origem (forma de obtenção dos dados).

Tabela 4.3: Dados de entrada e sua origem

Dado de Entrada	Origem
$P_{SEZ}(t)$	Medições da concessionária de energia
C_{SEZ}	Cálculos – equação (4.3)
C_{MSEZ}	Dados de medição da concessionária de energia
$C_{MParSEZ}$	Dados de medição da concessionária de energia
$comp_{SEZ}$	Cálculos – equação (4.7)
C_{M1Eq}	Tabelas da literatura – referência [15]
C_{MEq}	Tabelas da literatura – referência [15] ou Cálculos – equação (4.8)
C_{MCat}	Tabelas da literatura – referência [17] ou Dados de faturamento da concessionária de energia
C_{M1Cat}	Tabelas da literatura – referência [15, 17] ou Cálculos – equação (4.9)
$comp_{Par}$	Cálculos – equação (4.10)
t_{EqCat}	Tabelas da literatura – referência [42]
$t_{onEqCat}$	Tabelas da literatura – referência [42] ou Cálculos – equação (4.15)
$t_{offEqCat}$	Tabelas da literatura – referência [42] ou Cálculos – equação (4.16)
$tipo_{IndústriaPredomCat}$	Dados da concessionária de energia
$tipo_{ComércioPredomCat}$	Dados da concessionária de energia

B) Cálculos e Algoritmo:

Com base nesses dados, são realizados, então, os cálculos que visam a obtenção de uma **estimativa da contribuição**, em termos de potência ativa, **de cada grupo de equipamento do mesmo tipo, na potência média de cada uma das categorias de carga agregada associadas às diferentes parcelas de consumidor**. Ou seja, deve-se obter P_{MEqCat} , em que o índice “M” refere-se ao valor médio da potência ativa e os índices Eq e Cat foram definidos anteriormente. Essas grandezas são determinadas a partir dos dados de entrada, descritos previamente, e do seguinte algoritmo:

Passo 1: Determinação da potência ativa média da subestação em análise (SEZ)

$$P_{MSEZ} = \frac{\int_0^{24h} P_{SEZ}(t) dt}{24horas} = \frac{C_{SEZ}}{24horas} \quad (4.17)$$

Passo 2: Determinação da potência ativa média de cada parcela de consumidor (residencial, industrial e comercial)

$$P_{MPar} = comp_{SEZ} \cdot P_{MSEZ} \quad (4.18)$$

Passo 3: Definição das categorias de carga agregada (definição do conjunto Cat) e determinação da potência ativa média associada a cada uma delas.

$$P_{MCat} = comp_{Par} \cdot P_{MPar} \quad (4.19)$$

Passo 4: Determinação da potência ativa média de cada grupo de equipamentos do mesmo tipo com relação a cada categoria de carga agregada.

$$P_{MEqCat} = \frac{C_{MEq}}{C_{MCat}} \cdot P_{MCat} = \frac{\lambda \cdot C_{M1Eq}}{C_{M1Cat}} \cdot P_{MCat} \quad (4.20)$$

Passo 5: Determinação da potência ativa média, por categoria de carga agregada, correspondente aos equipamentos que não foram levados em conta na modelagem.

$$P_{MConstCat} = P_{MCat} - \sum P_{MEqCat} \quad (4.21)$$

Passo 6: Fim

Após a realização dos cálculos descritos nesse algoritmo e da obtenção das potências ativas médias (de cada grupo de equipamentos do mesmo tipo) associadas às diferentes categorias de carga agregada, pode-se, então, realizar os cálculos necessários para a obtenção dos parâmetros físicos descritos na Figura 4.5, denominados “**Cálculos da Primeira Etapa**”.

4.2.1.2. Cálculos da Primeira Etapa

As potências obtidas na etapa de “Cálculos Preliminares” (P_{MEqCat}) representam as **potências ativas médias** de diferentes grupos de equipamentos (do mesmo tipo) associados às diversas categorias de carga agregada. Portanto, essas grandezas podem ser consideradas como sendo capazes de caracterizar o **nível médio de potência ativa** (para cada um dos diversos grupos de equipamentos) sob **condições normais de operação**. Entretanto, a Primeira Etapa da metodologia de modelagem proposta tem por objetivo a determinação de parâmetros físicos relacionados ao processo de recomposição da carga e não a uma situação de operação normal da rede elétrica. Dessa maneira, é de fundamental importância a obtenção desses níveis de potência **no instante da reenergização** para que os parâmetros físicos, obtidos com base nesses valores de potência, possam caracterizar a carga durante o processo de restabelecimento de energia.

Existem algumas variáveis que podem influenciar, significativamente, esses níveis de potência no momento do religamento, sendo que as principais são a “**temperatura ambiente**” e a “**hora do dia**” [1]. A primeira exerce grande influência sobre a quantidade de equipamentos controlados termostaticamente em funcionamento. Quanto maior a temperatura ambiente, maior a quantidade de dispositivos de resfriamento em operação, principalmente os aparelhos de ar-condicionado. Além disso, essa variável é responsável por uma alteração dos tempos t_{on} e t_{off} relacionados ao ciclo termostático desses equipamentos (como geladeiras, freezers e aparelhos de ar-condicionado). Por exemplo, quanto maior a temperatura ambiente, mais tempo um equipamento de refrigeração terá que ficar ligado para atingir a temperatura determinada no seu termostato, ou seja, maior será o tempo relacionado ao ciclo ligado (t_{on}) do equipamento.

Já a variável “hora do dia” possui influência sobre a quantidade e o tipo de equipamentos (de forma geral) que estão em funcionamento. Por exemplo, os chuveiros são utilizados em maior escala, geralmente, à noite, quando as pessoas voltam para casa depois de um dia de trabalho. Em especial, durante o dia, quase não existem lâmpadas ligadas, mas há uma grande quantidade de aparelhos de ar-condicionado em funcionamento, principalmente em dias quentes. Nesse caso, observa-se, ainda, uma interdependência entre as variáveis “hora do dia” e “temperatura ambiente”.

Pode-se concluir, então, que a **influência dessas variáveis** sobre o nível de potência dos diversos grupos de equipamentos **é de difícil modelagem analítica**, uma vez que além das relações existentes entre cada uma dessas variáveis e o nível de potência dos equipamentos, existem, também, relações entre elas (temperatura ambiente e hora do dia).

Como alternativa a essa modelagem analítica, a metodologia proposta neste capítulo sugere a utilização de **heurísticas**, extraídas a partir do conhecimento de especialistas, que sejam capazes de caracterizar a influência das variáveis “temperatura ambiente” e “hora do dia” no nível de potência dos diferentes grupos de equipamentos analisados no momento da reenergização. Essas heurísticas são representadas por uma **Base de Regras** que será descrita posteriormente.

Além disso, existe uma outra dificuldade associada à definição dessas variáveis: a **imprecisão** na sua caracterização. Essa imprecisão pode ser observada, por exemplo, na definição da temperatura ambiente como “alta”, “média”, “baixa”, etc. Dependendo do contexto (do especialista e do local, por exemplo) em que se está classificando essa variável, uma temperatura de 26°C pode ser considerada como “alta” ou como “média”. Da mesma forma, o horário das 18:30 hs pode ser considerado como sendo “noite” ou “tarde”. Dessa maneira, a metodologia descrita neste capítulo propõe a utilização de **variáveis lingüísticas e lógica nebulosa** para tentar representar, de forma adequada, as imprecisões associadas à caracterização dessas duas variáveis.

A) Conceitos e Ferramentas:

A **Base de Regras** é responsável pela **inferência de algumas variáveis de saída**, a partir das variáveis de entrada, adequadamente representadas por conjuntos nebulosos, e de uma lógica determinada em uma base de conhecimento.

Assim, a Base de Regras possui como variáveis de entrada a “hora do dia em que ocorreu a reenergização” (denominada doravante “hora do dia”) e a “temperatura ambiente no instante do religamento” (denominada doravante “temperatura ambiente”) e como variáveis de saída os tempos t_B associados a diferentes tipos de indústria e de estabelecimentos comerciais e também modificadores tanto do nível de potência quanto dos tempos t_{on} e t_{off} dos diversos equipamentos considerados no processo de modelagem. Esses **modificadores** correspondem a **coeficientes capazes de caracterizar as alterações dos níveis de potência e dos tempos t_{on} e t_{off} dos diferentes grupos de equipamentos** (devido à influência das variáveis “temperatura ambiente” e “hora do dia”), representando, adequadamente, através da multiplicação de seu valor pelo módulo da potência média (P_{MEqCat}) calculada na etapa de “Cálculos Preliminares” (ou pelo tempo $t_{onEqCat}$ definido como dado de entrada dessa mesma etapa), **a magnitude dessas variáveis no momento da reenergização**. Esses modificadores são representados por k_{EqCat} (modificadores de potência) e k_{tonCat} (modificador de tempo t_{on}). A título de ilustração, a Tabela 4.4 apresenta os modificadores relacionados tanto ao grupo de equipamento quanto à categoria de carga agregada, considerando o conjunto Cat , anteriormente definido como exemplo, e o conjunto Eq como sendo composto pelos seguintes equipamentos:

Para a categoria de carga agregada Res: geladeiras (G), freezers (Fr), aparelhos de ar-condicionado (AC), lâmpadas fluorescentes (L_f), lâmpadas incandescentes (L_i) e chuveiros (C).

Para a categoria de carga agregada Ind: geladeiras industriais (Gi), freezers industriais (Fri), aparelhos de ar-condicionado, lâmpadas fluorescentes, lâmpadas incandescentes e máquinas industriais (Maq).

Para a categoria de carga agregada Com: geladeiras (G), freezers (Fr), aparelhos de ar-condicionado (AC), lâmpadas fluorescentes (L_f), lâmpadas incandescentes (L_i) e máquinas industriais (Maq).

Assim, para esse exemplo, o conjunto dos equipamentos considerados para cada categoria de carga agregada pode ser representado por $Eq = [G, Fr, AC, L_f, L_i, C, Gi, Fri]$.

Tabela 4.4: Modificadores relacionados aos diferentes grupos de equipamentos por categoria de carga agregada

Categoria de Carga Agregada (Cat)	Modificadores
Res	$k_{GRes} \rightarrow$ modificador de potência das geladeiras $k_{ACRes} \rightarrow$ modificador de potência dos aparelhos de ar-condicionado $k_{FrRes} \rightarrow$ modificador de potência dos freezers $k_{LfRes} \rightarrow$ modificador de potência das lâmpadas fluorescentes $k_{LiRes} \rightarrow$ modificador de potência das lâmpadas incandescentes $k_{CRes} \rightarrow$ modificador de potência dos chuveiros $k_{tonRes} \rightarrow$ modificador do tempo t_{on} dos equipamentos controlados termostaticamente
Ind	$k_{GiInd} \rightarrow$ modificador de potência das geladeiras $k_{ACInd} \rightarrow$ modificador de potência dos aparelhos de ar-condicionado $k_{FriInd} \rightarrow$ modificador de potência dos freezers $k_{LfInd} \rightarrow$ modificador de potência das lâmpadas fluorescentes $k_{LiInd} \rightarrow$ modificador de potência das lâmpadas incandescentes $k_{MaqInd} \rightarrow$ modificador de potência das máquinas industriais $k_{tonInd} \rightarrow$ modificador do tempo t_{on} dos equipamentos controlados termostaticamente
Com	$k_{GCom} \rightarrow$ modificador de potência das geladeiras $k_{ACCom} \rightarrow$ modificador de potência dos aparelhos de ar-condicionado $k_{FrCom} \rightarrow$ modificador de potência dos freezers $k_{LfCom} \rightarrow$ modificador de potência das lâmpadas fluorescentes $k_{LiCom} \rightarrow$ modificador de potência das lâmpadas incandescentes $k_{MaqCom} \rightarrow$ modificador de potência das máquinas industriais $k_{tonCom} \rightarrow$ modificador do tempo t_{on} dos equipamentos controlados termostaticamente

Da análise dessa tabela, pode-se notar que os modificadores dos tempos t_{on} dependem apenas da categoria de carga agregada (e não dos grupos de equipamentos), uma vez que as variáveis de entrada devem influenciar esses tempos, de forma bastante semelhante, tanto no caso de geladeiras quanto no caso de freezers e aparelhos de ar-condicionado. A Figura 4.9 ilustra a relação entrada/saída da Base de Regras proposta nesta metodologia.

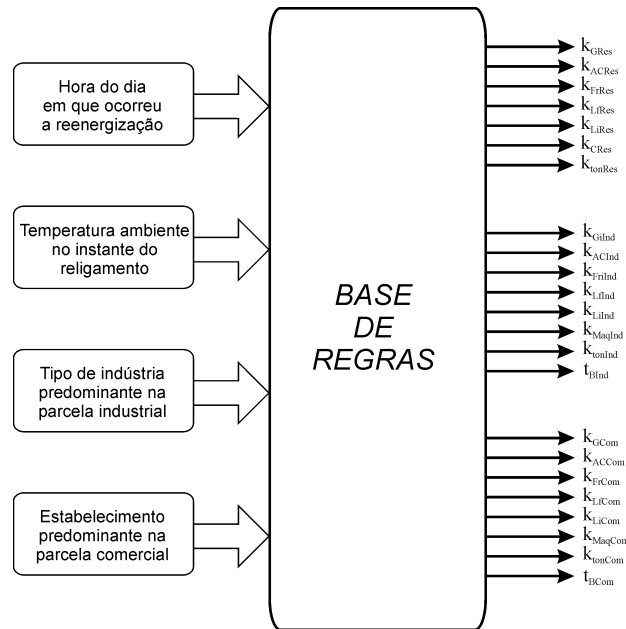


Figura 4.9: Base de Regras - variáveis de entrada e de saída

As regras são extraídas de uma base de conhecimento que deve representar a experiência de especialistas acerca da influência das variáveis de entrada nas variáveis de saída. Essa experiência pode estar relacionada com o conhecimento prático de profissionais ligados à área de sistemas de energia elétrica, como os operadores dos centros de controle, ou com o conhecimento obtido através de estudos e consultas à literatura. Neste trabalho, essas regras foram elaboradas com o seguinte formato:

Se ANTECEDENTE então CONSEQUENTE

O antecedente consiste em uma variável de entrada relacionada a um qualificativo lingüístico como, por exemplo, “temperatura ambiente alta”. Da mesma maneira, o

conseqüente refere-se a uma variável de saída relacionada a um qualificativo lingüístico como “modificador do tempo t_{on} (k_{ton}) alto”. A título de ilustração, uma das regras que relaciona a variável “temperatura ambiente” à variável “modificador do tempo t_{on} ” tem a forma:

Se “temperatura ambiente É alta” então “modificador do tempo t_{on} É alto”

Uma vez que as variáveis de entrada e de saída estão relacionadas a qualificativos (“alta” e “alto” respectivamente), é natural que a representação dessas variáveis também seja feita através de qualificativos lingüísticos, conforme descrito na Tabela 4.5, com exceção das variáveis de entrada “tipo de indústria predominante na categoria” e “tipo de comércio predominante na categoria” que estão relacionadas a um universo de possibilidades finito e bem definido (por exemplo, comércio do tipo “reparação de veículos”; indústria do tipo “de papel”). Assim, dependendo do tipo de indústria predominante na categoria, o tempo t_B associado à reenergização das cargas controladas manualmente pode ser alto ou baixo, sendo caracterizado em termos de qualificativos lingüísticos como na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Variáveis e seus qualificativos lingüísticos

Variável	Qualificativos Lingüísticos
Hora do Dia	“madrugada”, “manhã”, “almoço”, “tarde”, “jantar”, “noite”, “noite alta”
Temperatura Ambiente	“muito baixa”, “baixa”, “média”, “alta”, “muito alta”
t_{Bcat}	“muito baixo”, “baixo”, “médio”, “alto”, “muito alto”
Modificadores de Potência e de Tempo	“baixo”, “médio”, “alto”

Como descrito anteriormente, a imprecisão relacionada à associação dessas variáveis a qualificativos lingüísticos sugere a utilização de lógica nebulosa, visando a representação adequada dos mesmos, conforme descrito a seguir. Detalhes sobre a teoria de lógica fuzzy podem ser encontrados no Apêndice B.

B) Cálculos:

Uma vez descritos os principais conceitos e ferramentas (base de regras, qualificativos linguísticos e lógica nebulosa) a serem utilizados nessa sub-etapa, pode-se, então, descrever os cálculos propriamente ditos. A Figura 4.10 representa um detalhamento (“zoom”) do bloco “**Cálculos da Primeira Etapa**” ilustrado, previamente, na Figura 4.5.

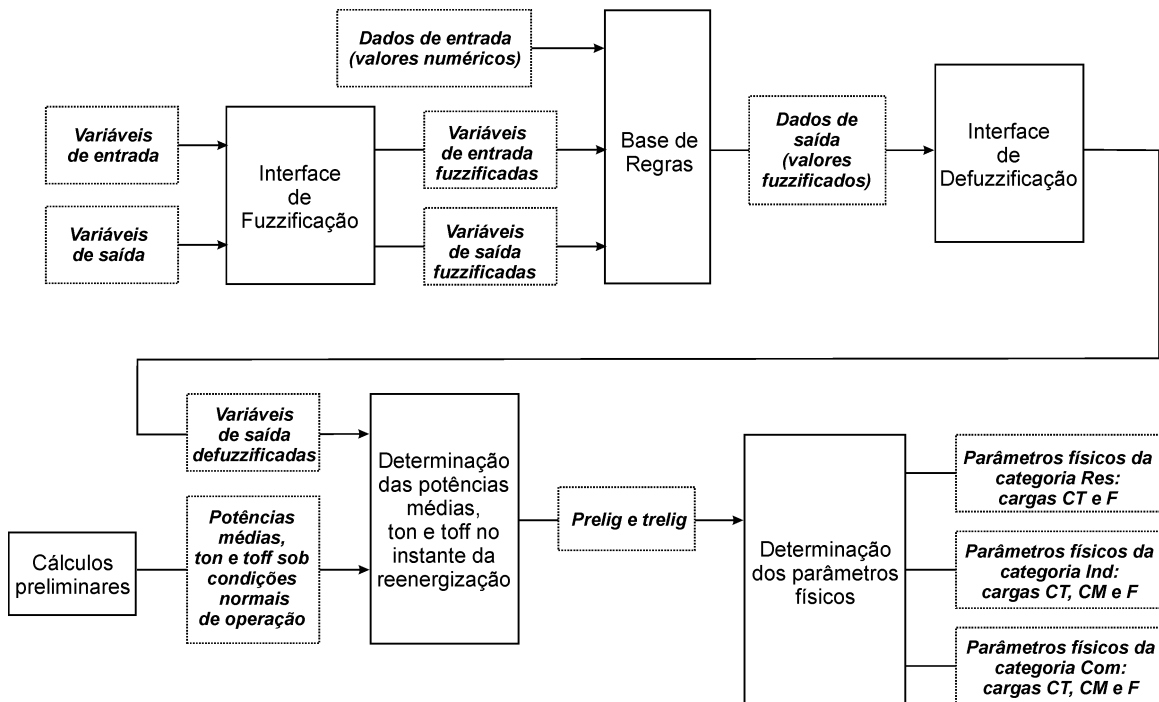


Figura 4.10: Detalhamento do bloco “Cálculos da Primeira Etapa” ilustrado na Figura 4.5

Nessa figura, o bloco “*Dados de entrada (valores numéricos)*” refere-se à entrada de valores numéricos de temperatura ambiente e hora do dia e o bloco “*Dados de saída (valores fuzzificados)*” refere-se à saída da base de regras que corresponde aos valores nebulosos (fuzzificados) dos modificadores de potência e de t_{on} . Além disso, o bloco “ P_{relig} e t_{relig} ” corresponde ao ponto onde são determinados os valores de potência ativa média e os tempos t_{on} e t_{off} , calculados para todos os equipamentos analisados no momento do religamento. Os itens B.1 a B.5, a seguir, tratam, de forma mais detalhada, dos blocos descritos na Figura 4.10.

B.1) Interface de Fuzzificação:

Esse bloco é responsável pela associação de um conjunto nebuloso a cada qualificativo lingüístico descrito na Tabela 4.5, através de funções de pertinência [Apêndice B]. Neste trabalho, as funções de pertinência utilizadas são dos tipos trapezoidal e triangular, pela sua facilidade de implementação. Por exemplo, a variável “temperatura ambiente” pode ser representada pelos conjuntos nebulosos referentes aos qualificativos “muito baixa”, “baixa”, “média”, “alta” e “muito alta”, conforme a Figura 4.11.

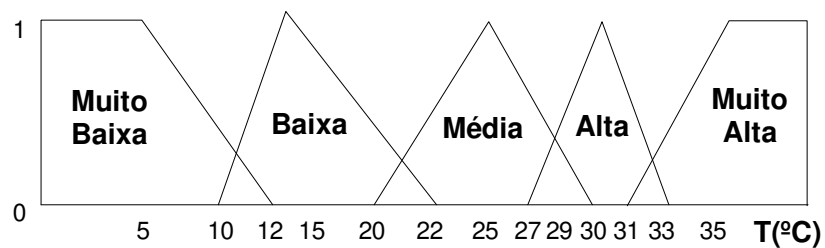


Figura 4.11: Conjuntos nebulosos associados à variável “temperatura ambiente”

B.2) Base de Regras:

A Base de Regras utiliza como dados de entrada e de saída as variáveis descritas, previamente, na Figura 4.9. O relacionamento entre essas variáveis é realizado a partir da aplicação de cada uma das regras definidas nessa base, usando um mecanismo de inferência do tipo MAX-MIN [Apêndice B].

B.3) Interface de Defuzzificação:

O objetivo da interface de defuzzificação é a obtenção de um valor discreto representativo para cada uma das variáveis de saída nebulosas obtidas após a aplicação da Base de Regras. A defuzzificação dessas variáveis é realizada a partir do método do centróide, bastante difundido na literatura [Apêndice B].

B.4) Determinação das Potências Ativas Médias e dos Tempos (t_{on} e t_{off}) no instante da reenergização:

Com base nos modificadores obtidos no bloco anterior e nas potências médias obtidas na etapa de “Cálculos Preliminares”, pode-se determinar, **no instante do religamento**, as potências ativas médias e os tempos t_{on} e t_{off} dos grupos de equipamentos analisados, para cada categoria de carga agregada, a partir das equações a seguir.

$$P_{MEqCat\ Relig} = k_{EqCat} . P_{MEqCat} \quad (4.22)$$

$$t_{onEqCat\ Relig} = k_{tonCat} . t_{onEqCat} \quad (4.23)$$

$$t_{offEqCat\ Relig} = t_{EqCat} - t_{onEqCat\ Relig} \quad (4.24)$$

Nessas equações, o índice *Relig* refere-se, justamente, ao momento do religamento. A Tabela 4.6 sintetiza as grandezas que devem ser obtidas, considerando o exemplo adotado neste trabalho.

Tabela 4.6: Grandezas obtidas para o exemplo adotado

Grandezas Obtidas ao Final dos Cálculos
$P_{MGResRelig}$
$P_{MFrResRelig}$
$P_{MACResRelig}$
$P_{MLfResRelig}$
$P_{MLiResRelig}$
$P_{MCResRelig}$
$P_{MGIIndRelig}$
$P_{MFrIndRelig}$
$P_{MACIndRelig}$
$P_{MLfIndRelig}$
$P_{MLiIndRelig}$
$P_{MMAqIndRelig}$
$P_{MGComRelig}$
$P_{MFrComRelig}$
$P_{MACComRelig}$
$P_{MLfComRelig}$
$P_{MLiComRelig}$
$P_{MMAqComRelig}$

B.5) Determinação dos Parâmetros Físicos:

Com base nas grandezas calculadas no bloco B.4, pode-se determinar os parâmetros físicos associados a cada tipo de carga (CT , CM e F) para cada categoria de carga agregada, conforme descrito a seguir.

- **Cargas Controladas Termostaticamente (CT):**

A determinação dos parâmetros físicos relacionados a esse tipo de carga é realizada, de forma individual, para cada tipo de equipamento controlado termostaticamente. Por exemplo, são calculados, de forma isolada, os parâmetros físicos associados ao comportamento, por exemplo, das geladeiras, dos freezers e dos aparelhos de ar-condicionado. O cálculo desses parâmetros é efetuado através da aplicação do algoritmo a seguir para cada um desses equipamentos, levando-se em conta as grandezas ilustradas na Figura 4.1 e o fenômeno físico envolvido na reenergização de cargas controladas termostaticamente: a recuperação da energia perdida durante o blecaute (W_L) a partir do momento do religamento, ou seja, $W_L = W_{RECT} + W_{TRI}$.

Passo 1: Cálculo da potência máxima possível:

$$P_{MAXPOSSÍVELEqCat} = \frac{t_{onEqCat Relig} + t_{offEqCat Relig}}{t_{onEqCat Relig}} \cdot P_{MEqCat Relig} \quad (4.25)$$

em que $P_{MAXPOSSÍVELEqCat}$ corresponde ao nível de potência, no instante do religamento, caso haja perda total da diversidade do estado do grupo de equipamentos.

Passo 2: Cálculo da energia perdida durante o blecaute W_{LEqCat} :

$$W_{LEqCat} = P_{MEqCat Relig} \cdot t_{blecaute} \quad (4.26)$$

em que $t_{blecaute}$ é o tempo de duração do blecaute e corresponde a $(t_R - t_i)$.

Passo 3: Cálculo da energia correspondente ao maior triângulo possível $W_{TRIEqCat}$

$$W_{TRIEqCat} = 0,5 \cdot (P_{MAXPOSSÍVELEqCat} - P_{MEqCatRelig}) \cdot t_{offEqCatRelig} \quad (4.27)$$

Passo 4: Cálculo da inclinação em $W_{TRIEqCat}$

$$inc_{EqCat} = \frac{P_{MEqCatRelig} - P_{MAXPOSSÍVELEqCat}}{t_{offEqCatRelig}} \quad (4.28)$$

Passo 5: Se $W_{LEqCat} \leq W_{TRIEqCat}$:

Essa condição corresponde a uma situação em que a energia perdida durante o blecaute não ocasionou a perda total da diversidade do estado dos equipamentos.

Passo 5.1: Cálculo do tempo até a retomada do regime permanente (t_{BEqCat}) e cálculo do pico de potência ($P_{MAXEqCat}$):

$$t_{BEqCat} = \sqrt{-\frac{2 \cdot W_{LEqCat}}{inc_{EqCat}}} \quad (4.29)$$

$$P_{MAXEqCat} = P_{MEqCatRelig} - (inc_{EqCat}) \cdot t_{BEqCat} \quad (4.30)$$

Passo 6: Se $W_{LEqCat} > W_{TRIEqCat}$:

Essa condição corresponde a uma situação em que a energia perdida durante o blecaute ocasionou a perda total da diversidade do estado dos equipamentos (aparecimento do patamar da Figura 4.1).

Passo 6.1: Cálculo do pico de potência:

$$P_{MAXEqCat} = P_{MAXPOSSÍVELEqCat} \quad (4.31)$$

Passo 6.2: Cálculo da energia associada ao retângulo $W_{RECTEqCat}$:

$$W_{RECTEqCat} = W_{LEqCat} - W_{TRIEqCat} \quad (4.32)$$

Passo 6.3: Cálculo do tempo até o início da retomada da diversidade do estado dos equipamentos t_{AEqCat} :

$$t_{AEqCat} = \frac{W_{RECTEqCat}}{P_{MAXPOSSÍVELEqCat} - P_{MEqCatRelig}} \quad (4.33)$$

Passo 6.4: Cálculo do tempo até a retomada do regime permanente t_{BEqCat} :

$$t_{BEqCat} = t_{AEqCat} + t_{offEqCatRelig} \quad (4.34)$$

Passo 7: Fim

Como esse algoritmo trata da determinação de parâmetros associados somente a cargas termostaticamente controladas, deve-se destacar que o índice Eq (nesse algoritmo) refere-se a um subconjunto do conjunto definido por todos os equipamentos considerados no processo de modelagem. Considerando o exemplo adotado neste capítulo, o conjunto dos equipamentos controlados termostaticamente equivale a $[G, Fr, AC, Gi, Fri]$.

Através da aplicação desse algoritmo, pode-se determinar os parâmetros físicos descritos na Figura 4.5 para todos os equipamentos controlados termostaticamente considerados no processo de modelagem, para todas as categorias de carga agregada analisadas. A Tabela 4.7 descreve as relações entre as grandezas calculadas pelo algoritmo e os parâmetros físicos ilustrados na Figura 4.5, onde os índices Res , Ind e Com constituem o conjunto Cat .

Tabela 4.7: Relação entre as grandezas calculadas pelo algoritmo e os parâmetros físicos da Figura 4.5

Grandeza calculada pelo algoritmo	Parâmetro físico da Figura 4.5
$P_{MEqCatRelig}$	$P_R(CTCat)$
t_{AEqCat}	$t_A(CTCat)$
t_{BEqCat}	$t_B(CTCat)$
$P_{MAXEqCat}$	$P_{máx}(CTCat)$

- Cargas Fixas (F):

No caso das cargas fixas, os parâmetros físicos de interesse são obtidos diretamente do item B.4 e correspondem à grandeza $P_{MEqCatRelig}$. Fazendo a correspondência entre essa grandeza e o parâmetro físico ilustrado na Figura 4.5, tem-se:

$$P_{MEqCatRelig} \rightarrow P_R(FCat)$$

Considerando o conjunto Eq como sendo formado apenas pelas cargas fixas consideradas no exemplo adotado, ou seja, considerando o conjunto $[L_f, L_i, C]$.

- Cargas Controladas Manualmente (CM):

No caso das cargas controladas manualmente, os parâmetros físicos de interesse são a potência em regime permanente e o tempo necessário, a partir do instante da reenergização, até a retomada do regime permanente. O primeiro valor é obtido diretamente do item B.4, e corresponde a $P_{MEqCatRelig}$. A correspondência entre essa grandeza e o parâmetro físico descrito na Figura 4.5 é dada por:

$$P_{MEqCatRelig} \rightarrow P_R(CMCat)$$

Já o tempo necessário até a retomada do regime permanente é extraído a partir da base de regras de acordo com o tipo predominante de indústria da categoria de carga agregada, que corresponde a um dado de entrada da Primeira Etapa, conforme descrito no item 4.2.1.1. Fazendo a correspondência entre essa grandeza e o parâmetro físico ilustrado na Figura 4.5, tem-se:

$$t_{BCat} \rightarrow t_B(CMCat)$$

Para as cargas controladas manualmente, considera-se que o conjunto Eq é formado apenas pelas cargas desse tipo consideradas no exemplo adotado, ou seja, $Eq = [Maq]$. Nesse caso, o conjunto Cat é composto apenas pelas categorias de carga agregada $[Ind, Com]$, uma vez que não foram considerados equipamentos controlados manualmente associados à categoria Res .

A Tabela 4.8 sintetiza todas as grandezas que são obtidas **ao final dessa Primeira Etapa**, para o exemplo adotado, fazendo a correspondência com os parâmetros físicos descritos na Figura 4.5.

Tabela 4.8: Parâmetros físicos obtidos ao final da Primeira Etapa da metodologia de modelagem proposta

Categoria de Carga Agregada	Grandeza obtida ao final da Primeira Etapa	Parâmetro físico da Figura 4.5
Res	$P_{MGResRelig}$, $P_{MFrResRelig}$ e $P_{MACResRelig}$ t_{AGRes} , t_{AFrRes} e t_{AACRes} t_{BGRes} , t_{BFrRes} e t_{BACRes} $P_{MAXGRes}$, $P_{MAXFrRes}$ e $P_{MAXACRes}$ $P_{MCResRelig}$, $P_{MLiResRelig}$ e $P_{MLfResRelig}$	$P_R(CTRes)$ $t_A(CTRes)$ $t_B(CTRes)$ $P_{\max}(CTRes)$ $P_R(FRes)$
Ind	$P_{MGIndRelig}$, $P_{MFrIndRelig}$ e $P_{MACIndRelig}$ t_{AGInd} , t_{AFrInd} e t_{AACInd} t_{BGInd} , t_{BFrInd} e t_{BACInd} $P_{MAXGIInd}$, $P_{MAXFrInd}$ e $P_{MAXACInd}$ $P_{MLiIndRelig}$ e $P_{MLfIndRelig}$ $P_{MMAqIndRelig}$ $t_{BTipodeIndustriaInd}$	$P_R(CTInd)$ $t_A(CTInd)$ $t_B(CTInd)$ $P_{\max}(CTInd)$ $P_R(FInd)$ $P_R(CMInd)$ $t_B(CMInd)$
Com	$P_{MGComRelig}$, $P_{MFrComRelig}$, $P_{MACComRelig}$ t_{AGCom} , t_{AFrCom} e t_{AACCom} t_{BGCom} , t_{BFrCom} e t_{BACCom} $P_{MAXGCom}$, $P_{MAXFrCom}$ e $P_{MAXACCom}$ $P_{MLiComRelig}$ e $P_{MLfComRelig}$ $P_{MMAqComRelig}$ $t_{BTipodeComercioCom}$	$P_R(CTCom)$ $t_A(CTCom)$ $t_B(CTCom)$ $P_{\max}(CTCom)$ $P_R(FCom)$ $P_R(CMCom)$ $t_B(CMCom)$

4.2.2. Segunda Etapa

Conforme descrito anteriormente, a **Segunda Etapa** consiste na determinação da curva de comportamento aproximada para cada grupo de equipamentos associado às diferentes categorias de carga agregada, a partir dos parâmetros físicos calculados na Primeira Etapa, conforme ilustrado na Figura 4.6. Essas curvas são obtidas através da

aplicação de alguns cálculos que caracterizam o bloco “Cálculos da Segunda Etapa”, representado nessa mesma figura e descrito, de forma mais detalhada, no item a seguir.

4.2.2.1. Cálculos da Segunda Etapa

As curvas aproximadas dos diferentes grupos de equipamentos, associados às diversas categorias de carga agregada, são representadas, de forma genérica, por $CA_{EqCat}(t)$. Para a determinação dessas curvas, é necessário o conhecimento prévio do tipo de controle referente a cada grupo de equipamentos, uma vez o comportamento de cada grupo está diretamente relacionado aos fenômenos físicos, inerentes a cada tipo de controle, que ocorrem durante o processo de recomposição. Conforme citado anteriormente, neste trabalho são considerados três tipos de carga classificadas quanto a seu tipo de controle: controladas termostaticamente, fixas e controladas manualmente. A partir dos parâmetros físicos obtidos na Primeira Etapa, é possível determinar as curvas aproximadas para cada grupo de equipamentos (considerando seu tipo de controle), conforme descrito a seguir.

A) Determinação da Curva Aproximada para Grupos de Equipamentos Controlados Termostaticamente:

Essa curva é construída a partir dos parâmetros descritos na Tabela 4.8. e possui a forma ilustrada na Figura 4.12.

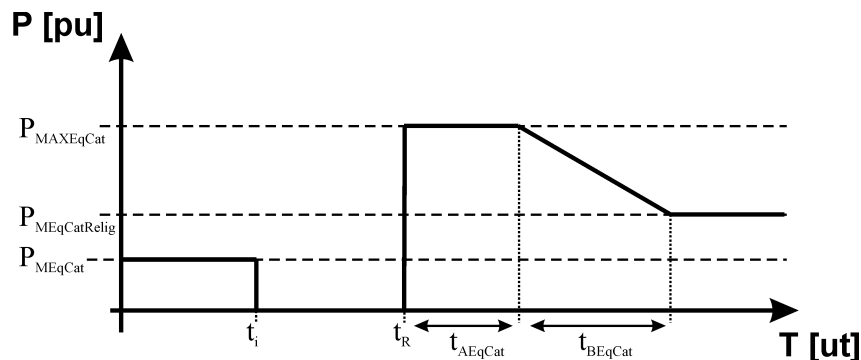


Figura 4.12: Curva aproximada para um grupo de equipamentos controlados termostaticamente

Considerou-se, nessa figura, uma situação de blecaute que permitiu que o nível de potência (em regime permanente) após a reenergização fosse maior que o nível de potência antes da ocorrência da interrupção, ou seja, $P_{MEqCat} \leq P_{MEqCatRelig}$, em que ***Eq* refere-se, aqui, apenas ao conjunto dos equipamentos controlados termostaticamente**. Da análise dessa curva, pode-se notar que sua construção depende do conhecimento de apenas quatro pontos:

- Primeiro ponto: $t = t_i$ e $P = P_{MEqCat}$
- Segundo ponto: $t = t_R$ e $P = P_{MAXEqCat}$
- Terceiro ponto: $t = (t_R + t_{AEqCat})$ e $P = P_{MAXEqCat}$
- Quarto ponto: $t = (t_R + t_{AEqCat} + t_{BEqCat})$ e $P = P_{MEqCatRelig}$

Esses pontos e essa curva correspondem a uma situação em que as condições de blecaute levaram a uma perda total da diversidade do estado dos equipamentos, acarretando o aparecimento do patamar descrito na Figura 4.12. Entretanto, existem situações de blecaute que possivelmente não irão conduzir à perda total da diversidade do estado desses dispositivos. Conseqüentemente, o patamar mencionado não existirá e o tempo t_{AEqCat} será nulo. Nessas situações, a curva aproximada é representada por apenas três pontos, que resultam dos quatro pontos descritos anteriormente, fazendo-se $t_{AEqCat} = 0$:

- Primeiro ponto: $t = t_i$ e $P = P_{MEqCat}$
- Segundo ponto: $t = t_R$ e $P = P_{MAXEqCat}$
- Terceiro ponto: $t = (t_R + t_{BEqCat})$ e $P = P_{MEqCatRelig}$

A título de ilustração, a Figura 4.13 representa a curva aproximada para as geladeiras associadas à categoria de carga agregada *Res*, com base em seus parâmetros físicos. É importante ressaltar que as curvas relacionadas aos freezers e aos aparelhos de ar-condicionado (que correspondem aos outros equipamentos controlados termostaticamente, associados a essa mesma categoria, considerados no exemplo deste capítulo) possuem o mesmo formato que a curva ilustrada nessa figura, mas os parâmetros físicos associados a esses equipamentos diferem dos parâmetros das geladeiras e estão representados na Tabela 4.9.

