Ricardo de Andrade Lira Rabêlo

Componentes de Software no Planejamento da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência
Orientador: Prof. Dr. Adriano Alber de França Mendes Carneiro
Co-orientadora: Profa. Dra. Rosana Teresinha Vaccare Braga

São Carlos
2010

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

Rabelo, Ricardo de Andrade Lira
R115c Componentes de software no planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos / Ricardo de Andrade Lira Rabelo ; orientadores Adriano Alber de França Mendes Carneiro e Rosana Teresinha Vaccare Braga. -- São Carlos, 2010.

Tese (Doutorado-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas Elétricos de Potência) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.

1. Sistemas elétricos de potência. 2. Componentes de software. 3. Desenvolvimento baseado em componentes. 4. Sistemas de Inferência *fuzzy*. 5. Sistemas hidrotérmicos de geração. 6. Planejamento da operação energética. 7. Otimização e simulação. 8. Política de operação energética. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Bacharel **RICARDO DE ANDRADE LIRA RABÊLO.**

Tese defendida e julgada em 02/08/2010 perante a Comissão Julgadora:

Aprovado

Prof. Dr. Adriano **ALBER DE FRANÇA MENDES CARNEIRO – (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Profª. Drª. **PATRICIA TEIXEIRA LEITE**
(Universidade Federal do ABC/UFABC)

Aprovado

Prof. Dr. **RUBÉN AUGUSTO ROMERO LÁZARO**
(Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho"/UNESP/Campus de Ilha Solteira)

APROVADO

Prof. Dr. **OSVALDO RONALD SAAVEDRA MÉNDEZ**
(Universidade Federal do Maranhão/UFMA)

Aprovado

Profª. Drª. **ROSANA TERESINHA VACCARE BRAGA**
(Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação/USP)

Prof. Titular **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Sumário

Resumo xv

Abstract xvii

Lista de Figuras xix

Lista de Tabelas xxix

Lista de Abreviaturas e Siglas xxxi

1 Introdução 1

1.1 Sistemas de Energia Elétrica . . . 1

1.1.1 Sistemas de Geração . . . 3

1.1.2 Sistemas de Transmissão e Distribuição . . . 4

1.2 Introdução ao Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica . . . 5

1.2.1 Planejamento da Operação de Sistemas de Geração de Energia Elétrica . . . 7

1.3 Abordagens Computacionais Aplicadas ao Desenvolvimento de Software para os Sistemas de Energia Elétrica . . . 8

1.3.1 Desenvolvimento Procedimental . . . 8

1.3.2 Desenvolvimento Orientado a Objetos . . . 8

1.3.3 Desenvolvimento Baseado em Componentes . . . 14

1.4 Motivação . . . 15

1.5 Objetivos . . . 17

1.6 Justificativa . . . 18

1.7 Organização do Trabalho . . . 19

2 Modelo Energético de Sistemas Hidrotérmicos de Geração 21

2.1 Considerações Iniciais . . . 21

2.2 Sistemas Hidrotérmicos de Geração . . . 22

2.3 Sistemas Hidroelétricos . . . 24

2.3.1 Principais Componentes de uma Usina Hidroelétrica 26
2.3.2 Vazões Afluentes 29
2.3.3 Altura de Queda 31
2.3.4 Casa de Máquinas 42
2.3.5 Engolimento Máximo e Potência Máxima 42
2.3.6 Geração Hidráulica Máxima Contínua 46
2.3.7 Função de Geração Hidráulica 47
2.4 Sistemas Termoelétricos 50
2.5 Considerações Finais 51

3 Planejamento da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos de Geração 53
3.1 Considerações Iniciais 53
3.2 Planejamento da Operação de Sistemas Termoelétricos 55
3.3 Planejamento da Operação de Sistemas Hidroelétricos 55
3.4 Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos 56
3.4.1 Horizontes do Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos . . . 62
3.4.2 Formulação do Planejamento da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos a Usinas Individualizadas (Planejamento de Curto Prazo) 67
3.4.3 Indicadores Econômicos do Planejamento da Operação Energética a Usinas Individualizadas 77
3.4.4 Energia Armazenada no Sistema 80
3.5 Modelos Computacionais Propostos 82
3.5.1 Condições de Operação Energética 85
3.5.2 Rede Hidráulica 89
3.6 Considerações Finais 91

4 Modelo de Otimização da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos de Geração 93
4.1 Considerações Iniciais 93
4.2 Formulação Alternativa para o Planejamento da Operação Energética de Sistemas Hidroelétricos 94
4.3 Otimização da Operação Energética 95
4.3.1 Matriz Indicadora das Variáveis Básicas 97
4.3.2 Estratégia de Partição dos Arcos 99
4.3.3 Solução Inicial 102
4.3.4 Identificação dos Ciclos 103
4.3.5 Direção de Caminhada dos Arcos Super Básicos 104

4.3.6 Projeção da Direção de Caminhada dos Arcos Super Básicos 105
4.3.7 Direção de Caminhada dos Arcos Básicos 106
4.3.8 Cálculo do Passo Máximo 106
4.3.9 Cálculo do Passo Ótimo 107
4.3.10 Atualização das Variáveis de Decisão 107
4.4 Algoritmo de Otimização da Operação Energética 108
4.5 Considerações Finais 109

5 Modelo de Simulação da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos de Geração 111

5.1 Considerações Iniciais 111
5.2 Simulação da Operação Energética 112
5.3 Política de Operação Energética 113
5.3.1 Política de Operação Energética Paralela 119
5.3.2 Política de Operação de Deplecionamento dos Reservatórios das Usinas de Montante a Jusante 121
5.3.3 Política de Operação Energética Proposta 121
5.3.4 Sistemas de Inferência *Fuzzy* 124
5.4 Algoritmo de Simulação da Operação Energética 136
5.5 Considerações Finais 140

6 Desenvolvimento Baseado em Componentes 141

6.1 Considerações Iniciais 141
6.2 Componentes de Software 141
6.2.1 Princípios de Componentes de Software 142
6.3 Benefícios do Desenvolvimento Baseado em Componentes 143
6.3.1 Reutilização 143
6.3.2 Redução do Acoplamento 146
6.3.3 Aumento da Coesão 148
6.3.4 Flexibilidade para Atualização e Substituição 149
6.3.5 Facilidade de Modificações pelo Contrato de Uso e de Realização 149
6.4 Camadas Arquiteturais 152
6.5 O Processo de Desenvolvimento Adotado 153
6.5.1 Fluxos de Trabalho e Artefatos 155
6.5.2 UML 159
6.6 Considerações Finais 160

7 Desenvolvimento Baseado em Componentes Aplicado ao Planejamento da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos de Geração 163

7.1 Considerações Iniciais . . . 163

7.2 Modelagem dos Requisitos . . . 163

7.2.1 Modelo de Caso de Uso . . . 164

7.2.2 Modelo de Domínio . . . 170

7.3 Modelagem da Especificação . . . 186

7.3.1 Identificação dos Componentes . . . 186

7.3.2 Interação dos Componentes . . . 199

7.3.3 Especificação dos Componentes . . . 221

7.4 Aspectos da Implementação dos Modelos Computacionais . . . 234

7.4.1 Objetos . . . 235

7.4.2 Herança . . . 238

7.4.3 Encapsulamento . . . 240

7.4.4 Polimorfismo . . . 241

7.5 Desenvolvimento Baseado em Componentes *versus* Desenvolvimento Orientado a Objetos . . . 243

7.6 Considerações Finais . . . 246

8 Aplicações dos Modelos de Otimização e Simulação da Operação Energética 249

8.1 Considerações Iniciais . . . 249

8.2 Condições de Operação Energética . . . 250

8.3 Otimização da Operação Energética . . . 254

8.3.1 Sistema Teste de Uma Usina Hidroelétrica . . . 255

8.3.2 Sistema Teste de Duas Usinas Hidroelétricas . . . 261

8.3.3 Sistema Teste de Sete Usinas Hidroelétricas . . . 266

8.3.4 Sistema Teste de Sete Usinas Hidroelétricas a Reservatório - MCSOOESH *versus* Hydrolab . . . 272

8.4 Simulação da Operação Energética . . . 279

8.4.1 Sistema Teste de Uma Usina Hidroelétrica . . . 279

8.4.2 Sistema Teste de Sete Usinas Hidroelétricas a Reservatório . . . 279

8.4.3 Sistema Teste de Dezoito Usinas Hidroelétricas a Reservatório . . . 284

8.5 Tempo Computacional . . . 292

8.6 Considerações Finais . . . 292

9 Discussões, Contribuições e Trabalhos Futuros 295

9.1 Resumo do Trabalho Realizado . . . 295

9.1.1 Sobre a Aplicação dos Componentes de Software e do UML *Components* . 295
9.1.2 Sobre a Aplicação dos Modelos Computacionais de Otimização e Simulação da Operação Energética 297
9.2 Contribuições 300
9.3 Publicações Realizadas e Submetidas 302
9.3.1 Publicações Realizadas 302
9.3.2 Publicações Submetidas 304
9.4 Trabalhos Futuros 304

Referências Bibliográficas **306**

A Política de Operação Baseada em Sistemas de Inferência *Fuzzy* **323**

Aos meus pais, Prof. Raimundo Lira e Dra. Socorro Andrade, por serem os principais responsáveis por essa conquita, além das lições diárias de dedicação e determinação.

Aos meus irmãos de sangue e coração, Rafael de Andrade e Sinval Neto, pelo incentivo, confiança e carinho. Melhores companheiros, não há!

Às minhas tias e tios , que muito, muito, muito, muito ajudaram nesta caminhada, dedico na figura da minha madrinha (Dra. Antônia) e meu padrinho (Seu Sinval).

Aos meus irmãos de coração, Wendell Lopes (Dendell), Weyler Lopes (Professor), Antônio Júnior (Badu), Maurício Aguiar (Aurinha), Danilo Leal (Tijubina), Lincoln Leitão (Mafioso),

Thiago Correia Lima (A.G.), Ricardo Brito (Índia seus cabelos) e Saulo Mendes (Mala), pelos gestos de apoio, confiança, incentivo, além de terem aceitado minha ausência durante esta jornada.

Ao meu irmão de coração Guilherme Enéas, pelos gestos de apoio, confiança, incentivo, além de ter me dado o prazer de seu convívio durante esta jornada ("Hoje é dia do Asa!").

E em especial à minha Lu, por ter sido a melhor companheira que um homem poderia desejar. Linda, única, perfeita, maravilhosa, verdadeira, fiel, em especial uma verdadeira motivadora. Sem seu apoio, tal realização não teria sido possível. Sem sua companhia, meus belíssimos dias desde 18/10/2004 não teriam sido realizados.

Ao Prof. Dr. Adriano Alber de França Mendes Carneiro, pela orientação e liberdade, contribuindo para meu crescimento científico e intelectual.

À Profa. Dra. Rosana Teresinha Vaccare Braga, pela atenção, orientação e palavras de apoio que contribuíram para meu crescimento científico e intelectual.

Aos meus familiares: avó, madrinha e padrinho, tias, tios, primos e primas.

Aos amigos do colégio Diocesano: Victor Rufino e Tiago Nobre.

Aos amigos de Teresina: Marcelo Leal, Nayarad Braga, Camila Ferro, João Luiz Júnior, Luiz Ferraz Filho, Norbelino, Renata Castro, Vinícius Golaço, Nayra Lima, Naiana Cronemberger, Nicolli, Lidiane, Caio, Seu João, Dona Nicinha, Tenente Sátiro, Ivan Mesquita, Evandro Mesquita, Roberto Mendes, Prof. Joel (*in memoriam*) e Profa. Regina.

Aos amigos fazendários Antônio Luís, Paulo Roberto, Emílio Júnior, Adriana Gírio, Silvânia Lima, Valduleide, Ricardo Rezende, Jânio Cury, Maria Dalva, Moreira Neto, Cristovam Colombo, Fábio, Sérgio Roberto, Luiz Antônio, Nicácia, Ana Maria, Aloysio, Rudá, Orlando e Valter Cid, por todo o apoio, confiança e motivação.

Ao amigo secretário da Fazenda Antônio Neto e sua esposa Rosário Bezerra por todo o incentivo, apoio e confiança.

Ao Governador Wellington Dias pela confiança na minha liberação.

Aos amigos piauienses que acompanharam-me neste jornada em São Carlos: Ronildo Pinheiro (namorador), Aldir (sério), Hermes ("Deus"), Valdemir Júnior (corredor), Helson (zangadinho) e Igor Feliciano (Carlos Germano).

Aos queridos amigos de fé, irmãos camaradas da turma de medicina da UFPI 2003/02: Rodolfo Delanno (Mestre Delanno), Tibério Borges (Fábio Luciano), Justino Júnior (Ibrahimovic), Eurípedes (Xavi), Luciano (Gerrard) e Tácio (Gamarra).

Ao amigo Luiz Júnior e toda a família Medeiros da Silva.

Ao meu coraçãozinho e querida prima-amiga, cara metade, Camila M. D. de Andrade, por seu carinho, apoio e amor a mim dedicados. Menina mais linda, mais meiga, não há!

À professora-amiga-irmã-mãe Élvia Bianco pelo seu carinho, atenção, conselhos e puxões de orelhas.

Aos amigos baianos (torcedores do Bahia): Sérgio Pitombo, Ava Brandão e Lucas Padilha. Ao amigo baiano (torcedor do Vitória) Daniel Barbosa pela amizade, conselhos e sua atenção em nossas várias conversas. Ao amigo baiano (torcedor do Itabuna) Gildson.

À família Bianco (Miguel, Regina, Alethéia, Júnior e Aline) pelos maravilhosos e inesquecíveis momentos.

À família Pignatti (Pedro, Marli, Alex, Jéssica e Mari) pelos excelentes momentos de convívio em Campinas. Aos amigos de Campinas, Anderson Concon e Leandro Gaspari.

À família Bortoletto (Joel, Fátima, Leandro) pelo prazer do convívio em Ribeirão Preto.

Aos amigos Marcelo Castoldi, Viviane e Victor pelos excelentes sábados em Araraquara.

Aos alunos de iniciação científica, Rui Bertho, Paulo Arce, Hanna e Gustavo.

Aos alunos de Trabalho de Conclusão de Curso: Renato Miranda e Hamilton Rogério.

Aos amigos do futebol de Araraquara: Léo, Alex, Fabião, Fabiano, Fabrício, Éder, Primo, Perci, Paulão, Bruno, Vagner José, Cesão, Lucas e Rodrigo.

Aos amigos do futebol de São Carlos: Danilo Borges, Fabinho, Duzão, Lucão, Fabin, Tavim, Alface, Tung dentre outros.

Aos amigos do LSEE: Gérson, Letícia, Odilon, Murilo, Sílvio, Marco Aurélio, Ulisses, Weslley, Janison, Etienne, Patrick e Raphael.

Aos amigos da USP - EESC: Marcus Pelegrinni, Wallisson, Amanda, Dênis Augusto, Daniel Falconi, Rui Altafim, Helvécio, Ricardo Augusto, Fernando Kostela, Cristiane, Valtemir, Nilson Costa, Pedrão, Clenilson, Moussa, Leandro, Eugênia, Marcelo Nanni, Jaqueline Godoy, Salgado (Globo Man) e Rafael Cruz Borges.

Aos amigos Thais Andrade, Camila Modonese, Eli Crescenti, Lohan, Cibele e Daniel Anijar (Dandan) pelos momentos inesquecíveis em São Carlos. Melhores companhias em São Carlos, impossível!!

Aos queridos amigos da turma de Energia e Automação 2003: Vinícius Crema, Luís Fernando, Brunão, Marco Aurélio, Gustavo Cravinhos, Tiagão, Dorfo, Nandão, Renato Monaro, Pato e os já mencionados.

Aos amigos das turmas de Energia e Automação 2004, 2005, 2006, 2007 e 2008.

Aos amigos professores da USP - EESC - Engenharia Elétrica: Dênis Coury, Mário Oleskovicz, José Carlos, Ivan Silva e Geraldo Costa pelas palavras de apoio e confiança.

Aos amigos professores da UFPI: Vinícius Machado, Gildásio Guedes, Antônio Costa, Francisco José Araújo, José Ferreira, José Alberto, Magno Santos, Paulo Sérgio, e Flávio Ferry, Marcondes Clark (matemática), Sávio (matemática) e Antônio Carlos (física) pela força, confiança, incentivo e prazeras conversas que muito me ajudaram nesta longa caminhada.

Aos amigos do ICMC - USP: Marcelo Eller, Paulo Gabriel, Daniel Kaster e Robson.

Aos amigos vigilantes da USP: Weber, Tiago, Leandro, Falcão, Luís, Eduardo Neto, Gilton Luís, Valter, Amauri Silva, Odário, Antônio Goulart, Robson dentre todos os outros.

Aos amigos do edifício Riviera pela ótima convivência: Cristian, Irineu, Seu 40, Dona Maria.

Aos amigos da Padaria Guanabara: Branco, Cláudia, Roberta (Bibi), Josiane e Jaqueline.

Aos amigos do Trem Bão, os quais represento pelo Rodrigo e Viviane.

Ao amigo barman do St. Patrick Ricardinho.

À Dona Teresinha, a amiga lavadeira aqui de São Carlos.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos: Marisa, Jussara, Denise e José Carlos.