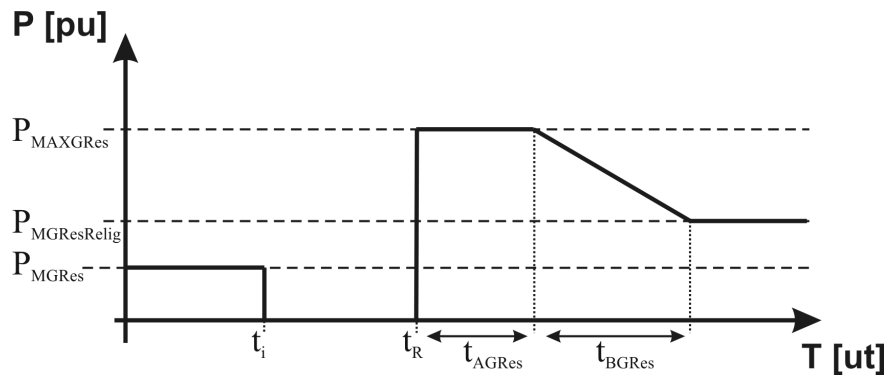


Figura 4.13: Curva aproximada para as geladeiras da categoria Res

Tabela 4.9: Pontos necessários para a construção das curvas aproximadas das geladeiras, freezers e aparelhos de ar-condicionado – Categoria de Carga Agregada Res

Geladeiras	Freezers	Aparelhos de Ar-Condicionado
Primeiro ponto: (t_i ; P_{MGRes})	Primeiro ponto: (t_i ; P_{MFrRes})	Primeiro ponto: (t_i ; P_{MACRes})
Segundo ponto: (t_R ; $P_{MAXGRes}$)	Segundo ponto: (t_R ; $P_{MAXFrRes}$)	Segundo ponto: (t_R ; $P_{MAXACRes}$)
Terceiro ponto: ($t_R + t_{AGRes}$; $P_{MAXGRes}$)	Terceiro ponto: ($t_R + t_{AFrRes}$; $P_{MAXFrRes}$)	Terceiro ponto: ($t_R + t_{AACRes}$; $P_{MAXACRes}$)
Quarto ponto: ($t_R + t_{AGRes} + t_{BGRes}$; $P_{MGResRelig}$)	Quarto ponto: ($t_R + t_{AFrRes} + t_{BFrRes}$; $P_{MFrResRelig}$)	Quarto ponto: ($t_R + t_{AACRes} + t_{BACRes}$; $P_{MACResRelig}$)

Portanto, as curvas $CA_{EqCat}(t)$ para os equipamentos controlados termostaticamente, associados a uma categoria de carga agregada, podem ser determinadas através da união desses quatro pontos (respeitando a forma da curva ilustrada na Figura 4.13) e seu valor para qualquer instante t pode ser obtido a partir de **técnicas de interpolação linear e de extrapolação**, considerando o trecho no qual o instante t está definido.

B) Determinação da Curva Aproximada para Grupos de Equipamentos de Carga Fixa:

Assim como no caso das cargas controladas termostaticamente, essa curva é construída a partir dos parâmetros obtidos na Primeira Etapa (descritos na Tabela 4.8) e possui a forma ilustrada na Figura 4.14.

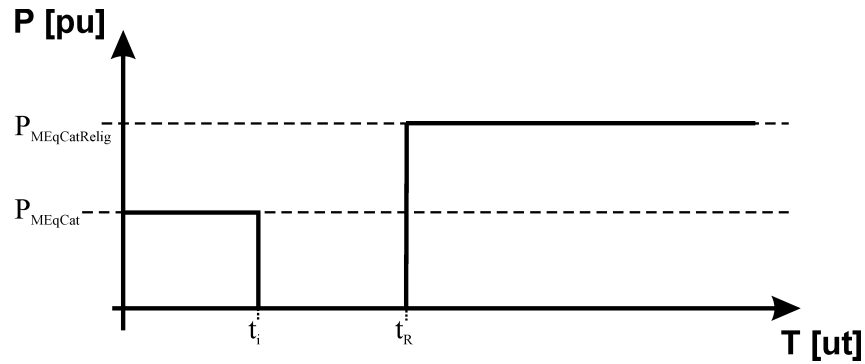


Figura 4.14: Curva aproximada para um grupo de equipamentos com carga fixa

Nessa figura, mais uma vez foi considerada uma situação de blecaute que resultou em $P_{MEqCat} \leq P_{MEqCatRelig}$, em que ***Eq* refere-se, aqui, apenas ao conjunto dos equipamentos com carga fixa**. Pode-se notar que sua construção depende do conhecimento de apenas dois pontos:

- Primeiro ponto: $t = t_i$ e $P = P_{MEqCat}$
- Segundo ponto: $t = t_R$ e $P = P_{MEqCatRelig}$

Como exemplo, a Figura 4.15 representa a curva aproximada para as lâmpadas incandescentes associadas à categoria de carga agregada *Res*, com base em seus parâmetros físicos. Deve-se salientar que as curvas relacionadas às lâmpadas fluorescentes e aos chuveiros (que correspondem aos outros equipamentos de carga fixa, associados a essa mesma categoria, considerados no exemplo deste capítulo) possuem o mesmo formato que a curva ilustrada nessa figura, mas os parâmetros físicos associados a esses equipamentos diferem dos parâmetros das lâmpadas incandescentes e estão representados na Tabela 4.10.

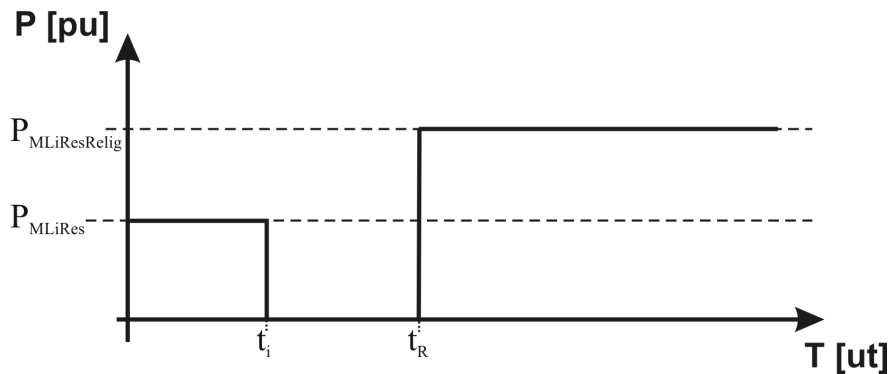


Figura 4.15: Curva aproximada para as lâmpadas incandescentes

Tabela 4.10: Pontos necessários para a construção das curvas aproximadas das lâmpadas incandescentes, lâmpadas fluorescentes e chuveiros – Categoria de Carga Agregada *Res*

Lâmpadas Incandescentes	Lâmpadas Fluorescentes	Chuveiros
Primeiro ponto: (t_i ; P_{MLiRes})	Primeiro ponto: (t_i ; P_{MLfRes})	Primeiro ponto: (t_i ; P_{MCRes})
Segundo ponto: (t_R ; $P_{MLiResRelig}$)	Segundo ponto: (t_R ; $P_{MLfResRelig}$)	Segundo ponto: (t_R ; $P_{MCResRelig}$)

Portanto, as curvas $CA_{EqCat}(t)$ para os equipamentos de carga fixa, associados a uma categoria de carga agregada, podem ser determinadas através da união desses dois pontos (respeitando a forma da curva ilustrada na Figura 4.14) e seu valor para qualquer instante t pode ser obtido a partir de **técnicas de interpolação linear e extrapolação**, considerando o trecho da curva no qual se insere o instante t .

C) Determinação da Curva Aproximada para Grupos de Equipamentos Controlados Manualmente:

Essa curva é construída a partir dos parâmetros descritos na Tabela 4.8 e possui a forma ilustrada na Figura 4.16.

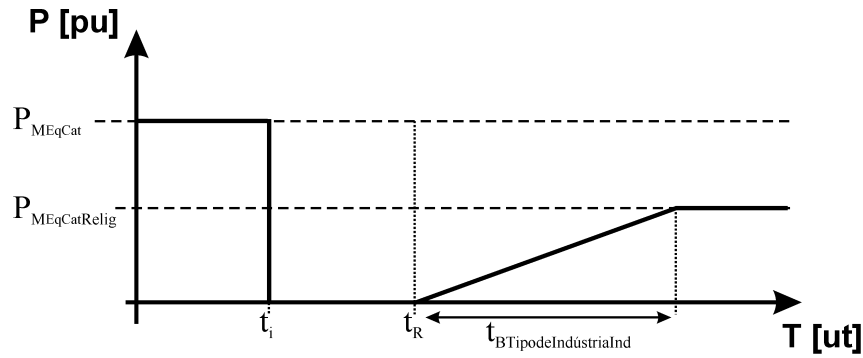


Figura 4.16: Curva aproximada para um grupo de equipamentos controlados manualmente

Nessa figura, foi considerada uma situação de blecaute que permitiu que o nível de potência (em regime permanente) após a reenergização fosse menor que o nível de potência antes da ocorrência da interrupção, ou seja, $P_{MEqCat} \geq P_{MEqCatRelig}$, em que **Eq refere-se, aqui, apenas ao conjunto dos equipamentos controlados manualmente**. Pode-se notar que sua construção depende do conhecimento de apenas três pontos:

- Primeiro ponto: $t = t_i$ e $P = P_{MEqCat}$
- Segundo ponto: $t = t_R$ e $P = 0$
- Terceiro ponto: $t = t_R + t_{BCat}$ e $P = P_{MEqCatRelig}$

Como exemplo, a Figura 4.17 representa a curva aproximada para as máquinas industriais associadas à categoria de carga agregada *Ind*, com base em seus parâmetros físicos.

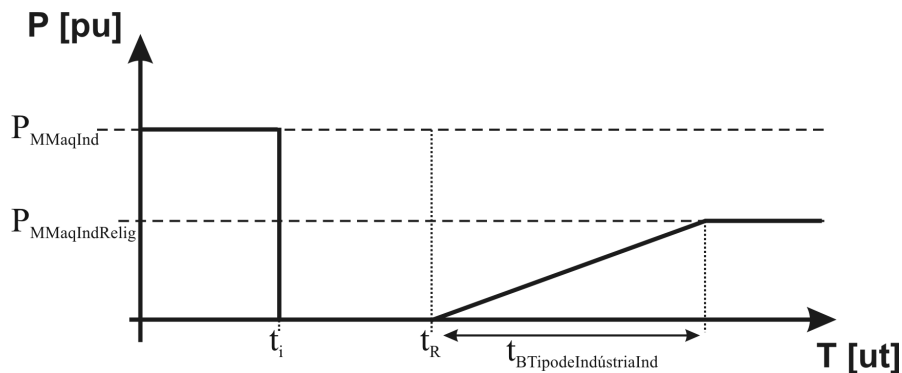


Figura 4.17: Curva aproximada para as máquinas industriais da categoria de carga agregada *Ind*

A Tabela 4.11 sintetiza os pontos necessários para a construção da curva aproximada associada às máquinas industriais da categoria de carga agregada *Ind*.

Tabela 4.11: Pontos necessários para a construção da curva aproximada das máquinas industriais – Categoria de Carga Agregada *Ind*

Máquinas Industriais
Primeiro ponto: (t_i ; $P_{MMaqInd}$)
Segundo ponto: (t_R ; 0)
Terceiro ponto: ($t_R + t_{BTipodeIndústrialInd}$; $P_{MMaqIndRelig}$)

Portanto, as curvas $CA_{EqCat}(t)$ para os equipamentos controlados manualmente, associados a uma categoria de carga agregada, podem ser determinadas através da união desses três pontos (respeitando a forma da curva ilustrada na Figura 4.13) e seu valor para qualquer instante t pode ser obtido a partir de **técnicas de interpolação linear e extrapolação**, considerando o trecho da curva no qual se insere o instante t .

4.2.3. Terceira Etapa

A **Terceira Etapa** é responsável pela realização de cálculos a partir das curvas aproximadas dos grupos de equipamentos ($CA_{EQCat}(t)$), obtidas na etapa anterior, visando a determinação da curva aproximada associada à carga agregada na subestação. Esses cálculos correspondem à soma ponto a ponto dessas curvas e, dependendo do que se deseja obter, podem fornecer resultados que possibilitam diversos tipos de análise, como:

- Determinação do comportamento de cada tipo de carga (quanto ao controle), associado a uma categoria de carga agregada;
- Determinação do comportamento de cada categoria de carga agregada;

- Determinação do comportamento de cada parcela de consumo (residencial, industrial e comercial) e
- Determinação do comportamento da carga agregada na subestação, que corresponde ao objetivo principal desta etapa.

Os cálculos associados a cada uma dessas análises estão descritos a seguir:

A) Determinação do comportamento de cada tipo de carga (quanto ao controle), associado a uma categoria de carga agregada

Nesse caso, para a determinação da curva aproximada, representada por $CA_{TipoCat}(t)$, deve-se realizar a soma ponto a ponto das curvas $CA_{EqCat}(t)$ obtidas para todos os grupos de equipamentos com o mesmo tipo de controle dentro de uma mesma categoria de carga agregada. Assim, tem-se para um determinado tipo de controle e para uma determinada categoria de carga agregada:

$$CA_{TipoCat}(t) = \sum CA_{EqCat}(t) \quad (4.35)$$

em que o índice *Tipo* refere-se ao conjunto dos tipos de controle analisados neste trabalho, ou seja $Tipo = [CT, F, CM]$ e *Eq* refere-se, aqui, ao conjunto dos equipamentos controlados da mesma maneira (*CT*, *F* ou *CM*) e pertencentes à mesma categoria de carga agregada. Por exemplo, se deseja-se conhecer o comportamento das cargas termostaticamente controladas da categoria de carga *Res*, tem-se:

$$CA_{CTRes}(t) = \sum CA_{EqRes}(t) = CA_{GRes}(t) + CA_{FrRes}(t) + CA_{ACRes}(t) \quad (4.36)$$

Já o comportamento das cargas fixas dessa mesma categoria de carga é dado por:

$$CA_{FRes}(t) = \sum CA_{EqRes}(t) = CA_{LfRes}(t) + CA_{LiRes}(t) + CA_{CRes}(t) \quad (4.37)$$

B) Determinação do comportamento de cada categoria de carga agregada

Para a determinação da curva aproximada do comportamento de cada categoria de carga agregada, representada por $CA_{Cat}(t)$, deve-se realizar, novamente, a soma ponto a ponto das curvas $CA_{EqCat}(t)$ obtidas para todos os grupos de equipamentos, mas levando-se em conta, agora, todos os grupos de equipamentos associados a uma mesma categoria de carga agregada, qualquer que seja seu tipo de controle. Assim, tem-se:

$$CA_{Cat}(t) = \sum CA_{EqCat}(t) \quad (4.38)$$

em que *Eq* refere-se, aqui, ao conjunto dos equipamentos pertencentes à mesma categoria de carga agregada. Essa curva também pode ser determinada através da soma ponto a ponto das curvas aproximadas de cada tipo de carga, associadas a determinada categoria de carga agregada, ou seja:

$$CA_{Cat}(t) = \sum CA_{TipoCat}(t) \quad (4.39)$$

Considerando o exemplo adotado neste capítulo, se deseja-se conhecer o comportamento da categoria de carga *Res*, tem-se:

$$CA_{Res}(t) = \sum CA_{TipoRes}(t) = CA_{CTRes}(t) + CA_{FRes}(t) \quad (4.40)$$

ou

$$CA_{Res}(t) = \sum CA_{EqRes}(t) = CA_{GRes}(t) + CA_{FRes}(t) + CA_{ACRes}(t) + CA_{LjRes}(t) + CA_{LiRes}(t) + CA_{CRes}(t) \quad (4.41)$$

Já o comportamento da categoria de carga agregada *Ind* é dado por:

$$CA_{Ind}(t) = \sum CA_{TipoInd}(t) = CA_{CTInd}(t) + CA_{FInd}(t) + CA_{CMIInd}(t) \quad (4.42)$$

ou

$$CA_{Ind}(t) = \sum CA_{EqInd}(t) = CA_{GIInd}(t) + CA_{FriInd}(t) + CA_{ACInd}(t) + CA_{LjInd}(t) + CA_{LiInd}(t) + CA_{MaqInd}(t) \quad (4.43)$$

Para a categoria de carga agregada *Com*, tem-se:

$$CA_{Com}(t) = \sum CA_{TipoCom}(t) = CA_{CTCom}(t) + CA_{FCom}(t) + CA_{CMCom}(t) \quad (4.44)$$

ou

$$CA_{Com}(t) = \sum CA_{EqCom}(t) = CA_{GCom}(t) + CA_{FrCom}(t) + CA_{ACCom}(t) + CA_{LfCom}(t) + CA_{LiCom}(t) + CA_{MaqCom}(t) \quad (4.45)$$

C) Determinação do comportamento de cada parcela de consumo

Para a determinação dessa curva aproximada, representada por $CA_{Par}(t)$, deve-se realizar a soma ponto a ponto das curvas $CA_{Cat}(t)$ obtidas para todas as categorias de carga agregada dentro de uma mesma parcela de consumo. Assim, tem-se:

$$CA_{Par}(t) = \sum CA_{Cat}(t) \quad (4.46)$$

em que *Cat* refere-se, aqui, ao conjunto das categorias de carga agregada pertencentes a uma mesma parcela de consumo. Considerando o exemplo adotado neste capítulo, o comportamento da parcela de consumo residencial (*Pres*) é dado por:

$$CA_{Pres}(t) = \sum CA_{Cat}(t) = CA_{Res}(t) \quad (4.47)$$

Já o comportamento da parcela de consumo industrial (*Pind*) é dado por:

$$CA_{Pind}(t) = \sum CA_{Cat}(t) = CA_{Ind}(t) \quad (4.48)$$

Para a parcela de consumo comercial (*Pcom*), tem-se:

$$CA_{Pcom}(t) = \sum CA_{Cat}(t) = CA_{Com}(t) \quad (4.49)$$

Para o exemplo adotado, existe apenas uma categoria de carga agregada associada a cada parcela de consumo. Entretanto, se a parcela comercial possuir duas categorias de

carga agregada distintas (como dois tipos de comércio bastante diferentes), a curva aproximada para essa parcela de consumo assumiria a forma:

$$CA_{Pcom}(t) = \sum CA_{Cat}(t) = CA_{Com1}(t) + CA_{Com2}(t) \quad (4.50)$$

em que *Com1* e *Com2* são os índices referentes a cada uma dessas duas categorias de carga agregada.

Com base na Figura 4.7, as curvas aproximadas referentes às parcelas residencial, industrial e comercial podem ser determinadas conforme as seguintes equações:

$$CA_{Pres}(t) = CT_{Res}(t) + F_{Res}(t) + P_{MConstRes} \quad (4.51)$$

$$CA_{Pind}(t) = CT_{Ind}(t) + F_{Ind}(t) + CM_{Ind}(t) + P_{MConstInd} \quad (4.52)$$

$$CA_{Pcom}(t) = CT_{Com}(t) + F_{Com}(t) + CM_{Com}(t) + P_{MConstCom} \quad (4.53)$$

D) Determinação do comportamento da carga agregada na subestação

Para a determinação da curva aproximada, representada por $CA_{SEZ}(t)$, capaz de determinar o comportamento da carga agregada na subestação, deve-se realizar a soma ponto a ponto das curvas $CA_{Par}(t)$ obtidas para todos as parcelas de consumo que compõem a subestação em análise (SEZ). Assim, tem-se:

$$CA_{SEZ}(t) = \sum CA_{Par}(t) \quad (4.54)$$

Considerando o exemplo adotado, pode-se determinar essa curva através da seguinte expressão:

$$CA_{SEZ}(t) = CA_{Pres}(t) + CA_{Pind}(t) + CA_{Pcom}(t) \quad (4.55)$$

Portanto, através da aplicação da metodologia proposta neste capítulo, pode-se obter o comportamento da carga agregada em uma subestação (em termos de sua potência ativa),

durante o processo de recomposição da rede elétrica, a partir de uma abordagem top-down, utilizando como dados de entrada informações de acesso relativamente fácil como, por exemplo, a curva de potência ativa diária da subestação e regras extraídas da experiência de especialistas (nesse trabalho, obtidas na literatura). Além disso, essa metodologia permite a consideração da influência de variáveis de difícil modelagem analítica sobre os principais fenômenos físicos que descrevem o comportamento da carga durante a reenergização, possibilitando a obtenção de um modelo de carga mais adequado e próximo da realidade. Essa metodologia também pode ser aplicada, de forma análoga, para a determinação do comportamento da carga agregada em termos de sua potência reativa. Entretanto, não existem, na literatura, muitos estudos acerca dos fenômenos físicos associados à potência reativa de cargas agregadas e de cargas individuais (equipamentos), dificultando, assim, a determinação de regras que permitam uma modelagem precisa dessa grandeza.

4.3. Aplicação

Com o intuito de validar a metodologia proposta, foram realizados alguns testes e simulações, considerando a reenergização de diversas subestações de distribuição. Entretanto, apenas os resultados associados a reenergização de uma dessas subestações serão ilustrados neste capítulo. Essa subestação refere-se à Subestação Andorinha – SE40 da CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz), caracterizada por parcelas de consumo residencial, industrial e comercial. Assim, pode-se definir o conjunto *Par* associado a essa subestação como $Par = [Pres, Pind, Pcom]$.

Além disso, foi considerada, nessas simulações, apenas uma categoria de carga agregada relacionada a cada uma das parcelas de consumo. A primeira categoria de carga agregada está associada à parcela de consumo residencial e refere-se à carga agregada de todas as residências (*Res*). A segunda está relacionada à parcela de consumo industrial e corresponde à carga agregada de todas as indústrias alimentadas pela SE40 (*Ind*). Finalmente, a terceira categoria de carga agregada refere-se à parcela de consumo comercial e representa a carga agregada de todos os estabelecimentos comerciais alimentados pela subestação em análise (*Com*). É importante salientar que a agregação das

cargas residenciais, industriais e comerciais nas categorias *Res*, *Ind* e *Com*, respectivamente, foi possível a partir da hipótese de que todas as residências, indústrias e estabelecimentos comerciais apresentam perfis de consumo similares dentro da parcela de consumo a que se referem. Ou seja, as residências são caracterizadas por perfis de consumo semelhantes, todas as indústrias apresentam perfis de consumo similares, etc.. Assim, o conjunto *Cat*, para esse caso, pode ser definido como $Cat = [Res, Ind, Com]$.

Os equipamentos, associados a cada uma das três categorias de carga agregada, foram considerados por sua possível influência no comportamento da carga na reenergização da rede elétrica conforme descrito a seguir:

Equipamentos relacionados à categoria de carga agregada *Res*: geladeiras (*G*), freezers (*Fr*), aparelhos de ar-condicionado (*AC*), chuveiros (*C*), lâmpadas incandescentes (*Li*) e lâmpadas fluorescentes (*Lf*). Esses equipamentos correspondem aos principais equipamentos encontrados, tipicamente, em uma residência. A carga de cada consumidor dessa categoria, ou seja, de **cada residência**, possui a seguinte composição considerada a partir de informações obtidas nas referências [42, 43]: 1 geladeira, 1 freezer, 1 aparelho de ar-condicionado, 1 chuveiro, 8 lâmpadas incandescentes e 1 lâmpada fluorescente. Os **fatores de penetração** desses equipamentos foram considerados da seguinte maneira:

- $\lambda_G = 87,3\%$
- $\lambda_{Fr} = 17\%$
- $\lambda_{AC} = 7\%$
- $\lambda_C = 100\%$
- $\lambda_{Li} = 100\%$
- $\lambda_{Lf} = 100\%$

Equipamentos relacionados à categoria de carga agregada *Ind*: compressores (*Comp*), serras verticais (*SV*), prensas (*P*), motores (*Mot*), furadeiras (*F*), serras elétricas (*SE*), máquinas de solda (*MS*), aparelhos de ar-condicionado (*ACind*), chuveiros (*Cind*), lâmpadas mistas (*Lm*) e lâmpadas fluorescentes (*Lfind*). Esses equipamentos referem-se a um exemplo de

indústria encontrado na referência [44], que nessa aplicação, será considerada como sendo o único tipo de indústria componente da categoria de carga agregada *Ind* e, portanto, nas simulações a serem realizadas, deve-se considerar essa indústria como sendo o tipo de indústria predominante nessa categoria. A carga de cada consumidor dessa categoria, ou seja, de **cada indústria**, possui a seguinte composição: 2 aparelhos de ar-condicionado, 1 chuveiro, 12 lâmpadas mistas, 24 lâmpadas fluorescentes, 1 compressor, 1 serra vertical, 1 prensa, 3 motores, 4 furadeiras, 2 serras elétricas e 2 máquinas de solda. Os **fatores de penetração** desses equipamentos foram considerados todos como 100%, uma vez que tem-se conhecimento da composição exata do tipo de indústria em análise, tomando-se como base a referência [44].

Equipamentos relacionados à categoria de carga agregada *Com*: geladeiras (*Gcom*), freezers (*Frcom*), aparelhos de ar-condicionado (*ACcom*), lâmpadas incandescentes (*Licom*) e lâmpadas fluorescentes (*Lfcom*). A escolha desses equipamentos foi feita com base na hipótese de que o único tipo de estabelecimento comercial componente da categoria de carga agregada *Com* corresponde a lojas de confecção de roupas. Portanto, nas simulações a serem realizadas, deve-se considerar esse tipo de comércio como sendo o tipo de estabelecimento comercial predominante nessa categoria. A carga de cada consumidor dessa categoria, ou seja, de **cada loja**, possui a seguinte composição considerada a partir da adoção de algumas hipóteses: 1 geladeira, 1 freezer, 1 aparelho de ar-condicionado, 8 lâmpadas incandescentes e 10 lâmpadas fluorescentes. Nesse caso, foi adotada a hipótese de que o fator de penetração de cada um desses equipamentos corresponde a 100%.

Dessa maneira, pode-se definir o conjunto dos equipamentos a serem considerados no processo de determinação do comportamento da carga agregada como sendo:

$$Eq = [G, Fr, AC, C, Li, Lf, ACind, Cind, Comp, SV, P, Mot, F, SE, MS, Lm, Lfind, Gcom, Frcom, ACcom, Licom, Lfcom]$$

Além disso, esses equipamentos podem ser agrupados, considerando os seguintes tipos de controle:

Equipamentos controlados termostaticamente (CT): G , Fr , AC , $Acind$, $Gcom$, $Frcom$ e $ACcom$.

Equipamentos com carga fixa (F): C , Li , Lf , Lm , $Cind$, $Lfind$, $Licom$ e $Lfcom$.

Equipamentos controlados manualmente (CM): $Comp$, SV , P , Mot , F , SE , MS .

4.3.1. Resultados dos Cálculos Preliminares

Os dados de entrada utilizados para a aplicação da metodologia foram extraídos conforme a Tabela 4.3 e das referências [15, 46, 47] e estão descritos a seguir:

1) $P_{SE40}(t)$: Amostra da curva diária de potência ativa da SE40, representada pela Figura 4.18.

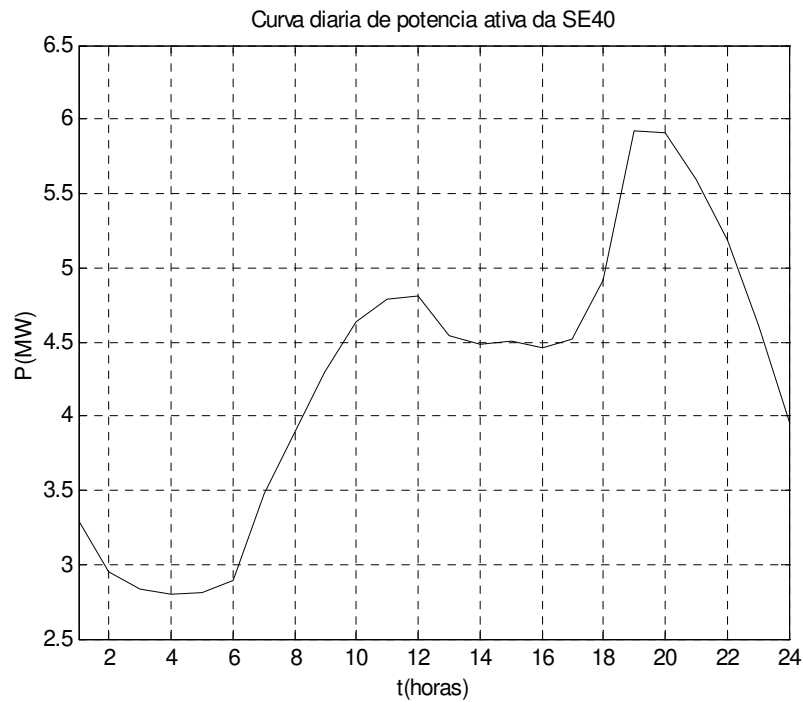


Figura 4.18: Curva diária de potência ativa da SE40 – $P_{SE40}(t)$

2) C_{SE40} : Calculado (Tabela 4.3).

$$C_{SE40} = 102,1 \text{ MWh}$$

3) C_{MSE40} : Obtido a partir de dados da concessionária.

$$C_{MSE40} = 3063 \text{ MWh}$$

4) $C_{MParSE40}$: Obtido a partir de dados da concessionária.

$$C_{MParSE40} = \begin{bmatrix} C_{MPr esSE40} \\ C_{MPindSE40} \\ C_{MPcomSE40} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2379,95 \\ 153,15 \\ 529,90 \end{bmatrix} \text{ MWh}$$

5) $comp_{SE40}$: Calculado (Tabela 4.3).

$$comp_{SE40} = \begin{bmatrix} \alpha_{SE40} \\ \beta_{SE40} \\ \gamma_{SE40} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 77,7 \\ 5 \\ 17,3 \end{bmatrix} \%$$

6) C_{MIEq} : Obtido a partir de tabelas da literatura e representado nas Tabelas 4.12 a 4.14.

Tabela 4.12: Consumo médio mensal de um equipamento – Categoria de carga agregada *Res*

Equipamento	Consumo Médio Mensal de um Equipamento(kWh)
Geladeira	$C_{MIG} = 45$
Freezer	$C_{MIFr} = 80$
Ar-condicionado	$C_{MIAC} = 240$
Chuveiro	$C_{MIC} = 70$
Lâmpada incandescente	$C_{MILi} = 10,5$
Lâmpada fluorescente	$C_{MILf} = 4,09$

Tabela 4.13: Consumo médio mensal de um equipamento – Categoria de carga agregada *Ind*

Equipamento	Consumo Médio Mensal de um Equipamento(kWh)
Lâmpada mista	$C_{MILm} = 66$
Lâmpada fluorescente	$C_{MILf ind} = 10,5$
Ar-condicionado	$C_{MIAC ind} = 250,8$
Chuveiro	$C_{MIC ind} = 440$
Compressor	$C_{M1Comp} = 2347$
Serra vertical	$C_{MISV} = 1734,5$
Prensa	$C_{MIP} = 1734,5$
Motor	$C_{MIMot} = 1190,6$
Furadeira	$C_{MIF} = 1203,8$
Serra elétrica	$C_{MISE} = 514,8$
Máquina de solda	$C_{MIMS} = 1056$

Tabela 4.14: Consumo médio mensal de um equipamento – Categoria de carga agregada *Com*

Equipamento	Consumo Médio Mensal de um Equipamento(kWh)
Geladeira	$C_{MIG com} = 45$
Freezer	$C_{MIFr com} = 80$
Ar-condicionado	$C_{MIAC com} = 208$
Lâmpada incandescente	$C_{MILicom} = 8,67$
Lâmpada fluorescente	$C_{MILf com} = 6,37$

7) C_{MEq} : Calculado (Tabela 4.3) e representado nas Tabelas 4.15 a 4.17 a seguir. Nas equações definidas nessa tabela, os números totais de residências, indústrias e estabelecimentos comerciais associados, respectivamente, às categorias de carga agregada *Res*, *Ind* e *Com* foram obtidos através das seguintes expressões:

$$n_{Res} = \frac{C_{M1Res}}{C_{M Res}} = \frac{0,227}{C_{M Res}}$$

$$n_{Ind} = \frac{C_{M1Ind}}{C_{M Ind}} = \frac{19,3}{C_{M Ind}}$$

$$n_{Com} = \frac{C_{M1Com}}{C_{MCom}} = \frac{0,466}{C_{MCom}}$$

em que os valores de C_{MRes} , C_{MInd} , C_{MCom} , C_{M1Res} , C_{M1Ind} e C_{M1Com} estão representados, a seguir, nos itens 8 e 9 desses cálculos preliminares.

Tabela 4.15: Consumo médio mensal de um grupo de equipamentos – Categoria de carga agregada *Res*

Equipamento	Consumo Médio Mensal de um Grupo de Equipamentos (kWh)
Geladeiras	$C_{MG} = 1.10500.0,873.45 = 412492,5kWh$
Freezers	$C_{MFr} = 1.10500.0,17.80 = 142800kWh$
Aparelhos de ar-condicionado	$C_{MAC} = 1.10500.0,07.240 = 176400kWh$
Chuveiros	$C_{MC} = 1.10500.1.70 = 735000kWh$
Lâmpadas incandescentes	$C_{MLi} = 8.10500.1.10,5 = 882000kWh$
Lâmpadas fluorescentes	$C_{MLf} = 1.10500.1.4,09 = 42945kWh$

Tabela 4.16: Consumo médio mensal de um grupo de equipamentos – Categoria de carga agregada *Ind*

Equipamento	Consumo Médio Mensal de um Grupo de Equipamentos (kWh)
Lâmpadas mistas	$C_{MLm} = 12.8.1.66 = 6336kWh$
Lâmpadas fluorescentes	$C_{MLfind} = 24.8.1.10,5 = 2016kWh$
Aparelhos de ar-condicionado	$C_{MACind} = 2.8.1.250,8 = 4012,8kWh$
Chuveiros	$C_{MCind} = 1.8.1.440 = 3520kWh$
Compressores	$C_{MComp} = 1.8.1.2347 = 18776kWh$
Serras verticais	$C_{MSV} = 1.8.1.1734,5 = 13876kWh$
Prensas	$C_{MP} = 1.8.1.1734,5 = 13876kWh$
Motores	$C_{MMot} = 3.8.1.1190,6 = 28574,4kWh$
Furadeiras	$C_{MF} = 4.8.1.1203,8 = 38521,6kWh$
Serras elétricas	$C_{MSE} = 2.8.1.514,8 = 8236,8kWh$
Máquinas de solda	$C_{MMS} = 2.8.1.1056 = 16896kWh$

Tabela 4.17: Consumo médio mensal de um grupo de equipamentos – Categoria de carga agregada *Com*

Equipamento	Consumo Médio Mensal de um Grupo de Equipamentos (kWh)
Geladeiras	$C_{MGcom} = 1.1100.1.45 = 49500kWh$
Freezers	$C_{MFrcom} = 1.1100.1.80 = 88000kWh$
Aparelhos de ar-condicionado	$C_{MACcom} = 1.1100.1.208 = 228800kWh$
Lâmpadas incandescentes	$C_{MLicom} = 8.1100.1.8,67 = 76296kWh$
Lâmpadas fluorescentes	$C_{MLfcom} = 10.1100.1.6,37 = 70070kWh$

8) C_{MCat} : Obtido a partir de dados da concessionária.

$$C_{MCat} = \begin{bmatrix} C_{MRes} \\ C_{MInd} \\ C_{MCom} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2379,95 \\ 153,15 \\ 529,90 \end{bmatrix} MWh$$

Deve-se salientar que no caso desse exemplo de aplicação, $C_{MCat} = C_{MParSE40}$, uma vez que para cada parcela de consumo existe apenas uma categoria de carga agregada associada.

9) C_{M1Cat} : Obtido a partir de tabelas da literatura.

$$C_{M1Cat} = \begin{bmatrix} C_{M1Res} \\ C_{M1Ind} \\ C_{M1Com} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,227 \\ 19,3 \\ 0,466 \end{bmatrix} MWh$$

10) $comp_{Par}$: Calculado (Tabela 4.3).

$$comp_{Pres} = [\varphi_{Res}] = \frac{C_{MRes}}{C_{MPres}} = 1$$

$$comp_{Pind} = [\varphi_{Ind}] = \frac{C_{MInd}}{C_{MPind}} = 1$$

$$comp_{Pcom} = [\varphi_{Com}] = \frac{C_{MCom}}{C_{MPcom}} = 1$$

11) t_{EqCat} : Obtido a partir de tabelas da literatura, conforme ilustra a Tabela 4.18.

Tabela 4.18: Duração dos ciclos termostáticos para os diversos equipamentos – Categorias de Carga Agregada *Res*, *Ind* e *Com*

Equipamento	Ciclo Termostático
Geladeira	$t_{G\text{ Res}} = t_{G\text{ comCom}} = 1h$
Freezer	$t_{Fr\text{ Res}} = t_{Fr\text{ comCom}} = 1h$
Aparelho de ar-condicionado	$t_{AC\text{ Res}} = t_{AC\text{ indInd}} = t_{AC\text{ comCom}} = 1h$

12) $t_{onEqCat}$: Obtido a partir de tabelas da literatura, conforme ilustra a Tabela 4.19.

Tabela 4.19: Duração dos ciclos “ligado” para os diversos equipamentos – Categorias de Carga Agregada *Res*, *Ind* e *Com*

Equipamento	Ciclo Termostático
Geladeira	$t_{onG\text{ Res}} = t_{onG\text{ comCom}} = 0,33h$
Freezer	$t_{onFr\text{ Res}} = t_{onFr\text{ comCom}} = 0,33h$
Aparelho de ar-condicionado	$t_{onAC\text{ Res}} = t_{onAC\text{ indInd}} = t_{onAC\text{ comCom}} = 0,33h$

13) $t_{offEqCat}$: Obtido a partir de tabelas da literatura, conforme ilustra a Tabela 4.20.

Tabela 4.20: Duração dos ciclos “desligado” para os diversos equipamentos – Categorias de Carga Agregada *Res*, *Ind* e *Com*

Equipamento	Ciclo Termostático
Geladeira	$t_{offG\text{ Res}} = t_{offG\text{ comCom}} = 0,67h$
Freezer	$t_{offFr\text{ Res}} = t_{offFr\text{ comCom}} = 0,67h$
Aparelho de ar-condicionado	$t_{offAC\text{ Res}} = t_{offAC\text{ indInd}} = t_{offAC\text{ comCom}} = 0,67h$

14) $tipo_{IndústriaPredomCat}$: Obtido a partir da adoção da hipótese de que a indústria predominante na categoria de carga agregada *Ind* corresponde à indústria exemplo extraída da referência [44] que representa uma serralheria.

15) *tipoComércioPredomCat*: Obtido a partir da adoção da hipótese de que o comércio predominate na categoria de carga agregada *Cat* corresponde a estabelecimentos comerciais do tipo loja de confecção de roupas.

Os resultados obtidos da aplicação do algoritmo descrito no item 4.2.1.1. estão descritos a seguir.

Passo 1: Determinação da potência ativa média da SE40

$$P_{MSE40} = \frac{\int_0^{24h} P_{SE40}(t)dt}{24horas} = \frac{C_{SE40}}{24horas} = \frac{102,1}{24horas} = 4,2542MW$$

Passo 2: Determinação da potência ativa média de cada parcela de consumidor (residencial, industrial e comercial)

$$\begin{bmatrix} P_{MPr es} \\ P_{MPind} \\ P_{MPcom} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,777 \\ 0,05 \\ 0,173 \end{bmatrix} . 4,2542 = \begin{bmatrix} 3,3055 \\ 0,2127 \\ 0,736 \end{bmatrix} MW$$

Passo 3: Definição das categorias de carga agregada (já definidas do início deste item) e determinação da potência ativa média associada a cada uma delas.

$$P_{MRes} = comp_{Pres} . P_{MPr es} = 1.3,3055 = 3,3055MW$$

$$P_{MInd} = comp_{Pind} . P_{MPind} = 1.0,2127 = 0,2127MW$$

$$P_{MCom} = comp_{Pcom} . P_{MPcom} = 1.0,736 = 0,736MW$$

Passo 4: Determinação da potência ativa média de cada grupo de equipamentos do mesmo tipo com relação a cada categoria de carga agregada.

$$P_{MG\text{ Re } s} = \frac{C_{M1G}}{C_{M1\text{ Re } s}} \cdot P_{M\text{ Re } s} = \frac{45}{227} \cdot 3,3055 = 0,6553MW$$

$$P_{MFr\text{ Re } s} = \frac{C_{M1Fr}}{C_{M1\text{ Re } s}} \cdot P_{M\text{ Re } s} = \frac{80}{227} \cdot 3,3055 = 1,1650MW$$

$$P_{MAC\text{ Re } s} = \frac{C_{M1AC}}{C_{M1\text{ Re } s}} \cdot P_{M\text{ Re } s} = \frac{240}{227} \cdot 3,3055 = 3,4950MW$$

$$P_{MC\text{ Re } s} = \frac{C_{M1C}}{C_{M1\text{ Re } s}} \cdot P_{M\text{ Re } s} = \frac{70}{227} \cdot 3,3055 = 1,0193MW$$

$$P_{MLi\text{ Re } s} = \frac{C_{M1Li}}{C_{M1\text{ Re } s}} \cdot P_{M\text{ Re } s} = \frac{10,5}{227} \cdot 3,3055 = 0,1529MW$$

$$P_{MLf\text{ Re } s} = \frac{C_{M1Lf}}{C_{M1\text{ Re } s}} \cdot P_{M\text{ Re } s} = \frac{4,09}{227} \cdot 3,3055 = 0,0596MW$$

$$P_{MLmInd} = \frac{C_{M1Lm}}{C_{M1Ind}} \cdot P_{MInd} = \frac{66}{19300} \cdot 0,2127 = 0,0007MW$$

$$P_{MLfindInd} = \frac{C_{M1Lfind}}{C_{M1Ind}} \cdot P_{MInd} = \frac{10,5}{19300} \cdot 0,2127 = 0,0001MW$$

$$P_{MACindInd} = \frac{C_{M1ACind}}{C_{M1Ind}} \cdot P_{MInd} = \frac{250,8}{19300} \cdot 0,2127 = 0,0028MW$$

$$P_{MCindInd} = \frac{C_{M1Cind}}{C_{M1Ind}} \cdot P_{MInd} = \frac{440}{19300} \cdot 0,2127 = 0,0048MW$$

$$P_{MCompInd} = \frac{C_{M1Comp}}{C_{M1Ind}} \cdot P_{MInd} = \frac{2347}{19300} \cdot 0,2127 = 0,0259MW$$

$$P_{MSVInd} = \frac{C_{M1SV}}{C_{M1Ind}} \cdot P_{MInd} = \frac{1734,5}{19300} \cdot 0,2127 = 0,0191MW$$

$$P_{MPInd} = \frac{C_{M1P}}{C_{M1Ind}} \cdot P_{MInd} = \frac{1734,5}{19300} \cdot 0,2127 = 0,0191MW$$

$$P_{MMotInd} = \frac{C_{M1Mot}}{C_{M1Ind}} \cdot P_{MInd} = \frac{1190,6}{19300} \cdot 0,2127 = 0,0131MW$$

$$P_{MFInd} = \frac{C_{M1F}}{C_{M1Ind}} \cdot P_{MInd} = \frac{1203,8}{19300} \cdot 0,2127 = 0,0133MW$$

$$P_{MSEInd} = \frac{C_{M1SE}}{C_{M1Ind}} \cdot P_{MInd} = \frac{514,8}{19300} \cdot 0,2127 = 0,0057MW$$

$$P_{MMSInd} = \frac{C_{M1MS}}{C_{M1Ind}} \cdot P_{MInd} = \frac{1056}{19300} \cdot 0,2127 = 0,0116MW$$

$$P_{MGcomCom} = \frac{C_{M1Gcom}}{C_{M1Com}} \cdot P_{MCom} = \frac{45}{466} \cdot 0,736 = 0,0711MW$$

$$P_{MFrcomCom} = \frac{C_{M1Frcom}}{C_{M1Com}} \cdot P_{MCom} = \frac{80}{466} \cdot 0,736 = 0,1264MW$$

$$P_{MACcomCom} = \frac{C_{M1ACcom}}{C_{M1Com}} \cdot P_{MCom} = \frac{208}{466} \cdot 0,736 = 0,3285MW$$

$$P_{MLicomCom} = \frac{C_{M1Licom}}{C_{M1Com}} \cdot P_{MCom} = \frac{8,67}{466} \cdot 0,736 = 0,0137MW$$

$$P_{MLfcomCom} = \frac{C_{M1Lfcom}}{C_{M1Com}} \cdot P_{MCom} = \frac{6,37}{466} \cdot 0,736 = 0,01MW$$

Passo 5: Determinação da potência média, por categoria de carga agregada, correspondente aos equipamentos que não foram levados em conta na modelagem

$$P_{MConstRes} = P_{MRes} - \sum P_{MEqRes} = 0$$

$$P_{MConstInd} = P_{MInd} - \sum P_{MEqInd} = 0$$

$$P_{MConstCom} = P_{MCom} - \sum P_{MEqCom} = 0$$

Esses resultados se devem à consideração da hipótese de que o consumo médio de cada consumidor associado a uma determinada categoria de carga agregada é composto apenas pelo consumo médio relativo aos equipamentos que foram levados em conta nesse exemplo de aplicação, ou seja:

$$C_{M1Cat} = \sum C_{MEqCat} \quad (4.56)$$

Passo 6: Fim

4.3.2. Resultados dos Cálculos da Primeira Etapa

A) Interface de Fuzzificação, Base de Regras e Interface de Defuzzificação

A Interface de Fuzzificação, a Base de Regras e a Interface de Defuzzificação descritas no item 4.2.1.2, foram implementadas através de um aplicativo gráfico, desenvolvido na linguagem Java. Esse aplicativo conta com recursos de edição avançados, permitindo a definição e edição das variáveis de entrada e de saída da base de regras, das regras que compõem a base de regras e dos conjuntos nebulosos associados aos qualificativos lingüísticos referentes às variáveis de entrada e de saída. Através da definição dessas grandezas e da utilização de uma interface gráfica amigável, pôde-se realizar, então, a fuzzificação das variáveis de entrada e de saída, a inferência das variáveis de saída (a partir das regras definidas na base de regras) e, finalmente, a defuzzificação das variáveis de saída. O aplicativo possibilita, ainda, salvar e carregar os dados do sistema que está sendo simulado a qualquer instante, flexibilizando, por exemplo, o processo de edição de

regras. Assim, pode-se incluir, facilmente, uma nova regra na base de regras definida num momento anterior, de forma rápida e precisa.

A Figura 4.19 ilustra uma tela do aplicativo gráfico desenvolvido, onde se pode observar as variáveis de entrada (temperatura ambiente e hora do dia) e de saída (k_{ACRes} , $k_{ACindInd}$, $k_{ACcomCom}$, k_{CRes} , k_{LiRes} , k_{LmInd} , $k_{LicomCom}$, $k_{CompInd}$, k_{tonRes} e $k_{toffRes}$) da base de regras. Nota-se, também, a presença de controles que permitem a inclusão (botão “Nova Variável”), a exclusão (botão “Excluir Variável”) e a edição (botão “Editar Variável”) de variáveis.

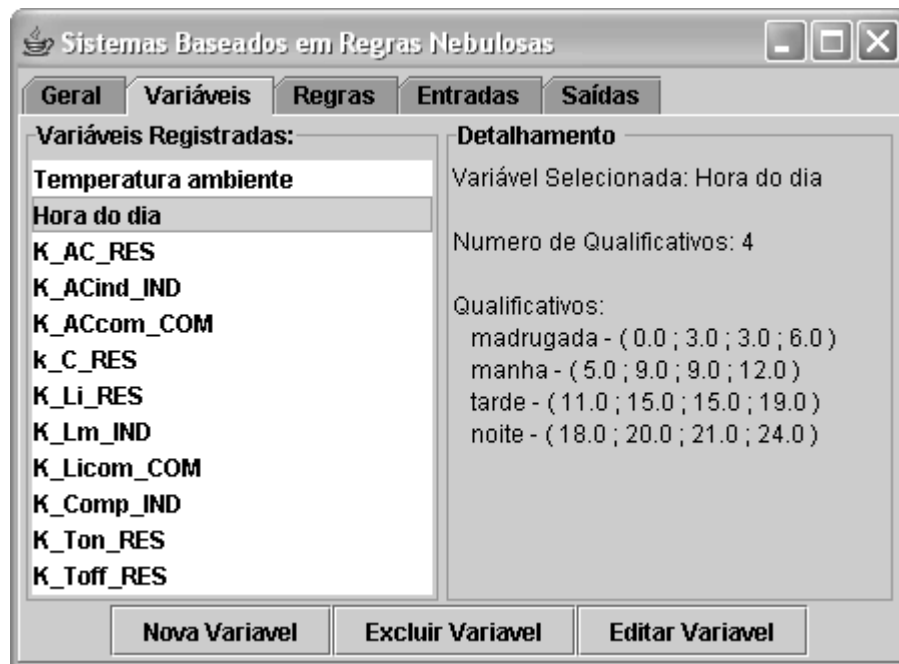


Figura 4.19: Tela do aplicativo gráfico desenvolvido – Interface de Fuzzificação

Em destaque, está representada a variável “hora do dia”, cujos qualificativos lingüísticos estão descritos do lado direito da tela (madrugada, manhã, tarde e noite). Os números representados entre parênteses ao lado desses qualificativos lingüísticos representam as abscissas dos conjuntos nebulosos associados a cada um deles. Por exemplo, o qualificativo lingüístico “manhã” está representado pelo conjunto nebuloso referente a uma função de pertinência, definida pelo trapézio formado pelos pontos (5;0), (9;1), (9;1) e (12;0). Como, nesse caso, o segundo e terceiro pontos são coincidentes, tem-

se, na verdade, uma função de pertinência triangular. Para cada um desses pontos, o primeiro número refere-se à hora do dia e o segundo número corresponde ao grau de pertinência dessa hora do dia ao conjunto nebuloso que representa o qualificativo “manhã”. A Figura 4.20 ilustra os quatro qualificativos dessa variável, bem como os conjuntos nebulosos associados a cada um deles.

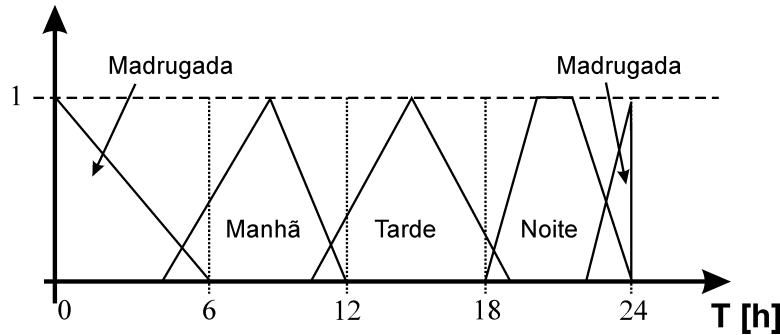


Figura 4.20: Conjuntos nebulosos associados à variável “hora do dia”

Esse processo de definição e edição das variáveis, envolvendo sua associação aos conjuntos nebulosos caracteriza a etapa de fuzzificação das variáveis. Deve-se salientar, ainda, que somente alguns dos modificadores (variáveis de saída da base de regras) foram utilizados nesse exemplo de aplicação, uma vez que foram adotadas as seguintes hipóteses:

- Os modificadores de potência das geladeiras e dos freezers, nesse exemplo de aplicação, foram considerados como unitários, admitindo-se que esses equipamentos estão sempre ligados ao longo do dia e que, portanto, não existe modificação nos seus níveis de potência com relação à variação da temperatura ambiente e da hora do dia, ou seja, $k_{GRes} = k_{FrRes} = k_{GcomCom} = k_{FrcomCom} = 1$. Assim, essas grandezas não precisam ser obtidas a partir da aplicação da base de regras.
- Os modificadores de potência dos chuveiros das categorias de carga agregada *Res* e *Ind* foram adotados como sendo os mesmos, admitindo-se que as variáveis de entrada da base de regras possuem influência semelhante nessas duas variáveis de saída. Assim, $k_{CRes} = k_{CindInd}$ e apenas uma dessas variáveis precisa ser representada no aplicativo desenvolvido (no caso, a variável k_{CRes}).

- Os modificadores de potência das lâmpadas incandescentes e fluorescentes da categoria de carga agregada *Res* foram adotados como sendo os mesmos, admitindo-se, novamente, que as variáveis de entrada possuem influência semelhante nessas duas variáveis de saída. Dessa maneira, $k_{LiRes} = k_{LfRes}$ e apenas uma dessas variáveis precisa ser representada no aplicativo desenvolvido (no caso, a variável k_{LiRes}).
- Pelos mesmos motivos, os modificadores de potência das lâmpadas mistas e fluorescentes da categoria de carga agregada *Ind* foram adotados como sendo os mesmos, ou seja, $k_{LmInd} = k_{LfIndInd}$ e apenas uma dessa variáveis precisa ser representada no aplicativo desenvolvido (no caso, a variável k_{LmInd}).
- Analogamente, os modificadores de potência das lâmpadas incandescentes e fluorescentes da categoria de carga agregada *Com* foram adotados como sendo os mesmos, ou seja, $k_{LicomCom} = k_{LfcomCom}$ e apenas uma dessas variáveis precisa ser representada no aplicativo desenvolvido (no caso, a variável $k_{LicomCom}$).
- Da mesma maneira, os modificadores de potência dos equipamentos da categoria de carga agregada *Ind* (*Comp*, *SV*, *P*, *Mot*, *SE* e *MS*) foram considerados como sendo os mesmos, ou seja, $k_{CompInd} = k_{SVInd} = k_{PInd} = k_{MotInd} = k_{SEInd} = k_{MSInd}$ e apenas uma dessas variáveis precisa ser representada no aplicativo desenvolvido (no caso, a variável $k_{CompInd}$).
- De forma similar, os modificadores de tempo t_{on} foram considerados como sendo os mesmos para todas as categorias de carga agregada, ou seja, $k_{tonRes} = k_{tonInd} = k_{tonCom}$. Assim, apenas uma dessas variáveis (de cada tipo) precisa ser representada no aplicativo desenvolvido (no caso, a variável k_{tonRes}).

A base de regras implementada é constituída por 42 regras relacionando as variáveis de entrada às variáveis de saída. A Figura 4.21 ilustra, em destaque, uma das regras (regra 28), envolvendo as variáveis “hora do dia” e k_{CRes} , na qual fica representada a característica de que os chuveiros relacionados à categoria de carga agregada *Res* são mais utilizados no período noturno, daí o conseqüente da regra ser “modificador k_{CRes} é alto” (lado direito da tela). Nessa figura, pode-se observar, também, os controles que permitem a inclusão de uma regra (botão “Nova Regra”), a exclusão de uma regra (botão “Excluir Regra”), a

inclusão de um antecedente (botão “Inserir Antecedente”), a exclusão de um antecedente (botão “Excluir Antecedente”), a definição de um conseqüente (botão “Setar Conseqüente”) e a edição do nome da regra (botão “Editar Nome”).

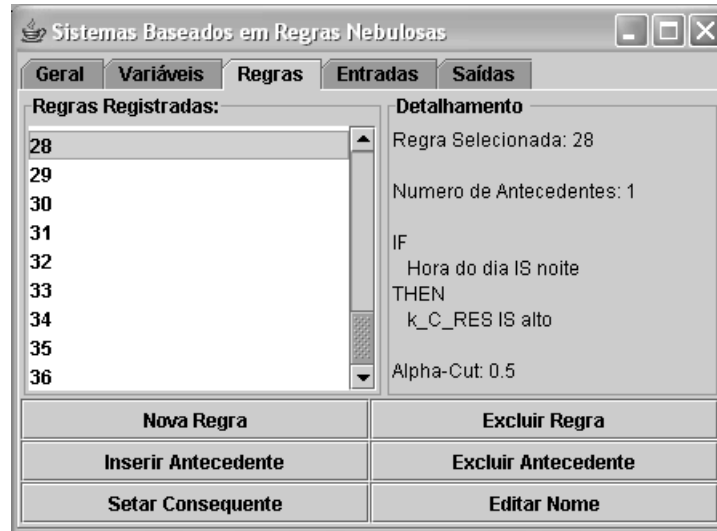


Figura 4.21: Tela do aplicativo gráfico desenvolvido – Base de Regras

As regras que compõem a Base de Regras Implementada estão descritas a seguir:

Regra 1: SE hora do dia É madrugada ENTÃO k_{ACRes} É baixo.

Regra 2: SE hora do dia É madrugada ENTÃO $k_{ACindInd}$ É baixo.

Regra 3: SE hora do dia É madrugada ENTÃO $k_{ACcomCom}$ É baixo.

Regra 4: SE hora do dia É madrugada ENTÃO k_{CRes} É baixo.

Regra 5: SE hora do dia É madrugada ENTÃO k_{LiRes} É baixo.

Regra 6: SE hora do dia É madrugada ENTÃO k_{LmInd} É baixo.

Regra 7: SE hora do dia É madrugada ENTÃO $k_{LicomCom}$ É baixo.

Regra 8: SE hora do dia É madrugada ENTÃO $k_{CompInd}$ É baixo.

Regra 9: SE hora do dia É manhã ENTÃO k_{ACRes} É alto.

Regra 10: SE hora do dia É manhã ENTÃO $k_{ACindInd}$ É alto.

Regra 11: SE hora do dia É manhã ENTÃO $k_{ACcomCom}$ É alto.

Regra 12: SE hora do dia É manhã ENTÃO k_{CRes} É baixo.

Regra 13: SE hora do dia É manhã ENTÃO k_{LiRes} É baixo.

- Regra 14:** *SE* hora do dia *É* manhã *ENTÃO* k_{LmInd} *É* alto.
- Regra 15:** *SE* hora do dia *É* manhã *ENTÃO* $k_{LicomCom}$ *É* baixo.
- Regra 16:** *SE* hora do dia *É* manhã *ENTÃO* $k_{CompInd}$ *É* alto.
- Regra 17:** *SE* hora do dia *É* tarde *ENTÃO* k_{ACRes} *É* alto.
- Regra 18:** *SE* hora do dia *É* tarde *ENTÃO* $k_{ACindInd}$ *É* alto.
- Regra 19:** *SE* hora do dia *É* tarde *ENTÃO* $k_{ACcomCom}$ *É* alto.
- Regra 20:** *SE* hora do dia *É* tarde *ENTÃO* k_{CRes} *É* baixo.
- Regra 21:** *SE* hora do dia *É* tarde *ENTÃO* k_{LiRes} *É* baixo.
- Regra 22:** *SE* hora do dia *É* tarde *ENTÃO* k_{LmInd} *É* alto.
- Regra 23:** *SE* hora do dia *É* tarde *ENTÃO* $k_{LicomCom}$ *É* baixo.
- Regra 24:** *SE* hora do dia *É* tarde *ENTÃO* $k_{CompInd}$ *É* alto.
- Regra 25:** *SE* hora do dia *É* noite *ENTÃO* k_{ACRes} *É* baixo.
- Regra 26:** *SE* hora do dia *É* noite *ENTÃO* $k_{ACindInd}$ *É* baixo.
- Regra 27:** *SE* hora do dia *É* noite *ENTÃO* $k_{ACcomCom}$ *É* alto.
- Regra 28:** *SE* hora do dia *É* noite *ENTÃO* k_{CRes} *É* alto.
- Regra 29:** *SE* hora do dia *É* noite *ENTÃO* k_{LiRes} *É* alto.
- Regra 30:** *SE* hora do dia *É* noite *ENTÃO* k_{LmInd} *É* baixo.
- Regra 31:** *SE* hora do dia *É* noite *ENTÃO* $k_{LicomCom}$ *É* alto.
- Regra 32:** *SE* hora do dia *É* noite *ENTÃO* $k_{CompInd}$ *É* baixo.
- Regra 33:** *SE* temperatura ambiente *É* baixa *ENTÃO* k_{tonRes} *É* baixo.
- Regra 34:** *SE* temperatura ambiente *É* baixa *ENTÃO* $k_{toffRes}$ *É* alto.
- Regra 35:** *SE* temperatura ambiente *É* alta *ENTÃO* k_{tonRes} *É* alto.
- Regra 36:** *SE* temperatura ambiente *É* alta *ENTÃO* $k_{toffRes}$ *É* baixo.
- Regra 37:** *SE* hora do dia *É* manhã *E* temperatura ambiente *É* baixa *ENTÃO* k_{ACRes} *É* baixo.
- Regra 38:** *SE* hora do dia *É* manhã *E* temperatura ambiente *É* baixa *ENTÃO* $k_{ACindInd}$ *É* baixo.
- Regra 39:** *SE* hora do dia *É* manhã *E* temperatura ambiente *É* baixa *ENTÃO* $k_{ACcomCom}$ *É* baixo.

Regra 40: *SE* hora do dia *É* tarde *E* temperatura ambiente *É* baixa *ENTÃO* k_{ACRes} *É* baixo.

Regra 41: *SE* hora do dia *É* tarde *E* temperatura ambiente *É* baixa *ENTÃO* $k_{ACindInd}$ *É* baixo.

Regra 42: *SE* hora do dia *É* tarde *E* temperatura ambiente *É* baixa *ENTÃO* $k_{ACcomCom}$ *É* baixo.

Finalmente, a etapa de defuzzificação das variáveis de saída pode ser observada na Figura 4.22, onde se encontram representados os valores calculados dos modificadores para uma dada condição de entrada. Conforme citado anteriormente, o método utilizado para a defuzzificação das variáveis foi o Método do Centróide. As amostras definidas nessa tela correspondem ao número de amostras extraídas da curva associada à envoltória de todos os conjuntos nebulosos que definem uma variável de saída.

Sistemas Baseados em Regras Nebulosas

Abas: Geral | Variáveis | Regras | Entradas | Saídas

Método de Defuzzificação

Centróide ▼ Amostrs: 100 [Executar]

Saídas Obtidas das Regras:

Variável	Valor Defuzzificado
K_AC_RES	0.22879518072289162
K_ACind_IND	0.22709643605870014
K_ACcom_COM	0.23005050505050498
k_C_RES	0.4705882352941177
K_Li_RES	0.4851305483028721
K_Lm_IND	0.22709643605870014
K_Licom_COM	0.4776054421768708
K_Comp_IND	0.22709643605870014
K_Ton_RES	0.703648068669528
K_Toff_RES	3.0700262639527267

Figura 4.22: Tela do aplicativo gráfico desenvolvido – Interface de Defuzzificação

B) Potências Ativas Médias e Tempos (t_{on} e t_{off}) no instante da reenergização:

A **primeira situação** de blecaute simulada (denominada **Situação 1**) pode ser considerada como **crítica**, pois devido a suas características especificadas (blecaute de longa duração, reenergização ocorrida no horário de pico e temperatura ambiente elevada) são esperados um grande pico de potência no instante do religamento, uma grande duração desse pico de potência e um tempo longo até a retomada do regime permanente. A Tabela 4.21 sintetiza as características da primeira situação de blecaute.

Tabela 4.21: Características da Situação 1

Tempo de Duração do Blecaute ($t_{blecaute}$)	Hora da ocorrência da interrupção (t_i)	Hora do dia (t_R) – horário da reenergização	Temperatura Ambiente
2 horas	17:00hs	19:00 hs	30°C

Os resultados obtidos a partir da utilização do aplicativo gráfico desenvolvido podem ser visualizados na Figura 4.23.

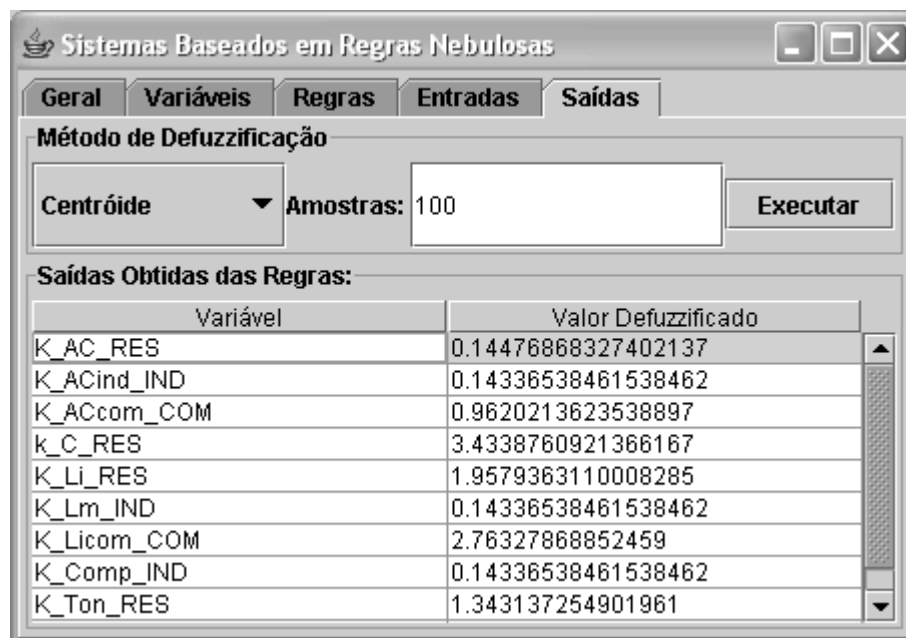


Figura 4.23: Tela do aplicativo gráfico desenvolvido – Modificadores para a Situação 1

Através dos valores desses modificadores e das hipóteses adotadas anteriormente, pode-se calcular (a partir das equações 4.22 a 4.24) os valores de potência ativa média e os tempos (t_{on} e t_{off}) no instante do religamento, considerando-se todos os equipamentos e categorias de carga agregada analisados nesse exemplo de aplicação. Esses valores encontram-se representados na Tabela 4.22.

Tabela 4.22: $P_{MEqCatRelig}$, $t_{onEqCatRelig}$ e $t_{offEqCatRelig}$ - Situação 1

Categoria de Carga Agregada Res	Categoria de Carga Agregada Ind	Categoria de Carga Agregada Com
$P_{MGResRelig} = 0,6553 \text{ MW}$ $P_{MFrResRelig} = 1,165 \text{ MW}$ $P_{MACResRelig} = 0,5057 \text{ MW}$ $P_{MCResRelig} = 3,5025 \text{ MW}$ $P_{MLiResRelig} = 0,2996 \text{ MW}$ $P_{MLjResRelig} = 0,1175 \text{ MW}$ $t_{onGResRelig} = 0,4473 \text{ h}$ $t_{offGResRelig} = 0,5527 \text{ h}$ $t_{onFrResRelig} = 0,4473 \text{ h}$ $t_{offFrResRelig} = 0,5527 \text{ h}$ $t_{onACResRelig} = 0,4473 \text{ h}$ $t_{offACResRelig} = 0,5527 \text{ h}$	$P_{MACindIndRelig} = 0,0004 \text{ MW}$ $P_{MCindIndRelig} = 0,0165 \text{ MW}$ $P_{MLmIndRelig} = 0,0001 \text{ MW}$ $P_{MLfindIndRelig} = 0,00001 \text{ MW}$ $P_{MCompIndRelig} = 0,0037 \text{ MW}$ $P_{MSVIndRelig} = 0,0027 \text{ MW}$ $P_{MPlIndRelig} = 0,0027 \text{ MW}$ $P_{MMotIndRelig} = 0,0019 \text{ MW}$ $P_{MFIndRelig} = 0,0019 \text{ MW}$ $P_{MSEIndRelig} = 0,0008 \text{ MW}$ $P_{MMSIndRelig} = 0,0017 \text{ MW}$ $t_{onACindIndRelig} = 0,4473 \text{ h}$ $t_{offACindIndRelig} = 0,5527 \text{ h}$	$P_{MGcomComRelig} = 0,0711 \text{ MW}$ $P_{MFrcomComRelig} = 0,1264 \text{ MW}$ $P_{MACcomComRelig} = 0,3160 \text{ MW}$ $P_{MLicomComRelig} = 0,0379 \text{ MW}$ $P_{MLfcomComRelig} = 0,0276 \text{ MW}$ $t_{onGcomComRelig} = 0,4473 \text{ h}$ $t_{offGcomComRelig} = 0,5527 \text{ h}$ $t_{onFrcomComRelig} = 0,4473 \text{ h}$ $t_{offFrcomComRelig} = 0,5527 \text{ h}$ $t_{onACcomComRelig} = 0,4473 \text{ h}$ $t_{offACcomComRelig} = 0,5527 \text{ h}$

C) Parâmetros Físicos:

Os parâmetros físicos associados ao comportamento dos equipamentos durante a reenergização da subestação em análise são determinados conforme descrito no item 4.2.1.2.

- **Equipamentos Controlados Termostaticamente:**

Os parâmetros físicos relacionados ao comportamento dos equipamentos controlados termostaticamente, para essa situação de blecaute, estão representados na Tabela 4.23.

Tabela 4.23: Parâmetros físicos dos equipamentos controlados termostaticamente - Situação 1

Categoria de Carga Agregada Res	Categoria de Carga Agregada Ind	Categoria de Carga Agregada Com
$P_{MGResRelig} = 0,6553 \text{ MW}$ $t_{AGRes} = 1,3419 \text{ h}$ $t_{BGRes} = 0,5527 \text{ h}$ $P_{MAXGRes} = 1,4652 \text{ MW}$ $P_{MFrResRelig} = 1,165 \text{ MW}$ $t_{AFrRes} = 1,3419 \text{ h}$ $t_{BFrRes} = 0,5527 \text{ h}$ $P_{MAXFrRes} = 2,6048 \text{ MW}$ $P_{MACResRelig} = 0,5057 \text{ MW}$ $t_{AACRes} = 1,3419 \text{ h}$ $t_{BACRes} = 0,5527 \text{ h}$ $P_{MAXACRes} = 1,1307 \text{ MW}$	$P_{MACindIndRelig} = 0,0004 \text{ MW}$ $t_{AACindInd} = 1,3419 \text{ h}$ $t_{BACindInd} = 0,5527 \text{ h}$ $P_{MAXACindInd} = 0,0009 \text{ MW}$	$P_{MGcomComRelig} = 0,0711 \text{ MW}$ $t_{AGcomCom} = 1,3419 \text{ h}$ $t_{BGcomCom} = 0,5527 \text{ h}$ $P_{MAXGcomCom} = 0,1590 \text{ MW}$ $P_{MFrcomComRelig} = 0,1264 \text{ MW}$ $t_{AFrcomCom} = 1,3419 \text{ h}$ $t_{BFrcomCom} = 0,5527 \text{ h}$ $P_{MAXFrcomCom} = 0,2826 \text{ MW}$ $P_{MACcomComRelig} = 0,3160 \text{ MW}$ $t_{AACcomCom} = 1,3419 \text{ h}$ $t_{BACcomCom} = 0,5527 \text{ h}$ $P_{MAXACcomCom} = 0,7066 \text{ MW}$

- **Equipamentos com Carga Fixa:**

Os parâmetros físicos relacionados ao comportamento dos equipamentos com carga fixa, para essa situação de blecaute, estão representados na Tabela 4.24.

Tabela 4.24: Parâmetros físicos dos equipamentos com carga fixa - Situação 1

Categoria de Carga Agregada Res	Categoria de Carga Agregada Ind	Categoria de Carga Agregada Com
$P_{MCResRelig} = 3,5025 \text{ MW}$ $P_{MLiResRelig} = 0,2996 \text{ MW}$ $P_{MLjResRelig} = 0,1175 \text{ MW}$	$P_{MCindIndRelig} = 0,0165 \text{ MW}$ $P_{MLmIndRelig} = 0,0001 \text{ MW}$ $P_{MLfindIndRelig} = 0,00001 \text{ MW}$	$P_{MLicomComRelig} = 0,0379 \text{ MW}$ $P_{MLfcomComRelig} = 0,0276 \text{ MW}$

- **Equipamentos Controlados Manualmente:**

Os parâmetros físicos relacionados ao comportamento dos equipamentos controlados manualmente, para essa situação de blecaute, estão representados na Tabela 4.25.

Tabela 4.25: Parâmetros físicos dos equipamentos controlados manualmente - Situação 1

Categoria de Carga Agregada <i>Ind</i>
$P_{MCompIndRelig} = 0,0037 \text{ MW}$
$P_{MSVIndRelig} = 0,0027 \text{ MW}$
$P_{MPIndRelig} = 0,0027 \text{ MW}$
$P_{MMotIndRelig} = 0,0019 \text{ MW}$
$P_{MFIndRelig} = 0,0019 \text{ MW}$
$P_{MSEIndRelig} = 0,0008 \text{ MW}$
$P_{MMSIndRelig} = 0,0017 \text{ MW}$
$t_{BInd} = 0,333 \text{ h}$ (adotado como hipótese)

4.3.3. Resultados dos Cálculos da Segunda Etapa

Esses cálculos fornecem as curvas aproximadas para os diversos grupos de equipamentos analisados, com base nos parâmetros físicos determinados na etapa anterior. Como exemplo, para o caso das geladeiras associadas à categoria de carga agregada *Res*, a curva aproximada é obtida a partir dos pontos a seguir, conforme ilustrado na Figura 4.24.