À Secretaria da Fazenda do Estado do Piauí (SEFAZ - PI) pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

Resumo

RABELO, R. A. L. Componentes de Software no Planejamento da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos. 2010. 310 f . Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

O planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos pode ser classificado como um problema de um sistema acoplado no tempo e no espaço, não linear, não convexo, estocástico e de grande porte. A complexidade do problema justifica a necessidade de utilização de diversas ferramentas computacionais com abordagens variadas. Este trabalho tem como objetivo a realização de estudos relacionados ao planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração, pela aplicação de componentes de software e de sistemas de inferência *fuzzy*. Pretende-se apresentar e aplicar um processo de desenvolvimento (UML *Components*), baseado em componentes de software, para a construção de modelos computacionais de simulação e otimização para servir de apoio ao planejamento da operação energética do sistema hidrotérmico brasileiro. O processo de desenvolvimento UML *Components* é aplicado de forma a nortear o desenvolvimento do software, para englobar as diferentes atividades realizadas nos fluxos de trabalho, além de incluir os vários artefatos produzidos. Como contribuição adicional, paralelamente ao uso dos componentes de software, este trabalho apresenta uma política de operação energética para reservatórios baseada em sistemas de inferência *fuzzy* Takagi-Sugeno. A política proposta é baseada na otimização da operação energética das usinas hidroelétricas, empregando o modelo de otimização desenvolvido. Com a operação energética otimizada, obtém-se as relações entre a energia armazenada do sistema e o volume útil operativo de cada usina a reservatório. A partir dessas relações são ajustados os parâmetros do modelo Takagi-Sugeno de ordem um. Ao optar-se por um sistema de inferência *fuzzy* para determinar a política de operação energética de um conjunto de reservatórios, obtém-se uma estratégia de ação/controle que pode ser monitorada e interpretada,

inclusive do ponto de vista linguístico. Outra vantagem na aplicação de sistemas *fuzzy* deve-se ao fato dos operadores humanos (especialistas) poderem traduzir, de forma consistente, e em termos de regras linguísticas, o seu processo de tomada de decisões, fazendo com que a ação do sistema *fuzzy* seja tão fundamentada e consistente quanto a deles.

Palavras–Chave: Componentes de software, desenvolvimento baseado em componentes, sistemas de inferência *fuzzy*, sistemas hidrotérmicos de geração, planejamento da operação energética, otimização e simulação, política de operação energética.

Abstract

RABELO, R. A. L. Software Components at the Energetic Operation Planning of Hydrothermal Systems. 2009. 310 f. Thesis (Doctoral) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

The operation planning of hydrothermal power systems can be classified as a nonseparable, nonlinear, nonconvex, stochastic and of large scale optimization problem. The complexity of this problem justifies the need for the use of various computational tools with different approaches. This work aims the accomplishment of studies related to the operation planning of hydrothermal power systems through the implementation of software components and fuzzy inference systems. It is intended to provide and implement a development process (UML Components) based on software components for building computational models of optimization and simulation to support the operation planning of the Brazilian hydrothermal power system. The UML Components development process is applied in a way to guide the software development to encompass different activities realized on workflows, as well as to include the various artifacts produced. As additional contribution, in parallel to the use of software components, it is intended to present an operational policy of reservoirs based on Takagi-Sugeno fuzzy inference systems. The proposed policy is based on optimization of hydropower operation, using the optimization model developed. Through the optimized operation, relations between system stored energy and the reservoir volume of each plant are obtained. With these relationships, the parameters of the Takagi-Sugeno model are adjusted. In choosing a fuzzy inference system for determining the operational policy of a set of reservoirs, it is obtained an strategy of action/control that can be monitored and interpreted including linguistic standpoint. Another benefit of the fuzzy system application refers to the fact that human specialists can consistently represent, through linguistic rules, their decision making process, making the fuzzy system action as consistent and sound as theirs.

Keywords: *Software components, Component-based development, fuzzy inference systems, hydrothermal systems of generation, operation planning, optimization and simulation, operacional policy.*

Lista de Figuras

1.1 O Fornecimento da energia elétrica. 2

1.2 Funcionamento de um objeto. 10

2.1 Esquema de um sistema hidrotérmico de geração. 22

2.2 Modelo energético de uma usina hidroelétrica. 24

2.3 Principais variáveis energéticas de uma usina hidroelétrica. 25

2.4 Histórico das vazões afluentes naturais mensais da usina de Emborcação. 30

2.5 Vazões afluentes naturais mensais mínimas, médias e máximas da usina de Emborcação. 31

2.6 Média de longo termo das usinas de Emborcação e Itumbiara. 32

2.7 Usinas hidroelétricas e suas vazões afluentes. 33

2.8 Altura de queda bruta de uma usina hidroelétrica. 33

2.9 Variação do nível de montante para a usina de Emborcação. 34

2.10 Variação do nível de jusante para a usina de Emborcação. 35

2.11 Efeito de remanso na usina hidroelétrica de São Simão. 36

2.12 Polinômios do nível de jusante para a usina de São Simão. 37

2.13 Estruturas causadoras das perdas hidráulicas em uma usina hidroelétrica. 39

2.14 Altura de queda líquida para a usina de Emborcação. 41

2.15 Engolimento máximo e potência máxima de um conjunto turbina/gerador em função da altura de queda líquida. 44

2.16 Aspecto típico da função de custo de operação de uma usina termoelétrica. 50

3.1 Influência das vazões afluentes futuras no planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos de geração. 60

3.2 Incerteza das vazões futuras com o tempo. 62

3.3 Esquema de decomposição temporal do problema do planejamento da operação. . 63

3.4 Função de custo de operação de um sistema não-hidráulico. 67

3.5 As funções de custo futuro, imediato e total em relação ao nível de armazenamento. 70

3.6 Evolução do armazenamento ao longo do horizonte de planejamento, a partir do intervalo t+1. 71

3.7 Balanço hídrico. 74

3.8 Modelo de otimização da operação energética. 86

3.9 Modelo de simulação da operação energética. 88

3.10 Representação do balanço hídrico por meio dos nós da rede. 89

3.11 Representação da rede básica associada a uma cascata com quatro usinas hidroelétricas. 90

3.12 Representação da rede hidráulica associada a uma cascata com quatro usinas hidroelétricas em um horizonte de T intervalos. 90

4.1 Representação da árvore composta por arcos básicos associada a uma cascata com quatro usinas hidroelétricas e três intervalos do horizonte. 99

4.2 Exemplo de ciclos formados por três arcos super-básicos. 104

4.3 Algoritmo para otimização da operação energética. 108

5.1 Sistema hidroelétrico para o fornecimento de energia elétrica no sistema sudeste/centro-oeste brasileiro. 113

5.2 Política de operação energética paralela. 120

5.3 Variável linguística representando a energia armazenada no sistema. 127

5.4 Sistema de inferência *fuzzy*. 130

5.5 Sistema *fuzzy* para política de operação energética. 134

5.6 N sistemas *fuzzy* para política de operação energética. 135

5.7 Algoritmo para simulação da operação energética. 137

6.1 Exemplo de atualização de componentes. 149

6.2 Exemplo de substituição de componentes. 150

6.3 As camadas arquiteturais [30]. 153

6.4 Processo de desenvolvimento UML *Components* (adaptado de [30]). 155

6.5 Os três estágios do fluxo de trabalho da especificação [30]. 158

7.1 Exemplo de Relacionamento de Caso de Uso - Comportamento Parcial Comum. . 169

7.2 Exemplo de Caso de Uso - Comportamento Complexo. 169

7.3 Diagrama de casos de uso do sistema. 170

7.4 Modelo de domínio parcial. 172

7.5 Associação unária. 173

7.6 Motivação para classes descritivas. 175

7.7 Classes descritivas. 176

7.8 Classe associativa. 176

7.9 Hierarquia de classes. 177

7.10 Hierarquia de classes. 177

7.11 Hierarquia de classes. 178

7.12 Composição entre usina hidroelétrica e casa de máquinas. 180

7.13 Composição entre casa de máquinas e conjuntos de unidades geradoras. 181

7.14 Composição entre catálogo e a descrição de uma turbina hidráulica. 181

7.15 Agregação entre arco e ciclo. 181

7.16 Classe conceitual abstrata. 182

7.17 Modelo de domínio parcial: sistema hidroelétrico de geração. 183

7.18 Modelo de domínio parcial: horizonte de planejamento. 184

7.19 Modelo de domínio parcial: otimização da operação energética. 184

7.20 Modelo de domínio parcial: simulação da operação energética. 184

7.21 Modelo de domínio parcial: rede hidráulica. 185

7.22 Artefatos do fluxo de trabalho dos requisitos como entradas para o fluxo de trabalho da especificação. 187

7.23 Mapeamento dos casos de uso para a identificação das interfaces de sistema e das suas operações. 188

7.24 Interfaces de sistema e suas operações. 188

7.25 Modelo de tipos do negócio parcial. 189

7.26 Modelo de tipos do negócio parcial com os tipos centrais do negócio *CatalogoDescTurbinaHidraulica* e *SistemaHidroeletrico*. 190

7.27 Modelo de tipos do negócio parcial com o tipo central do negócio *HorizontePlanejamento*. 191

7.28 Diagrama de responsabilidade da interface para o modelo de tipos do negócio do sistema hidroelétrico de geração. 192

7.29 Diagrama de responsabilidade da interface para o modelo de tipos do negócio do horizonte de planejamento. 193

7.30 Diagrama final de responsabilidade da interface para o modelo de tipos do negócio. 194

7.31 Especificações de componentes de sistema. 196

7.32 Especificação do componente de negócio do catálogo das descrição das turbinas hidráulicas. 196

7.33 Especificação do componente de negócio do sistema hidroelétrico. 197

7.34 Arquitetura inicial de especificação dos componentes. 198

7.35 Interface de sistema com a assinatura da operação *simularOperacaoEnergetica*. . . 201

7.36 Interação da operação de sistema *simularOperacaoEnergetica*. 202

7.37 Interface de negócio com a definição da primeira operação. 202

7.38 Interação parcial da operação de negócio *simularOperacaoEnergetica*. 203

7.39 Arquitetura intermediária de especificação dos componentes. 205

7.40 Interação parcial da operação de negócio *simularOperacaoEnergetica* com a descoberta de algumas operações de negócio adicionais. 207

7.41 Interação parcial da operação de negócio *simularOperacaoEnergetica* com a descoberta de mais algumas operações de negócio. 209

7.42 Interação completa da operação de negócio *simularOperacaoEnergetica* considerando a política de operação energética otimizada. 211

7.43 Interação da operação de negócio *CalcularVolumeEvaporado*. 212

7.44 Interface de negócio *ISistemaHidroeletrico*. 214

7.45 Interface de negócio *ICatalogoDescTurbinaHidraulica*. 214

7.46 Interface de negócio *IHorizontePlanejamento*. 215

7.47 Interface de negócio *IRedeHidraulica*. 215

7.48 Interface de negócio *IOperacaoEnergeticaRepIndiv*. 216

7.49 Interface de negócio *IPoliticaOperacaoEnergetica*. 216

7.50 Interface de negócio *ISistHidroOperEnergRepIndiv*. 218

7.51 Interface de negócio *ISistHidroBaseDados*. 219

7.52 Especificação do componente de negócio do sistema hidroelétrico após a fatoração das interfaces. 219

7.53 Arquitetura de especificação dos componentes após a fatoração das interfaces. . . 220

7.54 Diagrama de especificação da interface *ICatalogoDescTurbinasHidraulicas*. 223

7.55 Diagrama de especificação da interface *ISistHidroOperEnergRepIndiv*. 225

7.56 Diagrama de especificação da interface *ISimularOperacaoEnergetica*. 227

7.57 Diagrama de especificação da interface *IOtimizarOperacaoEnergetica*. 227

7.58 Pré e pós-condições para a operação *regraOtimizada* da interface *IPoliticaOperacaoEnergetica*. 228

7.59 Diagrama de especificação do componente *CatalogoDescTurbinaHidraulica*. 230

7.60 Diagrama de especificação do componente *SistemaHidroeletrico*. 230

7.61 Diagrama de especificação do componente de sistema *PlanejamentoOperacaoEnergetica*. 230

7.62 Diagrama de especificação adicional do componente de sistema *PlanejamentoOperacaoEnergetica*. 231

7.63 *IPlanejarOperacaoEnergetica* como interface base para as interfaces *IOtimizarOperacaoEnergetica* e *ISimularOperacaoEnergetica*. 232

7.64 Diagrama de especificação da interface de sistema *IPlanejarOperacaoEnergetica após a fatoração*. 232

7.65 Código-fonte do cabeçalho (*header*) da classe *CasaDeMaquinas*. 236

7.66 Código-fonte do cabeçalho (*header*) da classe *SistemaHidroeletrico*. 238

7.67 Código-fonte do cabeçalho (*header*) da classe *UsinaHidroeletrica*. 239

7.68 Código-fonte do cabeçalho (*header*) da classe *UsinaReservatorio*. 240

7.69 Código-fonte da implementação do método (*obterNivelMontante*) na classe *UsinaReservatorio*. 242

7.70 Código-fonte da implementação do método (*obterNivelMontante*) na classe *UsinaFioDaAgua*. 242

8.1 Sistema hidroelétrico composto pelas usinas do sistema sudeste brasileiro. 251

8.2 Algumas trajetórias de vazões afluentes naturais relativas a usina de São Simão. . 252

8.3 Algumas trajetórias de vazões afluentes naturais relativas a usina de Ilha Solteira. 253

8.4 Metas de geração hidráulica fornecidas pelo modelo de otimização da operação energética para o sistema hidroelétrico do sistema sudeste brasileiro composto pelas dezoito usinas a reservatório. 253

8.5 Trajetórias de volume para a usina de Emborcação (Enchimento). 256

8.6 Trajetórias de volume para a usina de Itumbiara (Enchimento). 257

8.7 Trajetórias de geração complementar para a usina de Emborcação (Enchimento). 258

8.8 Trajetórias de volume para a usina de Itumbiara (Deplecionamento). 259

8.9 Trajetórias de volume para a usina de Itumbiara para diferentes valores de vazões afluentes (MLT e MMLT). 260

8.10 Trajetórias de volume para a usina de Itumbiara considerando taxa de desconto, sazonalidade das vazões, efeito cota e "liberdade de operação" inicial do volume armazenado no reservatório. 260

8.11 Trajetórias de volume das usinas de Emborcação e Itumbiara. 261

8.12 Trajetórias de volume das usinas de Itumbiara e São Simão. 263

8.13 Comparativo das vazões afluentes incrementais à usina de Itumbiara e São Simão. 263

8.14 Motorização da casa de máquinas da usina de Emborcação em relação ao seu engolimento efetivo. 264

8.15 Motorização da casa de máquinas da usina de Itumbiara em relação ao seu engolimento efetivo. 264

8.16 Motorização da casa de máquinas da usina de São Simão em relação ao seu engolimento efetivo. 265

8.17 Trajetórias de volume das usinas de Emborcação, Itumbiara, São Simão, Furnas e Ilha Solteira. 266

8.18 Trajetórias de volume das usinas de Emborcação, Itumbiara e São Simão, e Ilha Solteira. 267

8.19 Comparativo das gerações hidráulica e complementar. 268

8.20 Comparativo das gerações hidráulicas com e sem a fixação de volumes mínimos finais aos reservatórios. 269

8.21 Comparativo das trajetórias de energia armazenada no sistema para diferentes magnitudes das vazões afluentes. 270

8.22 Comparativo das gerações hidráulicas para diferentes magnitudes das vazões afluentes. 271

8.23 Comparativo das gerações complementares para diferentes magnitudes das vazões afluentes. 272

8.24 Trajetórias de energia armazenada no sistema para a MLT (MCSOOESH e Hydrolab). 273

8.25 Trajetórias de geração hidráulica do sistema para a MLT (MCSOOESH e Hydrolab). 273

8.26 Trajetórias de energia armazenada no sistema para o período de 1936 a 1941 (MCSOOESH e Hydrolab). 274

8.27 Trajetórias de geração hidráulica do sistema para o período de 1936 a 1941 (MCSOOESH e Hydrolab). 275

8.28 Trajetórias de energia armazenada no sistema para o período de 1951 a 1956 (MCSOOESH e Hydrolab). 276

8.29 Trajetórias de geração hidráulica do sistema para o período de 1951 a 1956 (MCSOOESH e Hydrolab). 276

8.30 Trajetórias de energia armazenada no sistema para o período de 1971 a 1976 (MCSOOESH e Hydrolab). 277

8.31 Trajetórias de geração hidráulica do sistema para o período de 1971 a 1976 (MCSOOESH e Hydrolab). 277

8.32 Trajetórias de energia armazenada no sistema para o período de 2000 a 2005 (MCSOOESH e Hydrolab). 278

8.33 Trajetórias de geração hidráulica do sistema para o período de 2000 a 2005 (MCSOOESH e Hydrolab). 278

8.34 Trajetórias de energia armazenada no sistema para a MLT. 281

8.35 Trajetórias de energia armazenada no sistema para o período de 1936 a 1941. . . 281

8.36 Trajetórias de energia armazenada no sistema para o período de 1951 a 1956. . . 282

8.37 Trajetórias de energia armazenada no sistema para o período de 1971 a 1976. . . 282

8.38 Trajetórias de energia armazenada no sistema para o período de 2000 a 2005. . . 283

8.39 Trajetória de energia armazenada no sistema para a MLT. 285

8.40 Trajetória de energia armazenada no sistema 1936 a 1941. 286

8.41 Trajetória de energia armazenada no sistema 1971 a 1976. 287

8.42 Trajetória de energia armazenada no sistema 2000 a 2005. 288

8.43 Trajetória de volume útil em alguns reservatórios do sistema hidroelétrico para a MLT. 289

8.44 Trajetória de volume útil em alguns reservatórios do sistema hidroelétrico para a MLT. 289

8.45 Trajetória de volume útil em alguns reservatórios do sistema hidroelétrico para a MLT. 290

8.46 Trajetória de geração complementar 1971 a 1976. 290

8.47 Trajetória de geração complementar 2000 a 2005. 291

9.1 Diagrama de especificação do componente *SistemaHidroeletrico* com a interface *ISistHidroOperEnergRepEquiv*. 298

Lista de Tabelas

2.1 Polinômio $h_{jus}(u)$ para São Simão e Ilha Solteira. 36

7.1 Gabarito de caso de uso. 165

7.2 Caso de uso Definir Vazões Afluentes Naturais (Fluxo Básico). 166

7.3 Caso de uso Definir Vazões Afluentes Naturais (Fluxos Alternativos). 167

8.1 Média da Energia Armazenada no Sistema Hidroelétrico [MW]. 274

8.2 Desvio Padrão da Geração Hidráulica [MW]. 275

8.3 Média da Energia Armazenada no Sistema Hidroelétrico [MW]. 280

8.4 Tempo Computacional Gasto. 292

A.1 Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Emborcação. 324

A.2 Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Itumbiara. 324

A.3 Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de São Simão. 324

A.4 Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Furnas. 324

A.5 Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Marimbondo. 325

A.6 Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Água Vermelha. 325

A.7 Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Ilha Solteira. 325

A.8 Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Barra Bonita. 325

A.9 Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Promissão. 326

A.10 Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Três Irmãos. 326

A.11 Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Porto Primavera. 326

A.12 Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Jurumirim. 326

A.13 Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Chavantes. 327

A.14 Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Capivara. 327

A.15 Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Nova Ponte. 327

A.16 Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Camargos. 327

A.17 Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Mascarenhas de Moraes. 328

A.18 Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Caconde. 328

Lista de Abreviaturas e Siglas

CASE	-	*Computer-Aided Software Engineering*
DBC	-	Desenvolvimento Baseado em Componentes
DMS	-	*Distribution Management System*
EAS	-	Energia Armazenada no Sistema
EPA	-	Estratégia de Partição de Arcos
FACTS	-	*Flexible AC Transmission Systems*
FPH	-	Função de Produção Hidráulica
MCSOOESH	-	Modelos Computacionais de Simulação e Otimização da
	-	Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos
MDB	-	Matriz de Defluência Básica
MIVB	-	Matriz Indicadora de Variáveis Básicas
MLT	-	Média de Longo Termo
MOO	-	Modelagem Orientada a Objeto
NTP	-	*Network Topology Processor*
PBSIF	-	Política Baseada em Sistemas de Inferência *Fuzzy*
PSA	-	*Power System Applications*
RUP	-	*Rational Unified Process*
TEC	-	Transferência de Energia da Cascata
TEU	-	Transferência de Energia da Usina
UML	-	*Unified Modeling Language*

Capítulo 1

Introdução

1.1 Sistemas de Energia Elétrica

A energia desempenha um papel fundamental na vida humana. Ao lado das telecomunicações, transportes, água e saneamento, ela compõe a infra-estrutura necessária para incorporar o ser humano ao denominado modelo de desenvolvimento vigente. Assim, a energia é fator preponderante no desenvolvimento dos povos e sua abundância ou escassez influencia o potencial econômico das nações. A energia elétrica está inserida na sociedade moderna como uma de suas principais formas de energia. Ela é obtida a partir da transformação de outras formas de energia, sendo as usinas hidroelétricas e termoelétricas os dois principais tipos de fontes geradoras. Não obstante, a energia elétrica, uma vez gerada, é limpa, invisível, sem resíduos e contaminantes [106].