- Primeiro ponto: $t = t_i$ e $P = P_{antesreligGRes} \Rightarrow t=17:00 \text{ hs}$ e $P=0,6553 \text{ MW}$
- Segundo ponto: $t = t_R$ e $P = P_{MAXGRes} \Rightarrow t=19:00 \text{ hs}$ e $P=1,4652 \text{ MW}$
- Terceiro ponto: $t = (t_R + t_{AGRes})$ e $P = P_{MAXGRes} \Rightarrow t=20,3419 \text{ hs}$ e $P=1,3187 \text{ MW}$
- Quarto ponto: $t = (t_R + t_{AGRes} + t_{BGRes})$ e $P = P_{MGResRelig} \Rightarrow t= 20,8946 \text{ hs}$ e $P=0,6553 \text{ MW}$

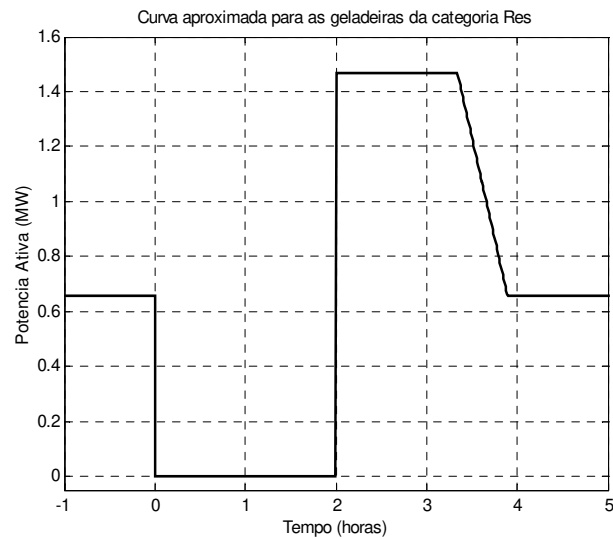


Figura 4.24: Curva aproximada para as geladeiras da categoria de carga agregada *Res* - Situação 1

4.3.4. Resultados dos Cálculos da Terceira Etapa

Esses cálculos fornecem curvas aproximadas que permitem diversos tipos de análise, conforme descrito no item 4.2.3. Alguns dos resultados obtidos para cada um desses tipos de análise estão representados nas Figuras 4.25 e 4.26. Nessas figuras, o instante $t = 0$ corresponde ao momento no qual ocorreu a interrupção.

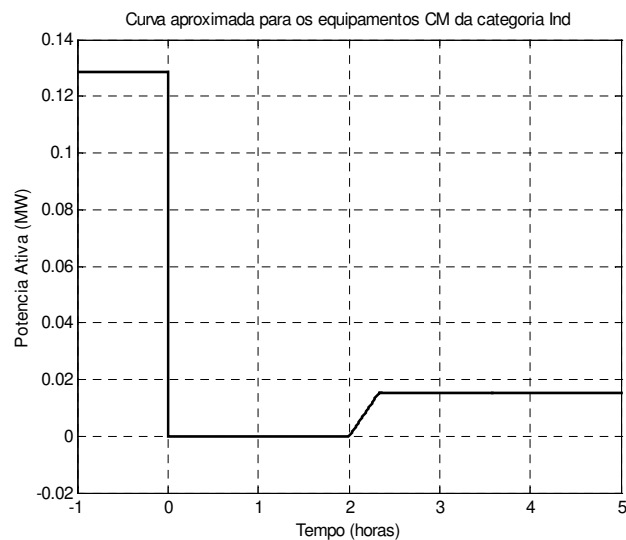


Figura 4.25: Curva aproximada do comportamento dos equipamentos controlados manualmente associados à categoria de carga agregada *Ind* - Situação 1

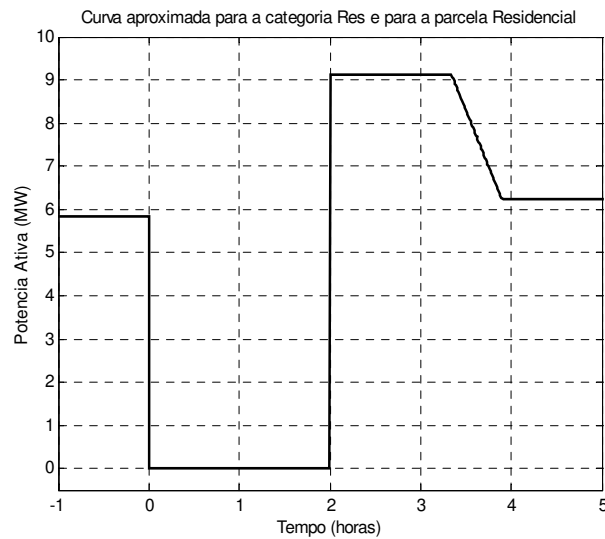


Figura 4.26: Curva aproximada do comportamento da categoria de carga agregada *Res* e do comportamento da parcela de consumo residencial- Situação 1

Deve-se salientar que como nesse exemplo de aplicação existe apenas uma categoria de carga agregada associada a cada parcela de consumo, as curvas aproximadas representativas do comportamento dessas parcelas coincidem com as curvas obtidas para as respectivas categorias de carga agregada. Assim, a parcela de consumo residencial apresenta comportamento idêntico ao descrito na Figura 4.26. Os comportamentos para as demais parcelas de consumo estão representados nas Figuras 4.27 e 4.28.

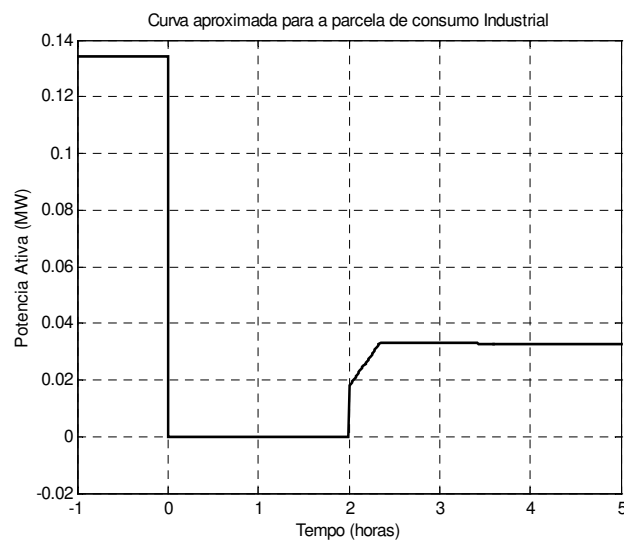


Figura 4.27: Curva aproximada para a parcela de consumo industrial - Situação 1

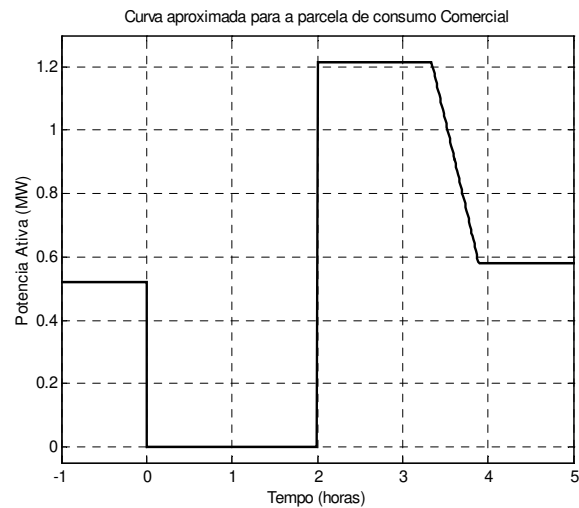


Figura 4.28: Curva aproximada para a parcela de consumo comercial - Situação 1

Finalmente, a Figura 4.29 apresenta o comportamento aproximado da carga agregada da Subestação 40 durante o processo de recomposição para a Situação 1.

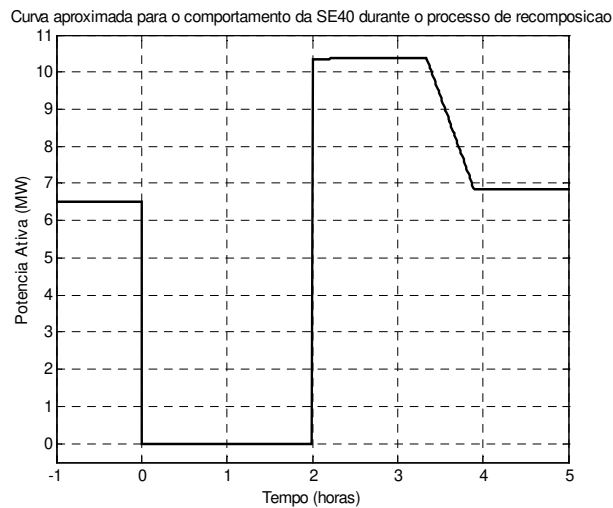


Figura 4.29: Curva aproximada para o comportamento da SE40 - Situação 1

Da análise dessas figuras, pode-se concluir que os resultados obtidos são condizentes com os esperados. Como a situação de blecaute simulada (Situação 1) pode ser considerada como crítica, conforme descrito anteriormente, espera-se como resultados um grande pico

de potência no instante do religamento, uma grande duração desse pico de potência e um tempo longo até a retomada do regime permanente, características que podem ser observadas na Figura 4.29. Esse comportamento também é esperado pelo fato de que a subestação em análise possui, como parcela de consumo predominante, a parcela residencial, na qual os dispositivos controlados termostaticamente possuem demanda significativa. Esses equipamentos são os maiores responsáveis pelas características representadas na Figura 4.29.

Além disso, outro fator que contribui para o aparecimento dessas características no comportamento da carga agregada da SE40 é a constituição da parcela de consumo comercial adotada. Nesse exemplo de aplicação, tal parcela foi considerada como sendo composta por apenas uma categoria de carga agregada, constituída por somente um tipo de estabelecimento comercial: as lojas de confecção de roupas. Esse tipo de comércio caracteriza-se por equipamentos bastante similares aos encontrados nas residências. Assim, pode-se esperar que o comportamento aproximado da parcela de consumo comercial (Figura 4.28) seja semelhante ao da parcela de consumo residencial (Figura 4.26), contribuindo, para reforçar o aparecimento das características observadas na Figura 4.29.

Outro aspecto que merece ser salientado consiste no aparecimento do patamar de potência constante observado no comportamento da parcela de consumo residencial (Figura 4.26). Esse patamar indica a perda total da diversidade do estado dos equipamentos controlados termostaticamente, um comportamento bastante característico de cargas residenciais quando da ocorrência de situações mais críticas de blecaute.

Já a **segunda situação** de blecaute simulada (denominada **Situação 2**) possui características bastante diferentes da primeira (blecaute de curta duração, reenergização ocorrida em horário de baixo consumo e temperatura ambiente baixa), justamente para a comparação dos resultados obtidos em cada uma dessas situações. A Tabela 4.26 sintetiza as características da segunda situação de blecaute.

Tabela 4.26: Características da Situação 2

Tempo de Duração do Blecaute ($t_{blecaute}$)	Hora da ocorrência da interrupção (t_i)	Hora do dia (t_R) – horário da reenergização	Temperatura Ambiente
10 minutos	9:00hs	9:10 hs	10°C

A Figura 4.30 ilustra o comportamento aproximado da Subestação 40 durante o processo de recomposição para a segunda situação de blecaute simulada. É importante ressaltar que os resultados intermediários da aplicação da metodologia proposta a essa nova situação não serão descritos aqui por serem muito extensos.

Novamente, os resultados obtidos para essa nova situação de blecaute condizem com os esperados. Como a situação de blecaute simulada (Situação 2) pode ser considerada como “mais amena”, conforme descrito previamente, espera-se como resultados um pico de potência menor no instante do religamento, uma pequena duração desse pico de potência e um tempo curto até a retomada do regime permanente, características que podem ser observadas na Figura 4.30. Em especial, pode-se notar que essa situação de blecaute, diferentemente da situação anterior, não ocasionou a perda total da diversidade do estado dos equipamentos controlados termostaticamente e, portanto, não houve a formação de um patamar de potência ativa.

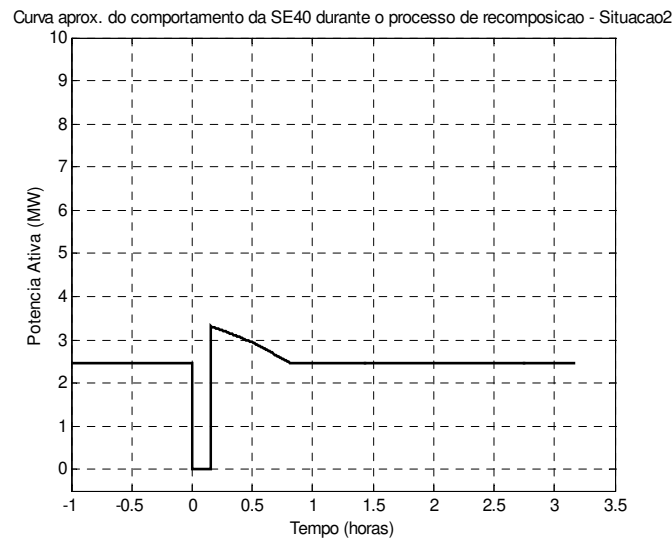


Figura 4.30: Curva aproximada para o comportamento da SE40 - Situação 2

Capítulo 5

Metodologia Caixa-Branca Bottom-Up

5.1. Introdução

Conforme descrito no Capítulo 3, a abordagem bottom-up parte da determinação de modelos capazes de **caracterizar as partes componentes do sistema real (denominados modelos de componentes)**, visando a posterior obtenção, através de métodos de agregação, de um modelo (denominado **modelo agregado**) para o mesmo. No caso do problema da modelagem da carga, o sistema real que está sendo modelado corresponde à carga agregada, que pode ser representada em diferentes níveis hierárquicos como, por exemplo, no nível de subestações, de alimentadores, de residências, de tipos de equipamentos, etc. Portanto, os componentes desse sistema (que correspondem às partes que constituem o modelo agregado) dependem do nível hierárquico adotado na representação da carga agregada. Por exemplo, se o objetivo do processo de modelagem é a obtenção de um método que represente a carga agregada em um alimentador, os modelos para as partes componentes desse sistema real podem ser um modelo de carga para as residências, um modelo para as indústrias e um modelo para os comércios. Entretanto, se a modelagem da carga for realizada em um outro nível hierárquico, como no nível de uma residência, os modelos de carga que constituem o modelo agregado vão corresponder aos equipamentos

elétricos encontrados nesse nível, por exemplo, um modelo para as geladeiras, um modelo para os aparelhos de ar-condicionado, etc. A Figura 5.1 ilustra a correspondência existente entre o processo de modelagem bottom-up generalizado e sua aplicação ao problema da modelagem da carga, considerando que o objetivo dessa modelagem corresponde à determinação do comportamento da carga agregada em um alimentador.

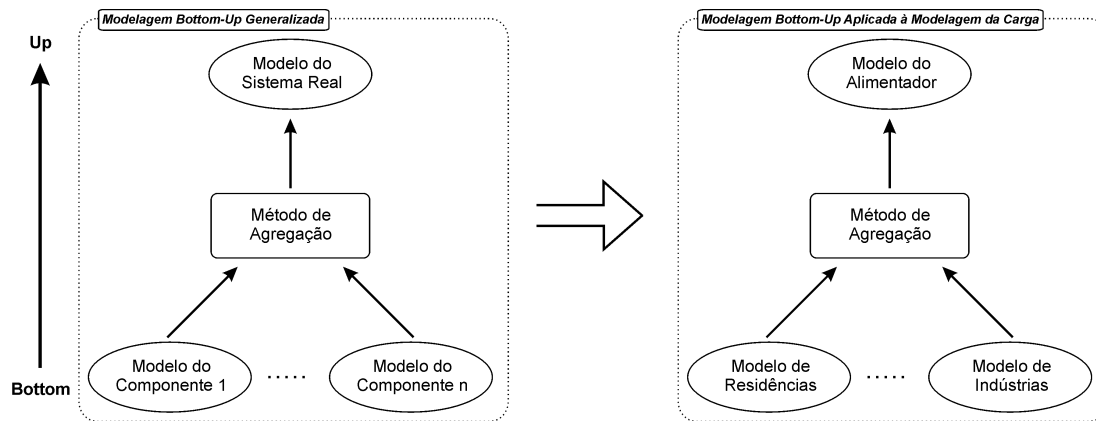


Figura 5.1: Aplicação da modelagem bottom-up ao problema da modelagem da carga

Nessa abordagem, **a precisão do modelo agregado obtido depende da adequação dos modelos dos componentes**. Isso significa que esses modelos devem ser capazes de representar não apenas genericamente os principais fenômenos físicos envolvidos durante o processo de recomposição da rede elétrica (caracterizando a modelagem caixa-branca), mas também parâmetros específicos de cada componente, de forma a caracterizar, permitindo considerar o comportamento particular de cada um deles. Procedendo dessa maneira, a modelagem detalhada das características físicas das partes componentes da carga agregada resultará na obtenção de um modelo agregado mais preciso, ou seja, mais próximo de representar o sistema real. Assim, quanto maior a precisão desejada para o modelo agregado, mais precisos devem ser os modelos de componentes.

Além disso, é importante ressaltar que quanto mais próximo do nível dos equipamentos se iniciar a modelagem das partes componentes, maiores são as chances de obtenção de um modelo agregado mais preciso, uma vez que os fenômenos físicos envolvidos no funcionamento desses equipamentos são bastante conhecidos [1] e, assim, é possível a realização de uma modelagem mais detalhada dos mesmos. Portanto, para a

obtenção de um **modelo agregado de carga mais preciso**, deve-se atentar para dois importantes aspectos:

- a **modelagem** das partes componentes deve se iniciar, preferencialmente, **no nível de equipamentos** e
- os modelos dos equipamentos devem representar os fenômenos físicos envolvidos no seu funcionamento e, também, **características particulares de cada equipamento individualmente**.

Por exemplo, os modelos dos equipamentos devem contemplar, por exemplo, a existência de diferentes tipos de geladeiras, lâmpadas e chuveiros, o que permitirá a obtenção de um modelo agregado mais adequado, independentemente do seu nível hierárquico (carga agregada no nível da subestação, no nível de residências, etc.). Nesse contexto, a utilização de técnicas de **Programação Orientada a Objetos** na determinação desses modelos torna-se bastante atrativa, uma vez que essa filosofia de programação valoriza a modelagem física e particular de cada equipamento, conforme será detalhado no item a seguir.

5.2. Programação Orientada a Objetos

Programação Orientada a Objetos ou POO é uma técnica de programação na qual o problema a ser abordado é modelado como sendo constituído por um conjunto de objetos que interagem. Os conceitos básicos dessa técnica são [48]:

- *Classe*: Uma classe é definida como um molde ou gabarito através do qual serão definidos os objetos. Assim, classe é um protótipo que define os métodos e atributos comuns a um conjunto de objetos de um mesmo tipo.
- *Objeto*: Um objeto é uma instância de uma classe. Ele representa uma entidade, conceito ou abstração individual pertinente ao domínio do problema sob análise.
- *Atributos*: Um atributo é uma propriedade do objeto. Eles representam a informação contida, na forma de variáveis ou constantes, dentro do objeto definido, registrando o estado atual do mesmo.

- *Métodos*: Representam o conjunto de operações que um objeto pode realizar. Basicamente, são sub-rotinas que manipulam variáveis locais, atributos próprios ou de outros objetos e parâmetros por passagem de conteúdo ou endereço.
- *Herança*: O mecanismo de herança permite que características comuns a um determinado conjunto de classes possam ser derivadas a partir de uma classe base, reaproveitando declarações e estruturas já existentes.

O conceito básico da filosofia de POO mais importante no processo de modelagem da carga durante a recomposição de sistemas de energia elétrica é o conceito de **encapsulamento** que, por esse motivo, será descrito, separadamente dos outros, no item a seguir.

5.2.1. Encapsulamento

O conceito de encapsulamento estabelece que um objeto deve conter em si mesmo as informações necessárias para sua manipulação como unidade. Isso pode ser feito através da colocação de suas variáveis e atributos sob a custódia protetora de seus métodos. Dessa maneira, são obtidos os benefícios de modularidade para o problema abordado (uma vez que os detalhes de implementação tornam-se “transparentes” para o programador), propiciando a utilização de dois importantes conceitos descritos a seguir [48]:

- *Ocultamento da informação*: através desse conceito, entende-se que um objeto deve revelar somente os dados estritamente necessários ao seu funcionamento, ou seja, para a utilização de um objeto, não é necessário conhecer os mecanismos associados a seus métodos, mas somente os efeitos dos mesmos.
- *Polimorfismo*: esse conceito permite que métodos que apresentem mecanismos de funcionamento diferentes, mas que acarretem efeitos e comportamentos similares, possuam a mesma identificação através da sua sobrecarga desses métodos. Dessa maneira, um objeto pode comunicar-se com outro sem precisar conhecer a classe a que o mesmo pertence.

Os conceitos descritos nos itens 5.2 e 5.2.1. sugerem que a aplicação das técnicas de POO ao problema da modelagem da carga pode ser realizada com sucesso, conforme descrito no item 5.2.2. a seguir.

5.2.2. Aplicação de POO na Modelagem da Carga

A aplicação dos conceitos de POO ao problema da modelagem da carga pode ser inferida a partir da definição de POO, descrita no item 5.2, na qual o problema a ser abordado consiste, agora, na determinação do comportamento da carga agregada, que pode ser modelada como sendo constituída por um conjunto de objetos que interagem. Nesse caso, os objetos correspondem às partes constituintes do modelo agregado, definindo diferentes modelos de componentes. A Figura 5.2 ilustra essa definição de POO aplicada ao problema da modelagem da carga.

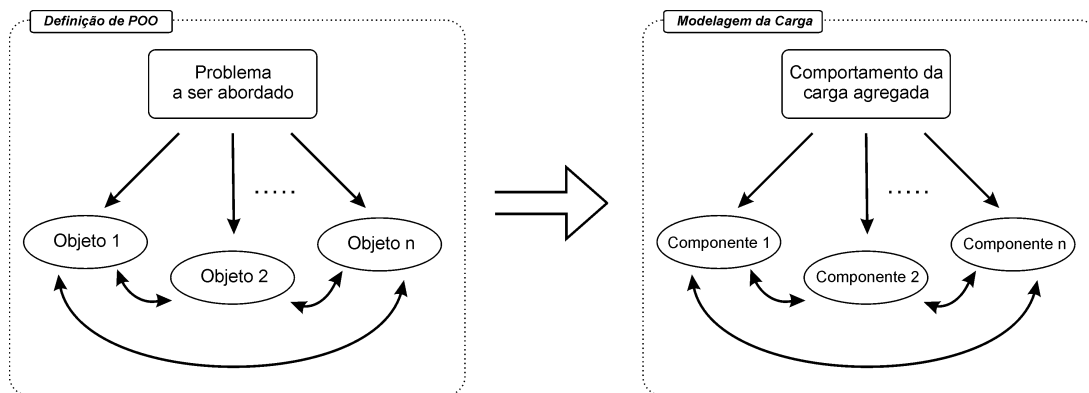


Figura 5.2: Definição de POO aplicada à modelagem da carga

Deve-se destacar que esses componentes da carga agregada dependem do nível hierárquico a ser modelado (podendo abranger desde modelos de equipamentos até modelos de indústrias), e que, conforme descrito no item 5.1, a obtenção de modelos agregados mais precisos está diretamente relacionada à modelagem desses componentes a partir do nível de equipamentos.

Além disso, considerando-se os conceitos definidos no item 5.2, pode-se perceber a facilidade de implementação que a POO permite na obtenção do modelo agregado, uma vez que esse tipo de programação:

- Possibilita a utilização simultânea de diversas **classes** com diferentes características que podem ser empregadas na representação de diferentes tipos de equipamentos como, por exemplo, os controlados termostaticamente, os controlados manualmente e os de carga fixa. Cada classe, então, define os atributos e métodos comuns a um conjunto de componentes de um mesmo tipo.
- Permite a definição de diferentes componentes, através do instanciamento de diferentes **objetos**, tanto dentro de uma mesma classe quanto em classes diferentes.
- Possibilita a utilização do conceito de **herança** que permite que características comuns a certo conjunto de classes possam ser derivadas a partir de uma classe base. Por exemplo, as classes das geladeiras, dos freezers e dos aparelhos de ar-condicionado possuem características comuns que podem ser derivadas a partir da classe dos equipamentos controlados termostaticamente.
- Permite a aplicação dos conceitos de **encapsulamento**, **polimorfismo** e **ocultamento da informação**, possibilitando a utilização de diversos tipos de componentes (objetos), sem a necessidade de preocupação, no contexto da agregação da carga, com os diferentes princípios de funcionamento dos vários tipos de equipamentos e componentes modelados. Além disso, esses conceitos promovem a comunicação entre os diferentes componentes mesmo que pertençam a classes diferentes.

Portanto, pode-se concluir que a utilização de técnicas de POO permite a preservação das características físicas individuais de cada equipamento ou componente utilizado na modelagem da carga agregada, como constantes de tempo, limites de operação, influência de variáveis associadas ao ambiente no qual ele está inserido, etc. Outra grande vantagem da aplicação de POO na modelagem desses componentes é o elevado grau de flexibilidade que a mesma proporciona, permitindo, por exemplo, a definição de componentes com diferentes características conectados a um mesmo alimentador (coexistência de diferentes elementos em um mesmo ambiente computacional).

5.3. Modelos de Equipamentos

De uma maneira geral, os equipamentos elétricos podem ser classificados de acordo com alguns **importantes aspectos** que exercem influência sobre o comportamento dos mesmos durante a reenergização da rede elétrica. Esses aspectos são:

- Perfil de consumo: representa o perfil de consumo de energia do equipamento ao longo do dia. Esse perfil está intimamente ligado ao tipo de usuário do equipamento, que determina, por exemplo, o período do dia em que o equipamento estará ligado, por quanto tempo o equipamento será utilizado, etc. Os perfis de consumo adotados neste trabalho correspondem ao perfil contínuo, ao perfil por período fixo e ao perfil com compensação. O **perfil contínuo** reflete o perfil de consumo constante ao longo do dia, caracterizando o funcionamento, por exemplo, de geladeiras e freezers. Já o **perfil por período fixo** está associado a equipamentos que são utilizados apenas (ou predominantemente) em um certo período, como é o caso de chuveiros (que funcionam predominantemente no período noturno). Finalmente, o **perfil por compensação** caracteriza o funcionamento de equipamentos que, após a ocorrência de um blecaute, consomem a energia (ou parte dela) que deixou de ser consumida durante a interrupção. Esse perfil está relacionado, por exemplo, a alguns tipos de máquinas industriais;
- Modelo elétrico: refere-se ao modelo matemático que representa a relação entre tensão e corrente do equipamento. Neste trabalho, foi considerado o modelo **ZIP**, bastante difundido na literatura [39], para a representação dessa relação;
- Controle interno: esse aspecto está associado à presença ou ausência de **controle termostático** no equipamento, uma vez que esse tipo de controle é o grande responsável pelas situações mais críticas de recomposição e
- Regime de serviço: reflete a forma com que o equipamento é utilizado, contemplando seu **ciclo de uso** ou **ciclo de serviço** e possíveis atrasos que sua utilização pode acarretar.

Com base nesses aspectos, pode-se definir uma **classe base** que caracterize, de forma genérica, um equipamento elétrico. A Figura 5.3 ilustra essa classe base.

```

public interface EquipamentoEletrico {
    //-----
    // Atributos
    //-----
    String name = new String("noname");
    String type = new String("notype");
    Vector profile = new Vector();
    boolean compensation = false;
    double compensationFactor = 0.0;
    double voltageModule = 1.0;
    double voltagePhase = 0.0;
    double currentModule = 0.0;
    double currentPhase = 0.0;
    double activePower = 0.0;
    double reactivePower = 0.0;
    double time = 0.0;
    double iterationDuration = 0.0;
    String controlType = new String("nocontroltype");
    double delay = 0.0;
    Vector serviceCycle = new Vector();
    //-----
    // Metodos gerais
    //-----
    public String getName();
    public void setName(String s);
    public String getType();
    public void setType(String s);
    //-----
    // Metodos para o perfil de consumo
    //-----
    public void setProfile(Vector p);
    public Vector getProfile();
    public void setCompensation(boolean b);
    public boolean getCompensation();
    public void setCompensationFactor(double f);
    public double getCompensationFactor();
    //-----
    // Metodos para modelos eletricos
    //-----
    public void setVoltageModule(double m);
    public void setVoltagePhase(double p);
    public double getCurrentModule();
    public double getCurrentPhase();

    public double getActivePower();
    public double getReactivePower();
    //-----
    // Metodos para controle interno
    //-----
    public void setTime(double t);
    public void setIterationDuration(double d);
    public double getIterationDuration();
    public void setControlType(String s);
    public String getControlType();
    public void iterate();
    //-----
    // Metodos para o regime de serviço
    //-----
    public void setDelay(double d);
    public double getDelay();
    public void setServiceCycle(Vector c);
    public Vector getServiceCycle();
}

```

Figura 5.3: Classe base para um equipamento elétrico genérico

Nessa figura, pode-se observar os métodos associados a cada um dos aspectos descritos anteriormente. Dentre os métodos mais importantes estão:

- *setProfile()*: define o perfil de consumo do equipamento elétrico, através de um vetor formado pelos pontos da curva associada a esse perfil;
- *setVoltageModule()*: define o módulo da tensão associada ao equipamento;
- *getCurrentModule()*: retorna o módulo da corrente associada ao equipamento;
- *getActivePower()*: retorna o módulo da potência ativa demandada pelo equipamento;
- *setControlType()*: define o tipo de controle interno ao equipamento e
- *setServiceCycle()*: define o ciclo de serviço do equipamento elétrico, através de um vetor formado pelos pontos da curva associada esse ciclo.

Assim, os equipamentos a serem modelados utilizam a estrutura dessa classe base, herdando parâmetros, métodos e atributos necessários à sua modelagem. A Figura 5.4 ilustra alguns dos equipamentos que podem ser utilizados na modelagem da carga de um alimentador e o Apêndice C apresenta, a título de ilustração, a modelagem realizada para equipamentos controlados termostaticamente.

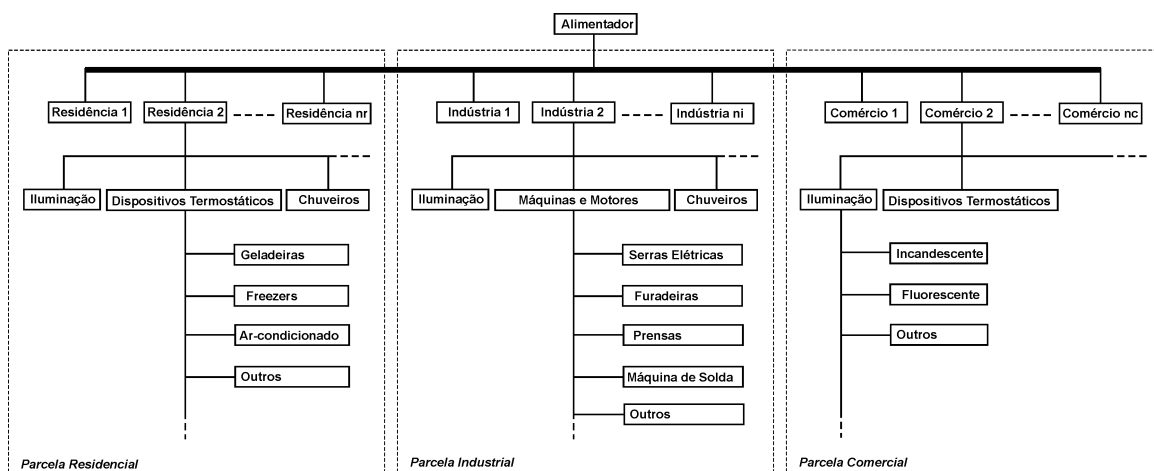


Figura 5.4: Exemplos de equipamentos que podem ser utilizados na modelagem da carga de um alimentador

5.4. Métodos de Agregação

Os métodos de agregação desempenham um papel fundamental na modelagem bottom-up, uma vez que são os responsáveis pela determinação do modelo agregado de carga a partir dos modelos de componentes obtidos previamente. Os itens 5.4.1 e 5.4.2, a seguir, tratam, respectivamente, da descrição de métodos de agregação convencionalmente utilizados na modelagem da carga e do método de agregação proposto neste trabalho.

5.4.1. Métodos Convencionais de Agregação

Na literatura [1], a agregação da carga é realizada, usualmente, através de **métodos estatísticos**. Esses métodos consistem na agregação de componentes da carga agregada que possuem características e comportamentos dinâmicos similares [22]. Eles consideram a carga agregada em um alimentador, por exemplo, como sendo composta por vários “grupos” relacionados a diferentes tipos de equipamentos. A carga de cada um desses “grupos” é obtida a partir do modelo individual do respectivo equipamento e da determinação estatística (através da utilização de funções de distribuição de probabilidade aplicadas aos parâmetros do modelo individual) dos parâmetros capazes de representar diferentes equipamentos do mesmo tipo. Para exemplificar, a carga agregada de um “grupo” de geladeiras, por exemplo, é determinada a partir dos seguintes passos:

1. Obtenção de um modelo capaz de representar, adequadamente, o funcionamento de uma geladeira. Essa etapa inclui a determinação dos parâmetros desse modelo individual.
2. Obtenção dos parâmetros relativos a outras geladeiras. Esses parâmetros são gerados estatisticamente (através de funções de distribuição de probabilidade), tomando-se como base os parâmetros do modelo individual, obtidos no passo anterior.

3. Agregação de várias geladeiras, formando um “grupo” de equipamentos do tipo geladeira, cuja carga corresponde à soma das cargas associadas a cada equipamento individualmente.

Segundo essa metodologia, a carga agregada em um alimentador, por exemplo, corresponde, então, à agregação (**soma**) da carga associada a diferentes “grupos” de equipamentos como o “grupo” das geladeiras, dos motores, dos aparelhos de ar-condicionado, etc. É importante ressaltar que outros métodos de agregação seguem os mesmos passos descritos anteriormente, tendo como diferença a forma de geração dos parâmetros na etapa 2, que, em alguns casos, são considerados iguais aos obtidos na etapa 1 e, em outros casos, são gerados de maneira aleatória. Portanto, devido a essas formas de geração de parâmetros de demais equipamentos que pertencem a um mesmo “grupo”, **essas metodologias de agregação da carga não preservam as características físicas individuais dos componentes e equipamentos** e, dessa forma, possuem sérias desvantagens quando combinadas com modelos físicos dos mesmos, como os modelos baseados em POO descritos anteriormente. Nesse contexto, foi desenvolvida uma metodologia de agregação de carga que considera tanto as características individuais dos componentes da carga agregada (através da utilização dos modelos POO) quanto os parâmetros físicos associados ao alimentador em estudo, conforme será descrito no item a seguir.

5.4.2. Método Físico de Agregação

Essa metodologia de agregação parte dos modelos de componentes previamente obtidos, utilizando técnicas de POO que levam em conta as características individuais de cada componente modelado, conforme descrito nos itens 5.2 e 5.3. Esses modelos fornecem, então, uma estimativa da carga individual relativa a cada componente da carga agregada, preservando parâmetros relacionados aos fenômenos físicos característicos do funcionamento de cada componente ou equipamento.

Além disso, diferentemente dos métodos de agregação de carga convencionais, essa metodologia de agregação considera importantes características físicas e elétricas **do alimentador** (ou alimentadores) de distribuição associado à carga agregada que está sendo modelada. Em especial, **essa metodologia leva em conta as perdas de potência ativa e reativa nos ramos do alimentador** (ou alimentadores), que são calculadas com base em parâmetros elétricos (como a impedância nos ramos) e físicos (como informações topológicas) do mesmo. Esses cálculos são efetuados através da aplicação de uma única iteração (apenas a iteração backward) de um **método do tipo varredura (back-forward sweep)**, amplamente utilizado para a resolução do fluxo de carga em redes de distribuição [49]. Esse método pôde ser empregado, uma vez que os sistemas de distribuição analisados neste trabalho possuem configuração radial, fluxo unidirecional, baixa relação $\left(\frac{X}{R}\right)$ e, conseqüentemente, perdas de potência significativas. O algoritmo, a seguir, descreve os passos necessários para a obtenção da carga agregada no alimentador e para o cálculo das perdas nos ramos do mesmo.

Passo 1: Para cada barra do alimentador, considerar a tensão nodal com magnitude de 1 pu e ângulo 0 rad:

$$E_k = 1pu \angle 0rad \quad (5.1)$$

em que k varia de 1 até o número total de barras do alimentador em análise.

Passo 2: Calcular todas as injeções de corrente nodais (I_k), considerando que não existem elementos shunt no alimentador:

$$I_k = S_k^* = P_k - jQ_k \quad (5.2)$$

em que S_k , P_k e Q_k são, respectivamente, as potências complexa, ativa e reativa da barra k .

Passo 3: Começando pelas barras terminais e caminhando em direção à barra na qual deseja-se conhecer o comportamento da carga agregada, calcular todas as correntes nos ramos:

$$\begin{aligned} I_{km} &= I_m + \sum_{j \in F_m} I_{mj} \\ \text{Re}\{I_{km}\} &= P_m + \sum_{j \in F_m} \text{Re}\{I_{mj}\} \\ \text{Im}\{I_{km}\} &= -Q_m + \sum_{j \in F_m} \text{Im}\{I_{mj}\} \end{aligned} \quad (5.3)$$

em que F_m é o conjunto de barras que são alimentadas pela barra m e I_{km} corresponde à corrente que circula pelo ramo k - m .

Passo 4: Calcular as perdas em todos os ramos do alimentador (SL_{km}):

$$\begin{aligned} SL_{km} &= PL_{km} + jQL_{km} = z_{km} \cdot I_{km}^2 \\ PL_{km} &= \left[r_{km} \cdot \left((\text{Re}\{I_{km}\})^2 - (\text{Im}\{I_{km}\})^2 \right) - x_{km} \cdot (2 \cdot \text{Re}\{I_{km}\} \cdot \text{Im}\{I_{km}\}) \right] \\ QL_{km} &= \left[x_{km} \cdot \left((\text{Re}\{I_{km}\})^2 - (\text{Im}\{I_{km}\})^2 \right) + r_{km} \cdot (2 \cdot \text{Re}\{I_{km}\} \cdot \text{Im}\{I_{km}\}) \right] \end{aligned} \quad (5.4)$$

em que r_{km} e x_{km} são, respectivamente, a resistência e a reatância série do ramo k - m .

Passo 5: Determinar a carga agregada no alimentador:

$$I_a = \sum_{m \in \Omega} I_{am} \quad (5.5)$$

em que I_{am} é a corrente que circula pelo ramo a - m e Ω corresponde ao conjunto das barras adjacentes à barra a .

$$S_{agregada} = S_a + \sum SL_{km} = (V_a \cdot I_a^*) + \sum SL_{km} \quad (5.6)$$

em que a corresponde à barra na qual deseja-se conhecer a carga agregada (barra inicial do alimentador); S_a corresponde à injeção de potência complexa na barra a ; V_a , I_a e SL_{km} são grandezas já calculadas anteriormente.

5.5. Aplicação

Com o intuito de validar a metodologia proposta (utilização de modelos de equipamentos orientados a objeto e método físico de agregação), foram realizadas algumas simulações, utilizando a linguagem computacional Java, considerando alimentadores de várias subestações de distribuição. Entretanto, novamente, apenas os resultados associados a reenergização de uma dessas subestações serão ilustrados neste capítulo. Essa subestação refere-se à Subestação Andorinha – SE40 da CPFL, já empregada nos testes efetuados no Capítulo 4. O alimentador associado a essa subestação possui a mesma composição descrita no Capítulo 4, ou seja, atende, aproximadamente, 10500 residências, 8 indústrias (do mesmo tipo do Capítulo 4) e 1100 lojas de confecção (comércio de roupas). A composição de cada residência, indústria e loja foi adotada como sendo a mesma utilizada no Capítulo 4 e encontra-se descrita, novamente, a seguir, para conveniência do leitor.

- Composição de cada residência: 1 geladeira, 1 freezer, 1 aparelho de ar condicionado (esses equipamentos correspondem às cargas controladas termostaticamente da residência), 1 chuveiro, 8 lâmpadas incandescentes e 1 lâmpada fluorescente. Foram considerados diferentes fatores de penetração (λ) para cada um desses equipamentos, conforme descrito no capítulo anterior.
- Composição de cada indústria: 2 aparelhos de ar condicionado (esses equipamentos correspondem à carga controlada termostaticamente da indústria), 1 chuveiro, 12 lâmpadas mistas, 24 lâmpadas fluorescentes, 1 compressor, 1 serra vertical, 1 prensa, 3 motores, 4 furadeiras, 2 serras elétricas, 2 máquinas de solda. Mais uma vez, os fatores de penetração (λ) para cada um desses equipamentos foram considerados como sendo de 100%

- Composição de cada loja: 1 geladeira, 1 freezer, 1 aparelho de ar condicionado (esses equipamentos correspondem às cargas controladas termostaticamente da loja de confecção de roupas), 8 lâmpadas incandescentes e 10 lâmpadas fluorescentes. Os fatores de penetração (λ) para cada um desses equipamentos também foram considerados como sendo de 100%.

A) Resultados obtidos para uma situação de operação normal (sem interrupções):

Inicialmente, foi simulada uma condição de operação normal para esse alimentador, visando a ilustração do funcionamento individual de alguns equipamentos e a obtenção do comportamento das parcelas de consumo residencial, industrial e comercial, bem como da carga agregada, caracterizada por uma situação sem interrupções no fornecimento de energia e por uma temperatura ambiente de 25°C. Esses comportamentos estão representados nas Figuras 5.5 a 5.24 a seguir.

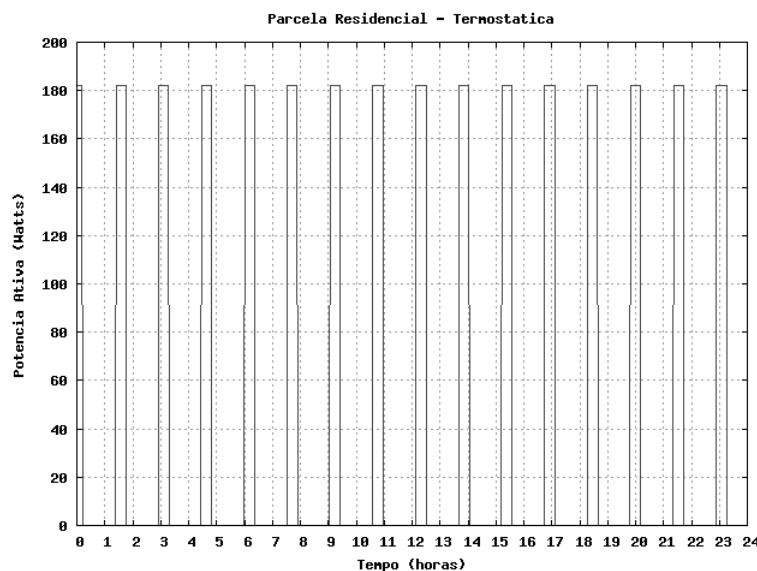


Figura 5.5: Funcionamento de uma geladeira da parcela residencial - sem interrupções

Pode-se verificar que o ciclo termostático desse equipamento é de, aproximadamente, 1 hora e 30 minutos e que o funcionamento da geladeira é ininterrupto.

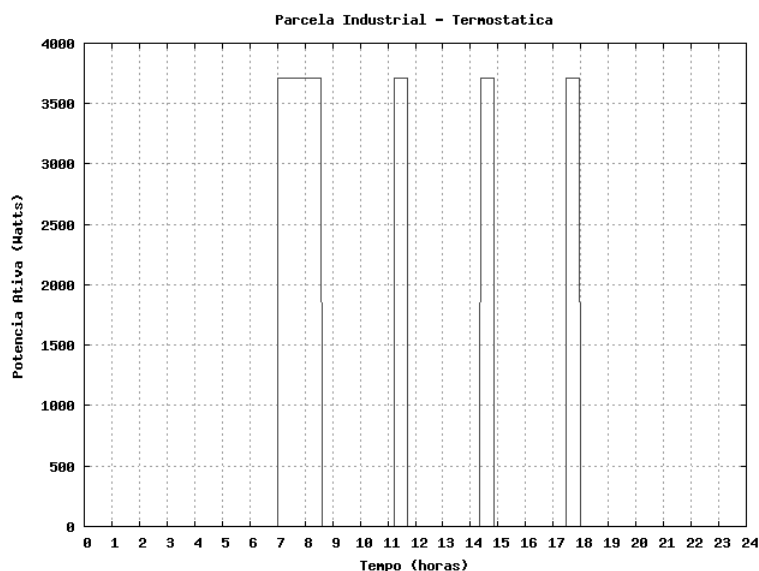


Figura 5.6: Funcionamento de um aparelho de ar-condicionado da parcela industrial - sem interrupções

Da análise dessa figura, pode-se notar que o funcionamento do aparelho de ar-condicionado está ao horário de funcionamento da indústria (das 8:00 hs às 18:30 hs aproximadamente) e que seu ciclo termostático tem duração de, aproximadamente, 3 horas.

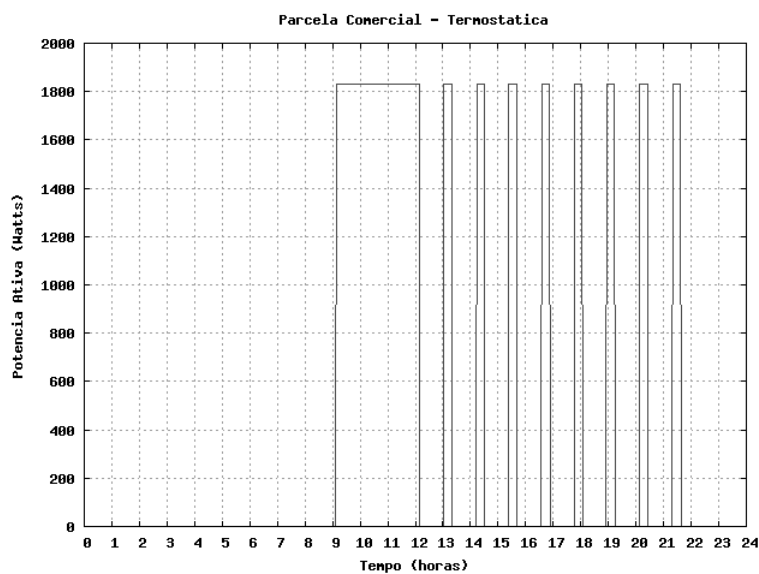


Figura 5.7: Funcionamento de um aparelho de ar-condicionado da parcela comercial - sem interrupções

De forma análoga, pode-se observar que o funcionamento do aparelho de ar-condicionado está restrito ao horário de funcionamento da loja (das 9:00 hs às 22:00 hs aproximadamente).

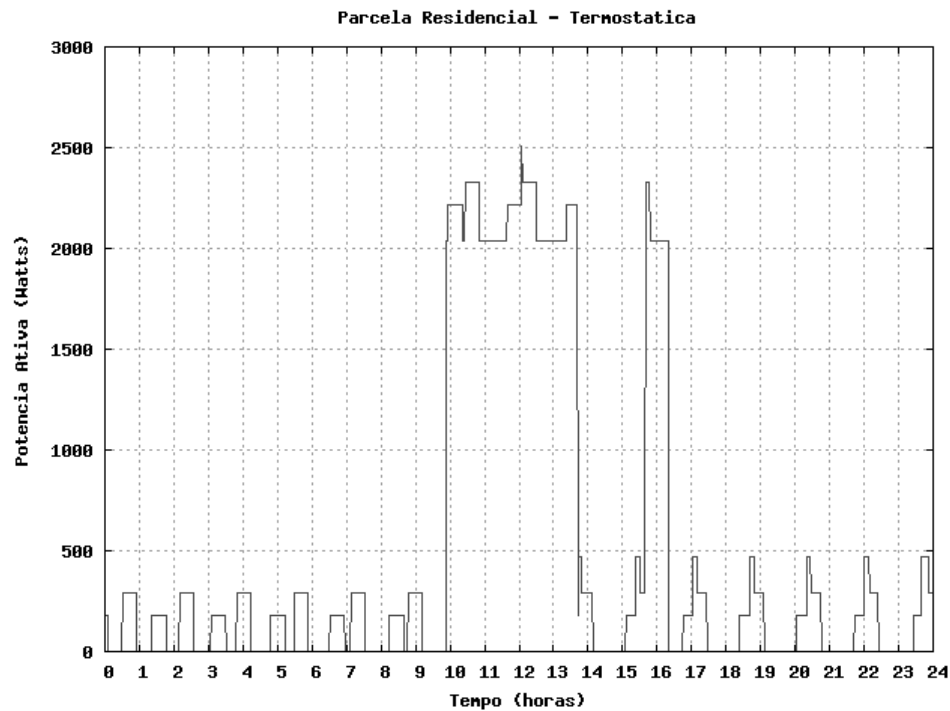


Figura 5.8: Comportamento agregado das geladeiras, freezers e aparelhos de ar-condicionado em uma residência – sem interrupções

Pode-se verificar que os maiores níveis de potência acontecem no horário em que, geralmente, o aparelho de ar-condicionado está funcionando dentro de uma residência (das 10:00 hs às 19:00 hs, aproximadamente, que corresponde ao período do dia em que o calor é mais intenso).

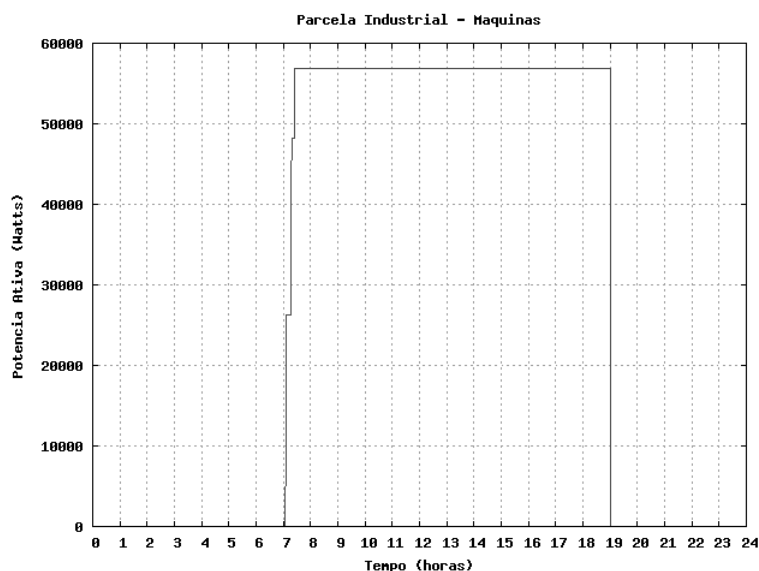


Figura 5.9: Comportamento agregado das máquinas em uma indústria – sem interrupções

Pode-se notar uma característica bastante típica do comportamento dessas máquinas em condições normais de operação: uma rampa de potência, a partir do instante em que são energizadas, até atingir o nível de potência máximo. Essa rampa indica que os equipamentos não são ligados simultaneamente, caracterizando uma linha de produção típica. Essa característica está representada, com maior detalhe, na figura a seguir.

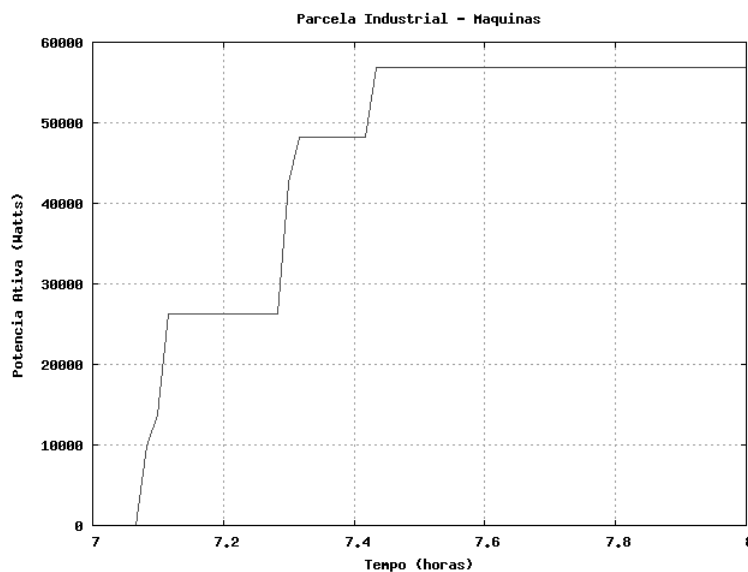


Figura 5.10: Detalhe do comportamento agregado das máquinas em uma indústria – sem interrupções

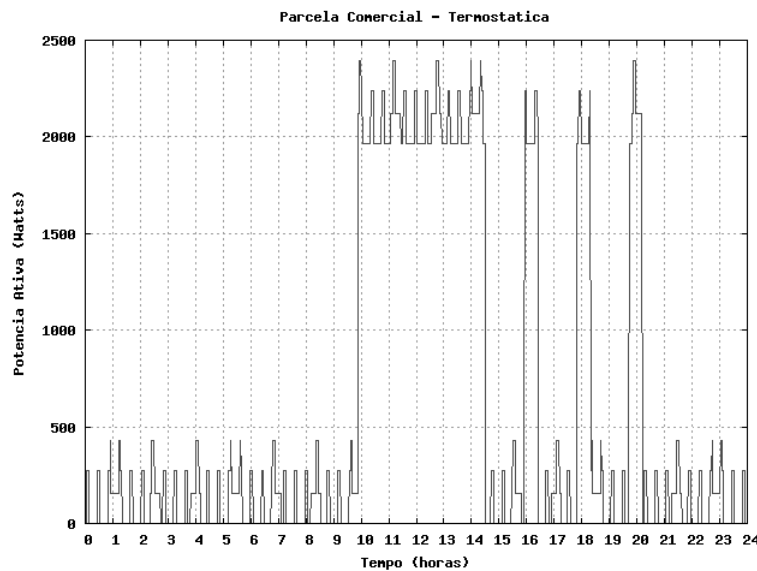


Figura 5.11: Comportamento agregado das geladeiras, freezers e aparelhos de ar-condicionado em uma loja – sem interrupções

Assim como na Figura 5.8, observa-se que os maiores níveis de potência acontecem no horário em que, geralmente, o aparelho de ar-condicionado está funcionando dentro de uma loja (das 9:00 hs às 22:00 hs aproximadamente).

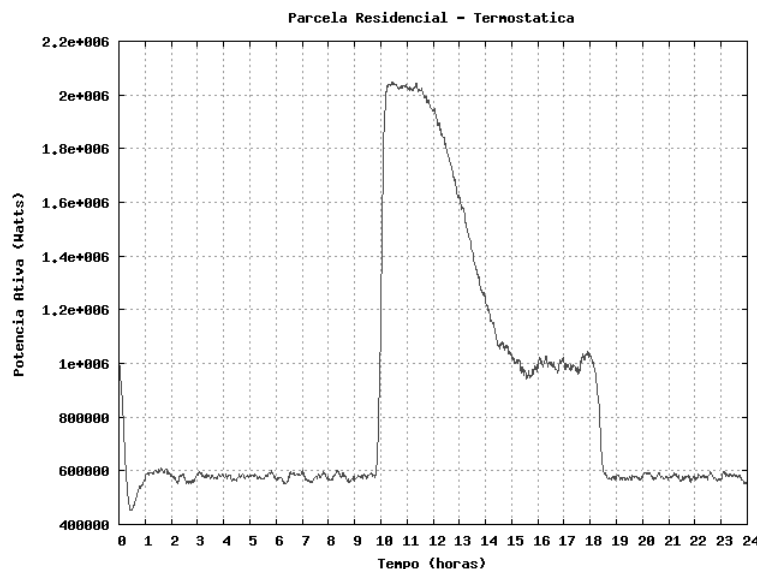


Figura 5.12: Comportamento agregado das geladeiras, freezers e aparelhos de ar-condicionado de toda a parcela de consumo residencial – sem interrupções

Nessa figura, o maior nível de potência (por volta das 10:00 hs) corresponde ao acionamento dos aparelhos de ar-condicionado nas residências que compõem a parcela de consumo residencial.

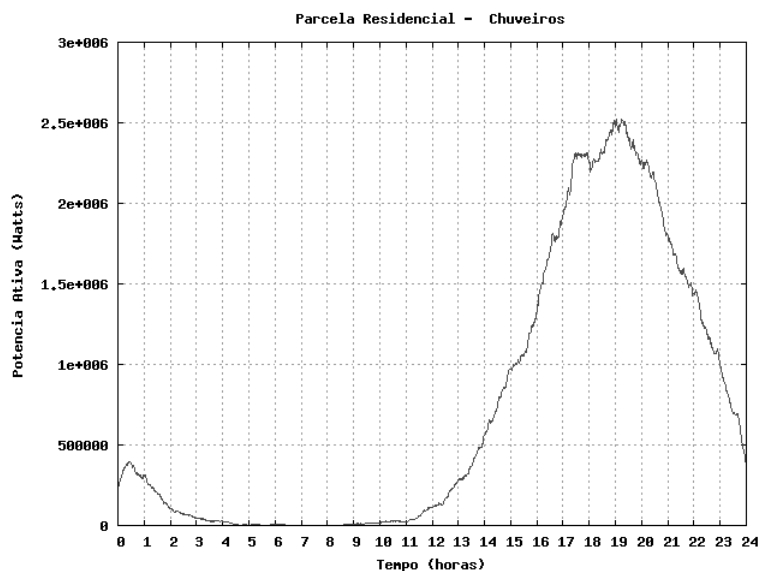


Figura 5.13: Comportamento agregado dos chuveiros de toda a parcela de consumo residencial – sem interrupções

Da análise dessa figura, verifica-se que os chuveiros são mais utilizados por volta das 20:00hs.

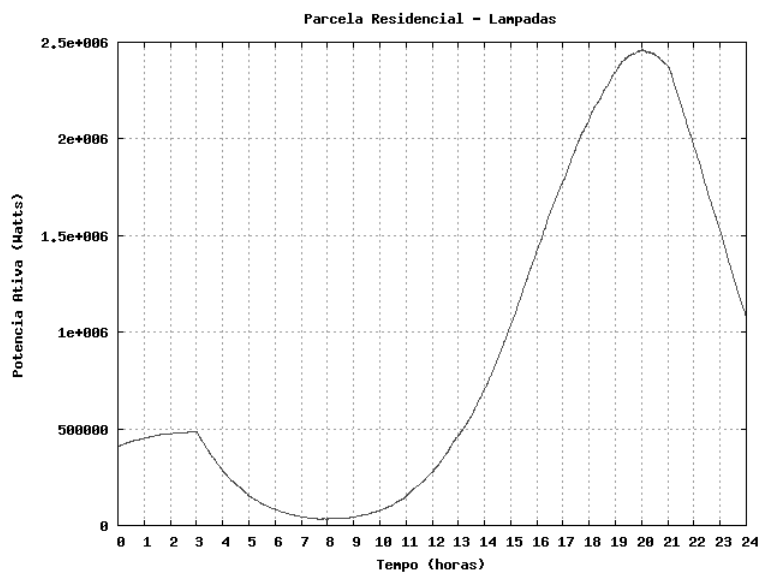


Figura 5.14: Comportamento agregado das lâmpadas de toda a parcela de consumo residencial – sem interrupções

Pode-se observar que as lâmpadas também são mais utilizadas por volta das 20:00hs.

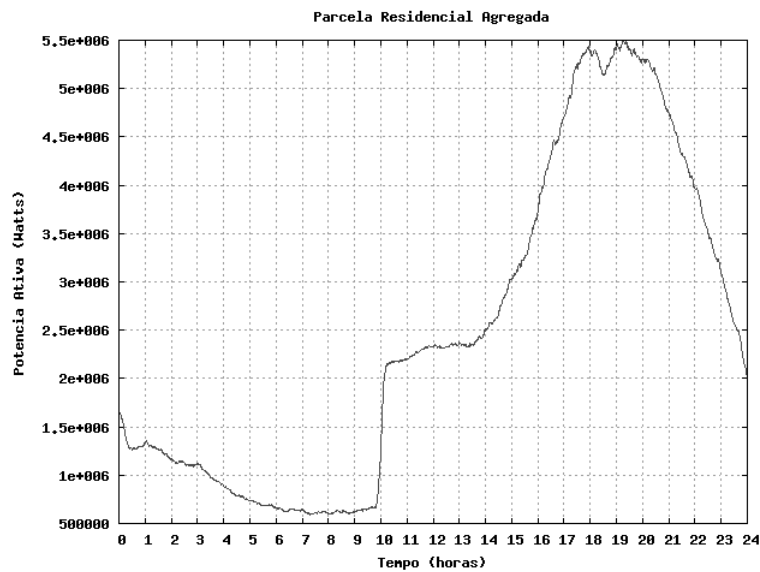


Figura 5.15: Comportamento agregado da parcela residencial – sem interrupções

Essa curva corresponde à agregação do comportamento dos equipamentos controlados termostaticamente, dos chuveiros e das lâmpadas em toda a parcela residencial.

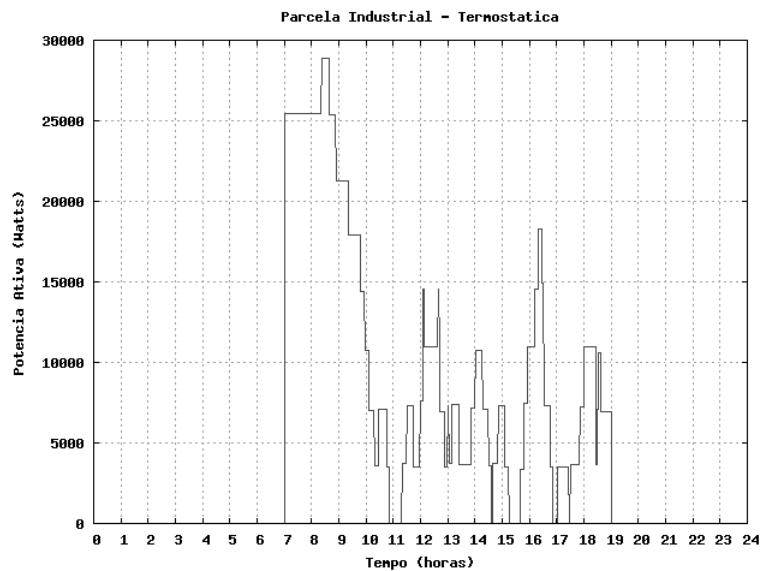


Figura 5.16: Comportamento agregado dos aparelhos de ar-condicionado de toda a parcela de consumo industrial – sem interrupções

Nota-se que o período em que os aparelhos de ar-condicionado permanecem energizados, considerando toda a parcela industrial, corresponde, aproximadamente, ao mesmo período de um único aparelho de ar-condicionado (por volta das 8:00 hs às 18:30 hs, conforme ilustrado na Figura 5.6), indicando que a agregação desses equipamentos foi capaz de manter e representar uma das características fundamentais de seu funcionamento. Além disso a representação desse comportamento agregado difere das curvas contínuas obtidas para o comportamento agregado de outros equipamentos, devido à pouca quantidade de equipamentos envolvidos (16 aparelhos de ar-condicionado).

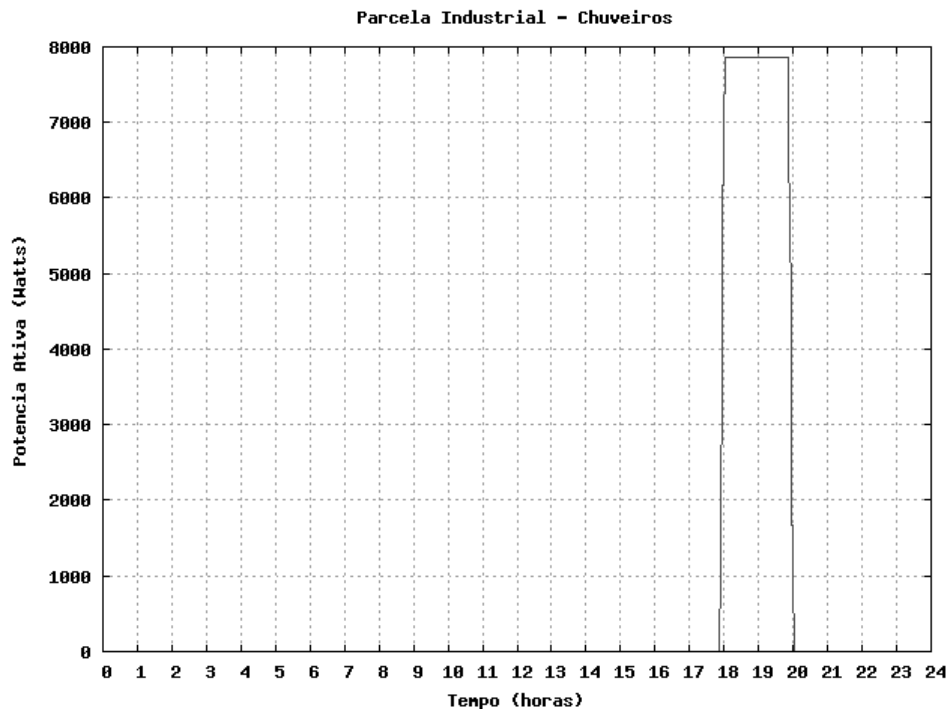


Figura 5.17: Comportamento agregado dos chuveiros de toda a parcela de consumo industrial – sem interrupções

Da análise dessa figura, verifica-se que os chuveiros da parcela industrial são utilizados, de forma concentrada, por volta das 19:00 hs, que corresponde, aproximadamente, ao horário de encerramento das atividades produtivas da parcela industrial (conforme ilustra a Figura 5.20).

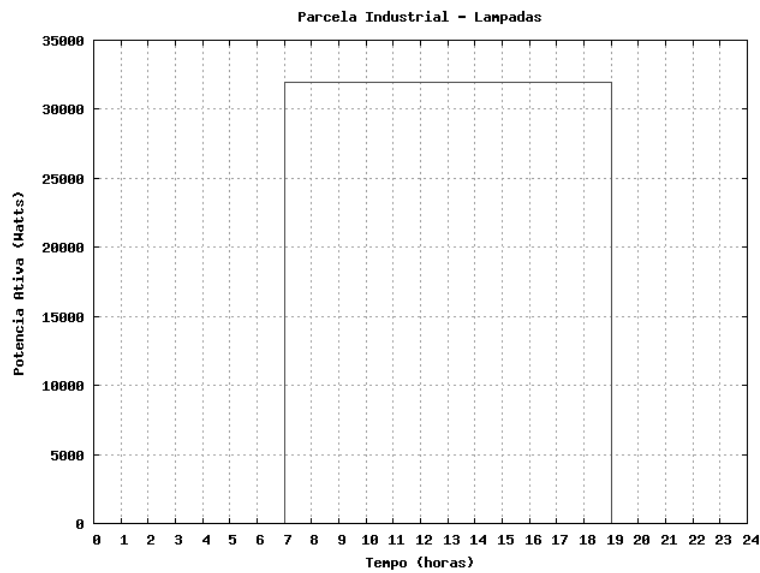


Figura 5.18: Comportamento agregado das lâmpadas de toda a parcela de consumo industrial – sem interrupções

Pode-se observar que as lâmpadas são utilizadas durante todo o horário de produção da parcela industrial.

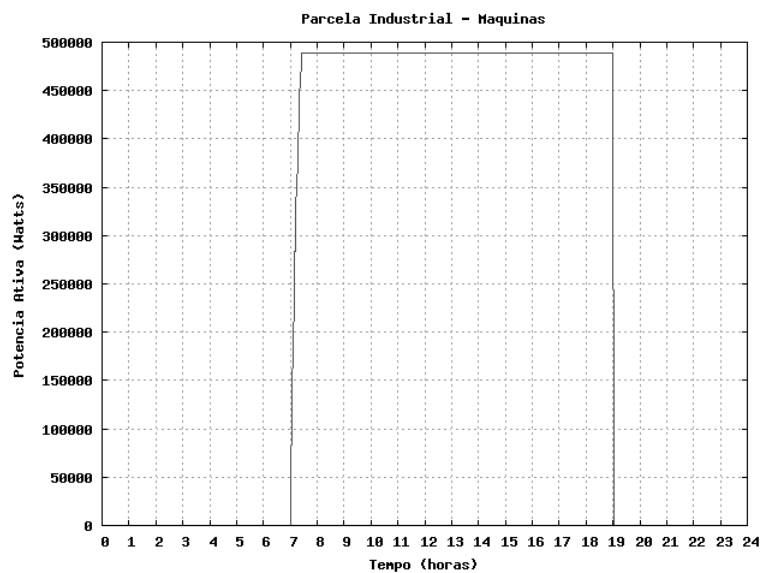


Figura 5.19: Comportamento agregado das máquinas de toda a parcela de consumo industrial – sem interrupções

Da análise dessa figura, observa-se que o comportamento agregado de todas as máquinas da parcela industrial conseguiu refletir a principal característica do funcionamento das mesmas: a rampa de potência descrita, anteriormente, nas Figuras 5.9 e 5.10.

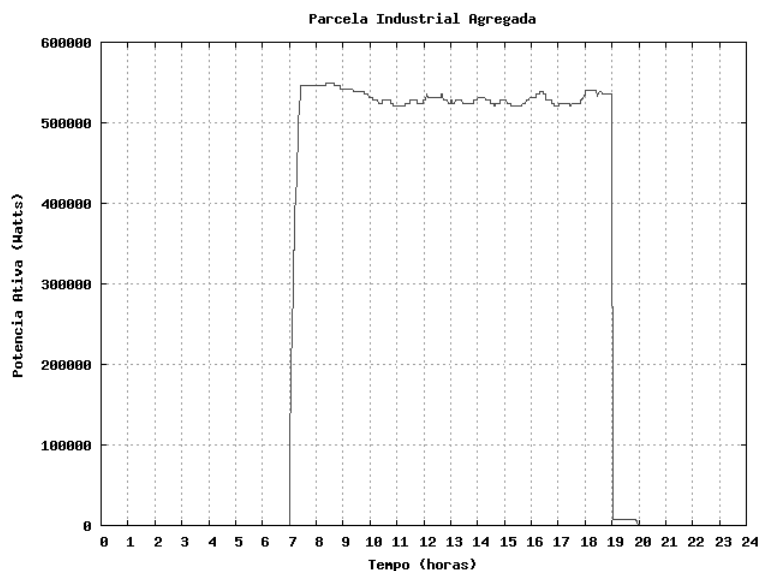


Figura 5.20: Comportamento agregado da parcela industrial – sem interrupções

Essa curva corresponde à agregação do comportamento dos aparelhos de ar-condicionado, dos chuveiros, das máquinas e das lâmpadas em toda a parcela industrial.

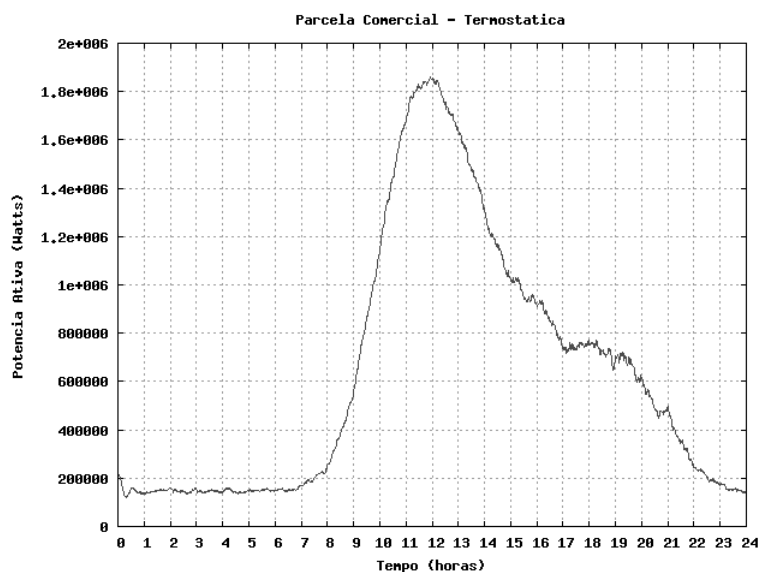


Figura 5.21: Comportamento agregado das geladeiras, freezers e aparelhos de ar-condicionado de toda a parcela de consumo comercial – sem interrupções

Nessa figura, o maior nível de potência (por volta das 10:00 hs) corresponde ao acionamento dos aparelhos de ar-condicionado nas lojas que compõem a parcela de consumo comercial.