A energia elétrica tem se caracterizado como uma fonte de energia altamente versátil, capaz de ser utilizada nos mais diferentes meios e para as mais diferentes finalidades, suprindo desde grandes fornos de siderúrgicas, até simples aparelhos eletrodomésticos. Esta versatilidade fez com que sua utilização aumentasse sensivelmente ao longo das últimas décadas, apresentando, ainda hoje, taxas elevadíssimas de crescimento [160]. Conseqüentemente, a geração de energia elétrica e o melhor aproveitamento possível dos recursos utilizados para tal, devem ser uma das principais preocupações de qualquer país. No Brasil, a participação da energia elétrica dentro do consumo total de energia é bastante significativa, situando-se acima da média mundial.

Os sistemas de energia elétrica, ou sistemas elétricos de potência, têm a função precípua de fornecer energia elétrica aos diferentes consumidores, onde quer que eles estejam e no momento

que eles desejarem, o bem produzido nas diferentes fontes de geração. Importante ressaltar a impropriedade do termo geração, uma vez que não há geração de energia, mas sim, transformação entre fontes de energia diferentes.

A energia elétrica deixa as usinas geradoras a cada instante de tempo e é transportada por uma complexa rede de linhas aéreas e/ou de cabos subterrâneos até alcançar seus centros consumidores. A Figura 1.1 esquematiza, de uma forma simplificada, todo este processo, desde quando a energia deixa a sua fonte geradora (1), passando por uma subestação de elevação da tensão (2), pelo seu transporte por longas linhas de transmissão (3) até as áreas onde há a sua necessidade nos centros consumidores. Uma vez neste ponto, o nível de tensão é rebaixado por outra subestação (4) sendo que as linhas do sistema de distribuição (5) encarregam-se de direcionar a energia elétrica até as residências, centros comerciais e industriais (6).

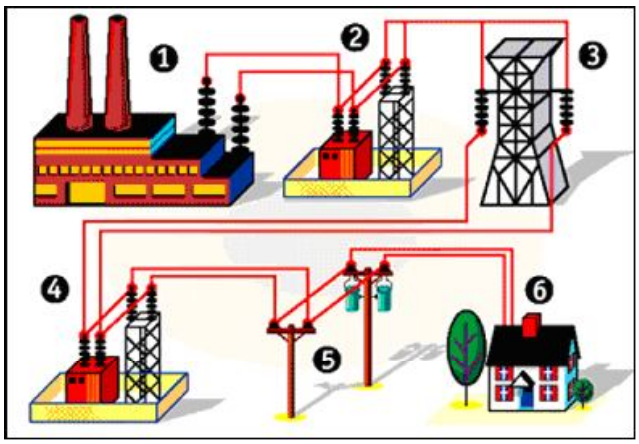

Figura 1.1: O Fornecimento da energia elétrica.

Os sistemas elétricos de potência, em geral, apresentam portes gigantescos, possuindo um número elevado de usinas, centenas ou milhares de quilômetros de linhas de transmissão, além de uma infinidade de subestações e centros de controle. A complexidade e os elevados custos envolvidos no gerenciamento de todos esses equipamentos têm sido responsáveis por significativos esforços, cujos objetivos são encontrar técnicas seguras e eficientes para operar e expandir os sistemas de energia elétrica.

A energia elétrica deve chegar aos consumidores dentro de determinados padrões de continuidade e qualidade de suprimento, obtidos à custa de certo investimento no sistema. Se, por um lado, investimentos insuficientes implicarão na perda de qualidade do produto, por outro lado, o excesso de investimentos resultará em um produto final com custo muito elevado, o que

irá desestimular o consumo. Assim, planejar e operar adequadamente um sistema elétrico de potência significa chegar a uma solução de compromisso entre a minimização dos custos de investimentos e operação e o atendimento a padrões pré-estabelecidos de qualidade do produto final.

Os sistemas elétricos de potência podem ser subdivididos em três grandes blocos:

- Geração, que perfaz a função de converter alguma forma de energia em energia elétrica;
- Transmissão, que é responsável pelo transporte da energia elétrica dos centros de geração aos de consumo;
- Distribuição, que distribui a energia elétrica recebida do sistema de transmissão aos grandes, médios e pequenos consumidores.

Cada um desses blocos requer diferentes níveis de investimentos e deve atender a padrões de qualidade específicos que influem na definição do nível de qualidade do produto final.

Não há como se diferenciar relativamente a importância dos três blocos da cadeia. São elementos em série e, portanto, a confiabilidade e economicidade[1] do todo dependem da confiabilidade e da economicidade de cada um dos componentes. Mais ainda, o sucesso da exploração econômica e confiável de um sistema elétrico de potência depende de quão integrado e coerente é o trabalho desenvolvido na gestão das três atividades [58].

1.1.1 Sistemas de Geração

Obtém-se energia elétrica, a partir da conversão de alguma outra forma de energia, utilizando-se máquinas elétricas rotativas, geradores síncronos ou alternadores, nos quais o conjugado mecânico é obtido por um processo que, geralmente, utiliza turbinas hidráulicas ou a vapor [73]. Eventualmente, a energia elétrica de um sistema pode ser obtida, também, pela importação de sistemas vizinhos.

A utilização dos diferentes tipos de usinas geradoras é função da existência de fontes primárias de energia, que podem ser renováveis ou não-renováveis; e é fortemente influenciada pelas condições tecnológicas, econômicas e ecológicas. No caso do Brasil, a grande fonte de energia elétrica é a geração hidroelétrica, o que deve ainda perdurar por um longo tempo graças ao

[1] O vocábulo economicidade se vincula, no domínio das ciências econômicas e de gestão, à idéia fundamental de desempenho qualitativo. Trata-se da obtenção do melhor resultado estratégico possível de uma determinada alocação de recursos financeiros, econômicos e/ou patrimoniais em um dado cenário socioeconômico.

potencial ainda disponível. No entanto, é necessária uma precaução quando se reflete acerca dos diferentes números apresentados para esse potencial, uma vez que eles não consideram o efeito da legislação ambiental sobre os projetos potenciais.

São consideradas fontes não-renováveis aquelas passíveis de se esgotarem por serem utilizadas com velocidade bem maior que os milhares de anos necessários para sua formação. Nesta categoria estão os derivados do petróleo, os combustíveis radioativos (urânio, tório, plutônio, etc.), a energia geotérmica, o carvão mineral e o gás natural. Atualmente, a utilização de tais fontes para produzir eletricidade se dá principalmente por uma primeira transformação da fonte primária em energia térmica, por exemplo, por meio de combustão, fissão ou processos geotérmicos. A geração elétrica, obtida por este meio, é conhecida como geração termoelétrica.

Fontes renováveis são aquelas cuja reposição pela natureza é bem mais rápida do que sua utilização energética (como as águas dos rios, marés, sol, ventos) ou cujo manejo pelo homem pode ser efetuado de forma compatível com as necessidades de sua utilização energética (como a biomassa: cana de açúcar, florestas energéticas e resíduos animais, humanos, industriais). A maioria dessas fontes apresenta características estatísticas e estocásticas, de certa forma cíclicas, em períodos de tempo compatíveis com a operação das usinas elétricas e inferiores à vida útil das mesmas. Tais fontes podem ser usadas para produzir eletricidade principalmente por meio de usinas hidroelétricas (água), eólicas (vento) e solar-fotovoltaicas (sol, indiretamente, gerando vapor e biomassa renovável) [140].

1.1.2 Sistemas de Transmissão e Distribuição

Uma característica fundamental da energia elétrica é a necessidade de consumo imediato da quantidade produzida. Não havendo possibilidades reais de armazenagem de energia elétrica em grandes quantidades, o transporte de energia se reveste de suma importância na definição do equilíbrio do binômio produção-consumo. O transporte de energia corresponde aos meios físicos (linhas de transmissão e distribuição) que conduzem a energia das fontes geradoras até os mercados consumidores.

O estudo dos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica não faz parte dos objetivos deste trabalho. Ao longo do texto, são referenciados apenas quando esses sistemas forem relevantes no contexto da geração de energia elétrica.

1.2 Introdução ao Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica

Apesar da fase pioneira do serviço de energia elétrica no Brasil ter-se iniciado no final do século XIX, acompanhando as iniciativas que se desenvolviam nos países mais avançados, a preocupação brasileira com a produção de energia elétrica veio somente algum tempo depois. Vale citar que o crescimento e a modernização da economia brasileira na década de 50 não foram devidamente acompanhados pelo aumento da capacidade de geração de energia. Nesta época, principalmente em São Paulo e no Rio de Janeiro, houve grandes racionamentos, com reflexos desastrosos na vida urbana e na produção industrial. Entre as medidas inicialmente tomadas para permitir o desenvolvimento dos sistemas de geração, estava a realização do inventário dos recursos hidroelétricos da região Sudeste. Os estudos, contratados com a consultora CANAMBRA (um consórcio canadense-americano-brasileiro), estenderam-se entre 1962 e 1966 e representam o marco da introdução do planejamento de sistemas de energia elétrica no Brasil [58].

Nas sociedades modernas, o consumo de energia elétrica tem apresentado índices de crescimento bastante elevados frente a outras formas de energia. Em 1970, 17% de toda a energia consumida no Brasil eram sob a forma de energia elétrica; este número evoluiu para 42% em 2001 [6, 47]. Este crescimento do consumo de energia elétrica pode ser caracterizado de duas formas diferentes. Há o crescimento vertical, devido à ampliação da densidade de cargas em áreas já eletrificadas, em conseqüência do aumento das necessidades energéticas nos consumidores industriais, residenciais e comerciais; e o crescimento horizontal, devido à expansão geográfica dos sistemas elétricos evidenciado, especialmente, pelo importante papel da eletrificação rural.

Com o aumento do consumo de energia elétrica no país, existe a necessidade de um planejamento do sistema hidrotérmico de geração cada vez mais elaborado, que englobe as fontes de geração de energia elétrica, com o objetivo de garantir, da melhor forma possível, o atendimento da demanda. O problema da geração de energia elétrica no Brasil torna-se complexo à medida que as usinas hidroelétricas, base do suprimento energético, são extremamente dependentes de fatores climáticos e também da operação do sistema. Baseado nisso, o planejamento da produção de energia elétrica é um desafio para os gerenciadores do setor elétrico brasileiro, conforme evidenciado pela crise de abastecimento de energia em 2001, para a qual contribuiu decisivamente a falta de investimentos que acompanhassem a evolução das necessidades (demanda). Além disso, a decisão política de reestruturar o setor, com privatizações e desregulamentações, acompanhando algumas tendências internacionais, modificou bastante o ambiente de atuação das empresas de energia elétrica, trazendo novos e importantes desafios para o planejamento do

sistema hidrotérmico de geração brasileiro.

Os sistemas elétricos de potência são responsáveis por grande parte do fornecimento da energia consumida, ocupando uma posição de fundamental importância, tanto nos países desenvolvidos como naqueles em desenvolvimento. A complexidade e os elevados custos envolvidos para um fornecimento adequado da energia elétrica levam à necessidade de estudos cuidadosos para o funcionamento adequado desses sistemas de energia elétrica. Entre os vários tipos de estudos necessários, abrangendo áreas diversas na operação e expansão desses sistemas, um deles está relacionado com as fontes primárias de suprimento de energia (hidráulica, nuclear, carvão, gás natural, etc.). Esta área de estudos busca definir como será a utilização da energia que será transformada em eletricidade, suas incertezas presentes e futuras, as quantidades disponíveis, seu gerenciamento, seus custos e sua evolução. Ela deve considerar também as condições em que será gerada a energia elétrica, ou seja, como a energia disponível será transformada em eletricidade, visando garantir o fornecimento da energia elétrica, de forma econômica e confiável. Desta forma, torna-se necessário planejar previamente como deverá ser a operação e expansão dos sistemas de energia elétrica, levando em conta desde condições futuras até a situação de momento, de forma a determinar os procedimentos a serem assumidos ao longo do horizonte de planejamento. Além do mais, para a formação de preços em um mercado de energia elétrica é imprescindível que se conheçam aspectos do planejamento e da operação do sistema [157].

O planejamento e a operação de sistemas de energia elétrica interligados constituem um problema bastante complexo, que abrange desde o inventário de bacias hidrográficas, construção de usinas geradoras e rede de transmissão, planejamento da operação hidráulico/térmica do sistema, até a supervisão e controle em tempo real da produção e transporte da energia. O planejamento de sistemas de energia elétrica no Brasil envolve etapas de planejamento da expansão e da operação. O planejamento da operação visa determinar estratégias de operação que minimizam o custo operacional do sistema durante um determinado horizonte, denominado de horizonte de planejamento, que em geral é de até cinco anos. O principal objetivo desta etapa é promover o aproveitamento racional dos recursos disponíveis, garantindo qualidade e segurança no atendimento a demanda, satisfazendo às restrições operativas, físicas, etc. do sistema. Por meio de estudos de planejamento da operação, as empresas fornecedoras de energia procuram garantir a manutenção dos sistemas existentes e maximizar sua produtividade. O planejamento da expansão tem como um de seus objetivos o estabelecimento de um nível de confiabilidade ao sistema no atendimento da demanda futura. Para isso, o planejamento adota horizontes de até 30 anos, no qual se procura analisar estratégias de desenvolvimento do sistema elétrico, por meio da com-

posição futura do parque gerador e dos principais sistemas de transmissão, estabelecendo, assim, um programa de desenvolvimento tecnológico e industrial e de inventário, principalmente, das bacias hidrográficas. Desta forma, planejar a operação consiste em determinar quando e quais decisões operativas devem ser tomadas, bem como o desempenho esperado do sistema para estas decisões; enquanto planejar a expansão tem como objetivo especificar, principalmente, onde, como e quando deverá ser expandido o sistema.

1.2.1 Planejamento da Operação de Sistemas de Geração de Energia Elétrica

O planejamento da operação dos sistemas de energia elétrica pretende determinar as decisões operativas mais apropriadas para o funcionamento adequado desses sistemas. O planejamento deve avaliar, previamente, que comportamento terá o sistema, propor e analisar alternativas para a garantia do fornecimento de energia, avaliar custos de operação, encontrar a solução mais econômica, tudo isto podendo ser traduzido por uma operação otimizada do sistema.

O planejamento da operação para sistemas de geração de energia elétrica, especificamente, é importante pelo fato dele agir sobre o suprimento da fonte energética, afetando diretamente dois itens fundamentais no funcionamento dos sistemas elétricos de potência: a garantia de fornecimento da energia elétrica, obtida pelo gerenciamento apropriado da disponibilidade da fonte primária; e o custo associado a este fornecimento energético, dado, principalmente, pelo custo do combustível consumido. Este custo de operação envolve cifras vultosas, de tal forma que um pequeno aperfeiçoamento na operação pode significar uma economia considerável. Adicionalmente, o planejamento da operação para sistemas de geração deve contemplar a coordenação conjunta da geração de várias empresas de energia elétrica. Além do mais, a expansão do sistema de geração implica alto custo social e financeiro, e se forem considerados, ainda, os danos causados ao meio ambiente, provocados tanto pelas usinas hidroelétricas quanto pelas termoelétricas, conclui-se ser altamente necessário o estudo e o desenvolvimento de metodologias para o planejamento da operação de sistemas de geração de energia elétrica que retirem o máximo de benefícios das unidades geradoras existentes [32].