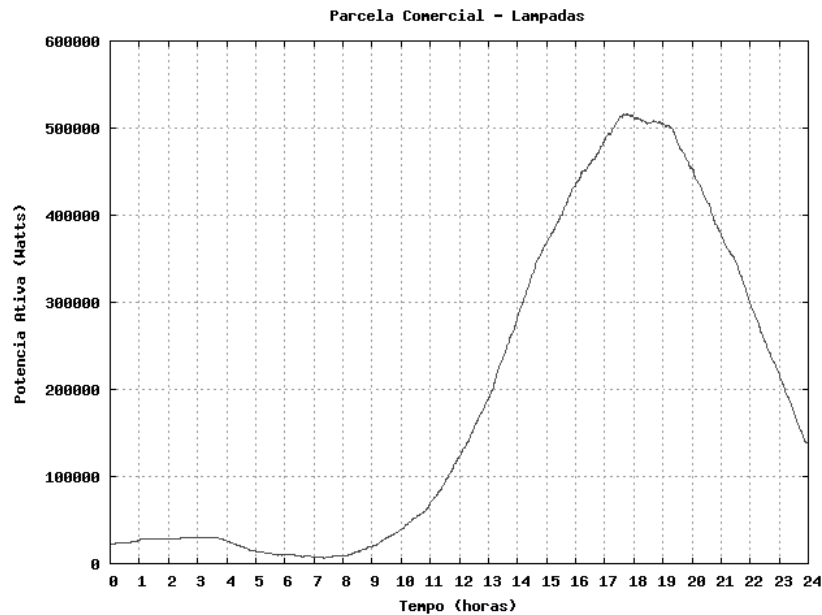


Figura 5.22: Comportamento agregado das lâmpadas de toda a parcela de consumo comercial – sem interrupções

Pode-se observar que as lâmpadas também são mais utilizadas por volta das 19:00 hs.

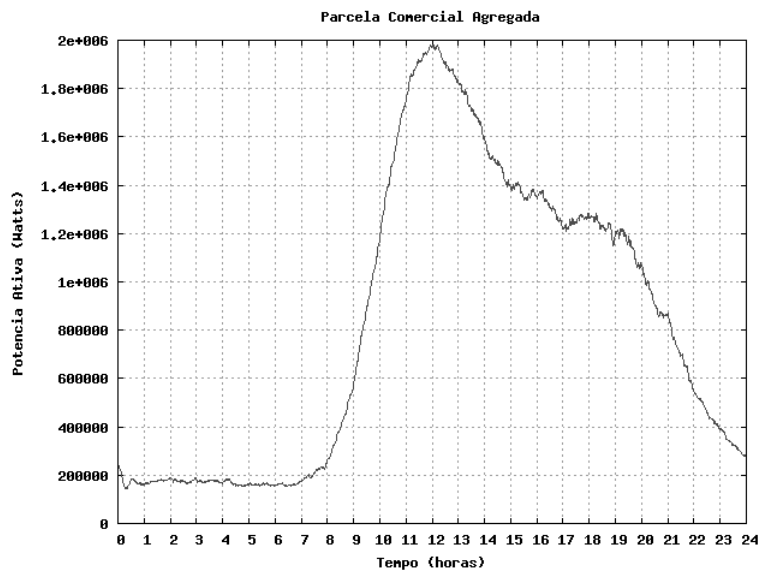


Figura 5.23: Comportamento agregado da parcela comercial – sem interrupções

Essa curva corresponde à agregação do comportamento dos equipamentos controlados termostaticamente e das lâmpadas em toda a parcela comercial.

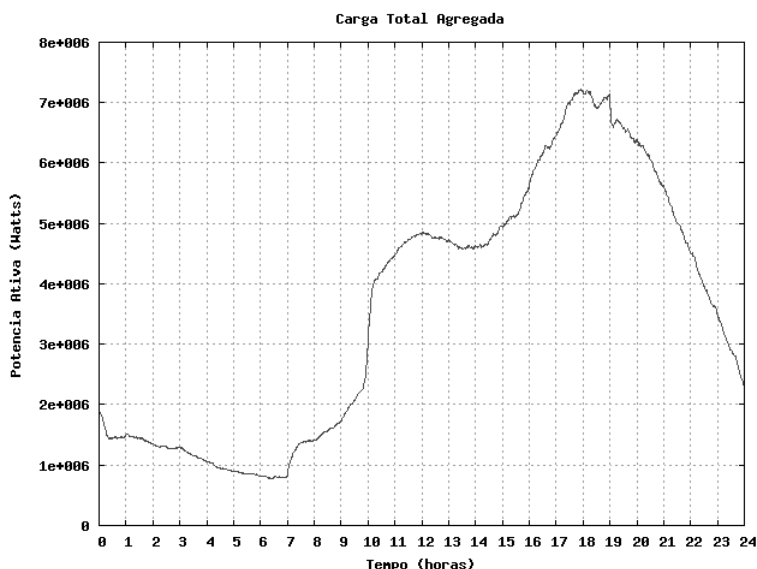


Figura 5.24: Comportamento da carga agregada no alimentador – sem interrupções

Pode-se observar que essa curva possui uma forma bastante similar à forma da curva associada ao comportamento da carga agregada da parcela residencial. Isso ocorre uma vez que ela é obtida através da agregação dos comportamentos das parcelas de consumo residencial, industrial e comercial, sendo que a primeira é predominante no alimentador em análise.

Da análise das Figuras 5.5 a 5.24, pode-se concluir que as classes e objetos implementados foram capazes de representar, de forma bastante satisfatória, as principais características físicas envolvidas no funcionamento dos equipamentos em estudo: perfil de consumo, modelo elétrico, controle interno e regime de serviço, conforme descrito, previamente, no item 5.3.

B) Resultados obtidos para a primeira situação de blecaute (Situação 1):

Posteriormente, foi simulada uma condição de blecaute, correspondente à Situação 1 descrita no capítulo anterior, cujas características estão novamente representadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Características da Situação 1

Tempo de Duração do Blecaute ($t_{blecaute}$)	Hora da ocorrência da interrupção (t_i)	Hora do dia (t_R) – horário da reenergização	Temperatura Ambiente
2 horas	17:00hs	19:00 hs	30°C

Os resultados obtidos para essa situação estão representados nas Figuras 5.25 a 5.37.

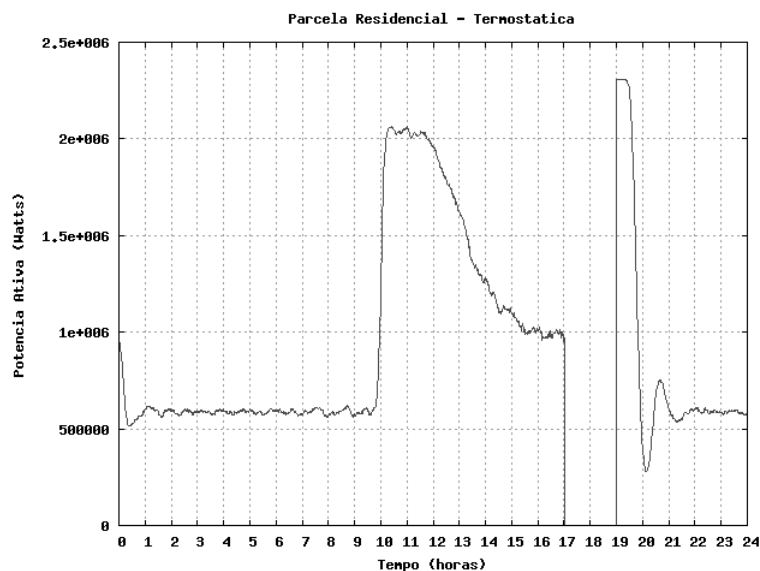
Parcela de Consumo Residencial:

Figura 5.25: Comportamento das cargas controladas termostaticamente (geladeiras, freezers e aparelhos de ar-condicionado) da parcela de consumo residencial - Situação 1

Da análise dessa figura, pode-se observar que a metodologia proposta permitiu a representação das principais características envolvidas no processo de reenergização de cargas controladas termostaticamente: surgimento do pico de potência no instante da

reenergização e aparecimento de um patamar de potência constante associado à perda de diversidade do estado desses equipamentos. Esses resultados condizem com os esperados, uma vez que a condição de blecaute simulada corresponde a uma situação bastante crítica.

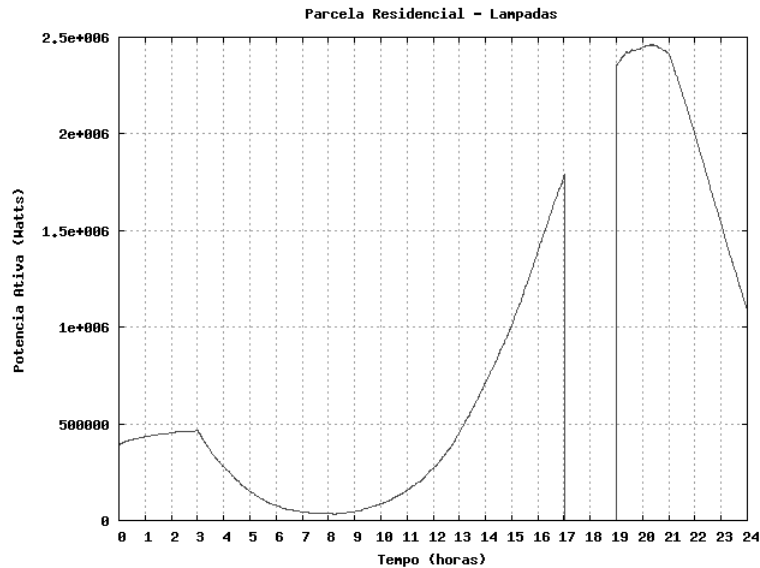


Figura 5.26: Comportamento das lâmpadas (incandescentes e fluorescentes) da parcela de consumo residencial- Situação 1

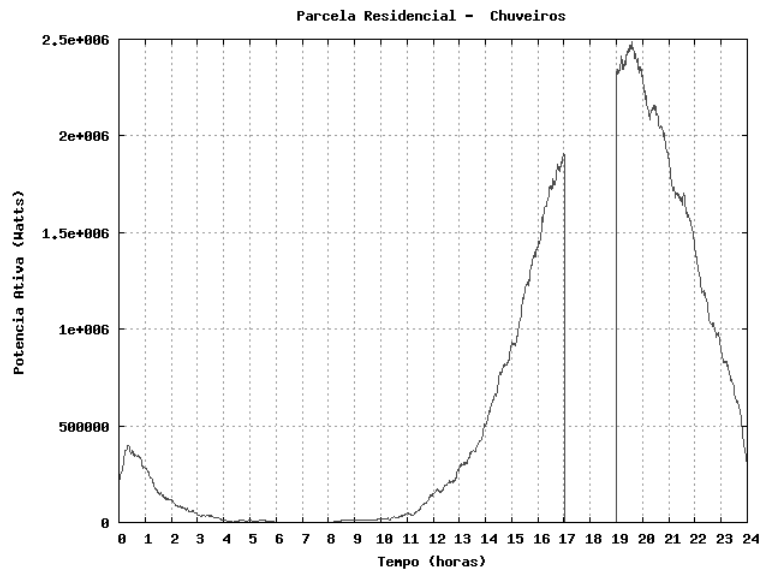


Figura 5.27: Comportamento dos chuveiros da parcela de consumo residencial- Situação 1

Das Figuras 5.26 e 5.27 pode-se notar que, conforme o esperado, a interrupção no fornecimento de energia, apesar de caracterizar uma situação crítica, não influencia o

comportamento tanto dos chuveiros quanto das lâmpadas incandescentes e fluorescentes, que após a reenergização, seguem seu perfil de consumo diário normal, uma vez que correspondem a cargas fixas.

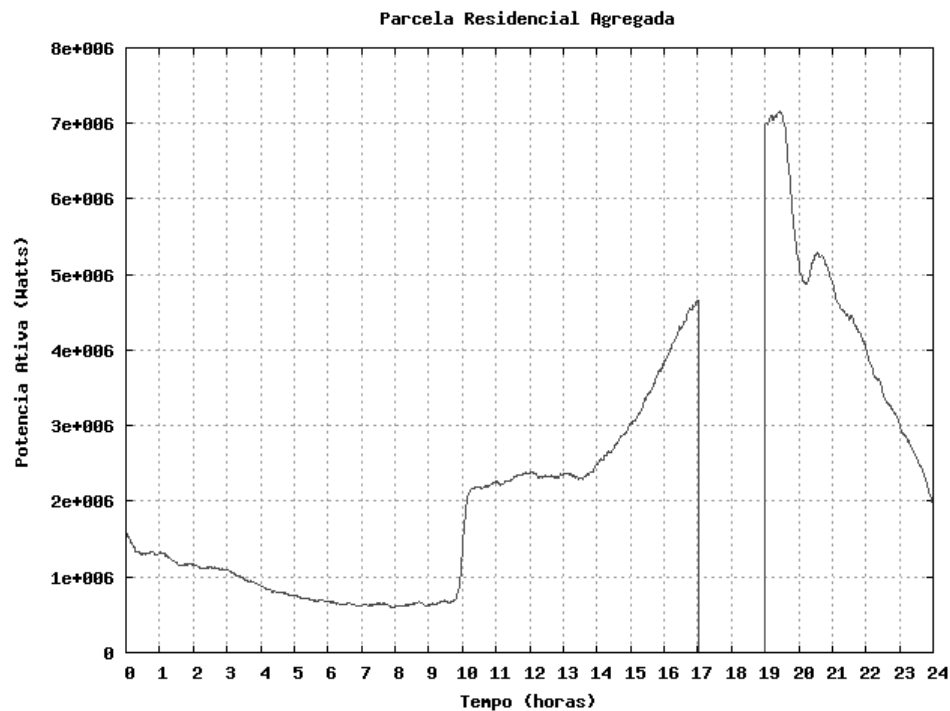


Figura 5.28: Comportamento da parcela de consumo residencial- Situação 1

Dessa figura pode-se concluir que as características do blecaute simulado (reenergização ocorrida no horário de pico, temperatura ambiente elevada no momento da recomposição e interrupção de longa duração) levaram a uma condição de recomposição bastante crítica, caracterizada pelo pico de potência no instante da reenergização, cerca de 1,5 vezes maior que o nível de potência em condições normais de operação.

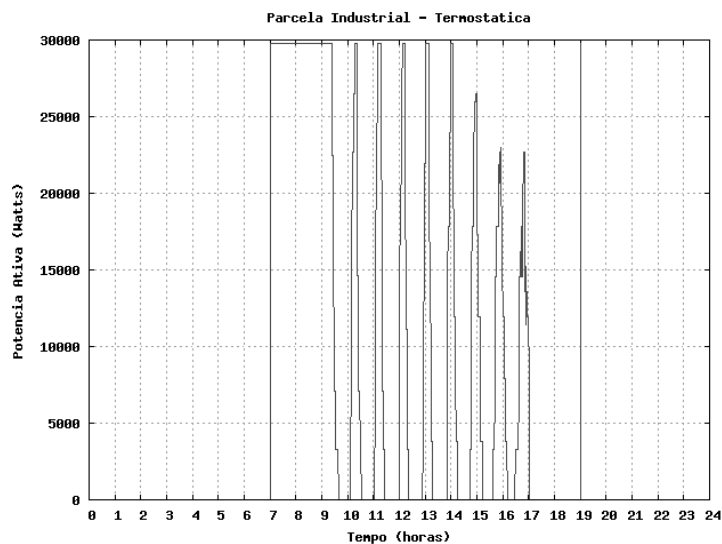
Parcela de Consumo Industrial:

Figura 5.29: Comportamento das cargas controladas termostaticamente (aparelhos de ar-condicionado) da parcela de consumo industrial- Situação 1

Da análise da Figura 5.29 pode-se observar que, no momento da recomposição, esses equipamentos haviam acabado de ser desligados (perfil de consumo dos aparelhos de ar-condicionado da parcela industrial) e, assim, o comportamento típico de cargas controladas termostaticamente em situações de interrupção críticas não foi observado.

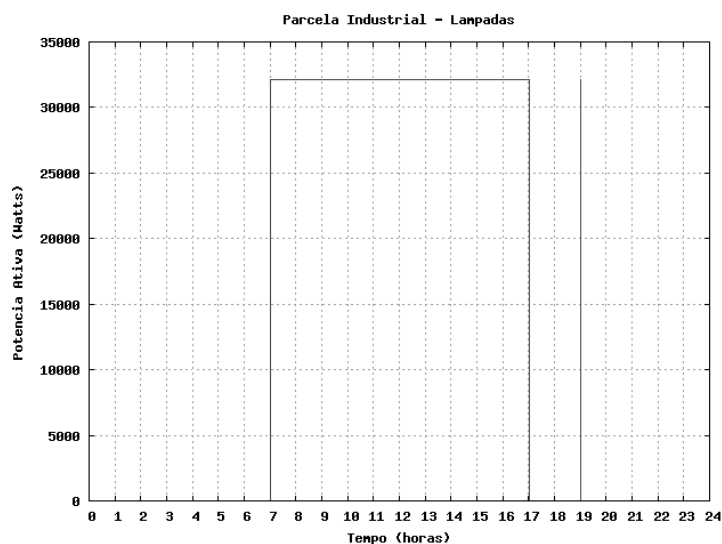


Figura 5.30: Comportamento das lâmpadas (mistas e fluorescentes) da parcela de consumo industrial- Situação 1

Analisando essa figura, pode-se notar que assim como no caso dos equipamentos controlados termostaticamente, o comportamento das lâmpadas durante o processo de recomposição não pôde ser observado, uma vez que no momento da reenergização, haviam acabado de ser desligadas, devido ao perfil de consumo considerado para as mesmas.

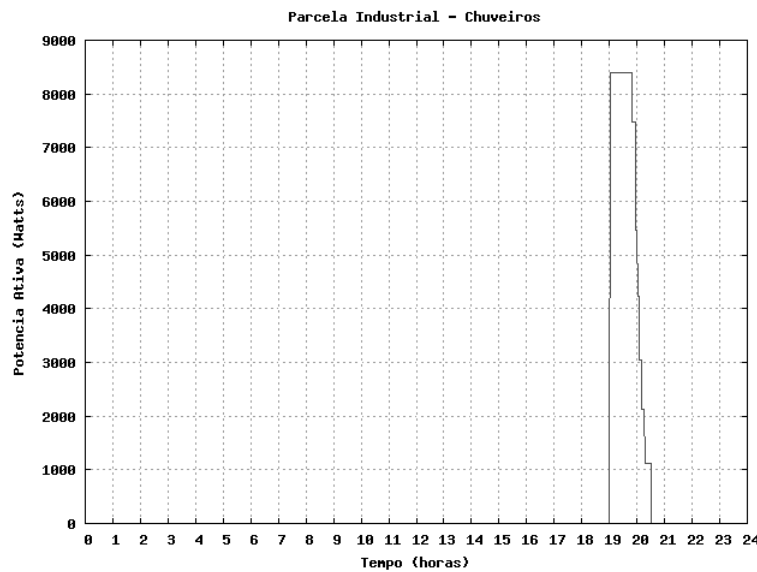


Figura 5.31: Comportamento dos chuveiros da parcela de consumo industrial- Situação 1

Nota-se, da Figura 5.31, que o comportamento dos chuveiros da parcela industrial se assemelha ao comportamento dos chuveiros da parcela residencial, ou seja, conforme esperado, a interrupção no fornecimento de energia, apesar de caracterizar uma situação crítica, não influenciou o comportamento dos mesmos, que após a reenergização, seguiram seu perfil de consumo diário normal.

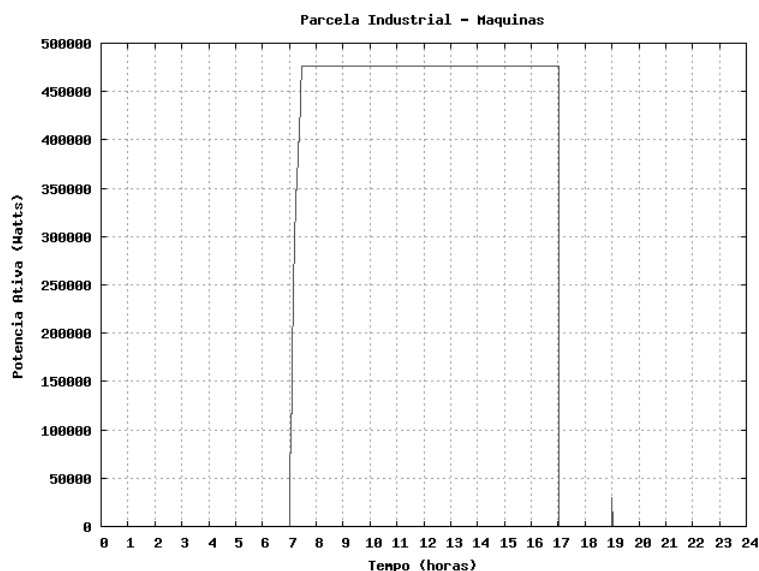


Figura 5.32: Comportamento das máquinas da parcela de consumo industrial- Situação 1

Da Figura 5.32, pode-se notar que devido ao perfil de consumo adotado para as máquinas da parcela industrial, no momento da reenergização, elas haviam acabado de ser desligadas e, assim, seu comportamento durante a reenergização não foi. Entretanto, pôde-se, novamente, notar a rampa de potência característica do funcionamento conjunto desses equipamentos.

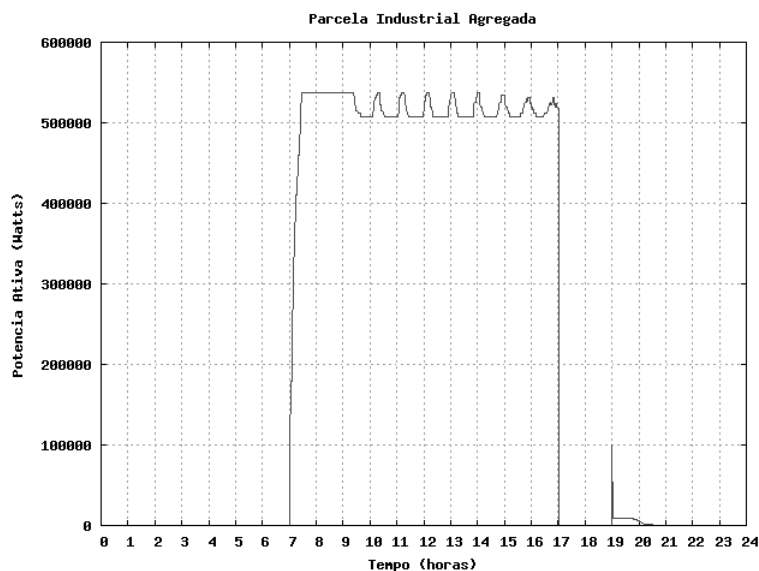


Figura 5.33: Comportamento da parcela de consumo industrial- Situação 1

O comportamento da parcela de consumo industrial, representado na Figura 5.33, consiste na agregação dos comportamentos dos equipamentos associados a essa parcela. Pode-se notar que apesar dos chuveiros serem os únicos equipamentos dessa parcela que encontram-se em funcionamento no instante da reenergização (devido a seu perfil de consumo diário), eles não exercem grande influência no comportamento da parcela industrial durante a recomposição, uma vez que o nível de potência dos mesmos é muito baixo quando comparado ao nível das máquinas industriais.

Parcela de Consumo Comercial:

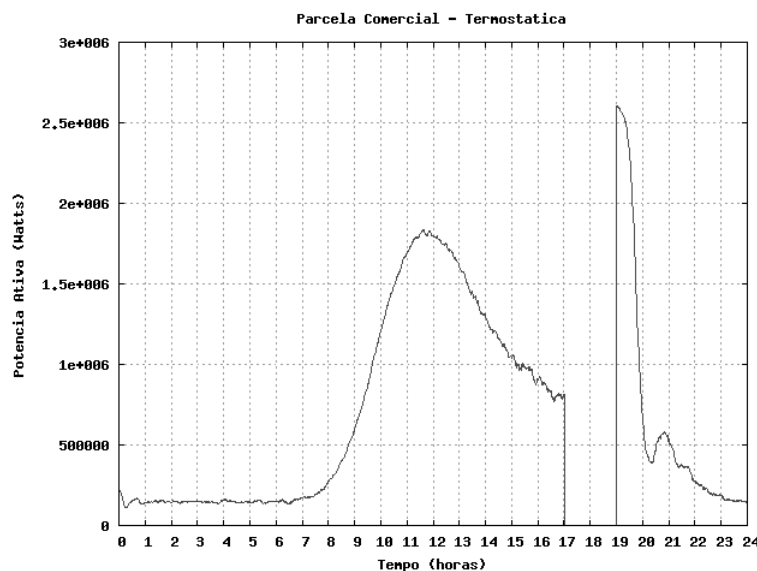


Figura 5.34: Comportamento das cargas controladas termostaticamente (geladeiras freezers e aparelhos de ar-condicionado) da parcela de consumo comercial- Situação 1

Da análise dessa figura, pode-se observar que, mais uma vez, foi possível a representação das principais características envolvidas no processo de reenergização de cargas controladas termostaticamente. Novamente, esses resultados condizem com os esperados, uma vez que a condição de blecaute simulada é crítica.

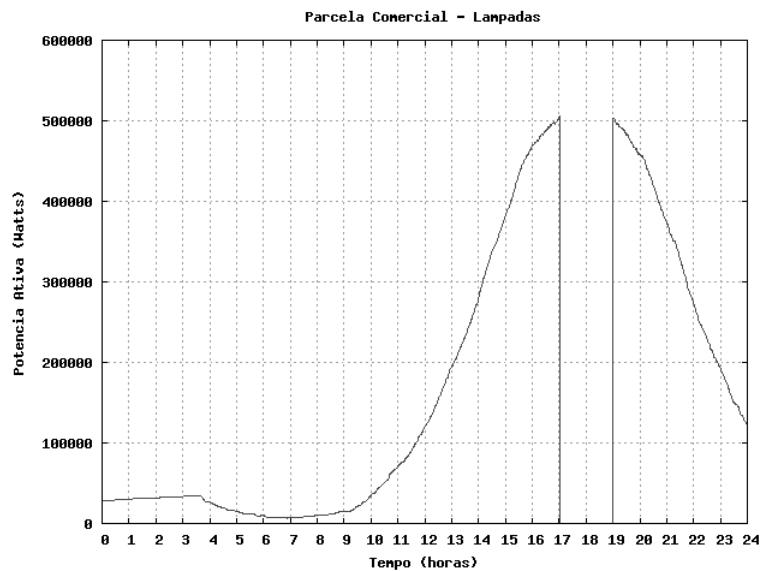


Figura 5.35: Comportamento das lâmpadas da parcela de consumo comercial- Situação 1

Da Figura 5.35, pode-se notar que, conforme o esperado, a interrupção no fornecimento de energia, apesar de caracterizar uma situação crítica, não influencia o comportamento das lâmpadas incandescentes e fluorescentes, que após a reenergização, seguem seu perfil de consumo diário normal, uma vez que correspondem a cargas fixas.

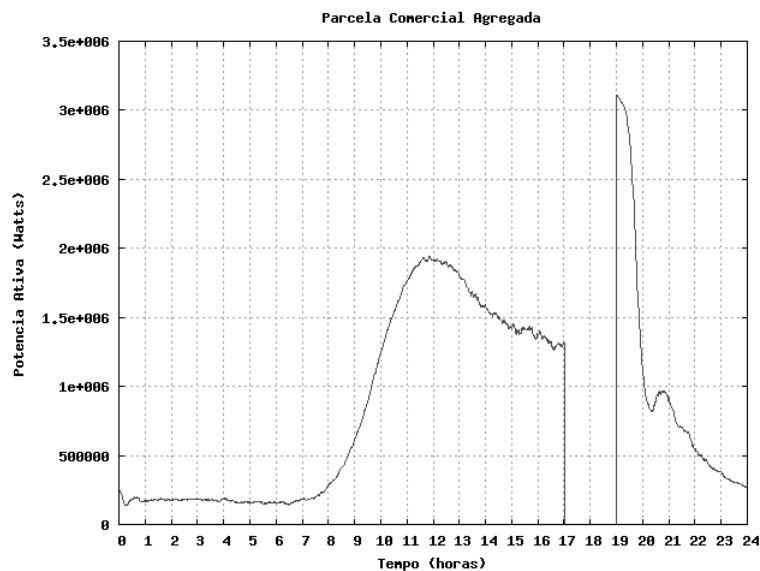


Figura 5.36: Comportamento da parcela de consumo comercial- Situação 1

Dessa figura, pode-se notar que as características do blecaute simulado levaram a uma condição de recomposição bastante crítica, caracterizada pelo pico de potência no instante da reenergização. Deve-se ressaltar que o comportamento da parcela comercial é bastante similar ao da parcela residencial, uma vez que se considerou um tipo de estabelecimento comercial (lojas) com equipamentos encontrados em residências típicas.

Carga Agregada no Alimentador:

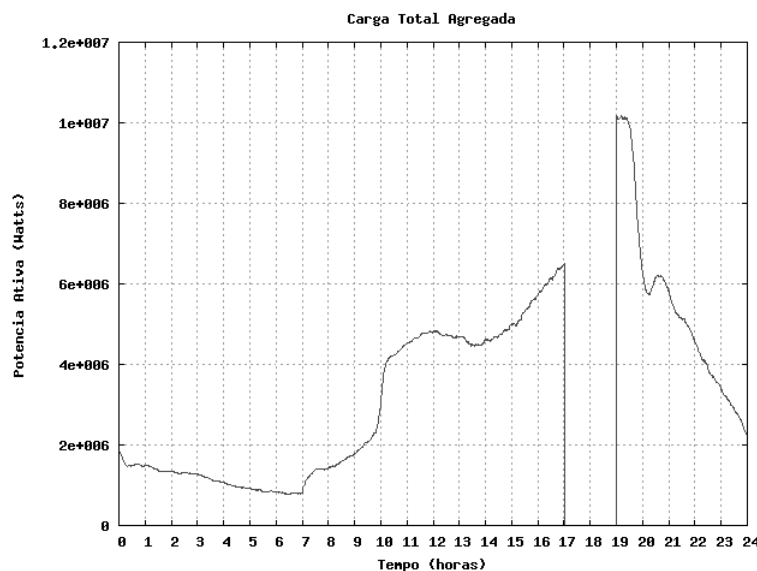


Figura 5.37: Comportamento da carga agregada no alimentador - Situação 1

Analisando-se essa figura, conclui-se que as características do blecaute simulado levaram a uma situação de recomposição bastante crítica, caracterizada, principalmente, pelo pico de potência no instante da reenergização, cerca de 1,5 vezes maior que o nível de potência em condições normais de operação.

C) Resultados Obtidos para a Situação 2:

Foi simulada, então, outra condição de blecaute, correspondente à Situação 2 descrita no capítulo anterior, cujas características estão novamente representadas na Tabela 5.2.

Os resultados obtidos para essa situação estão representados nas Figuras 5.38 a 5.50.

Tabela 5.2: Características da Situação 2

Tempo de Duração do Blecaute ($t_{blecaute}$)	Hora da ocorrência da interrupção (t_i)	Hora do dia (t_R) – horário da reenergização	Temperatura Ambiente
10 minutos	9:00hs	9:10 hs	10°C

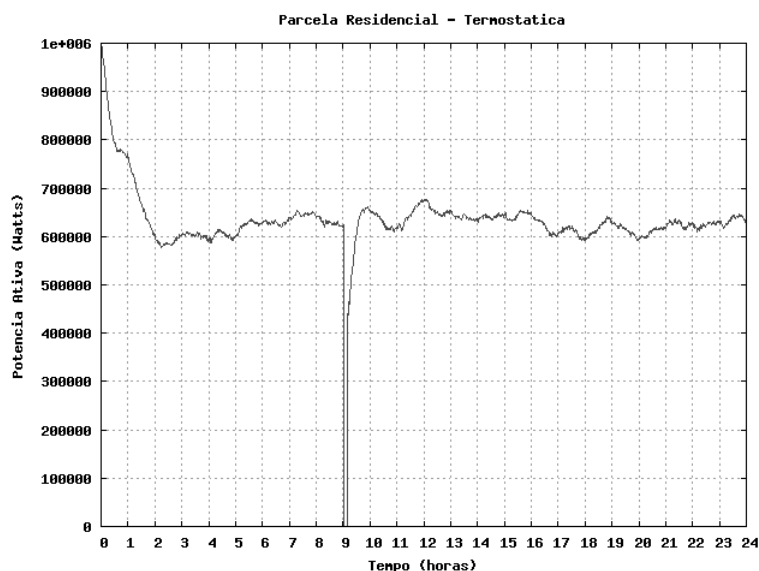
Parcela de Consumo Residencial:

Figura 5.38: Comportamento das cargas controladas termostaticamente (geladeiras, freezers e aparelhos de ar-condicionado) da parcela de consumo residencial- Situação 2

Analisando-se a Figura 5.38, verifica-se que o comportamento dos equipamentos controlados termostaticamente da parcela residencial, para essa nova situação de blecaute, difere bastante do comportamento observado para a Situação 1. Esse resultado também condiz com o esperado, uma vez que a segunda condição de blecaute corresponde a uma situação “mais amena”, na qual a reenergização ocorre em um horário de baixo consumo (9:10hs), a temperatura ambiente é baixa e o blecaute é de curta duração. Outra característica interessante de se notar é a ausência da demanda de potência associada aos aparelhos de ar-condicionado que, em virtude da baixa temperatura ambiente (10°C) não são acionados por seu controle termostático.

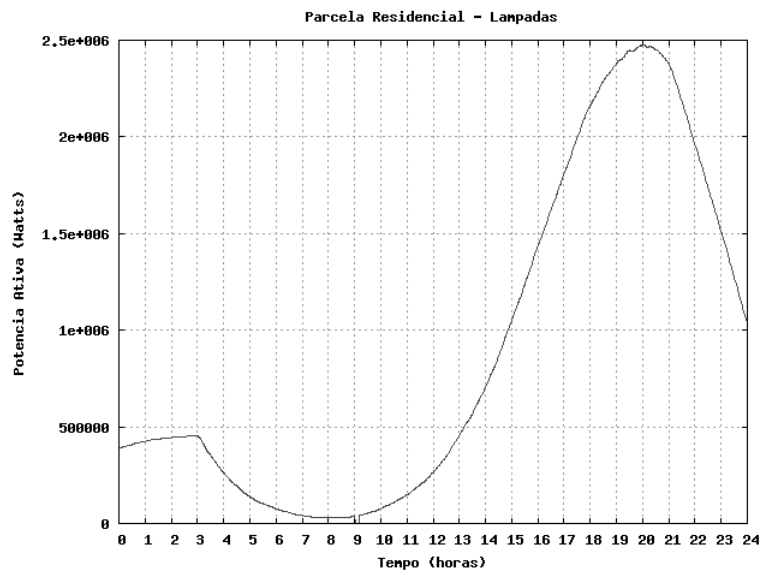


Figura 5.39: Comportamento das lâmpadas (incandescentes e fluorescentes) da parcela de consumo residencial- Situação 2

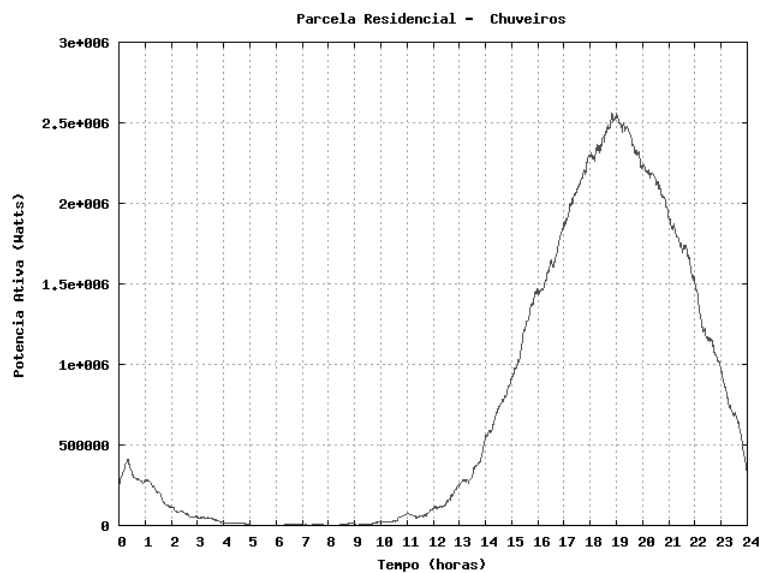


Figura 5.40: Comportamento dos chuveiros da parcela de consumo residencial- Situação 2

Das Figuras 5.39 e 5.40, pode-se observar que o comportamento das lâmpadas e dos chuveiros não sofreu qualquer influência do blecaute ocorrido. Após a reenergização, esses equipamentos seguiram seu perfil de consumo diário normal (cargas fixas).

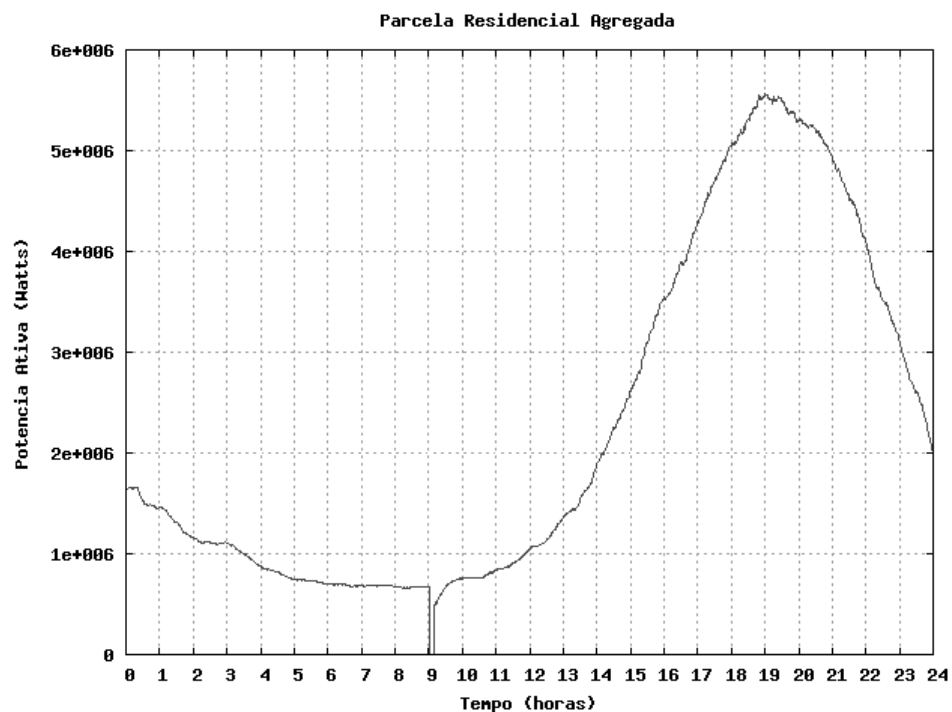


Figura 5.41: Comportamento da parcela de consumo residencial- Situação 2

Da Figura 5.41, pode-se concluir que como a condição de blecaute simulada corresponde a uma situação “amena”, o comportamento obtido para a parcela residencial é praticamente o mesmo de uma situação de operação normal da rede elétrica, com exceção do intervalo em que o alimentador ficou desenergizado (9:00hs às 9:10hs) e da ausência de demanda de potência dos aparelhos de ar-condicionado.

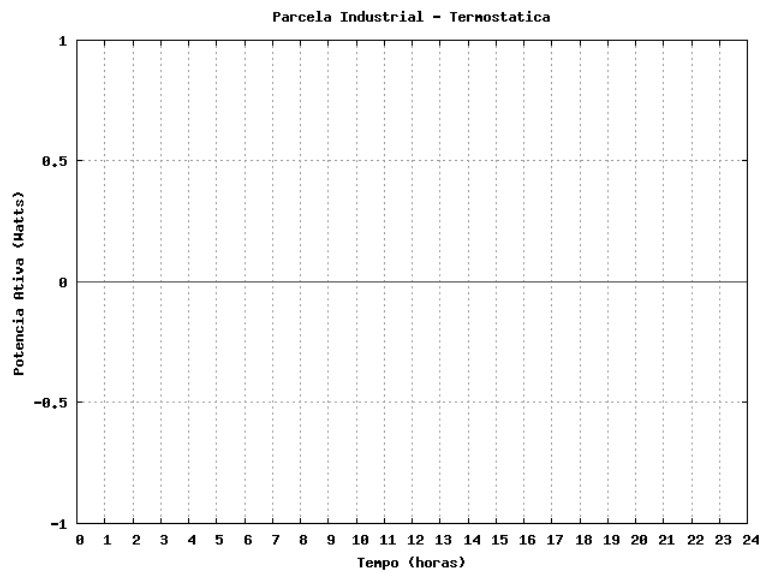
Parcela de Consumo Industrial:

Figura 5.42: Comportamento das cargas controladas termostaticamente (aparelhos de ar-condicionado) da parcela de consumo industrial- Situação 2

Observa-se, também nessa figura, a ausência da demanda de potência associada aos aparelhos de ar-condicionado, em virtude da baixa temperatura ambiente (10°C).

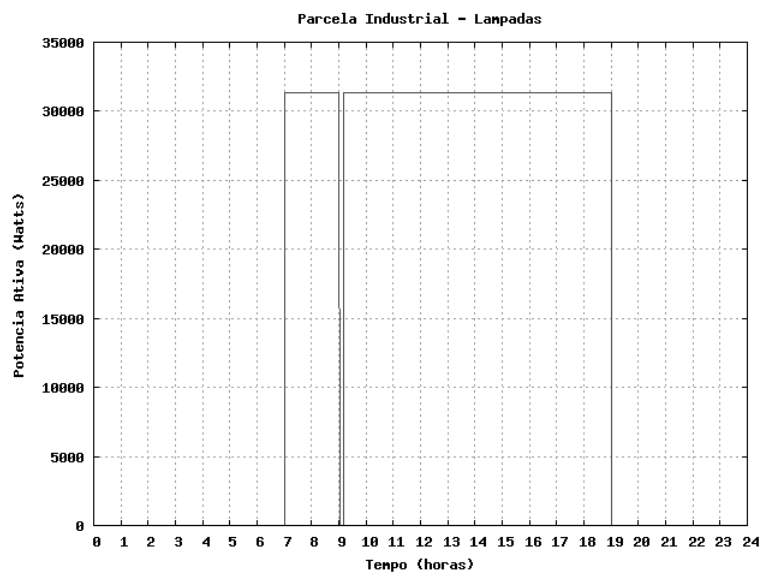


Figura 5.43: Comportamento das lâmpadas (mistas e fluorescentes) da parcela de consumo industrial- Situação 2

Da Figura 5.43, pode-se notar que o blecaute simulado não alterou o comportamento das lâmpadas da parcela industrial, que após a reenergização mantiveram seu perfil de consumo normal, uma vez que correspondem a cargas fixas.

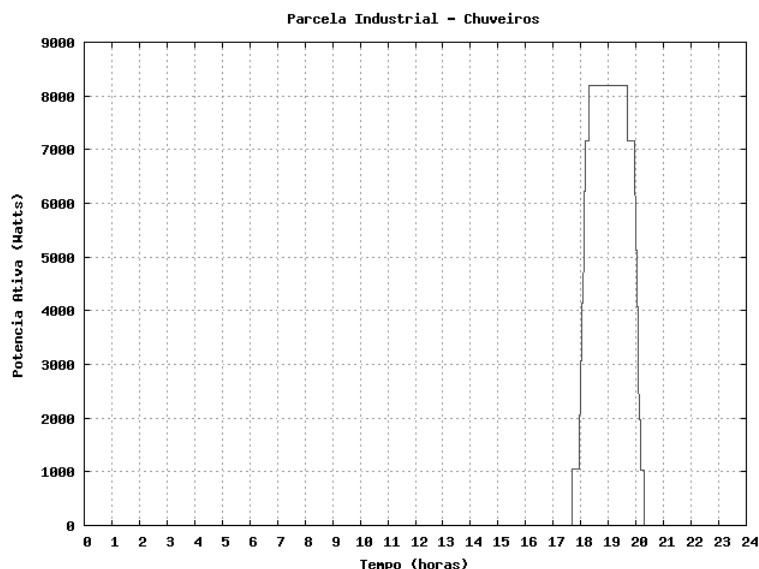


Figura 5.44: Comportamento dos chuveiros da parcela de consumo industrial- Situação 2

Da análise dessa figura, pode-se verificar que devido ao horário da reenergização, o blecaute não influenciou o comportamento dos chuveiros da parcela industrial que mantiveram seu perfil de consumo original.

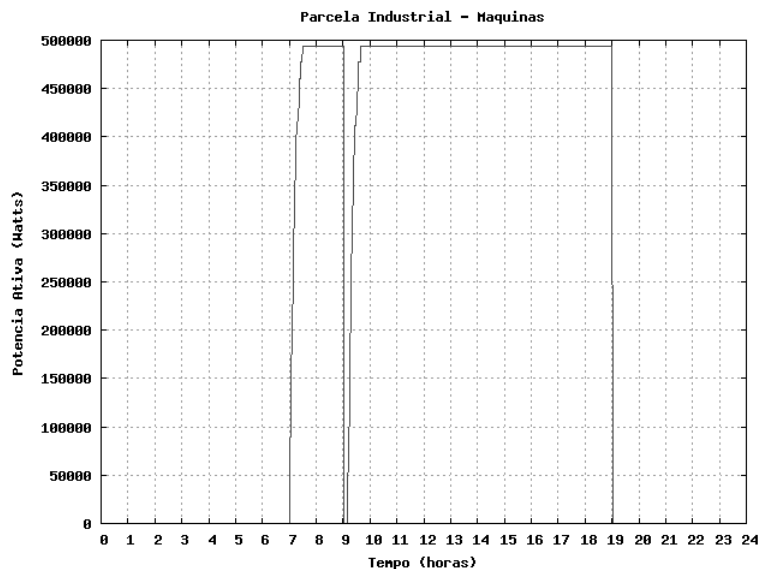


Figura 5.45: Comportamento das máquinas da parcela de consumo industrial- Situação 2

Da Figura 5.45, pode-se observar que antes da ocorrência da interrupção, esses equipamentos apresentaram um comportamento bastante característico, já mencionado anteriormente: uma rampa de potência até atingir o nível de potência máximo, indicando que os equipamentos não são ligados simultaneamente. Esse comportamento se repete, conforme o esperado, após a recomposição, caracterizando o acionamento assíncrono dos equipamentos da linha de produção.

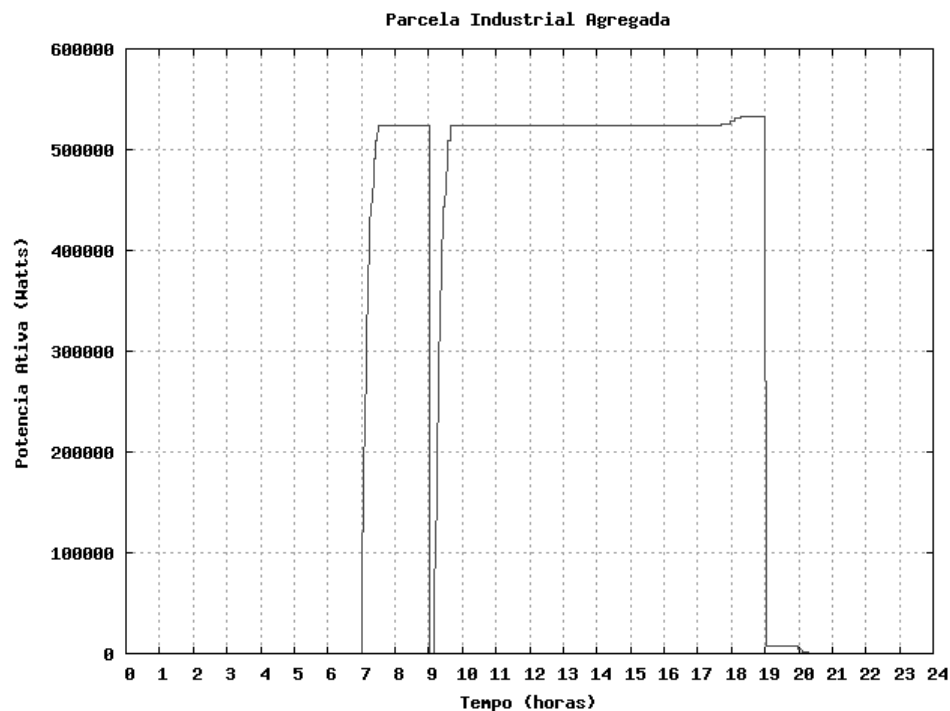


Figura 5.46: Comportamento da parcela de consumo industrial- Situação 2

Nessa figura, observa-se o comportamento da parcela industrial que segue, basicamente, o formato da curva das máquinas industriais, uma vez que o nível de potência das mesmas é muito superior ao nível de potência dos demais equipamentos considerados nessa parcela.

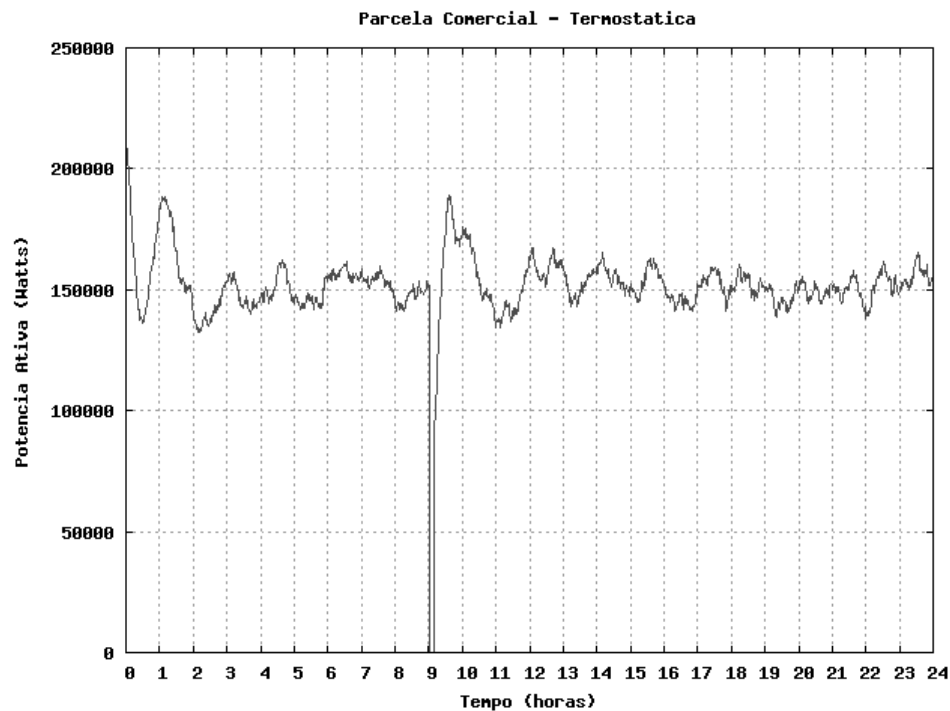
Parcela de Consumo Comercial:

Figura 5.47: Comportamento das cargas controladas termostaticamente (geladeiras, freezers e aparelhos de ar-condicionado) da parcela de consumo comercial - Situação 2

Analisando-se a Figura 5.47, verifica-se que, assim como no caso da parcela residencial, o comportamento dos equipamentos controlados termostaticamente da parcela comercial, para essa nova situação de blecaute, difere bastante do comportamento observado para a Situação 1. Esse resultado também condiz com o esperado, devido às características da segunda condição de blecaute e à ausência de demanda de potência associada aos aparelhos de ar-condicionado.

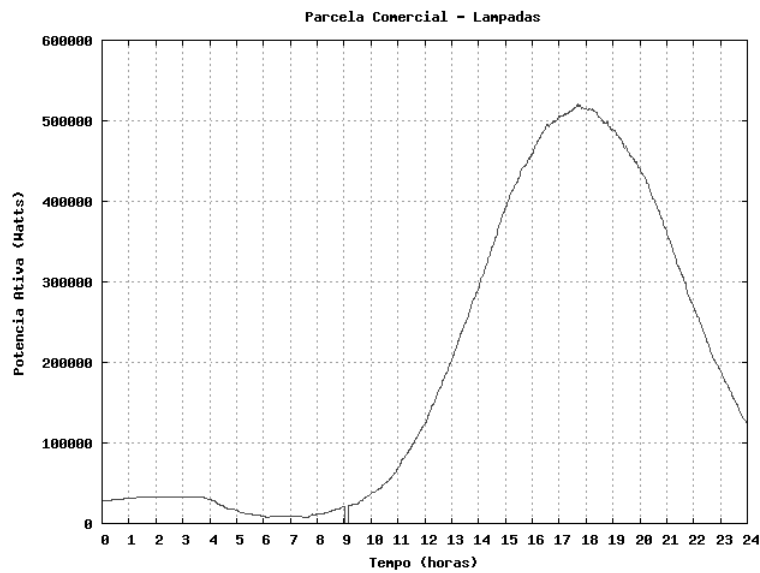


Figura 5.48: Comportamento das lâmpadas (incandescentes e fluorescentes) da parcela de consumo comercial- Situação 2

Da Figura 5.48, pode-se observar que o comportamento das lâmpadas incandescentes e fluorescentes da parcela comercial também não sofreu qualquer influência do blecaute ocorrido, mantendo seu perfil de consumo original, uma vez que correspondem a cargas fixas.

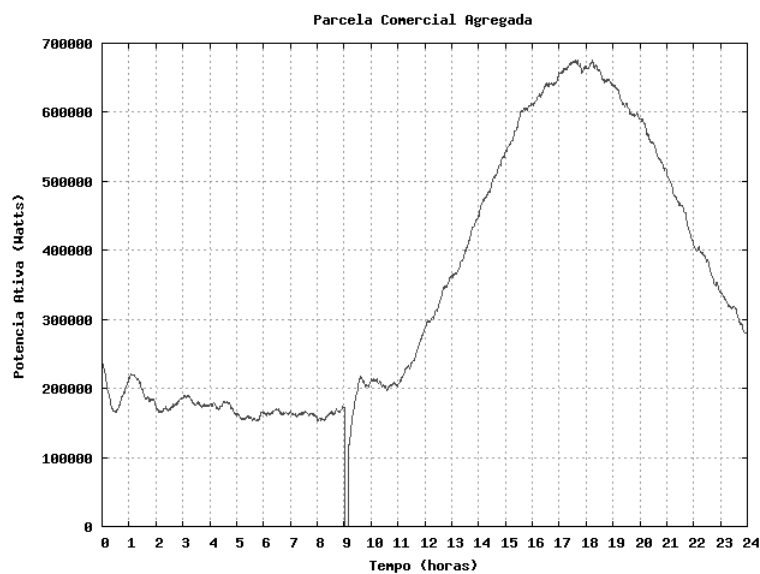


Figura 5.49: Comportamento da parcela de consumo comercial- Situação 2

Da Figura 5.49, pode-se concluir que como a condição de blecaute simulada corresponde a uma situação “amena”, o comportamento obtido para a parcela comercial é praticamente o mesmo de uma situação de operação normal da rede elétrica, com exceção da ausência de demanda de potência dos aparelhos de ar-condicionado e do intervalo em que o alimentador ficou desenergizado (9:00hs às 9:10hs).

Carga Agregada no Alimentador:

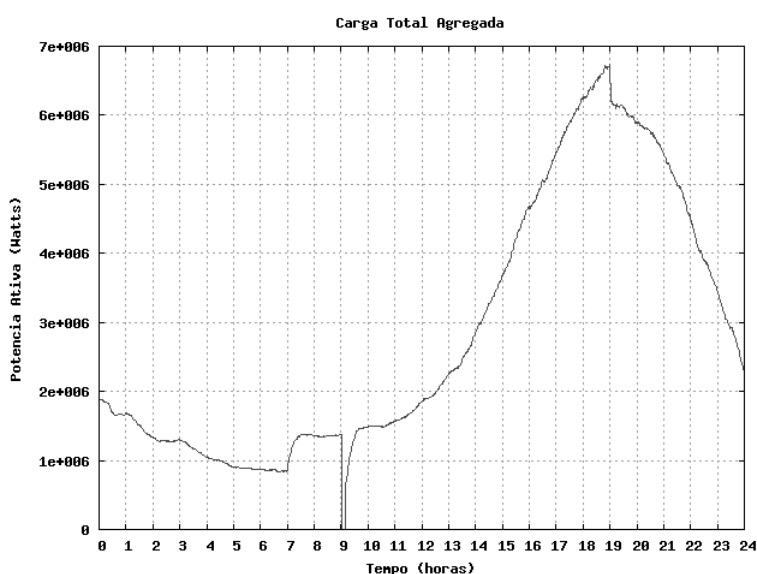


Figura 5.50: Comportamento da carga agregada no alimentador - Situação 2

Analisando-se a Figura 5.50, pode-se verificar que, diferentemente do ocorrido para a Situação 1, o comportamento da carga agregada no alimentador é praticamente o mesmo que em condições normais de operação, uma vez que o blecaute não influenciou, de forma significativa, o comportamento de nenhuma das três parcelas de consumo consideradas (residencial, industrial e comercial).

D) Resultado obtido para a terceira situação de blecaute (Situação 3):

Posteriormente, foi simulada outra condição de blecaute (Situação 3), cujas características estão representadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Características da Situação 3

Tempo de Duração do Blecaute ($t_{blecute}$)	Hora da ocorrência da interrupção (t_i)	Hora do dia (t_R) – horário da reenergização	Temperatura Ambiente
2 horas	17:00hs	19:00 hs	16°C

Nota-se que essa situação difere da Situação 1 apenas pela temperatura ambiente adotada, uma vez que o objetivo dessa simulação é verificar a influência dessa variável no comportamento da carga agregada no alimentador durante a reenergização. O resultado obtido para essa situação está representado na Figura 5.51.

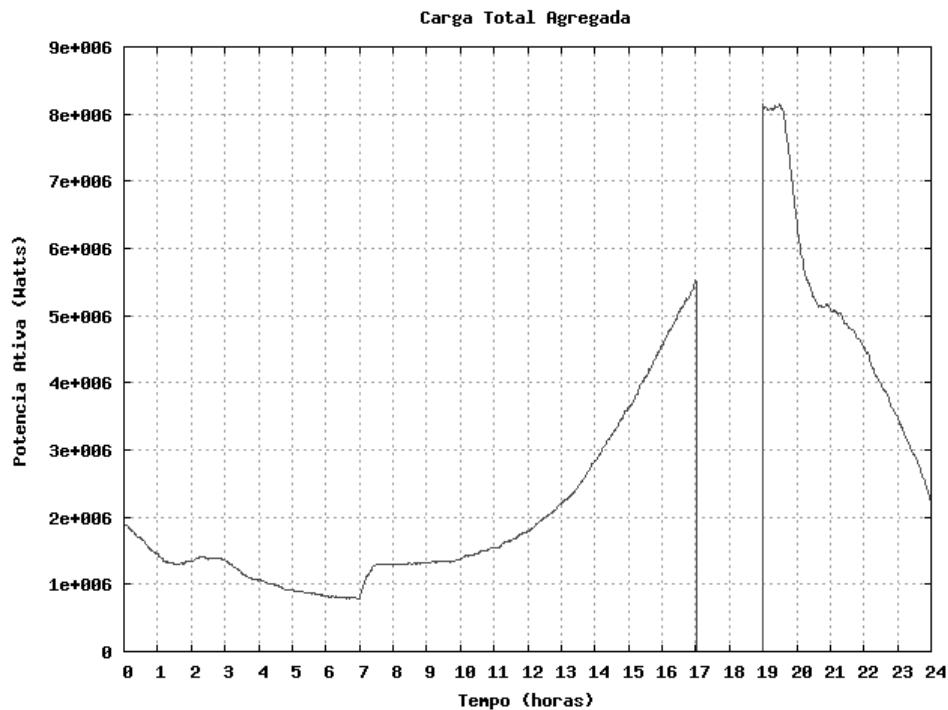


Figura 5.51: Comportamento da carga agregada no alimentador - Situação 3

Comparando-se a Figura 5.51 com a Figura 5.37, pode-se observar que a temperatura ambiente mais baixa foi responsável pela diminuição do pico de potência no instante do religamento. Esse resultado condiz com o esperado, uma vez que a influência dessa variável está relatada em alguns trabalhos encontrados na literatura [1].

E) Resultado obtido para a quarta situação de blecaute (Situação 4):

Posteriormente, foi simulada outra condição de blecaute (Situação 4), cujas características estão representadas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Características da Situação 4

Tempo de Duração do Blecaute ($t_{blecaute}$)	Hora da ocorrência da interrupção (t_i)	Hora do dia (t_R) – horário da reenergização	Temperatura Ambiente
2 horas	13:00hs	15:00 hs	30°C

Nota-se que essa situação difere da Situação 1 apenas pelos horários de ocorrência da interrupção e de restabelecimento de energia, uma vez que o objetivo dessa simulação é verificar a influência de um blecaute mais longo no comportamento da parcela de consumo industrial. É importante ressaltar que, nas simulações anteriores, só foi possível a verificação do comportamento dessa parcela para uma condição de blecaute amena (Situação 2), uma vez que para as outras situações (1 e 3), o horário de desligamento da carga associada a essa parcela (relacionado, diretamente, com o perfil de consumo diário da parcela industrial) coincidia com o horário da reenergização e, portanto, a influência desses blecautes não pôde ser observada para essas situações. O resultado obtido para essa situação está representado na Figura 5.52.

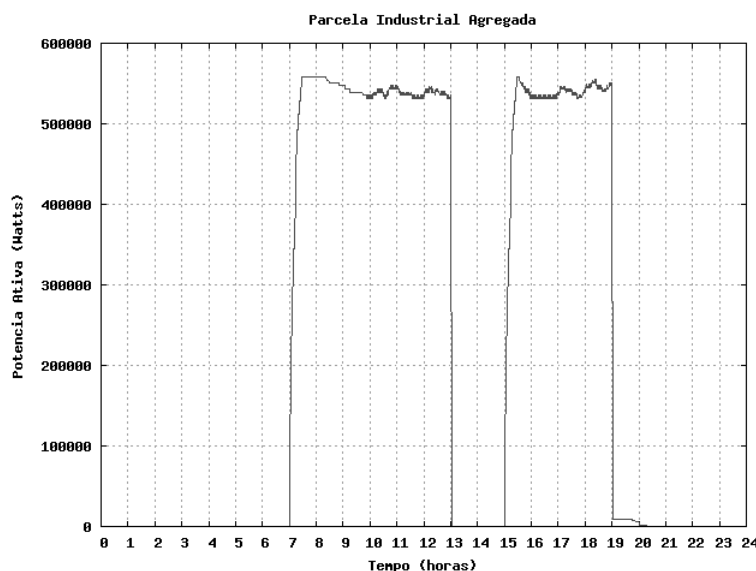


Figura 5.52: Comportamento da parcela de consumo industrial - Situação 4

Pode-se observar que, conforme esperado, o comportamento dessa parcela não sofre influência significativa mesmo para uma situação de blecaute crítica, uma vez que a maioria dos equipamentos associados a essa parcela possui dispositivos de desligamento automático e, assim, no momento da reenergização, estarão desligados. A partir do instante do restabelecimento de energia, pode-se verificar o aparecimento da rampa de potência inerente à reenergização não simultânea dos equipamentos da linha de produção.

5.6. Comparação Entre as Metodologias Propostas

Neste trabalho, foram propostas duas metodologias distintas para a representação do comportamento da carga durante a recomposição de sistemas de energia elétrica. A primeira é a Metodologia Heurística Top-Down, descrita no Capítulo 4 e a segunda corresponde à Metodologia Caixa-Branca Bottom-Up, apresentada neste capítulo.

Apesar de suas características bastante diferentes, as duas metodologias foram capazes de representar o comportamento da carga agregada em uma subestação/alimentador após a reenergização da rede. Entretanto, pode-se destacar algumas vantagens e desvantagens com relação à aplicação das duas metodologias propostas com base nos resultados de simulação obtidos para cada uma delas.

A **Metodologia Heurística Top-Down** necessita de uma grande variedade de dados de entrada: medições do sistema real em condições normais de operação, dados associados ao faturamento da concessionária de energia e, em maior escala, informações relativas ao conhecimento de especialistas. Todas essas informações podem ser consideradas como de fácil obtenção e, portanto, o tipo de dado de entrada utilizado por esse modelo corresponde a uma vantagem do mesmo. Além disso, essa metodologia apresenta como vantagem a baixa complexidade computacional associada a ela, uma vez que se baseia na aplicação de implicações lógicas, que acarretam em baixo esforço computacional. Apesar dessa metodologia conseguir representar, de forma satisfatória, os principais fenômenos físicos envolvidos no processo de recomposição das cargas do sistema elétrico, os comportamentos obtidos tanto para as parcelas de consumo quanto para a carga agregada correspondem a

comportamentos aproximados, ou seja, a uma aproximação bastante simplificada do comportamento do sistema real.

Já a **Metodologia Caixa-Branca Bottom-Up** necessita de informações relacionadas ao conhecimento dos fenômenos físicos envolvidos no funcionamento de cada equipamento modelado. Essas informações nem sempre são facilmente obtidas e, assim, constituem uma desvantagem dessa metodologia quando comparada à anterior. Outra desvantagem característica dessa metodologia é sua complexidade computacional, associada diretamente ao instanciamento de uma grande quantidade de objetos e aos cálculos necessários para a obtenção do modelo agregado. Apesar dessas desvantagens, essa metodologia possui uma grande capacidade de representação dos fenômenos físicos envolvidos no processo de reenergização e, portanto, os comportamentos das parcelas de consumo bem como da carga agregada correspondem a comportamentos bem mais próximos da realidade quando comparados aos obtidos através da primeira metodologia proposta.

Pode-se, então, definir alguns critérios para a realização da comparação entre os dois métodos desenvolvidos. O primeiro critério corresponde **ao grau de dificuldade associado à obtenção e organização dos dados de entrada requeridos**. Nesse sentido, a Metodologia Caixa-Branca Bottom-Up possui como característica um alto grau de dificuldade envolvido na obtenção dessas informações. Já os dados de entrada necessários para a Metodologia Heurística Top-Down podem ser obtidos de forma relativamente fácil.

Outro critério importante para a comparação dos dois métodos é o **grau de complexidade envolvido na metodologia de modelagem** de cada um deles, sendo que, conforme as metodologias descritas nos Capítulos 4 e 5, a abordagem Heurística Top-Down apresenta uma metodologia bastante intrincada e, portanto, um grau de complexidade muito maior que o da abordagem Caixa-Branca Bottom-Up.

Além disso, deve-se levar em consideração o **esforço computacional** envolvido na obtenção do comportamento da carga agregada durante o processo de reenergização. Nesse contexto, a demanda computacional requerida pela Metodologia Caixa-Branca Bottom-Up é muito maior que pela Metodologia Heurística Top-Down. Para as simulações realizadas considerando um alimentador com 10500 residências, 8 indústrias e 1100 estabelecimentos comerciais, o primeiro método necessitou de cerca de 1,5 minutos para a determinação do

comportamento desejado, enquanto que esse comportamento foi obtido de forma praticamente instantânea no caso da aplicação da Metodologia Heurística Top-Down.

Finalmente, outro critério que deve ser avaliado na comparação entre os dois métodos é a **precisão ou qualidade dos resultados**. Quanto a esse critério, pode-se afirmar que os resultados obtidos pela aplicação da Metodologia Heurística Top-Down podem ser considerados como satisfatórios e capazes de representar, ainda que de forma aproximada, o comportamento da carga em uma condição de reenergização da rede elétrica. Entretanto, os resultados obtidos através da Metodologia Caixa-Branca Bottom-Up caracterizam esse comportamento da carga de forma não tão aproximada e bem mais próxima do comportamento do sistema real em análise. A Figura 5.53 ilustra a comparação dos métodos propostos, segundo os quatro critérios estabelecidos para essa finalidade.

Pode-se concluir, então, que dependendo do tipo de aplicação, a utilização de um desses métodos pode ser mais vantajosa que a do outro. Por exemplo, se deseja-se conhecer, com precisão, o comportamento da carga durante a recomposição da rede elétrica, visando evitar sua retomada inadequada, a Metodologia Caixa-Branca Bottom-Up mostra-se mais apropriada desde que os dados de entrada necessários para a utilização dessa metodologia estejam disponíveis. Entretanto, se o tempo de simulação for um fator determinante, a Metodologia Heurística Top-Down pode ser considerada como sendo mais adequada, apesar da imprecisão associada aos seus resultados. Assim, pode-se afirmar que durante a etapa de **Planejamento da Recomposição** (realizada “off-line”), na qual o aspecto mais importante a ser considerado é a precisão dos resultados e o tempo de simulação não é relevante, a aplicação do Método Caixa-Branca Bottom-Up torna-se mais vantajosa. Entretanto, para fins de utilização **como apoio no processo de recomposição em tempo real** (“on-line”), o Método Heurístico Top-Down mostra-se mais adequado, uma vez que é capaz de fornecer resultados com um grau de precisão aceitável com esforço computacional reduzido.

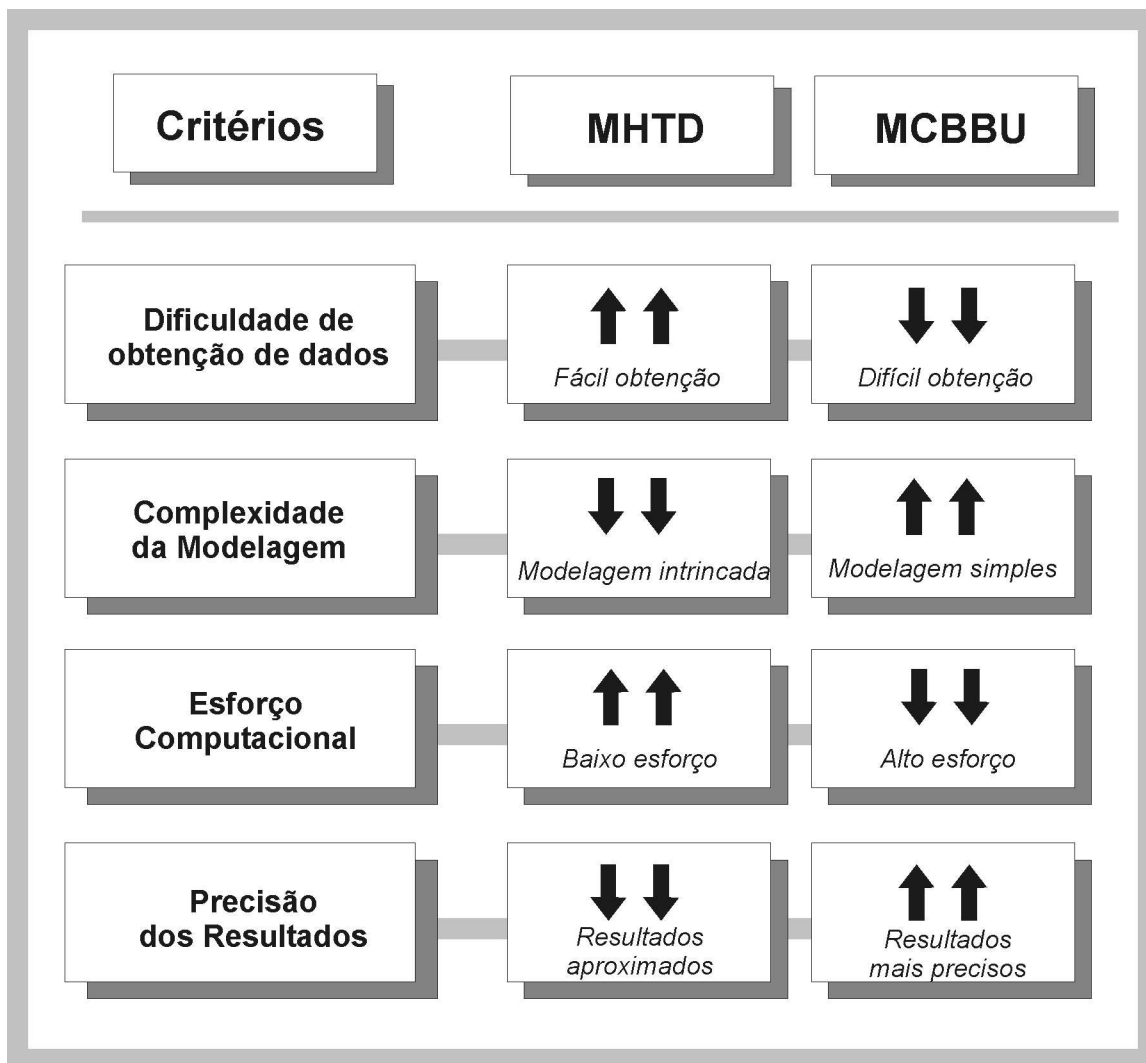


Figura 5.53: Compara o entre as metodologias propostas

Capítulo 6

Conclusões

A previsão do comportamento da carga durante a recomposição de sistemas de energia elétrica é um problema bastante complexo que, até os dias atuais, vem sendo pouco abordado devido, justamente, às dificuldades intrínsecas a sua modelagem.

Os modelos encontrados na literatura [19, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 27, 28, 30, 41] são determinados com base em muitas simplificações (suposição de que a carga agregada é composta por somente um tipo de parcela de consumo, adoção da hipótese de que todos os equipamentos componentes da carga agregada se comportam de forma similar, etc.) que acabam por prejudicar a qualidade dos resultados obtidos. Além disso, a utilização da maioria desses modelos implica no emprego de dados medidos referentes ao período da interrupção. Entretanto, essas informações, quase sempre, são muito difíceis de serem obtidas, dificultando a aplicação desse tipo de modelo. Nesse contexto, a principal contribuição deste trabalho foi o **desenvolvimento de duas metodologias de previsão do comportamento da carga, durante a reenergização da rede elétrica, que não necessitam de medições do sistema de energia elétrica, realizadas durante a interrupção**. Ambos os métodos propostos requerem uma grande quantidade de dados relacionados à rede em recomposição, porém esses dados correspondem a informações e medições associadas a uma **condição normal de operação**. As metodologias propostas, neste trabalho, foram:

- **Metodologia Heurística Top-Down (MHTD):** tem por objetivo a obtenção da curva (aproximada) de comportamento pós-reenergização da carga agregada correspondente a uma subestação de distribuição (ou a outros níveis hierárquicos). Esse método utiliza dados gerais da subestação, da composição percentual de cada parcela de consumo e dos vários tipos de carga quanto a seu controle (cargas controladas termostaticamente, cargas controladas manualmente e cargas fixas). Conforme citado anteriormente, todos esses dados são relacionados a uma situação normal de operação. A previsão do comportamento da carga é realizada através da aplicação de uma Base de Regras (que contempla o conhecimento de especialistas) e do emprego de lógica nebulosa (para a definição das variáveis envolvidas no processo de modelagem).
- **Metodologia Caixa-Branca Bottom-Up (MCBBU):** tem por objetivo a obtenção da curva de comportamento pós-reenergização da carga agregada correspondente a um alimentador (ou a outros níveis hierárquicos). Esse método necessita de informações relacionadas ao conhecimento dos fenômenos físicos envolvidos no funcionamento de cada equipamento modelado. Mais uma vez, todos esses dados são relacionados a uma situação normal de operação. A previsão do comportamento da carga é realizada através da aplicação de técnicas de POO e de um método físico de agregação, também proposto neste trabalho.