1.3 Abordagens Computacionais Aplicadas ao Desenvolvimento de Software para os Sistemas de Energia Elétrica

1.3.1 Desenvolvimento Procedimental

No tocante à construção, há várias décadas que os programadores vêm lidando com a tarefa de escrever programas de computador. "Antigamente", um programa continha uma longa série de instruções seqüenciais que comandavam um computador para que este executasse determinada tarefa. Normalmente, esses programas eram usados para automatizar certos processos comerciais, assim como, complexos cálculos na área científica [154]. Rapidamente, a automação passou a penetrar em várias áreas da atividade humana. Novos desafios surgiam para a indústria do software, que a cada instante tinha que buscar novas tecnologias para prover a crescente demanda por aplicações computacionais mais complexas e abrangentes [128]. A programação procedural surgiu como uma importante alternativa para os programadores, na qual novos recursos para as linguagens de programação de alto nível tornavam o desenvolvimento e a alteração de programas mais fácil. A programação procedural organiza as instruções em grupos que realizam uma tarefa específica, conhecida como procedimento. Em algumas linguagens de programação, os procedimentos são identificados como funções ou métodos. Além disso, a programação procedural gerou outro benefício que simplificou a tarefa dos programadores. Os procedimentos escritos em uma linguagem de programação podem ser reutilizados em outros programas que exijam procedimentos semelhantes. Os programadores chamam isso de reusabilidade de código.

1.3.2 Desenvolvimento Orientado a Objetos

Apesar desta vantagem, restava um problema a ser resolvido. O mundo real é organizado em objetos, não em procedimentos. Cada vez que um novo programa era escrito, o programador tinha que enfrentar o desafio de recriar o mundo real, baseado em objetos, por meio de uma linguagem de programação procedural. Na busca da solução para esse problema, surge o paradigma da programação orientada a objetos. Introduzido no contexto computacional da década de 60, com a linguagem Simula 67, e com um melhor alcance por meio da linguagem Smalltalk ([101]), esse modelo de programação se evidenciou com o surgimento de demandas mais complexas para aplicações computacionais, além de permitir que os programas imitem os objetos do mundo real pela definição de classes. Atualmente, a orientação a objetos está presente na grande maioria das linguagens de programação, das quais podem ser citadas Java [43], C++ [171], dentre muitas

outras [176]. Ressalta-se que, a programação orientada a objetos tem sido aceita pela indústria da energia elétrica como uma alternativa viável à programação procedural [120].

A tecnologia de objetos apresenta elementos-chave que fundamentam a mudança de enfoque no processo de modelagem e desenvolvimento de aplicações, trazendo benefícios intrínsecos à filosofia. A orientação a objetos pode ser definida como uma nova maneira de pensar os problemas, utilizando modelos organizados a partir de conceitos do mundo real [61]. Nessa tecnologia, o principal bloco de construção de todos os sistemas de *software* é o objeto [13].

Desta forma, um aspecto interessante da tecnologia de objetos é a sua característica de representar o mundo real como ele é enxergado. Esta mudança de enfoque é justificada pelo fato de que objetos existem na natureza muito antes de haver qualquer tipo de aplicação deles pelo negócio: pessoas, turbinas, usinas, minerais, etc. existem por si só, apresentam características peculiares representadas por seus atributos e pelo seu comportamento no mundo real. Desta forma, é possível manter a modelagem do sistema e, em decorrência, sua automação o mais próximo possível de uma visão conceitual do mundo real.

Um objeto de software consiste de atributos (dados) e operações (funções, métodos) que processam os seus atributos. Esta associação natural entre as operações e os atributos melhora a coesão[2] [30]. A falta de associação entre dados e procedimentos é uma deficiência das linguagens procedurais de programação, o que pode levar à utilização inadequada das operações pela equipe de programação, porque não existe nenhuma proteção real contra o uso inadequado dos dados e dos procedimentos. Ambos estão disponíveis para serem utilizados pelo programador, sem qualquer restrição ou verificação. As linguagens orientadas a objetos provêm uma solução para este problema por meio do encapsulamento, que é uma técnica de interligação de atributos e operações para formar um objeto [74].

Com o encapsulamento, o cliente de um objeto de software está isolado de como os dados estão armazenados e de como as operações estão implementadas. Os clientes comunicam-se com os objetos de software por meio de mensagens, isto é, um sinal enviado ao objeto requisitando um serviço por meio da execução de uma operação. Trata-se de um ciclo completo no qual uma mensagem é enviada a um objeto, operações são executadas dentro dele com base nos seus dados (atributos), e uma mensagem contendo o resultado da operação é enviada ao objeto solicitante (cliente). Funciona como uma fábrica (Figura 1.2 [61]) que recebe uma ordem de

[2] A coesão implica que uma classe agrupe somente os atributos e as operações muito relacionados entre si e com a classe propriamente dita [128].

produção (mensagem de solicitação), processa essa ordem (operações) utilizando matéria prima (atributos) e gera um produto final (mensagem de resposta).

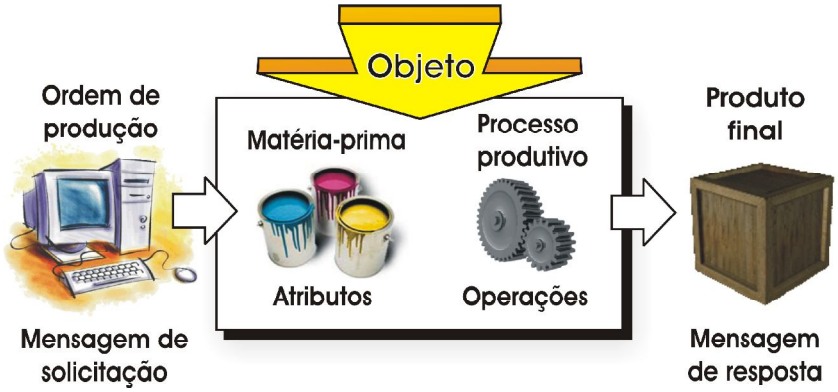

Figura 1.2: Funcionamento de um objeto.

Entretanto, conhecer uma linguagem orientada a objetos é um primeiro passo necessário, mas insuficiente para criar sistemas orientados a objetos [77]. A essência da tecnologia orientada a objetos é a identificação e organização dos conceitos do domínio da aplicação, ao invés da sua representação final em uma linguagem de programação orientada a objetos [186]. Assim, desenvolver sistemas orientados a objetos implica na adoção de uma estratégia orientada a objetos em todo o processo de desenvolvimento [170]. Este processo de desenvolvimento pode ser dividido em três estágios: análise, projeto e programação orientados a objetos [155]. A utilização de técnicas sistemáticas nas fases de análise, projeto faz com que o processo de geração de código (programação, implementação) seja quase automatizado [177]. Ressalta-se que a orientação a objetos não é apenas uma teoria, mas uma tecnologia comprovada que pode ser utilizada em vários projetos para a construção de diferentes tipos de sistemas [61], mesmo em domínios que têm pouca analogia com domínios naturais ou de negócios.

A maioria do software tradicional do setor elétrico é de grande porte, cujo desenvolvimento é baseado em métodos procedurais. Isto lhes impõe certas dificuldades no seu desenvolvimento e na sua manutenção [4, 119]. Ressalta-se que essas dificuldades são pouco compatíveis com o novo ambiente que se estabelece para o setor [124]. Assim, o potencial da orientação a objetos para sistemas de energia elétrica, em geral, tem sido examinado e reconhecido[3]. Foram encontradas diversas aplicações do paradigma da orientação a objetos em sistemas de energia elétrica,

[3]Em quase todos os programas orientados a objetos relativos a aplicações que envolvem sistemas de energia elétrica, C++ tem sido a linguagem escolhida [120]

resumidas a seguir:

- A construção de uma plataforma para aplicações de simulações em sistemas de energia elétrica utilizando a linguagem C++ [184];
- Aplicações para sistemas elétricos de potência (PSA - *Power System Applications*) como, análise de fluxo de carga, análise de curto-circuito, processamento de topologia da rede elétrica e coordenação de relé [119];
- O projeto orientado a objetos para um processador de topologia da rede (NTP - *Network Topology Processor*) [121], o qual realiza o seu processamento para obter a topologia da rede da corrente elétrica;
- O projeto de um solucionador genérico de sistemas lineares para uma classe de grandes matrizes simétricas esparsas sobre números reais e complexos [120]. Tais matrizes aparecem em várias aplicações de análises de sistemas elétricos de potência como análise de fluxo de carga e análise de curto-circuito;
- O planejamento de sistemas de energia elétrica incluindo considerações sobre análise "exergética"[4] [111];
- A modelagem de sistemas elétricos e as operações para matrizes esparsas utilizando a programação orientada a objetos [66];
- A representação dos elementos dos sistemas elétricos de potência [124, 125]. Os modelos matemáticos dos elementos são transformados em objetos;
- O desenvolvimento de um componente, utilizando programação orientada a objetos, para resolver equações lineares em análises de sistemas elétricos de potência[103];
- Sistemas especialistas para operação (funcionamento) e gerenciamento (configuração, ajuste) dos relés de proteção dos sistemas elétricos [86];
- Análise da rede elétrica, especificamente o processamento da topologia e o cálculo do fluxo de carga [56];
- O fluxo de carga [109, 110, 156];
- A simulação e o controle de sistemas elétricos [57];

[4] O termo exergia vem do grego e significa trabalho disponível [111].

- A análise e o controle de redes elétricas de grande escala contendo sistemas flexíveis de transmissão em corrente alternada (FACTS - *Flexible AC Transmission Systems*) com ramos controlados [60];
- Um sistema de análise de distribuição [186];
- O desenvolvimento de um fluxo de carga trifásico pela reutilização de um fluxo de carga monofásico já existente [2];
- Em [3], os autores extendem o trabalho [2], por meio da inclusão da abordagem dos casos de uso[5];
- A simulação da dinâmica de sistemas de energia elétrica [93];
- Um banco de dados orientado a objetos para aplicações de simulações de sistemas de potência [55];
- Sistema de gerenciamento de distribuição (DMS - *Distribution Management System*) [14];
- Circuitos de distribuição [185];
- Fluxo de carga para sistemas de distribuição radiais e para sistemas fracamente malhados [88]. Neste trabalho, os autores extendem a modelagem do fluxo de carga baseado em objetos para sistemas de distribuicão radiais [87], para incluir sistemas de distribuição fracamente malhados;
- Geração distribuída [89];
- Planejamento dinâmico de um sistema de transmissão em um ambiente desregulamentado de acesso livre [67];
- O desenvolvimento de uma base computacional orientada a objetos, a qual representa os componentes físicos dos sistemas de energia elétrica e suas metodologias de análise e síntese [4];
- Os mesmos autores de [4], apresentam uma nova filosofia para o desenvolvimento de softwares na área de sistemas de energia elétrica, utilizando os conceitos da Modelagem Orientada a Objetos (MOO) [5];

[5]Casos de uso são apresentados e aplicados no Capítulo 7.

- Modelo para avaliação da confiabilidade composta de sistemas de potência por simulação Monte Carlo e a representação tanto da geração eólica como da carga variante [46];

- A classificação de distúrbios associados à Qualidade de Energia Elétrica (QEE) [138].

Com relação à aplicação da orientação a objetos no planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos pode-se elencar:

- Um modelo orientado a objetos para o planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos [153]. São modelados as partes físicas do sistema e o algoritmo de otimização. Importante mencionar que a estratégia de solução adotada é baseada na utilização da Programação Dinâmica Dual Estocástica, e na agregação de diversos reservatórios em reservatórios equivalentes de energia;

- Um sistema computacional de suporte à decisão, denominado Hydrolab, para o planejamento e a programação da operação de sistemas hidrotérmicos de geração elétrica [32, 33]. O projeto e a implementação do sistema de suporte à decisão são baseados no paradigma da programação orientada a objetos. O sistema computacional gerencia cinco modelos que auxiliam a tomada de decisão para o planejamento e programação da operação. As ferramentas de decisão estão divididas em três categorias: simulação, otimização e previsão. Para a realização dos estudos, o sistema conta com uma base de dados composta por usinas hidroelétricas, gerenciadas e despachadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS);

- O autor deste trabalho também realizou alguns trabalhos [134, 135, 136] em que pôde-se evidenciar a potencialidade da aplicação da orientação a objetos na análise, projeto e implementação para o desenvolvimento do modelo de otimização da operação energética direcionado ao planejamento da operação energética do sistema hidrotérmico brasileiro. O desenvolvimento orientado a objetos permitiu construir o modelo computacional que reflete um domínio, o domínio do planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos de geração, utilizando-se da terminologia desse domínio. Adicionalmente, pôde-se constatar-se que as habilidades básicas usadas na análise e no projeto orientados a objetos foram essenciais para a criação de um software bem projetado, robusto e manutenível, na medida do possível com as limitações e problemas do desenvolvimento orientado a objetos.

1.3.3 Desenvolvimento Baseado em Componentes

A idéia de reutilização é antiga e teve início desde o tempo em que as pessoas começaram a encontrar soluções consistentes para os problemas. Esta busca foi motivada pela idéia de que, uma vez encontrada a solução, esta poderia ser aplicada a novos problemas. Assim, a aplicação de uma solução, repetida por várias vezes, acaba por torná-la aceita, generalizada e padronizada [129]. Na ciência da computação, em particular na disciplina de engenharia de software, tem-se procurado especificar e projetar soluções que possam ser reutilizadas em diferentes projetos. Alguns dos benefícios da reutilização referem-se ao aumento da qualidade e à redução do esforço de desenvolvimento.

Na medida em que o software orientado a objetos sofre manutenções, este pode se tornar mal estruturado, cada vez mais difícil de evoluir ou reutilizar alguma de suas partes. A dificuldade em atualizar o software continuamente tem motivado a investigação de soluções que diminuam o seu custo e tempo de desenvolvimento, garantam um tempo de vida maior, facilitem sua manutenção e reutilização. Simultaneamente, surgem na literatura novos paradigmas que propõem estruturar o software de uma forma diferente, visando obter algumas vantagens sobre os paradigmas anteriores, como o Desenvolvimento Baseado em Componentes (DBC) que visa construir um novo software a partir de componentes pré-existentes [105].

As classes de objetos individuais são muito específicas e detalhadas, além de terem que estar associadas a uma aplicação em tempo de compilação ou quando o sistema estiver sendo conectado. O conhecimento detalhado das classes é necessário para seu uso, e isso significa que o código-fonte precisa ser disponibilizado pelo fornecedor da classe [170]. Os componentes são mais abstratos do que classes de objetos. Embora a tecnologia de orientação a objetos e, especialmente a programação orientada a objetos, forneça características de reusabilidade, esta reutilização é caracterizada principalmente no nível de código fonte, entretanto os códigos fonte ainda têm que serem recompilados sempre que as funcionalidades precisam ser extendidas [2]. Na construção de uma aplicação baseada em componentes de software, não é necessário a disponibilização do código-fonte, de forma que o componente de software não necessita ser compilado com os outros componentes da aplicação [103]. Quando um determinado trecho da aplicação precisa de alguma funcionalidade fornecida pelo componente de software, ele simplesmente invoca um serviço do componente, sem se preocupar aonde esse componente está sendo executado ou com a linguagem de programação utilizada para desenvolvê-lo. Para isto, os componentes declaram suas interfaces e todas as interações são feitas por meio delas. Desta forma, as interfaces podem ser consideradas

como pontos de acesso dos componentes de software. Estes pontos permitem o acesso (requisição, solicitação) dos clientes aos serviços fornecidos pelo componente [172].

Um componente é um "pacote" de software que inclui implementação com uma especificação das interfaces fornecidas e requeridas [50]. O desenvolvimento baseado em componentes surge como uma técnica que oferece os recursos necessários para, a partir do entendimento do domínio de uma aplicação, poder dividí-la em componentes de software. A técnica postula que os serviços dos componentes podem ser especificados por meio de interfaces bem definidas, de forma que possam ser utilizados por terceiros, que não necessariamente conheçam detalhes da sua implementação [63].

1.4 Motivação

O planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos pode ser classificado como um problema de otimização de um sistema dinâmico, não linear, interconectado, não convexo, estocástico, de grande porte e não separável [18, 19, 21, 84, 166]. Nos sistemas com grande parcela de geração hidroelétrica, como o sistema brasileiro, o planejamento da operação tem uma grande preocupação com a disponibilidade e o gerenciamento da fonte de suprimento de energia hidráulica. Além do mais, ele deve levar em conta um amplo espectro de atividades, abrangendo desde a otimização plurianual dos reservatórios até o despacho das usinas. Adicionalmente, a privatização de usinas e o novo ambiente competitivo, com usinas pertencentes a diferentes empresas, dificultam a determinação de uma política de operação [6] que, pela sua própria essência, tem que ser cooperativa. Tudo isso leva a um cenário operativo bastante complexo, onde o uso de métodos tradicionais utilizados em outros países nem sempre traz bons resultados [83]. Portanto, as características próprias do sistema brasileiro estimulam o desenvolvimento de métodos computacionais e critérios adequados às suas condições [127]. O planejamento da operação do sistema hidrotérmico brasileiro de forma eficiente, em especial das usinas hidroelétricas brasileiras, justifica-se não apenas pela necessidade de manutenção e controle da confiabilidade do sistema eletroenergético nacional, mas também como produto de natureza econômica de valor estimável e de fator importante para assegurar o crescimento nacional sustentado [137]. Observa-se ainda

[6] Para nossos propósitos, uma política de operação para sistemas hidrotérmicos de geração consiste em uma estratégia operacional que determina a utilização da água e de combustíveis fósseis e físseis num sistema hidrotérmico composto por usinas hidroelétricas e termoelétricas. A política de operação leva à determinação da quantidade de energia elétrica produzida por cada uma das usinas, pela definição do estado de armazenamento de cada reservatório e do consumo dos combustíveis.

que o problema de utilização eficiente dos recursos hídricos, resolvidos por meio de modelos computacionais, deve ser não somente uma preocupação em momentos difíceis, mas um processo contínuo de melhoria para a operação do sistema [135].