Ambas as metodologias foram capazes de representar, de forma satisfatória, o comportamento da carga durante o restabelecimento de energia. Entretanto, pôde-se identificar vantagens e desvantagens na aplicação de cada um dos métodos conforme segue:

- **MHTD:** apresenta como vantagens o tipo de dado de entrada requerido (de fácil obtenção) e o baixo esforço computacional demandado, uma vez que os cálculos são bastante simples (computacionalmente). As principais desvantagens dessa metodologia são a complexidade associada ao método e a qualidade dos resultados obtidos (resultados aproximados).

- MCBBU: apresenta como desvantagens o tipo de dado de entrada requerido e o grande esforço computacional demandado, uma vez que há a necessidade de realização de um grande número de cálculos. As principais vantagens dessa metodologia são a simplicidade associada ao método e a qualidade dos resultados obtidos (resultados bem mais próximos do comportamento real da carga).

Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se destacar:

- A melhoria da Base de Regras utilizada na Metodologia Heurística Top-Down, através da adequação das regras já propostas e da inserção de novas regras baseadas no conhecimento de especialistas. Esse conhecimento pode ser adquirido, por exemplo, a partir de entrevistas com operadores experientes do sistema de energia elétrica.
- A melhoria dos modelos empregados para os equipamentos na Metodologia Caixa-Branca Bottom-Up, uma vez que quanto mais precisos esses modelos, maior será a qualidade do resultado obtido para o comportamento da carga agregada. A adequação desses modelos engloba a realização de estudos acerca dos fenômenos físicos envolvidos na reenergização dos equipamentos, bem como a consideração de um maior nível de detalhamento com relação à consideração de diferentes equipamentos de um mesmo tipo (diferentes tipos de geladeiras, de lâmpadas, etc.).
- Inclusão de características e equações nos modelos dos equipamentos utilizados na Metodologia Caixa-Branca Bottom-Up, que permitam melhorar a modelagem da carga do ponto de vista dinâmico. Dessa maneira, esses modelos também poderiam ser utilizados em simulações visando a análise dinâmica da rede elétrica.
- Utilização das metodologias desenvolvidas na previsão da carga para outras condições de operação, que não a de recomposição da rede elétrica.

Bibliografia

- [1] Adibi, M. M., *Power System Restoration – Methodologies and Implementation Strategies*, IEEE Press, 2000.
- [2] Fairley, P., *The Unruly Power Grid*, IEEE Spectrum, Vol. 41, No. 8, pp.22-27, Aug. 2004.
- [3] Ancona, J. J., *A Framework for Power System Restoration Following a Major Power Failure*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 3, pp.1480-1485, Aug. 1995.
- [4] Adibi, M. M., Price, W.W., Ihara, S., Weliky, C., Janes, S.A., Wrubel, J.N., *Special Consideration in Power System Restoration – The Second Working Group Report*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, pp.15-21, Feb. 1994.
- [5] Adibi, M. M., Borkoski, J. N., Kafka, R. J., *Analytical Tool Requirements for Power System Restoration*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 3, pp.1582-1591, Aug. 1994.
- [6] Kosko, B., *Neural Networks and Fuzzy Systems – A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence*, Prentice Hall, 1992.
- [7] Adibi, M. M., Fink, L.H., Giri, J., Kirschen, D.S., Shahidehpour, S.M., Zaborszky, J., *New Approaches in Power System Restoration*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 4, pp.1428-1434, Feb. 1992.
- [8] Adibi, M. M., Kafka, R. J., *Power System Restoration Issues*, IEEE Computer Applications in Power, Vol. 4, No. 2, pp.19-24, Apr. 1991.
- [9] Monticelli, A., Wu, F., *Analytical Tools for Power System Restoration – Conceptual Design*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 1, pp.10-16, Feb. 1988.

- [10] Ihara, S., Schweppe, F. C., *Physically Based Modeling of Cold Load Pickup*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 100, No. 9, pp.4142-4150, Sep. 1981.
- [11] McDonald, J. E., Bruning, A. M., Mahieu, W. R., *Cold Load Pickup*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 98, No. 4, pp.1384-1386, Jul./Aug. 1979.
- [12] Gross G., Galiana F., *Short-term load forecasting*, Proceedings of the IEEE, Vol. 75, No. 12, pp.1558-1573, Dec. 1987.
- [13] Aguirre, L. A., *Introdução à Identificação de Sistemas – Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais*, Belo Horizonte, Editora UFMG, 2000.
- [14] Söderström, T., Stoica, P., *System Identification*, Cambridge, Prentice Hall, 1989.
- [15] Procel, *Tabela de Consumo Mensal de Equipamentos Residenciais*, Disponível online em: <http://www.eletronbras.gov.br/procel>, março de 2005.
- [16] Shaw, I. S., Simões, M. G., *Controle e Modelagem Fuzzy*, São Paulo, Edgar Blücher/FAPESP, 1999.
- [17] Jardini, J.A., Casolari, R. P., 1999, *Curvas de Carga de Consumidores e Aplicações na Engenharia da Distribuição*, Relato das pesquisas realizadas no CED (Centro de Excelência em Distribuição de Energia Elétrica), São Paulo, Brasil.
- [18] Fink, L.H., Liou K., Liu C., *From Generic Restoration Actions To Specific Restoration Strategies*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 2, pp.745-752, May 1995.
- [19] Agneholm, E., *Cold Load Pick-up*, PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, Feb. 1999.
- [20] Chong, C-Y., Malhami R. P., *Statistical Synthesis of Physically Based Load Models With Applications to Cold Load Pickup*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 103, No. 7, pp.1621-1628, Jul. 1984.
- [21] Mortensen, R. E., Haggerty, K. P., *Dynamics of Heating and Cooling Loads: Models, Simulations and Actual Utility Data*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 1, pp.243-249, Feb. 1990.

-
- [22] Hatziargyriou, N.D., Papadopoulos, M., *Cold Load Pickup Studies in Extended Distribution Networks*, 6th Mediterranean Electrotechnical Conference. Proceedings, May 1991.
- [23] Capasso, A., et.al., *A Bottom-up Approach to Residential Load Modeling*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 2, pp.957-964, May 1994.
- [24] Laurent, J.C., Malhamé, R.P., *A Physically-Based Computer Model Of Aggregate Electric Water Heating Loads*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 3, Aug. 1993.
- [25] Nehrir, M.H., Dolan, P.S., Gerez, V., Jameson, W.J., *Development and Validation of a Physically-Based Computer Model For Predicting Winter Electric Heating Loads*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 1, Feb. 1995.
- [26] Chen, C-S., Wu, T-H., Lee, C-C., Tzeng, Y-M., *The Application Of Load Models Of Electric Appliances To Distribution System Analysis*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 3, Aug. 1995.
- [27] Dolan, P.S., Nehrir, M.H., Gerez, V., *Development Of A Monte Carlo Based Aggregate Model For Residential Electric Water Loads*, Electric Power Systems Research, 36, pp. 29 – 35, 1996.
- [28] Tomiyama, K., Daniel, J.P., Ihara, S., *Modeling Air Conditioner Load For Power System Studies*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 2, May 1998.
- [29] Leou, R.C., Gaing, Z.L., Lu, C.N., Chang, B.S., Cheng, C.L., *Distribution System Feeder Cold Load Pickup Model*, Electric Power Systems Research, 36, pp. 163 – 168, 1996.
- [30] Manichaikul, Y., Schweppe, F.C., *Physically Based Industrial Electric Load*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 98, No. 4, Jul/Aug. 1979.
- [31] Gomes, P., et. al., *Recentes Blecautes e Conseqüentes Aperfeiçoamentos no Processo de Recomposição do Sistema Interligado Nacional*, IX SEPOPE - Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Maio/2004, Rio de Janeiro (RJ), Brasil.
- [32] Gomes, P., Lima, A. C. S., Guarini, A. P., *Guidelines for Power System Restoration in the Brazilian System*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 2, May 2004.

- [33] Gomes, P., Lima, J. W. M., Schilling, M. Th., *Estratégias para Aumento da Segurança da Malha Elétrica Nacional: Lições Extraídas dos Grandes Blecautes*, XVI SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Outubro/2001, Campinas (SP), Brasil.
- [34] ONS, *Estudos de Recomposição do Sistema das Regiões Sul/Sudeste/Centro-Oeste*, Informe Técnico DPP/GPE – 14/2000, 2000.
- [35] Debs, A. S., *Modern Power Systems Control and Operation*, Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [36] Monticelli, A., *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*, São Paulo, Editora Edgard Blücher, 1983.
- [37] Ju, P., Handschin, E., Karlsson, D., *Nonlinear Dynamic Load Modeling: Model and Parameter Estimation*, IEEE Transactions on Power Systems, pp 1689 – 1697, Nov. 1996.
- [38] Price, W.W., *Bibliography on Load Models for power Flow and Dynamic Performance Simulation - IEEE Task force on Load Representation for Dynamic Performance*, IEEE Transactions on Power Systems, pp 523 – 538, Feb. 1995.
- [39] Mota, L.T.M., *Estimação Dinâmica de Parâmetros da Carga em Sistemas de Energia Elétrica*, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2001.
- [40] Mortensen, R. E., Haggerty, K. P., *A Stochastic Computer Model for Heating and Cooling Loads*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 3, pp.1213-1219, Aug. 1990.
- [41] Uçak, C., Pahwa A., *An Analytical Approach For Step-By-Step Restoration Of Distribution Systems Following Extended Outages*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 3, pp.1717-1723, Jul. 1994.
- [42] Revista do Frio, Disponível online em: <http://www.revistadofrio.com>, março de 2005.
- [43] Atlas do Desenvolvimento Humano, Disponível online em: <http://www.undp.org.br/HDR/Atlas.htm>, março de 2005.
- [44] CPFL, *Norma Técnica GED 13 – Fornecimento em Tensão Secundária de Distribuição*, 2004.

-
- [45] Navarro, I. R., *Dynamic Load Models for Power Systems*, Licentiate Thesis, Lund University, 2002.
- [46] Leite, F., *Aplicação de redes neurais artificiais na previsão de curto prazo da carga nodal de sistemas de energia elétrica*, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 1997.
- [47] Gazeta Mercantil Ano LXXXIV n° 22929.
- [48] Mota, A. A., *Desenvolvimento de Interfaces Gráficas para Centros de Controle de Energia Elétrica*, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2001.
- [49] Luo, G. X., Semlyen, A., *Efficient Load Flow for Large Weakly Meshed Networks*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 4, pp 1309 – 1316, Nov. 1990.

Apêndice A

Publicações

Neste apêndice, encontram-se descritos os artigos já publicados ou submetidos para apreciação, relacionados, direta ou indiretamente, ao tema deste trabalho.

A.1. Trabalhos Diretamente Relacionados

MOTA, Lia Toledo Moreira; MOTA, Alexandre de Assis; FRANÇA, André Luiz Morelato. *Fuzzy Rule-based Methodology for Residential Load Behaviour Forecasting during Power Systems Restoration*. International Journal Of Computer Applications In Technology, v. 22, n. 2/3, p. 73-79, 2005.

MOTA, Lia Toledo Moreira; MOTA, Alexandre de Assis; FRANÇA, André Luiz Morelato. *Modelagem e simulação de cargas residenciais termostáticas para a recomposição do sistema elétrico a partir de uma abordagem orientada a objetos*. SBA: Controle & Automação - Sociedade Brasileira de Automatica, v. 15, n. 2, p. 202-214, 2004.

MOTA, Lia Toledo Moreira; MOTA, Alexandre de Assis; *Load Modeling at Electric Power Distribution Substations Using Dynamic Load Parameters Estimation*. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, London, UK, v. 26, n. 10, p. 805-811, 2004.

MOTA, Lia Toledo Moreira; MOTA, Alexandre de Assis; FRANÇA, André Luiz Morelato. *Comportamento da Carga durante a Recomposição de Sistemas Elétricos: Uma Ferramenta de Simulação para o Treinamento do Operador*. In: WCETE2004 - World Congress in Engineering and Technology Education, Santos (SP), 2004.

MOTA, Lia Toledo Moreira; MOTA, Alexandre de Assis; FRANÇA, André Luiz Morelato. *Metodologia Baseada Em Regras E Lógica Nebulosas Para Previsão Do Comportamento Da Carga Residencial Na Recomposição De Sistemas De Energia Elétrica*. In: XV Congresso Brasileiro de Automática - CBA, Gramado (RS), 2004.

MOTA, Lia Toledo Moreira; MOTA, Alexandre de Assis; FRANÇA, André Luiz Morelato. *Physically-based Aggregation of Object-Oriented Load Models in Power Systems Restoration*. In: IEEE PES T&D2004 Latin America, São Paulo (SP), 2004.

MOTA, Lia Toledo Moreira; MOTA, Alexandre de Assis; FRANÇA, André Luiz Morelato. *Estimação dinâmica do comportamento da carga na recomposição de sistemas de energia elétrica*. In: 5th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission - V CLAGTEE, São Pedro (SP), 2003.

A.2. Trabalhos Correlatos

MOTA, Alexandre de Assis; MOTA, Lia Toledo Moreira; FRANÇA, André Luiz Morelato. *Teaching power engineering basics using advanced web technologies and problem-based learning environment*. IEEE Transactions on Power Systems, v. 19, n. 1, p. 96-103, 2004.

MOTA, Alexandre de Assis; MOTA, Lia Toledo Moreira; FRANÇA, André Luiz Morelato. *Avaliação da Qualidade de Planos de Recomposição de Sistemas de Energia Elétrica*. In: XVIII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (GOP125), Curitiba (PR), 2005.

MOTA, Alexandre de Assis; MOTA, Lia Toledo Moreira; FRANÇA, André Luiz Morelato. *Representação Gráfica Automática de Procedimentos de Rede na Recomposição do Sistema Interligado Nacional*. In: VI SIMPASE – Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos (R0069), São Paulo (SP), 2005.

MOTA, Alexandre de Assis; MOTA, Lia Toledo Moreira; FRANÇA, André Luiz Morelato. *Metodologia De Recomposição Coordenada De Sistemas Elétricos Com Base Em Técnicas De Lógica Nebulosa E Busca Heurística*. In: XV Congresso Brasileiro de Automática - CBA, Gramado (RS), 2004.

MOTA, Alexandre de Assis; MOTA, Lia Toledo Moreira; FRANÇA, André Luiz Morelato. *Treinamento de Operadores para a Recomposição de Sistemas Elétricos*. In: WCETE2004 - World Congress in Engineering and Technology Education, Santos (SP), 2004.

MOTA, Alexandre de Assis; MOTA, Lia Toledo Moreira; FRANÇA, André Luiz Morelato. *Dynamic Evaluation of Reenergization Times during Power Systems Restoration*. In: IEEE PES T&D2004 Latin America, São Paulo (SP). 2004.

MOTA, Alexandre de Assis; MOTA, Lia Toledo Moreira; FRANÇA, André Luiz Morelato. *Simulation and Analysis of Restoration Plans Using Fuzzy Rule-based Systems*. In: IEEE PES T&D2004 Latin America, São Paulo (SP), 2004.

MOTA, Lia Toledo Moreira; MOTA, Alexandre de Assis; FRANÇA, André Luiz Morelato. *Interface Baseada em Regras Nebulosas para o Treinamento via WEB da Recomposição de Linhas de Transmissão em Sistemas de Energia Elétrica*. In: XXXVI SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, São João Del Rei (MG). 2004.

MOTA, Alexandre de Assis; MOTA, Lia Toledo Moreira; FRANÇA, André Luiz Morelato. *Metodologia Orientada a Objetos para Visualização Rápida de Grafos Não-Dirigidos a partir de Lista de Arestas*. In: XXXVI SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2004, São João Del Rei. 2004.

MOTA, Alexandre de Assis; MOTA, Lia Toledo Moreira; FRANÇA, André Luiz Morelato. *Metodologia Orientada a Objetos para Construção Automática de Grafos CPM/PERT*. In: XXXVI SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2004, São João Del Rei. 2004.

MOTA, Alexandre de Assis; MOTA, Lia Toledo Moreira; FRANÇA, André Luiz Morelato. *Identificação de blocos construtivos para recomposição de sistemas de energia elétrica*. In: 5th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission - V CLAGTEE, São Pedro (SP). 2003.

MOTA, Alexandre de Assis; MOTA, Lia Toledo Moreira; FRANÇA, André Luiz Morelato. *Análise e Projeto de Aplicativos Interativos via Web para Ensino de Engenharia*. In: WCETE2004 - World Congress in Engineering and Technology Education, Santos (SP), 2004.

Apêndice B

Conceitos Básicos de Lógica Fuzzy

Os tópicos subseqüentes apresentam os conceitos básicos de lógica nebulosa, passando pela teoria de conjuntos nebulosos, pela definição de variáveis nebulosas, de regras nebulosas e, finalmente, por sistemas baseados em múltiplas regras nebulosas.

B.1. Conjuntos Nebulosos

Neste trabalho, foram utilizados conjuntos nebulosos com funções de pertinência trapezoidais e triangulares. Essa escolha se deve ao fato de que a representação matemática para esses dois tipos de função de pertinência pode ser a mesma e, além disso, ambas as funções podem fazer uso do mesmo conjunto de métodos computacionais para calcular as pertinências em qualquer ponto do seu universo de discurso. Mais ainda, esses métodos são definidos por expressões simples com baixo carregamento computacional.

Os números trapezoidais podem ser definidos em termos de quatro coordenadas (**A**, **B**, **C** e **D**), correspondentes aos vértices da sua função de pertinência. Assim, o número nebuloso trapezoidal cuja representação é n [**A**, **B**, **C**, **D**], pode ser definido como na Figura B.1.

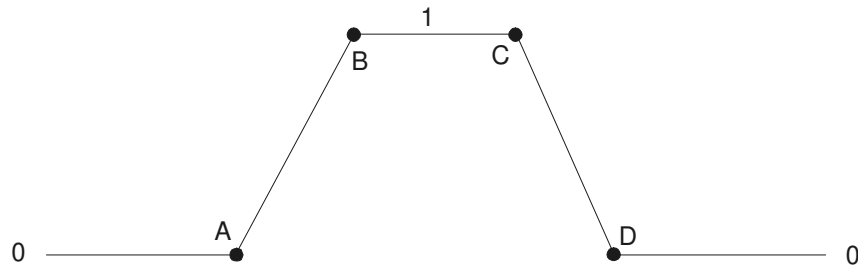


Figura B.1: Número nebuloso trapezoidal

Os valores de pertinência dos vértices A, B, C e D são implicitamente conhecidos, correspondendo a $\mu(A) = 0$; $\mu(B) = 1$; $\mu(C) = 1$; $\mu(D) = 0$. O método de extração da pertinência de um número real qualquer a esse tipo de conjunto pode ser definido pelo algoritmo a seguir:

Dado x (valor de entrada),

Calcular $\mu(x)$:

Se $x \leq A$ ou $x \geq D$ **fazer** $\mu(x) = 0$.

Se $x < B$ e $x > A$ **fazer** $\mu(x) = \frac{x - A}{B - A}$.

Se $x \leq C$ e $x \geq B$ **fazer** $\mu(x) = 1$.

Se $x < D$ e $x > C$ **fazer** $\mu(x) = 1 - \frac{x - C}{D - C}$.

Um número nebuloso triangular pode ser definido da mesma maneira que um número trapezoidal, simplesmente fazendo-se $B = C$, conforme demonstra a Figura B.2.

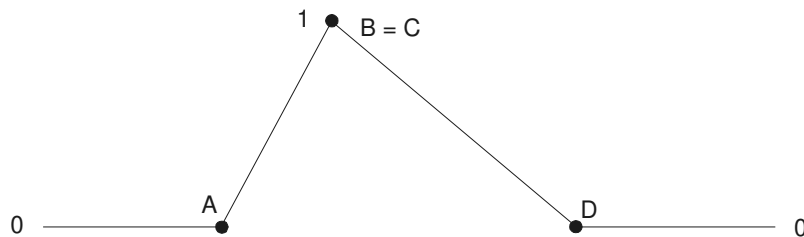


Figura B.2: Número nebuloso triangular

Cada conjunto nebuloso deve ter associado a si, além dos parâmetros **A**, **B**, **C** e **D**, um outro parâmetro denominado *corte- α* (ou “ *α -cut*”). Esse valor é um número real, definido no intervalo entre 0 e 1, incluindo os extremos, e está associado à realização de um corte na função de pertinência do número nebuloso, em uma altura correspondente ao valor de pertinência que seja igual ao corte α .

Esse parâmetro não é estritamente necessário para a definição de um conjunto nebuloso propriamente dito, mas está diretamente associado à utilização do mesmo em relações de inferência, como as encontradas em conjuntos de regras nebulosas.

B.2. Variáveis Nebulosas

Uma variável nebulosa é utilizada para descrever um conceito nebuloso, comumente expresso por uma variável lingüística, tal como “*distância*”, “*temperatura*” ou “*idade*”. Suas principais características são:

- Possui um nome ou descritor da variável (por exemplo, “*temperatura*”);
- É expressa por uma unidade física bem definida, pela qual a variável deve ser descrita (por exemplo, “*graus Celsius*” [°C]);
- Está definida em um universo fechado de discurso ou escopo (por exemplo, “*0 a 100 graus*”);
- Possui um grupo de conjuntos nebulosos associados aos seus qualificativos lingüísticos (por exemplo, os conjuntos “*quente*”, “*morno*” e “*frio*”, podem ser associados à variável “*temperatura*”).

Por exemplo, a variável nebulosa “*temperatura*” pode ser totalmente definida como a seguir:

Variável v :

- Nome: temperatura
- Unidade: Graus Celsius (°C)

- Escopo: de 0 °C a 45 °C
- Conjuntos Nebulosos: 5
Muito Baixa: [0 0 5 10]
Baixa: [5 10 15 20]
Média: [15 20 25 30]
Alta: [25 30 35 40]
Muito Alta: [35 40 45 45]

em que os conjuntos nebulosos são números trapezoidais, dados por suas coordenadas [A, B, C, D]. A Figura B.3 ilustra os conjuntos nebulosos da variável v .

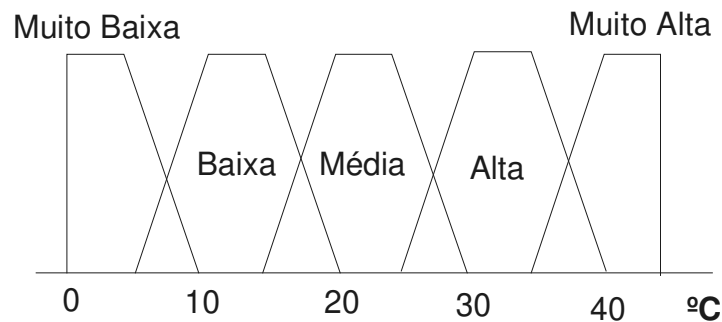


Figura B.3: Variável nebulosa v (“temperatura”) e seus qualificativos

A pertinência de um valor a uma variável nebulosa pode ser extraída especificando o qualificativo (conjunto nebuloso) com ao qual se deseja verificar a relação. Dessa forma, obtém-se um valor singular de pertinência. Outra maneira é obter um vetor de pertinências, onde cada posição do vetor corresponde à pertinência do valor especificado com relação a cada qualificativo (conjunto nebuloso) da variável nebulosa.

B.3. Regras Nebulosas

Uma regra nebulosa é uma estrutura do tipo:

Seantecedente 1 **E**antecedente 2 **E**

...

antecedente n

Entãoconclusão 1 **E**conclusão 2 **E**

...

conclusão m

Essa estrutura é composta por três diferentes grupos de conjuntos nebulosos ou valores “CRISP”: os antecedentes, os conseqüentes (ou conclusões) e as entradas. Os antecedentes são as premissas da regra, que devem ser “*verdadeiros*” para que os conseqüentes sejam considerados válidos. As entradas correspondem aos valores imediatos das variáveis envolvidas com os qualificativos lingüísticos dos antecedentes, que servirão para avaliar se os mesmos são verdadeiros ou falsos.

As regras nebulosas podem ser executadas através da determinação do conseqüente pelo mecanismo de implicação nebulosa. Nesse caso, o processo de disparo de uma regra consiste nos seguintes passos:

- a. Fuzzificar os valores de entrada, determinando sua pertinência ao conjunto nebuloso variável-qualificativo de cada antecedente;
- b. Tomar o menor valor de pertinência obtido nos antecedentes (operador **MIN**);
- c. Implicar esse valor nos conjuntos nebulosos variável-qualificativo dos conseqüentes, ou seja, tornar esse valor o novo corte α , para cada conjunto conseqüente, somente se o valor obtido pela regra for maior que o corte α já designado individualmente a cada conjunto (operador **MAX**).

A Figura B.4 ilustra esse mecanismo, para uma regra com dois antecedentes (**A1** e **A2**), duas entradas respectivas (**E1** e **E2**) e um conseqüente (**C**). Nesse caso, o corte α_C é tomado, automaticamente, como o menor valor (**MIN**) entre α_{A1} e α_{A2} .

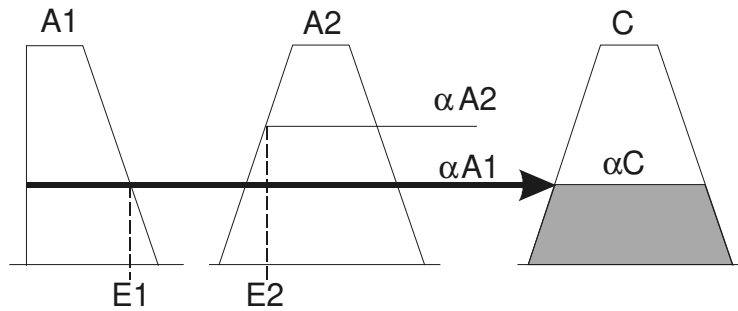


Figura B.4: Implicação em uma regra nebulosa

B.4. Sistema Baseado em Regras

Neste trabalho, foram utilizados sistemas baseados no disparo paralelo de conjuntos de regras. Em outras palavras, foram utilizados grupos de regras executadas, simultaneamente, a partir de um mesmo conjunto de entradas e implicando em um mesmo conjunto de conseqüentes. Isso é possível através do emprego do operador de composição nebulosa *MIN-MAX*. Os passos para disparo desse algoritmo são:

Dados

n_E entradas

n_R regras

Fazer

1. Para cada uma das n_R regras, fazer:

1.1. Fazer $\alpha = 1$;

1.2. Determinar o número de antecedentes n_A

1.3. Para cada um dos n_A antecedentes, fazer:

1.3.1. Coletar valor correspondente à variável do antecedente;

1.3.2. Fuzzificar esse valor usando o conjunto variável-qualificativo do antecedente, obtendo μ ;

1.3.3. Se $\alpha > \mu$, então fazer $\alpha = \mu$

1.4. Determinar o número de conseqüentes n_C

1.5. Para cada um dos conseqüentes, fazer:

1.5.1. Se $\alpha > \alpha_{cut}$, então fazer $\alpha_{cut} = \alpha$

A Figura B.5 ilustra um sistema de disparo paralelo de regras, com n_E entradas e n_R regras.

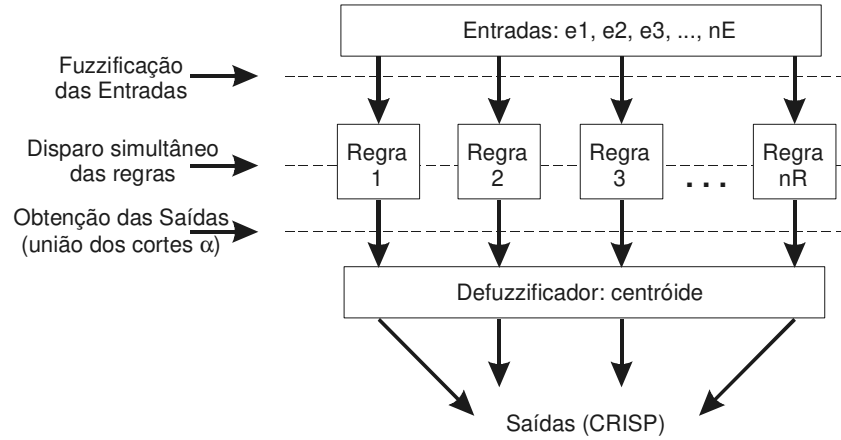


Figura B.5: Sistema de disparo paralelo de regras nebulosas

O valor de saída associado a cada variável nebulosa descrita pelos conseqüentes é, então, obtido através da defuzzificação do conjunto nebuloso determinado pela união dos seus qualificativos, após a aplicação do operador de corte α . Neste trabalho, o método de defuzzificação utilizado foi o método do centróide, onde o valor da saída defuzzificada pode ser determinado como na equação B.1.

$$\text{Saída} = \frac{\sum_{i=1}^{nconj} \mu_i . a_i}{\sum_{i=1}^{nconj} \mu_i} \quad (B.1)$$

em que μ_i é a pertinência de um qualificativo associada a um dos conjuntos que o representam, a_i é o valor modal de cada conjunto que representa o qualificativo e $nconj$ é o número de conjuntos que representam o qualificativo. O valor obtido, neste caso, é um número real.

Apêndice C

Modelagem de Equipamentos Controlados Termostaticamente

O modelo geral de um equipamento termostático pode ser derivado a partir do comportamento físico do dispositivo, relacionando sua temperatura interna e seus estados de funcionamento. Em condições normais de operação, a temperatura de referência de um equipamento termostático é mantida entre dois valores previamente definidos de temperatura: um limite de temperatura superior ($T_{máx}$) e um de temperatura inferior ($T_{mín}$). O controle da unidade de refrigeração (ou aquecimento no caso, por exemplo de aquecedores de ambiente) é, normalmente, realizado através de um mecanismo do tipo liga/desliga, acionado nas temperaturas limites. A demanda elétrica do equipamento, neste caso, pode ser considerada constante e existente somente nos intervalos em que a unidade de refrigeração/aquecimento está ligada. A Figura C.1 ilustra o ciclo termostático para um equipamento de refrigeração, operando em condições normais.

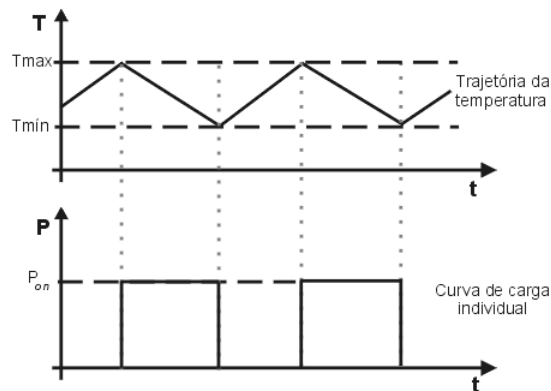


Figura C.1: Ciclo termostático de um equipamento de refrigeração

Durante a ocorrência de uma interrupção, o equipamento perde a capacidade de executar a parcela do ciclo termostático correspondente ao seu estado “ligado”. Nesta situação, a temperatura de referência do equipamento pode ultrapassar os limites estabelecidos previamente, retirando o mesmo do seu estado normal. O que ocorre, neste caso, é uma perda de energia térmica geral que se reflete nas alterações da temperatura. Portanto, no instante do restabelecimento, o equipamento poderá executar um ciclo “ligado” de duração maior que em condições normais de operação, até que sua temperatura de referência se encontre novamente entre os limites máximo e mínimo estabelecidos previamente. A Figura C.2 ilustra um caso típico de alteração do ciclo termostático para um equipamento de refrigeração.

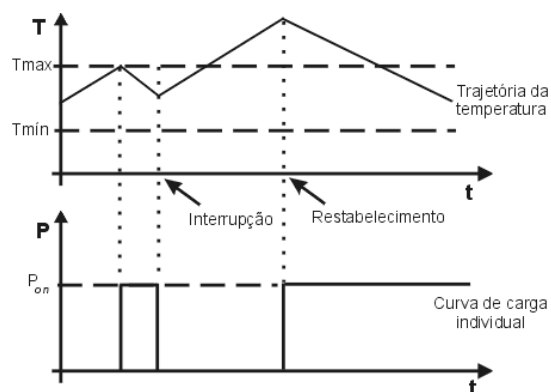


Figura C.2: Alteração do ciclo termostático de um equipamento de refrigeração após a ocorrência de um blecaute

O “acúmulo” dessas alterações no ciclo termostático após as interrupções, para todos os equipamentos temostáticos existentes em um alimentador, é que resulta na sobrecarga temporária que pode ser observada na recomposição de subestações de distribuição compostas por uma parcela de consumo residencial significativa.

Nos modelos utilizados neste trabalho, por facilidade de implementação, a variação da temperatura se dá de maneira linear com relação ao tempo. Esta variação, entretanto, pode assumir outros tipos de comportamento (exponencial, por exemplo), e pode ser facilmente substituída no modelo original, considerando a implementação orientada a objetos. Assim sendo, ambos os comportamentos (em condições normais de operação e durante a ocorrência de blecautes) adotados neste trabalho podem ser descritos de maneira discreta no tempo, para cada equipamento termostático envolvido no problema, pelas equações a seguir:

$$T_i = T_{i-1} + \alpha \cdot \Delta t \quad (C.1)$$

$$P_i^e = m_i \cdot P_{on} \quad (C.2)$$

em que:

- T_i : temperatura de referência no instante i ;
- α : coeficiente térmico (resfriamento ou aquecimento);
- P_i^e : demanda do equipamento e no instante i ;
- m : variável lógica de estado; $m=0 \rightarrow$ desligado; $m=1 \rightarrow$ ligado;
- P_{on} : demanda do equipamento no estado ligado.

Nesse modelo, o coeficiente térmico α e a variável de estado m devem ser determinados a cada passo de resolução do problema.

Aplicando os conceitos de POO, o modelo de um equipamento termostático qualquer pode ser derivado a partir de única classe-mãe, cujas características principais estão representadas pelo seu diagrama de classe descrito na figura C.3.

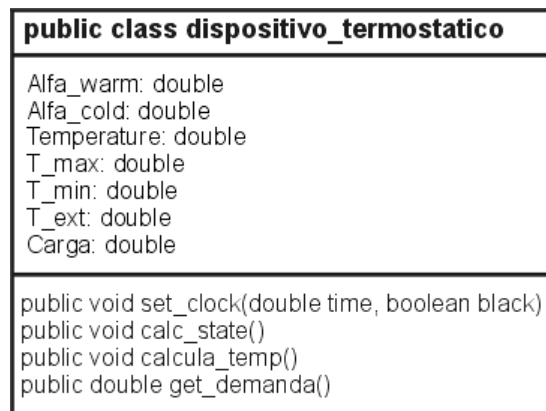


Figura C.3: Diagrama de classe para um equipamento controlado termostaticamente

Os atributos básicos da classe **dispositivo_termostático** são:

- **Alfa_warm** (α_w): coeficiente de aquecimento do dispositivo termostático.
- **Alfa_cold** (α_c): coeficiente de resfriamento do dispositivo termostático.
- **Temperature** (T): temperatura de referência.
- **T_max** ($T_{máx}$): limite de temperatura máxima.
- **T_min** ($T_{mín}$): limite de temperatura mínima.
- **T_ext** (T_{ext}): temperatura ambiente.
- **Carga** (P): Carga associada ao dispositivo no seu estado ativado.

Os métodos básicos da classe **dispositivo_termostático** são:

- **Set_clock**: função responsável pela atualização da variável “tempo” dos objetos.
- **Calc_state**: função responsável pela determinação do estado atualizado (ligado ou desligado) do dispositivo termostático.
- **Calcula_temp**: função responsável pela atualização da temperatura de referência do equipamento.
- **Get_demanda**: função responsável pelo retorno da demanda atualizada dos dispositivos.

A partir da classe **dispositivo_termostático**, pode-se então derivar classes-herdeiras que correspondem aos diferentes equipamentos controlados termostaticamente que podem ser encontrados nas residências, indústrias e comércios do alimentador ou subestação em análise. Essas classes herdeiras fazem uso das funcionalidades básicas definidas na classe-mãe, além de métodos próprios inerentes a cada uma delas. Dessa maneira, esses dispositivos podem ser tanto de aquecimento quanto resfriamento, bastando alterar as características de ativação e coeficientes térmicos na sua definição.