A complexidade do problema justifica a necessidade de utilização de diversas ferramentas computacionais com abordagens variadas [22]. Além da complexidade, modelos computacionais para o planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração merecem estudos detalhados, a fim de evitar incertezas nas sinalizações para o mercado de energia elétrica, contribuindo para a diminuição do risco de déficit de energia, proporcionando uma maior confiabilidade na operação energética. Para isto, torna-se necessário um amplo investimento no estudo do problema, levando ao aprimoramento dos modelos existentes e também ao desenvolvimento de modelos alternativos de abordagem ao problema, evitando-se a inconveniente dependência de modelos únicos [26]. Adicionalmente, estudos comparativos entre esses modelos, incluindo nacionais e internacionais, se fazem necessários para uma maior confiabilidade na operação do sistema, bem como para a redução dos custos envolvidos na geração de energia elétrica.

A moderna indústria de energia elétrica requer a realização de estudos que utilizem ferramentas computacionais sofisticadas, as quais são aprimoradas de forma continuada à medida que os recursos computacionais de hardware e software evoluem. Desta forma, as ferramentas computacionais, além de robustas e confiáveis, devem permitir que manutenções sejam feitas de forma simples. É necessário ainda prever o uso das aplicações encadeadas ou acopladas com diversas ferramentas da área [153].

Uma das mais importantes mudanças no processo de desenvolvimento para obter melhorias significativas na produtividade de software é deixar de fazer aplicações a partir do zero cada vez que um novo projeto for iniciado. Ao invés disso, deve-se construir aplicações computacionais por meio da reutilização de componentes de software já existentes na própria organização ou adquirindo componentes de software de outras organizações, pois muitas aplicações podem usar componentes similares ou até mesmo idênticos [49].

A modelagem (análise e projeto) orientada a objetos do planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos [134, 135, 136], realizada pelo autor, possibilitou a implementação de um sistema computacional fácil de entender por estar representando objetos do mundo real de maneira mais intuitiva quando comparada à implementação procedimental. Todas as vantagens da orientação a objetos citadas na seção 1.4.2, puderam ser observadas. No entanto, o reúso proporcionado pela implementação orientada a objetos é somente no nível de classes.

Uma análise mais aprofundada do domínio do planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos revela a adequação do DBC para este domínio, uma vez que se existirem componentes devidamente especificados, estes poderão ser reutilizados em diversas aplicações do domínio. Isso motivou a investigação realizada neste trabalho, a qual é um passo adiante na modelagem e implementação do sistema, conduzindo a melhoria na qualidade do software resultante, facilitando sua compreensão, manutenção, evolução e reutilização.

1.5 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo a realização de estudos relacionados ao planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração, por meio da aplicação de componentes de software [130]. Ressalta-se que a principal atividade deste estudo inclui a aplicação da engenharia de software, mais especificamente, o desenvolvimento baseado em componentes, para a especificação, implementação e montagem de ferramentas computacionais aplicáveis ao planejamento da operação do sistema brasileiro de geração de energia elétrica.

É muito importante contextualizar este trabalho dentro do grande panorama de planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração. Pretende-se apresentar e aplicar um processo de desenvolvimento (UML *Components* [30]), baseado em componentes de software, para a construção de modelos computacionais de otimização e de simulação, para servir de apoio ao planejamento da operação. Adicionalmente, pretende-se apresentar uma implementação de uma política de operação energética de reservatórios, baseada em sistemas de inferência *fuzzy*, para auxiliar no fornecimento de energia elétrica ao sistema com economia e confiabilidade.

Ressalta-se que este trabalho está inserido em um conjunto de trabalhos desenvolvidos e aplicativos computacionais do grupo de pesquisa do LSEE - SEL - EESC - USP[7], relacionados ao planejamento da expansão e da operação do sistema hidrotérmico brasileiro. Portanto, um dos objetivos deste trabalho consiste em reunir o resultado destas várias pesquisas desenvolvidas, de forma a auxiliar na construção de modelos computacionais para o planejamento da operação do sistema hidrotérmico brasileiro.

Especificamente pretende-se:

- Apresentar e aplicar um processo de desenvolvimento baseado em componentes de software,

[7]USP - Universidade de São Paulo, EESC - Escola de Engenharia de São Carlos, SEL - Departamento de Engenharia Elétrica e LSEE - Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica.

que permita a construção de modelos computacionais para o planejamento da operação energética do sistema hidrotérmico brasileiro;

- Apresentar as vantagens dos componentes de software e do UML *Components* na construção dos modelos computacionais, de forma a evidenciar seus benefícios para o desenvolvimento de aplicações computacionais voltadas aos sistemas de energia elétrica;

- Realizar uma modelagem dos requisitos, de forma a capturar as reais necessidades/exigências para os modelos computacionais;

- Realizar uma modelagem da especificação, de forma a produzir uma especificação clara e precisa das interfaces, dos componentes e da arquitetura de especificação dos componentes. Ressalta-se que uma especificação bem produzida conduz a uma implementação mais fácil de ser realizada, entendida e reutilizada por outros desenvolvedores. Com uma transição, entre os vários fluxos de trabalho do processo, representada de forma explícita pelos vários artefatos produzidos, objetiva-se mostrar que o desenvolvimento torna-se mais suave e o produto obtido terá mais qualidade, pois minimiza-se a chance de serem introduzidos erros entre um fluxo de trabalho e outro;

- Desenvolver uma política de operação energética para o sistema hidrotérmico brasileiro, baseada em sistemas de inferência *fuzzy*, de forma a maximizar os benefícios dos recursos hidroelétricos de geração [131];

- Realizar vários estudos de caso, de forma a avaliar os modelos computacionais propostos, além de proporcionar uma conotação prática voltada à análise de resultados e a potencial descoberta de novos princípios para a operação energética otimizada do sistema hidrotérmico brasileiro.

1.6 Justificativa

O presente trabalho consiste na aplicação de uma abordagem computacional, baseada em componentes de software, aplicável ao planejamento da operação energética do sistema hidrotérmico brasileiro. A abordagem computacional utilizada pode ser considerada eficiente por utilizar um processo de desenvolvimento[8] com seus fluxos de trabalho, bem como os artefatos produzidos

[8]Um processo de desenvolvimento de software descreve uma abordagem para a construção (análise, especificação, projeto, etc.), implantação e, possivelmente, a manutenção de software.

em cada fluxo de trabalho. O processo de desenvolvimento adotado consiste num processo com um número razoável de artefatos e com pouca burocracia, no qual cada fluxo de trabalho tem objetivos claros e uma importância precisa, visando a produção de um software que atenda aos requisitos da melhor forma possível. Portanto, o processo adotado permite o desenvolvimento de forma rápida, pois o que interessa é o software pronto, e não um amontoado de documentos justificando porque ele ainda não foi finalizado. Além do mais, os artefatos produzidos foram empregados diretamente para a produção do software, em vez de servirem somente como produtos de documentação.

Adicionalmente, um software necessita possuir uma documentação extremamente detalhada, precisa e atualizada para que possa ser mantido com facilidade, rapidez e de maneira correta, sem produzir novos erros ao corrigir os antigos. Modelar um sistema é uma forma bastante eficiente de documentá-lo [65], além do que a modelagem é uma parte central de todas as atividades que levam à construção de um bom software, pois modelos podem ser empregados para [13]:

- Comunicar a estrutura e o comportamento desejados do sistema;
- Visualizar e controlar a arquitetura do sistema;
- Compreender melhor o sistema que está sendo elaborado;
- Gerenciar riscos.

Na abordagem computacional utilizada, emprega-se UML (*Unified Modeling Language* ou Linguagem de Modelagem Unificada) para a modelagem do software, visto que ela tornou-se a linguagem universalmente aceita para modelagem (e consequentemente documentação) de projetos de software [77]. Além do mais, ela é uma linguagem muito expressiva, abrangendo as várias visões necessárias para especificar, desenvolver e implantar sistemas. Entretanto, a UML é apenas uma linguagem e, portanto, é somente uma parte do processo para o desenvolvimento de software. Por isso, é necessário também adotar um processo de desenvolvimento, no caso foi adotado o UML *Components*.

1.7 Organização do Trabalho

O presente trabalho está organizado da seguinte forma:

- O Capítulo 2 contém a modelagem energética dos sistemas hidrotérmicos de geração, com suas principais características e variáveis;

- O Capítulo 3 apresenta o problema do planejamento da operação energética dos sistemas hidrotérmicos de geração, enfatizando suas características, sua formulação matemática e uma apresentação inicial da estrutura dos modelos computacionais desenvolvidos neste trabalho;

- O Capítulo 4 descreve, de forma detalhada, o modelo de otimização da operação energética, enfatizando a importância de algumas particularidades do problema para a construção do algoritmo empregado na otimização;

- O Capítulo 5 apresenta detalhadamente o modelo de simulação da operação energética, dando destaque à política de operação energética e aos sistemas de inferência *fuzzy*;

- O Capítulo 6 apresenta as definições de componentes de software, seus princípios e seus principais benefícios no desenvolvimento de software. Adicionalmente, apresenta-se as camadas arquiteturais, o processo de desenvolvimento completo e a linguagem de modelagem utilizada;

- O Capítulo 7 ilustra a aplicação do processo UML *Components* para o desenvolvimento dos modelos computacionais de otimização e simulação da operação energética. Enfatiza-se as atividades dos fluxos de trabalho e os artefatos produzidos, de forma a guiar a produção da aplicação de software;

- O Capítulo 8 apresenta os resultados obtidos pela aplicação dos modelos de otimização e de simulação da operação energética, implementados neste trabalho. Por meio das várias aplicações executadas, pretende-se avaliar os modelos especificados e implementados segundo a abordagem de componentes de software, de modo que possam ser testados e potencialmente utilizados no planejamento da operação energética do sistema hidrotérmico brasileiro.

- O Capítulo 9 apresenta as conclusões, englobando as discussões e as contribuições, os trabalhos publicados e submetidos pelo autores, e algumas perspectivas de trabalhos futuros relacionados ou em continuidade direta desta tese.

Capítulo 2

Modelo Energético de Sistemas Hidrotérmicos de Geração

2.1 Considerações Iniciais

A geração de energia elétrica nos grandes sistemas de potência engloba as unidades responsáveis pela produção desta energia que pode ser hidroelétrica, quando resulta do aproveitamento da energia de quedas hidráulicas; ou termoelétrica, quando resulta da queima de combustíveis diversos, tais como carvão, óleo, gás e urânio (fissão). Os diferentes graus de utilização das usinas hidroelétricas e termoelétricas na composição dos parques geradores permitem classificar os sistemas elétricos em três grandes grupos: termoelétricos, hidroelétricos e hidrotérmicos. Em alguns países, as condições geográficas determinam a inexistência de potencial hidroelétrico aproveitável, sendo seus sistemas de geração exclusivamente termoelétricos. Em outros, o aproveitamento de recursos hidroelétricos de porte resulta em sistemas exclusivamente hidroelétricos. Entretanto, na maioria dos países, os dois tipos de geração são conjugados, formando sistemas hidrotérmicos de geração. O sistema brasileiro de produção de energia elétrica é um sistema hidrotérmico, com forte predominância da geração de origem hidráulica.

Neste capítulo é apresentado o modelo energético de sistemas hidrotérmicos de geração, enfatizando as características operativas e energéticas. Primeiramente, apresenta-se o modelo energético dos sistemas hidroelétricos, enfatizando os principais componentes de uma usina hidroelétrica, as vazões afluentes, a altura de queda, a casa de máquinas, o engolimento máximo, a potência máxima, a geração hidráulica máxima contínua e a função de geração hidráulica.

Posteriormente, é apresentado de forma resumida a caracterização dos sistemas termoelétricos.

2.2 Sistemas Hidrotérmicos de Geração

Um sistema hidrotérmico de geração é constituído por dois subsistemas: o subsistema hidráulico e o térmico. O objetivo deste sistema é fornecer energia a uma rede de transmissão que deve atender aos centros de carga (Figura 2.1).

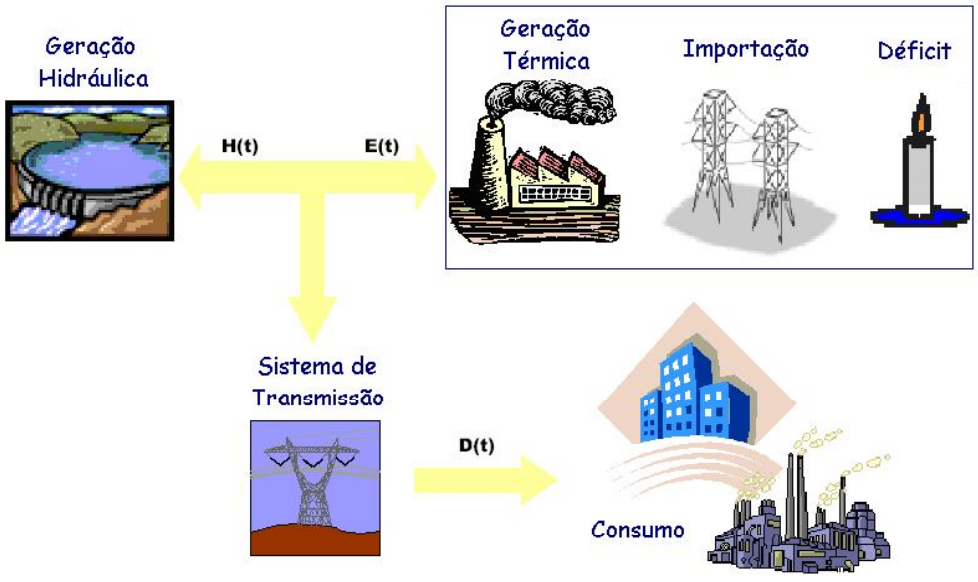

Figura 2.1: Esquema de um sistema hidrotérmico de geração.

Na Figura 2.1 as variáveis indicadas são:

- *D(t)*: demanda (mercado de energia elétrica) média durante o intervalo *t*, em $\overline{MW}$[1];
- *H(t)*: geração média total das usinas hidroelétricas durante o intervalo *t*, em $\overline{MW}$;
- *E(t)*: geração média das fontes não hidráulicas (complementação térmica, importação de energia e corte de carga) durante o intervalo *t*, em $\overline{MW}$.

[1] A unidade utilizada para expressar energia é o $\overline{MW}$ (mega watt médio). O $\overline{MW}$, em um dado intervalo de tempo Δt, é a energia produzida por uma fonte geradora de potência de 1 MW. Para que se consiga o valor de energia, em unidades rotineiras como MWh ou MWmês, deve-se fornecer a duração do intervalo em que a fonte geradora trabalhou. A vantagem de se utilizar o $\overline{MW}$ para se medir energia é que ele informa, também, o valor da potência média fornecida pela fonte geradora durante o intervalo Δt.

Apesar de seu custo operacional ser extremamente baixo[2], uma vez que a energia elétrica obtida é proveniente da energia potencial da água, as usinas hidroelétricas apresentam um tempo de construção longo, com custo de investimento elevado. Além do mais, situam-se, geograficamente, onde haja disponibilidade de água com desnível que permita a construção, por meio de barragens, do reservatório, exigindo, em geral, a construção de longos sistemas de transmissão. Destaca-se como inconveniente o alagamento de áreas férteis, perda de terras produtivas, interrupção do curso natural do rio e possíveis modificações no clima da micro-região.

As usinas termoelétricas apresentam tempo de construção e custo de investimento sensivelmente menores, quando comparadas às hidroelétricas, apresentando, no entanto, custo operacional elevado, em virtude do custo do combustível. Elas também necessitam de água, para a condensação do vapor, porém, em ordem de grandeza menor que a utilizada pelas hidráulicas, o que permite maior grau de liberdade em sua localização, podendo situar-se em maior proximidade dos centros de consumo, resultando na redução de investimentos no sistema de transmissão. Apresentam, como inconveniente, a emissão na natureza, de poluentes, resíduos da combustão e, conforme seu tipo, a utilização de combustível não renovável.

Em um sistema hidrotérmico, o custo de operação pode ser dividido em duas parcelas: custos fixos e variáveis em função do nível de geração das usinas. Em uma usina hidroelétrica, existem apenas custos fixos, uma vez que os custos de manutenção e operação das máquinas não dependem da geração da usina. Por outro lado, em uma usina termoelétrica, o custo é fortemente dependente da geração, uma vez que o consumo de combustível é proporcional ao nível de geração da usina. Dessa forma, pode-se concluir que o custo variável de um sistema hidrotérmico é computado por sua parcela de operação do sistema de geração não-hidráulico [53, 113].

A seguir, faz-se um detalhamento das características operativas e energéticas das usinas hidroelétricas e termoelétricas, necessário para o entendimento da modelagem do problema do planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração. Deve ser frisado que o detalhamento a seguir foi feito a partir de uma ampla revisão bibliográfica [31, 32, 37, 38, 53, 58, 83, 98, 108, 113, 147, 157, 160, 174], de forma a envolver os principais aspectos concernentes aos sistemas hidrotérmicos de geração.

[2]Mesmo nos casos em que são cobradas taxas pelo uso da água, o custo de operação das usinas hidroelétricas é relativamente baixo quando comparado ao custo de operação das usinas termoelétricas.

2.3 Sistemas Hidroelétricos

De todas as fontes energéticas exploradas atualmente, a hidroeletricidade destaca-se por ser obtida da água, um recurso renovável, não poluente, sem resíduos e que permite sua reutilização a jusante, para o mesmo fim [106]. Os recursos hidráulicos são, onde esse potencial existe, os mais econômicos e promissores entre as alternativas energéticas convencionais.

A modelagem de usinas hidroelétricas é o processo pelo qual as usinas são representadas por um conjuntos de equações matemáticas. Trata-se de um processo necessário para que a energia gerada por estas usinas possa ser calculada com base em informações comumente associadas à sua operação. Assim, para desenvolver o modelo matemático para uma usina hidroelétrica, deve-se, inicialmente, definir o que se deseja deste modelo, as suas entradas e saídas.

Pelo modelo matemático de uma usina entende-se, neste trabalho, focado em aspectos energéticos, a função de geração da usina, isto é, a função que relaciona variáveis mensuráveis do aproveitamento à energia gerada. Estas variáveis mensuráveis são: o volume de água armazenado no reservatório e as vazões, turbinada e vertida. A partir destas variáveis, deve-se determinar a energia gerada pela usina, tal como ilustrado na Figura 2.2.

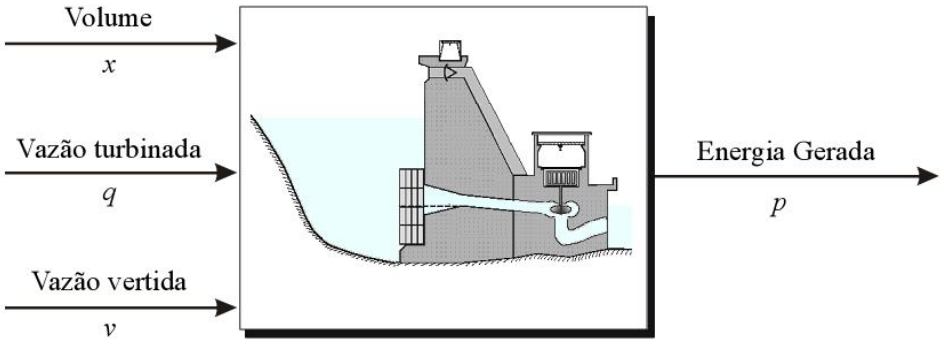

Figura 2.2: Modelo energético de uma usina hidroelétrica.

Para facilitar o entendimento deste modelo matemático, os principais componentes relativos à operação energética de uma usina hidroelétrica são descritos em detalhes na seção 2.3.1. A Figura 2.3 apresenta um esquema de uma usina hidroelétrica e as variáveis relevantes que compõem o modelo.

As variáveis indicadas na figura são:

- X_{mor}: é o volume morto do reservatório, em hm^3. É o volume de água armazenado abaixo

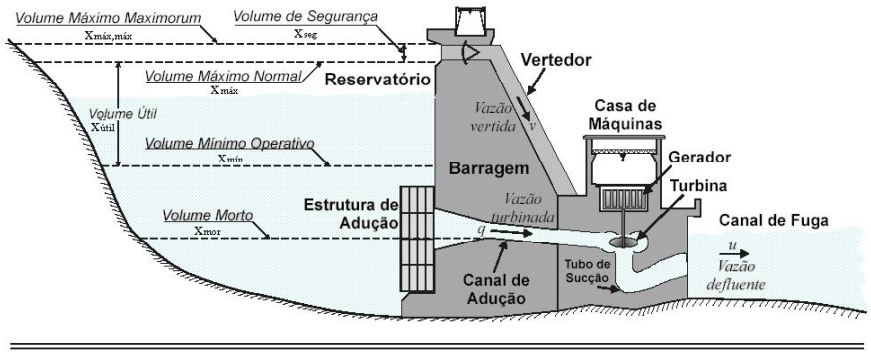

Figura 2.3: Principais variáveis energéticas de uma usina hidroelétrica.

do nível mínimo do canal de adução (nível a partir do qual a água consegue entrar no sistema de adução), e que não pode ser retirado do reservatório. Desta forma, o volume morto não pode ser aproveitado para a geração de energia elétrica;

- X_{min}: é o volume mínimo operativo, em hm^3. É o mínimo volume de água necessário para que a usina possa gerar energia. Normalmente está associado à altura mínima na qual a turbina pode operar ou ao nível necessário do reservatório para manter as estruturas de adução submersas. O volume mínimo operativo pode ser determinado, também, a partir de restrições hidráulicas para a entrada de água no sistema de adução, como, por exemplo, para evitar a formação de vórtices (redemoinho, remoinho) na tomada d'água;

- X_{max}: é o volume máximo operativo, em hm^3. É o volume máximo extremo de água que o reservatório pode armazenar em condições normais de operação;

- X_{util}: é a diferença entre os volumes operativos, máximo e mínimo, em hm^3. Deve-se ressaltar que os volumes operativos (mínimo e máximo) do reservatório definem os limites, mínimo e máximo, da sua operação energética. Assim, o volume útil representa a faixa de operação normal dos reservatórios para geração de energia elétrica;

- $X_{max,max}$: é o volume máximo *maximorum*, em hm^3. É o volume máximo extremo que o reservatório pode armazenar, sem que haja comprometimento da estrutura da barragem. Este volume, geralmente, é atingido em condições anormais de operação, tais como grandes cheias;

- X_{seg}: é o volume de segurança, em hm^3. É a diferença entre o volume máximo *maximorum* e o volume máximo operativo. É como se fosse um "espaço vazio" que pode ser preenchido

em condições anormais, quando há excesso de água. Dessa forma, o volume de segurança tem a finalidade de reservar uma faixa de segurança na operação do reservatório;

- q: é a vazão turbinada (engolimento), em m^3/s. É a vazão que efetivamente gera energia elétrica, fluindo do reservatório à casa de máquinas passando pelo canal de adução, e fazendo com que as turbinas girem e acionem os geradores. Esta variável possui um limitante superior, chamado engolimento máximo, que é a vazão turbinada que produz a potência máxima do conjunto de unidades geradoras (turbina/gerador) para uma dada altura de queda líquida;

- v: é a vazão vertida, em m^3/s. É a vazão que flui diretamente do reservatório ao rio, através do vertedouro, sem passar pela casa de máquinas e sem gerar energia elétrica. É vista como desperdício, mas às vezes, é um mal necessário para que sejam satisfeitas restrições de vazão defluente mínima da usina, ou para controlar o nível d'água do reservatório, em situações em que a vazão turbinada não é suficiente para extravasar o fluxo de água que chega ao reservatório;

- u: é a vazão defluente (vazão descarregada pela usina), em m^3/s. É a soma das vazões turbinada e vertida ($u = q + v$).

2.3.1 Principais Componentes de uma Usina Hidroelétrica

Os principais componentes de uma usina hidroelétrica, ilustrados na Figura 2.3, estão listados a seguir:

- Uma barragem que represa a água, com conseqüente formação do reservatório, que aumenta a altura de queda da água, o que em muitas usinas brasileiras é essencial para a produção de energia elétrica, uma vez que, devido ao relevo suave, estas não possuiriam altura de queda razoável. Assim, a barragem tem como uma de suas funções a criação de uma diferença de níveis entre o espelho d'água do reservatório (montante) e o canal de fuga (jusante). Os reservatórios, dependendo de sua capacidade de regularização, podem ser classificados em dois grupos: de compensação ou de acumulação. Os do primeiro grupo têm volume suficiente somente para a regularização de descargas semanais ou diárias. Os reservatórios do segundo grupo têm capacidade para regularizar as vazões de um mês, de um ano ou mesmo de vários anos. As usinas hidroelétricas, com reservatórios de compensação são comumente chamadas de usinas a fio d'água, enquanto as usinas com reservatórios

de acumulação são denominadas usinas a reservatório. Uma usina a fio d'água tem seu volume útil e sua faixa de operação normal iguais a zero, desta forma, o reservatório situa-se sempre no mesmo nível, implicando que a vazão afluente ao reservatório seja descarregada (turbinada e/ou vertida) pela usina. Os reservatórios de acumulação atenuam bastante o efeito da sazonalidade das afluências naturais, com armazenamento em períodos chuvosos e deplecionamento em períodos de estiagem. Além de seu papel de regularização das afluências, os reservatórios de acumulação têm uma função importante no controle de cheias em sua bacia. Assim, durante períodos chuvosos, deixa-se vazio um determinado espaço do reservatório, criando um volume capaz de armazenar afluências elevadas caso ocorram cheias, reduzindo eventuais danos causados nas áreas ribeirinhas a jusante. A fração do volume operativo que fica vazia é chamada de volume de espera. O volume de espera é, portanto, um volume vazio que se acrescenta ao volume de segurança do reservatório. A utilização dos reservatórios do sistema para o controle de cheias cria um conflito de objetivos com a produção de energia, pois reduz o volume máximo operativo e conseqüentemente a capacidade de produção dos aproveitamentos [3]. Outros tipos de restrições como navegação, saneamento, irrigação e controle ambiental, por exemplo, também podem afetar a geração de energia do sistema de reservatórios;

- Um canal de adução que conduz a água armazenada no reservatório para as turbinas. Normalmente, na entrada do canal de adução, existe uma estrutura composta por grades para evitar que objetos entrem no canal e atinjam as turbinas, danificando-as. Também há, na entrada do canal de adução, comportas que são fechadas para que as turbinas possam sofrer manutenção;

- Um vertedouro por onde a água em excesso é liberada. Ele é dimensionado levando-se em conta as vazões do passado e estudos estatísticos, baseados no histórico de vazões, de forma a prever uma possível grande cheia. No cálculo das cheias de projeto das usinas hidroelétricas brasileiras, utiliza-se a cheia decamilenar. Esta seqüência hidrológica é calculada considerando-se uma condição hidrológica (cheia) com probabilidade média de ocorrência em dez mil anos [31]. Como a água que passa pelo vertedouro não passa pelas turbinas e, portanto não gera energia elétrica, o vertimento é um desperdício de energia que deve ser evitado sempre que possível. Entretanto, é praticamente impossível evitar totalmente o vertimento, o qual, diga-se de passagem, é também uma operação de segurança,

[3] Estas restrições estabelecem que, em determinados períodos do ano, o volume máximo operativo do reservatório não pode ser atingido.

pois a água que não pode ser utilizada na geração de energia elétrica e que não pode ser armazenada no reservatório deve retornar ao manancial hídrico, a fim de não comprometer a estrutura física da barragem. Para este caso, o vertedouro, sendo responsável pela integridade da barragem, atua permitindo a passagem direta da água de montante para jusante; em outros casos, o vertedouro é utilizado para manter vazões mínimas a jusante do reservatório quando o nível de carga é baixo e as vazões turbinadas não são suficientes para satisfazer tais restrições;

- Uma casa de máquinas, onde estão localizados os geradores elétricos, as turbinas hidráulicas, os reguladores, os sistemas de controle e de proteção, os painéis e outros equipamentos responsáveis pela transformação de energia potencial hidráulica em energia elétrica. Um aspecto importante no projeto das usinas hidroelétricas, e que influencia o arranjo da casa de máquinas, é a determinação da turbina mais apropriada a cada tipo de aproveitamento [140]. A turbina hidráulica efetua a transformação da energia hidráulica (cinética e/ou potencial da água) em mecânica. Seu funcionamento, conceitualmente, é bastante simples: é o mesmo princípio da roda d'água que, movimentada pela água, faz girar um eixo mecânico. O gerador elétrico tem seu rotor acionado por acoplamento mecânico com a turbina e transforma energia mecânica em elétrica devido às interações eletromagnéticas ocorridas em seu interior. Em geral, são usados geradores síncronos, porque os sistemas de potência devem operar com frequência fixa. Apesar da grande variedade de modelos disponíveis atualmente, a maioria das turbinas pode ser classificada em dois grupos principais: turbinas de reação e turbinas de ação. A mais clássica turbina de ação é a turbina Pelton. Ela é utilizada em usinas hidroelétricas com quedas variando de 200m a 1.500m. As duas mais famosas turbinas de reação são a turbina Francis, que trabalha com quedas variando de 20m a 750m, e a turbina Kaplan, que trabalha com quedas inferiores a 70m;

- Um canal de fuga que conduz a água, descarregada pela usina, de volta ao manancial hídrico. O nível do canal de fuga (sua cota em relação ao nível do mar) vai definir, juntamente com o nível do reservatório, a altura de queda da água na usina.

2.3.2 Vazões Afluentes

A vazão afluente (afluência) é a vazão de água que chega ao reservatório através do manancial hídrico (rios, lagos, etc.)[4] e da área de drenagem da bacia hidrográfica que capta água e descarrega no reservatório. A produção energética de um sistema hidroelétrico depende das vazões afluentes às diversas usinas que compõem o sistema [58]. As séries de vazões afluentes representam o fluxo de água médio que flui em postos de medição durante determinados intervalos de discretização. No Brasil, há registros históricos das vazões afluentes às principais usinas hidroelétricas do Sistema Interligado Nacional desde 1931 [160]. Os registros das vazões afluentes observadas no passado são chamados de série histórica. Além dos dados do histórico de vazões, pode-se utilizar a Média de Longo Termo (MLT), que representa a média aritmética de cada mês das vazões naturais dos rios[5]. O setor elétrico tem adotado o termo vazão natural para identificar a vazão que ocorreria em uma seção do rio, se não houvesse interferências na sua bacia contribuinte, tais como regularizações de vazões realizadas por reservatórios, desvios de água, evaporações em reservatórios e usos consuntivos (irrigação, criação animal e abastecimento urbano, rural e industrial) [116]. A fim de ilustrar a forte irregularidade das vazões afluentes naturais, a Figura 2.4 apresenta o histórico de vazões afluentes naturais mensais da usina de Emborcação. Já a Figura 2.5 exibe as vazões afluentes mensais mínimas, médias e máximas da série histórica enfatizando mais uma vez a distribuição irregular da água em uma usina hidroelétrica do sistema brasileiro. Já a Figura 2.6 ilustra a MLT do histórico de vazões afluentes naturais das usinas de Emborcação e Itumbiara.

Nos estudos de otimização e simulação, é comum a existência de várias usinas interconectadas hidraulicamente. A interconexão hidráulica entre as usinas faz com que as vazões afluentes a um reservatório difiram sensivelmente de suas vazões afluentes naturais por causa da operação dos reservatórios de montante.

Considerando as usinas mostradas na Figura 2.7, as vazões afluentes às usinas 1 e 2, y_1 e y_2, respectivamente, são iguais às vazões afluentes naturais destas usinas, $y_{nat,1}$ e $y_{nat,2}$. A vazão afluente à usina 3, y_3, será igual à sua vazão afluente natural, $y_{nat,3}$, somente se a usina 1 for operada a fio d'água, ou seja, se o volume de água armazenado no reservatório da usina 1 for mantido constante. Visto que esta operação, geralmente, não é verificada, a vazão y_3 pode ser determinada genericamente como a soma da vazão defluente da usina 1, u_1, e da vazão

[4]Pode-se incluir as eventuais descargas (defluências) das usinas imediatamente a montante do reservatório.

[5]A vazão MLT de uma usina hidroelétrica em um determinado mês corresponde à média aritmética das vazões deste mês registrados no histórico, para essa usina.

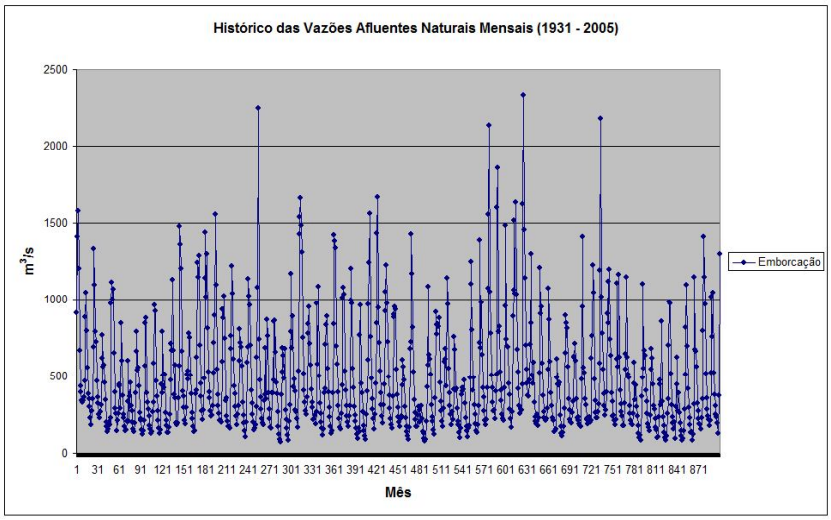

Figura 2.4: Histórico das vazões afluentes naturais mensais da usina de Emborcação.

incremental (lateral) da usina 3, $y_{inc,3}$. Os cálculos a seguir são realizados:

$$y_{inc,3} = y_{nat,3} - y_{nat,1} \tag{2.1}$$

$$y_3 = u_1 + y_{inc,3} \tag{2.2}$$

As vazões incrementais [6] não podem ser alteradas pela operação dos reservatórios e por isso são chamadas de vazões não-controláveis. A vazão não-controlável corresponde à vazão lateral gerada pela área de drenagem a montante da usina. O contrário ocorre para a vazão defluente da usina 1, que por isso é chamada de vazão controlável [7]. Desta forma, a usina 3 tem uma parcela de vazão afluente que é controlável e outra que é não-controlável.

Já a usina 4 recebe duas parcelas de vazões controláveis, provenientes das usinas 2 e 3. A vazão afluente na usina 4 pode ser determinada da seguinte forma:

$$y_{inc,4} = y_{nat,4} - y_{nat,2} - y_{nat,3} \tag{2.3}$$

$$y_4 = u_2 + u_3 + y_{inc,4} \tag{2.4}$$

[6] Esta vazão é determinada a partir do conhecimento das vazões afluentes naturais, uma vez que as medições de vazões em campo só determinam as vazões afluentes naturais.

[7] Assim, a vazão controlável é calculada como a soma das defluências das usinas imediatamente a montante.

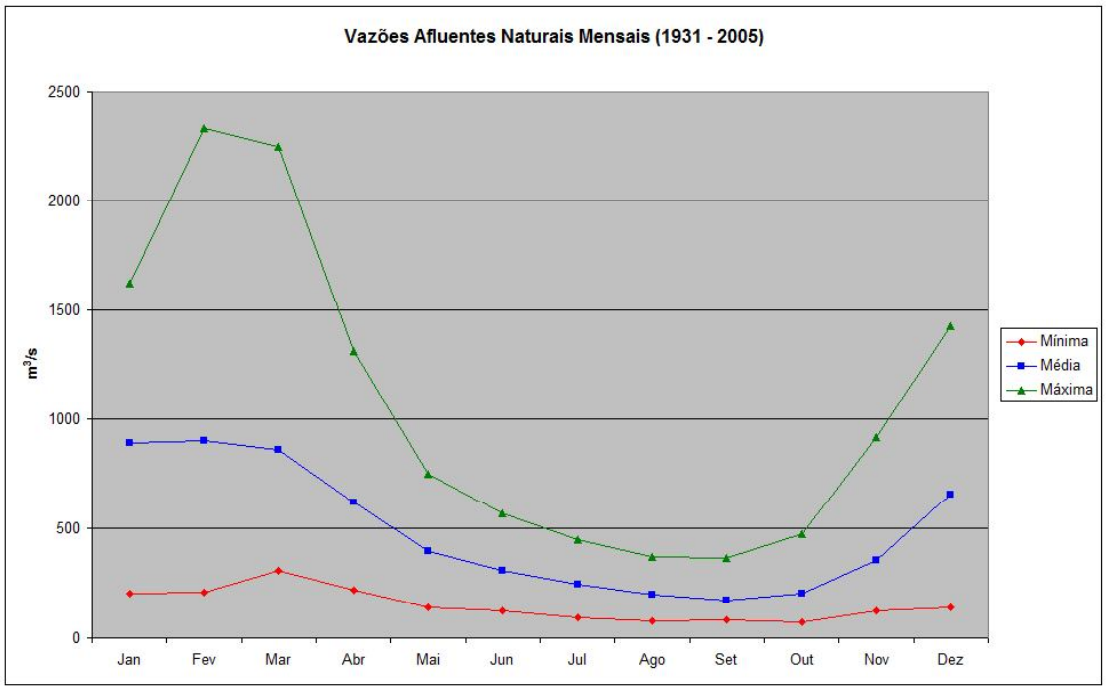

Figura 2.5: Vazões afluentes naturais mensais mínimas, médias e máximas da usina de Emborcação.

De forma geral, a vazão afluente de uma usina i qualquer, y_i, pode ser determinada utilizando-se as seguintes equações:

$$y_{inc,i} = y_{nat,i} - \sum_{j \in \Omega_i} y_{nat,j} \tag{2.5}$$

$$y_i = y_{inc,i} + \sum_{j \in \Omega_i} u_j \tag{2.6}$$

onde Ω_i é o conjunto formado pelas usinas que estão imediatamente a montante da usina i.

2.3.3 Altura de Queda

A altura de queda bruta, h_b, é a diferença de altura entre os níveis de água do reservatório e do curso do rio a jusante, ou do canal de fuga, e a altura de queda líquida, h_l, é a altura de queda bruta subtraída da perda de carga hidráulica, h_p. Desta forma, a altura de queda bruta de uma usina hidroelétrica é uma função dos níveis d'água de montante e jusante. Para estabelecer uma referência comum a todas as usinas hidroelétricas, estes níveis d'água são usualmente expressos em relação ao nível do mar. A Figura 2.8 ilustra a altura de queda bruta de uma usina

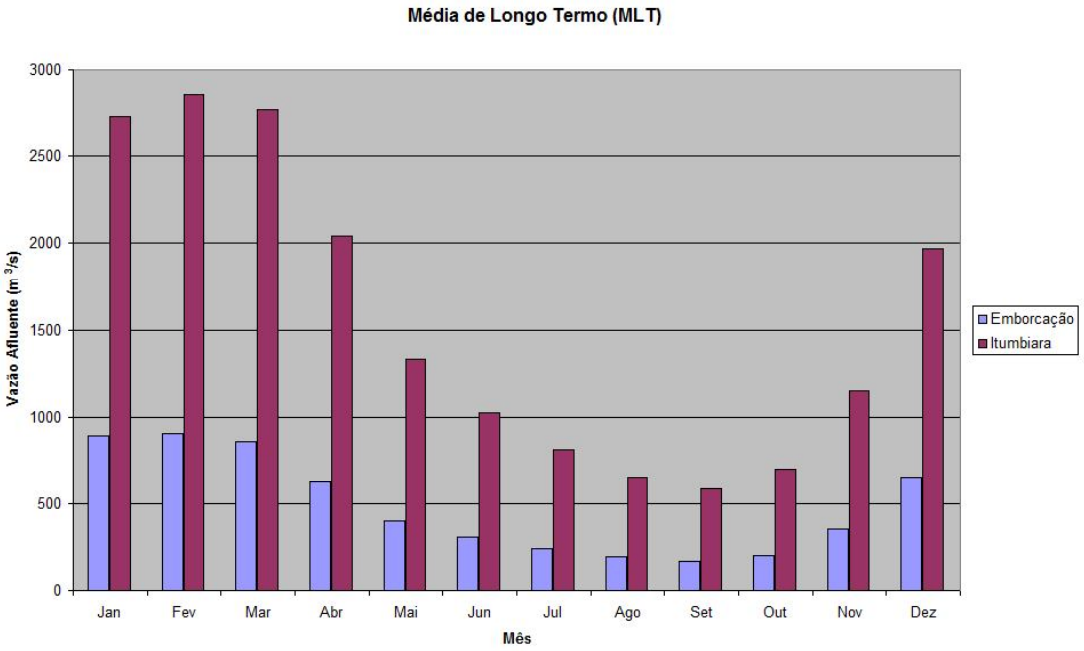

Figura 2.6: Média de longo termo das usinas de Emborcação e Itumbiara.

hidroelétrica.

Nível de Montante

O nível a montante, $h_{mon}(x)$, é uma função não-linear do volume total de água armazenado no reservatório, x, em hm^3. Costuma-se utilizar polinômios[8] para representar esta função[9]. Ela depende, basicamente, do relevo da região na qual o reservatório foi construído. A Figura 2.9 ilustra a variação do nível de montante do reservatório da usina de Emborcação entre os volumes mínimo e máximo operativos.

Nível de Jusante

Similarmente ao nível a montante, o nível a jusante, $h_{jus}(u)$, também é uma função não-linear, representada por polinômios e depende da vazão defluente da usina, u, em m^3/s. A forma

[8] A obtenção desses polinômios é feita a partir de estudos topográficos da região alagada pela construção da barragem. Estes estudos determinam o volume de alagamento para diferentes posições do nível d'água do reservatório.

[9] Os dados dos polinômios podem ser encontrados no cadastro das usinas da Eletrobrás.

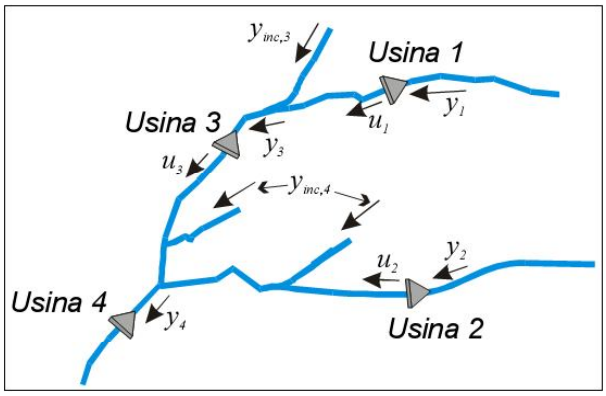

Figura 2.7: Usinas hidroelétricas e suas vazões afluentes.

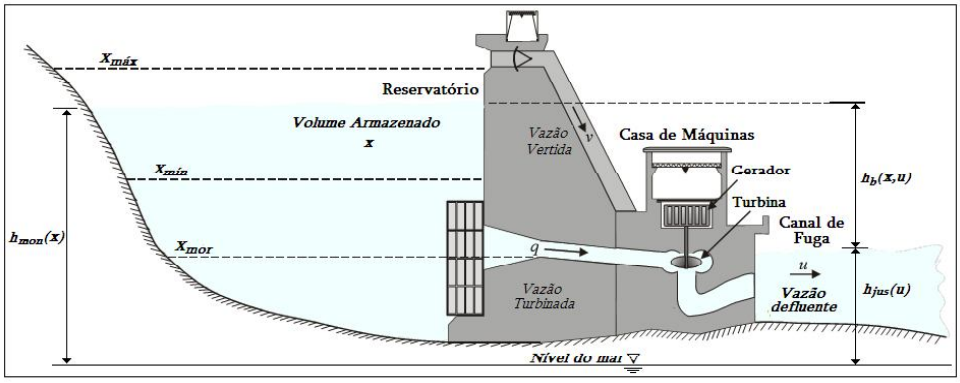

Figura 2.8: Altura de queda bruta de uma usina hidroelétrica.

desta função depende do canal de fuga da usina, do arranjo da usina (posição do vertedouro) e do relevo da região imediatamente a jusante do reservatório. A Figura 2.10 ilustra o gráfico da variação do nível de jusante da usina de Emborcação[10]. Cabe observar que, geralmente, o nível a jusante de uma usina varia pouco com a vazão defluente, sendo o tempo de resposta dependente da seção do rio a jusante da usina [58]. Assim, uma simplificação, comumente utilizada, consiste em admitir-se o nível de jusante da usina ao longo de um determinado período de tempo como sendo conhecido e igual a um valor médio. Este nível médio a jusante é chamado de nível médio do canal de fuga (ou cota média do canal de fuga), cf^{med}, e é usualmente fornecido como um dado da usina hidroelétrica.

[10]Os valores das vazões defluentes mínima e máxima correspondem ao menor e ao maior valor encontrado no histórico de vazões afluentes naturais, respectivamente.

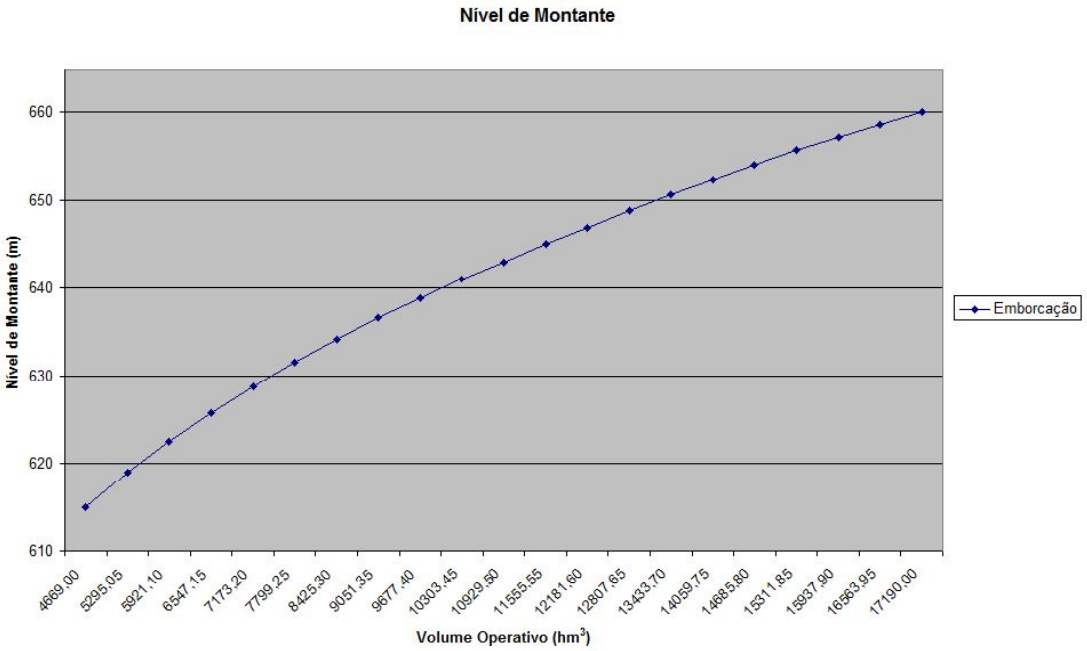

Figura 2.9: Variação do nível de montante para a usina de Emborcação.

A forma do polinômio $h_{jus}(u)$ mostra como a vazão defluente da usina pode influenciar de modo adverso sua operação. Quando a vazão defluente eleva-se, o nível a jusante também se eleva, reduzindo a altura de queda d'água. Em alguns casos, o nível de jusante não depende somente da vazão defluente da usina, mas também do volume armazenado no reservatório de uma usina hidroelétrica de jusante ou das águas de um rio de jusante. São os chamados efeitos de remanso.

O efeito de remanso caracteriza-se, então, pela influência que o volume armazenado em um reservatório de uma usina hidroelétrica de jusante[11] ou as águas de um rio de jusante podem ter sobre o nível do canal de fuga de uma usina hidroelétrica [160].

Um exemplo do efeito de remanso ocorre na usina de São Simão, última usina hidroelétrica localizada no rio Paranaíba. O nível de jusante desta usina depende não somente de sua vazão defluente, mas também do nível d'água da usina logo abaixo, Ilha Solteira. Ao analisar o posicionamento relativo destas usinas na Figura 2.11, observa-se que, conforme o reservatório de

[11] O efeito de remanso, em especial, causado sobre o nível do canal de fuga de uma usina, pela influência do volume armazenado em um reservatório de uma usina imediatamente a jusante, é conhecido como afogamento do canal de fuga da usina, ou simplesmente, diz-se que a usina a montante está afogada pela usina imediatamente a jusante. Esta situação ocorre em cascatas onde as usinas encontram-se próximas umas das outras.

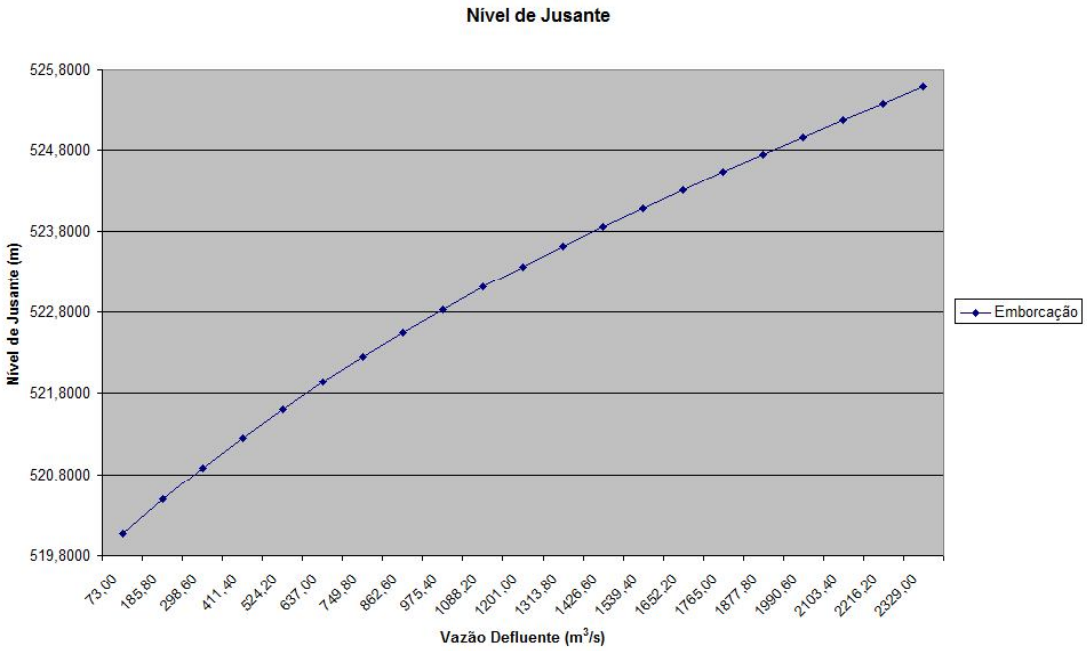

Figura 2.10: Variação do nível de jusante para a usina de Emborcação.

Ilha Solteira aumenta seu nível, o volume acumulado eleva o nível de jusante de São Simão, dificultando o escoamento de sua vazão defluente. Quanto mais cheio estiver o reservatório de Ilha Solteira, mais sensível é o efeito de remanso em São Simão.

Para determinar-se o nível a jusante de usinas com efeito de remanso, são ajustados polinômios *Defluência X Nível de Jusante (cota canal de fuga)* para diferentes níveis de montante (cota de montante) do reservatório imediatamente a jusante da usina em questão. Dessa forma, uma usina com efeito de remanso possui mais de um polinômio para a cota do canal de fuga, sendo cada um desses polinômios associados a uma cota do reservatório imediatamente a jusante. A cota do canal de fuga destas usinas é obtida por interpolação dos polinômios, de acordo com o nível d'água do reservatório que provoca o efeito de remanso [108].

Como ilustração, considera-se uma usina com efeito de remanso e o reservatório da usina imediatamente a jusante em uma determinada cota nr. Essa cota está situada entre duas cotas de referência $nr_i \leqslant nr \leqslant nr_{i+1}$, e a elas estão associados dois polinômios de nível de jusante $h_{jus}^{nr_i}(u)$ e $h_{jus}^{nr_{i+1}}(u)$, respectivamente. A Equação 2.7 descreve a determinação do polinômio do canal de fuga da usina com efeito de remanso $h_{jus}(u)$, via interpolação dos polinômios de referência.

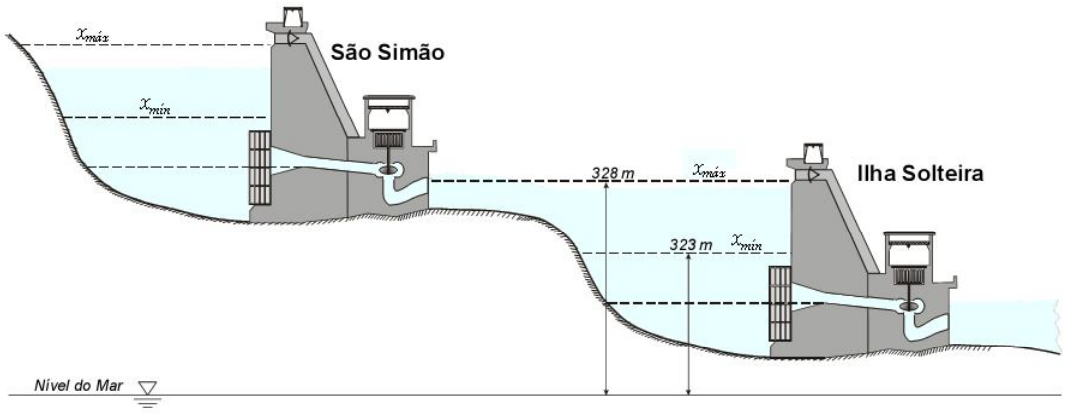

Figura 2.11: Efeito de remanso na usina hidroelétrica de São Simão.

Coeficientes do Polinômio $h_{jus}(u) = b_0 + b_1 \cdot u^1 + b_2 \cdot u^2 + b_3 \cdot u^3 + b_4 \cdot u^4$						
Usina Hidroelétrica	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	nr
São Simão	$3,15584 \cdot 10^2$	$2,3503 \cdot 10^{-3}$	$-1,38024 \cdot 10^{-7}$	$5,23395 \cdot 10^{-12}$	$-7,85937 \cdot 10^{-17}$	317
	$3,21730 \cdot 10^2$	$1,93288 \cdot 10^{-4}$	$1,13388 \cdot 10^{-7}$	$-6,6300 \cdot 10^{-12}$	$1,16693 \cdot 10^{-17}$	322
	$3,25156 \cdot 10^2$	$-2,02317 \cdot 10^{-4}$	$1,10615 \cdot 10^{-7}$	$-5,16993 \cdot 10^{-12}$	$7,89793 \cdot 10^{-17}$	325
	$3,27963 \cdot 10^2$	$-3,79015 \cdot 10^{-5}$	$4,89739 \cdot 10^{-8}$	$-1,68298 \cdot 10^{-12}$	$2,04098 \cdot 10^{-17}$	328
Ilha Solteira	$2,81 \cdot 10^2$	$0,0$	$0,0$	$0,0$	$0,0$	

Tabela 2.1: Polinômio $h_{jus}(u)$ para São Simão e Ilha Solteira.

$$h_{jus}(u) = h_{jus}^{nr_i}(u) + \frac{nr - nr_i}{nr_{i+1} - nr_i} \cdot (h_{jus}^{nr_{i+1}}(u) - h_{jus}^{nr_i}(u)) \tag{2.7}$$

A Tabela 2.1 apresenta os polinômios[12] *Defluência X Nível de Jusante (cota canal de fuga)* das usinas hidroelétricas de São Simão e Ilha Solteira. Pode-se observar o conjunto de polinômios que a usina de São Simão tem, e as cotas de referência de cada polinômio associadas ao reservatório da usina de Ilha Solteira. Estes polinômios são apresentados na Figura 2.12.

Esta figura mostra que para um mesmo valor de vazão defluente, o nível de jusante de São Simão eleva-se à medida que o nível de montante de Ilha Solteira eleva-se. Além disso, fazendo-se uma análise das inclinações das curvas, verifica-se que o nível de jusante de São Simão passa a

[12] O coeficiente b_0 é o termo independente do polinômio.

ser menos sensível à sua vazão defluente conforme o reservatório de Ilha Solteira enche-se. Isso ocorre porque à medida que o reservatório de Ilha Solteira enche, a água de seu reservatório passa a dificultar de forma mais intensa o escoamento da vazão defluente da usina de São Simão. Desta forma, quanto maior a cota do reservatório de Ilha Solteira, maiores são as cotas do canal de fuga de São Simão, e menor é o efeito da defluência de São Simão no aumento da cota do seu próprio canal de fuga.

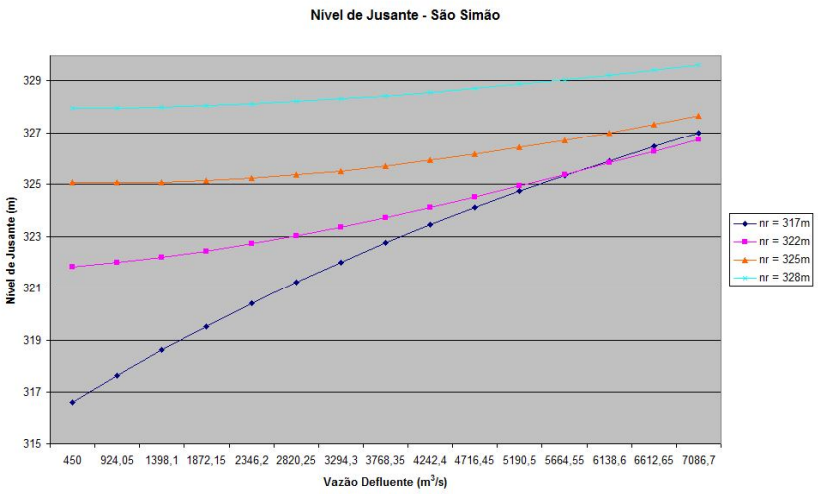

Figura 2.12: Polinômios do nível de jusante para a usina de São Simão.

Para determinar o nível de jusante da usina de São Simão em função de sua vazão defluente u, primeiramente deve-se identificar o nível a montante do reservatório da usina de Ilha Solteira. O valor deste nível é utilizado na escolha do polinômio $h_{jus}(u)$ de São Simão e só então, realiza-se o cálculo.

Se o nível de montante de Ilha Solteira é menor que 317m, utiliza-se apenas o polinômio especificado para nr_1; de forma semelhante, se o nível de montante de Ilha Solteira é maior ou igual a 328m, situação que só ocorre quando o volume de segurança é utilizado, utiliza-se apenas o polinômio especificado para nr_4. Na maioria das vezes, o nível de montante de Ilha Solteira não é igual a um dos níveis utilizados como referência para os polinômios de São Simão; nestes casos realiza-se interpolação linear entre os polinômios correspondentes aos níveis de referência que compreendem o valor do nível de montante de Ilha Solteira. Os cálculos são feitos da seguinte forma:

1. Calcula-se o nível de montante de Ilha Solteira utilizando o volume armazenado em seu

reservatório, x_{is}, e o polinômio $h_{mon}(x)$ desta usina. Sendo o valor deste nível denotado por nr (nível de referência), tem-se:

$$nr = h_{mon}(x_{is}) \tag{2.8}$$

2. Faz-se uma busca entre os níveis de referência dos polinômios de São Simão, nr_i, para i = 1,..., 4, e encontram-se os níveis tais que $nr_i \leqslant nr \leqslant nr_{i+1}$;

3. Calculam-se os níveis de jusante que ocorreriam para os polinômios referência i e $i+1$ para a vazão defluente u da usina de São Simão e realiza-se a interpolação linear utilizando-se a Equação 2.7.

As funções, $h_{mon}(x)$ e $h_{jus}(u)$, podem ser determinadas por medições realizadas no próprio local da barragem ou ajustadas por modelos computacionais capazes de descrever as características da região e processar modelos de hidrodinâmica. No Brasil, adotam-se polinômios de até quarto grau para representar os níveis a montante e jusante das usinas.

Assim, a altura de queda bruta passa a depender tanto do volume armazenado como da vazão defluente:

$$h_b(x, u) = h_{mon}(x) - h_{jus}(u) \tag{2.9}$$

Perda de Carga Hidráulica

Quando a água flui pela usina hidroelétrica, ela perde energia por causa do atrito contra seis estruturas principais da usina: a estrutura de adução, a entrada do canal de adução, o canal de adução, o caracol da turbina, a turbina e o tubo de sucção [160]. Esta perda de energia pode ser representada como uma diminuição na queda útil de água. As estruturas causadoras destas perdas estão ilustradas na Figura 2.13. A determinação da perda de carga, ou perda hidráulica, hp, é uma parte importante do projeto e depende largamente do material utilizado na tubulação: aço, concreto, ferro fundido, cimento amianto, dentre outros [140]. Dessa forma, a perda de carga representa a perda de carga hidráulica, em metros ou porcentagem da queda bruta, que a água sofre pelo percurso de adução, desde o reservatório até o tubo de sucção.

Embora todas as seis perdas supracitadas precisem ser consideradas em benefício da precisão do modelo, apenas as três primeiras são consideradas diretamente no cálculo das perdas hidráulicas. As outras são consideradas de forma indireta no cálculo da eficiência da turbina [160]. Nos

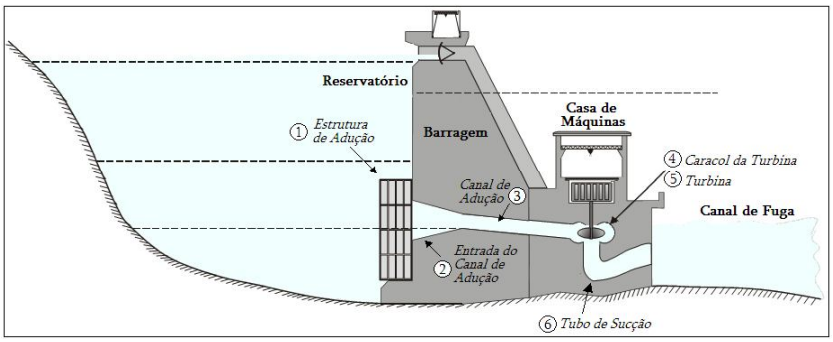

Figura 2.13: Estruturas causadoras das perdas hidráulicas em uma usina hidroelétrica.

modelos adotados pelo setor elétrico brasileiro, existem três representações da perda de carga hidráulica, geralmente dependentes dos objetivos da operação e dos dados disponíveis [98, 108]:

- Perda de carga constante: este é o modelo mais simples que pode ser adotado, sendo bastante usado, embora seja também o menos preciso. A perda de carga é considerada constante e igual a um valor médio. Este modelo é usado quando não há informação disponível para calcular as perdas hidráulicas de forma mais precisa. Isto ocorre nos estudos de expansão ou mesmo planejamento de médio prazo, onde outras fontes de incerteza são mais importantes para os estudos;

$$h_p = constante \tag{2.10}$$

- Perda de carga proporcional à altura de queda bruta: este modelo considera que a perda de carga depende da altura de queda bruta disponível. O parâmetro k_{pc} é um número positivo e depende da usina hidroelétrica em estudo. Assim, este modelo representa a perda de carga como uma porcentagem k_{pc} da altura de queda bruta da usina;

$$h_p = k_{pc} \cdot h_b \tag{2.11}$$

- Perda de carga proporcional ao quadrado da vazão turbinada: neste modelo a altura de perda depende do quadrado da vazão turbinada, mas não depende da altura de queda bruta. Como no modelo anterior, o parâmetro k_{pc} é um número positivo que depende da usina em estudo.

$$h_p = k_{pc} \cdot q^2 \tag{2.12}$$

A altura de queda líquida, h_l, é calculada pela diferença entre a altura de queda bruta, h_b, e a perda de carga hidráulica, h_p [108]. Trata-se da altura da água correspondente à energia efetivamente entregue ao conjunto turbina-gerador. Ressalta-se que, dependendo do modelo adotado, a altura de perda hidráulica pode ser constante, dependente da altura de queda bruta ou da vazão turbinada. Logo, a altura de queda líquida, h_l, passa a depender de todos esses parâmetros e pode ser genericamente escrita como:

$$h_l(x, q, v) = h_b(x, u) - h_p(x, q, v) \tag{2.13}$$

$$h_l(x, q, v) = h_{mon}(x) - h_{jus}(u) - h_p(x, q, v) \tag{2.14}$$

Para ilustrar o comportamento da função de altura de queda líquida, segundo variações da vazão defluente e do volume armazenado no reservatório, a Figura 2.14 mostra a variação da altura de queda líquida em função do aumento da defluência e do volume de água armazenado no reservatório da usina de Emborcação. São apresentadas quatro curvas, relacionadas a diferentes valores de defluências. Pelo formato das curvas, nota-se que, quanto maior o volume armazenado, maior a altura de queda líquida. Isto se deve à elevação do nível de montante devido ao aumento do volume de água armazenado no reservatório. Comparando-se a posição relativa entre as quatro curvas, observa-se que, para um mesmo valor de volume armazenado, a altura de queda líquida reduz-se conforme a vazão defluente eleva-se. Isto ocorre em função do aumento da defluência implicar na elevação do nível de jusante (nível do canal de fuga), o que diminui a altura de queda líquida. Entretanto, para algumas usinas como Ilha Solteira, não há influência da vazão defluente no cálculo do nível de jusante.

Perdas Energéticas por Evaporação nas Usinas Hidroelétricas

Dentro do contexto de escassez de energia, a avaliação das perdas nos reservatórios devido a evaporação, passa a ter um papel que pode ser importante, tanto nos estudos de planejamento, como na operação dos sistemas existentes [48]. Na operação energética das usinas hidroelétricas, modelos de evaporação são utilizados praticamente em duas fases:

- Os dados de evaporação do local de um reservatório para obtenção das séries de vazões naturais, utilizadas em estudos de simulação e otimização;

- Os dados de evaporação de um reservatório existente são utilizados para avaliar a perda

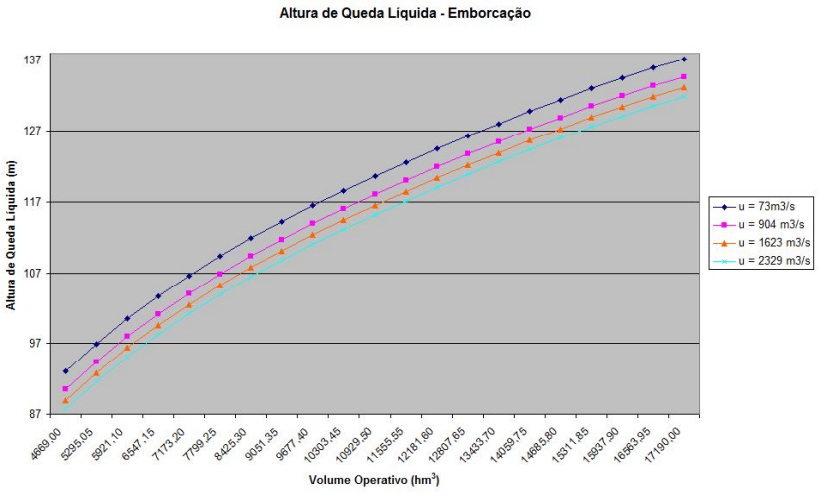

Figura 2.14: Altura de queda líquida para a usina de Emborcação.

energética que ocorre devido à evaporação, visto que a água evaporada não é utilizada na geração de energia elétrica.

Nos estudos energéticos com discretização mensal, as perdas por evaporação são modeladas por doze coeficientes de evaporação, ce_{jan}, ce_{fev}, ..., ce_{dez}, um para cada mês do ano, expressos em mm. Para obter o volume de água evaporado, x_{ev}, em hm^3, multiplica-se a área do espelho d'água do reservatório, a_e, pelo coeficiente de evaporação do mês desejado.

No Brasil, similarmente aos níveis d'água de montante e jusante de uma usina hidroelétrica, a área do espelho d'água também é especificada por um polinômio de no máximo quarto grau. Este polinômio especifica a área do espelho d'água do reservatório, a_e, em km^2, a partir do nível de montante, em metros.

Desta forma, uma vez especificado o volume armazenado no reservatório, x, primeiramente determina-se o nível de montante, $h_{mon}(x)$, e na seqüência determina-se a área do espelho d'água, a_e. O produto entre a área e o coeficiente de evaporação especifica o volume evaporado x_{ev} em hm^3 [160]:

$$x_{ev} = 10^{-3} \cdot ce_{mes} \cdot a_e(h_{mon}(x)) \tag{2.15}$$

2.3.4 Casa de Máquinas

A casa de máquinas de uma usina hidroelétrica é composta por conjuntos de unidades geradoras (turbina/gerador) com características semelhantes. As características principais de uma casa de máquinas e de suas unidades geradoras são descritas a seguir [98].

- N_c: número de conjuntos de unidades geradoras da usina;
- N_j: número de unidades geradoras do conjunto j ($1 \leq j \leq Nc$);
- $Tipo_j$: tipo da turbina do conjunto j (Francis, Kaplan ou Pelton);
- $P_{ef,j}$: potência efetiva de cada unidade geradora do conjunto j. É definida como a máxima potência ativa possível de ser gerada, em regime permanente, na unidade geradora a partir da sua entrada em operação;
- $h_{ef,j}$: altura de queda efetiva de cada unidade geradora do conjunto j. É definida como a menor altura de queda líquida sob a qual a unidade geradora, em operação, desenvolve a sua potência efetiva;
- $q_{ef,j}$: engolimento efetivo de cada unidade geradora do conjunto j. É definido como a vazão turbinada que submetida à altura de queda efetiva produz a potência efetiva.

A partir dos conceitos de engolimento efetivo e potência efetiva de cada unidade geradora de um conjunto e do número de conjuntos que uma usina possui, podem ser definidos os conceitos de engolimento efetivo, q_{ef}, e potência efetiva, p_{ef}, da usina hidroelétrica:

$$q_{ef} = \sum_{j=1}^{N_c} (N_j \cdot q_{ef,j}) \tag{2.16}$$

$$p_{ef} = \sum_{j=1}^{N_c} (N_j \cdot p_{ef,j}) \tag{2.17}$$

2.3.5 Engolimento Máximo e Potência Máxima

O conceito de engolimento máximo está associado à geração da potência máxima de uma unidade geradora e, conseqüentemente, da potência máxima produzida por uma usina.

A potência máxima de uma unidade geradora ($p_{max,j}$) é definida como o maior valor de potência ativa de saída que pode ser produzida, para uma determinada altura de queda líquida,

levando-se em conta as limitações da turbina e do gerador. O engolimento máximo[13]($q_{max,j}$) de uma unidade geradora é definido como a maior vazão turbinada que, numa dada altura de queda líquida, produz a potência máxima da unidade. Juntamente com o cálculo do engolimento máximo, também é realizado o cálculo da máxima potência que pode ser gerada pela usina hidroelétrica.

Os conceitos discutidos a seguir referem-se à análise de uma única unidade geradora. Porém, esses conceitos são extensíveis à análise de uma usina hidroelétrica composta por conjuntos de unidades geradoras. Para cada altura de queda líquida, uma unidade geradora é capaz de produzir uma potência máxima à custa de uma turbinagem (engolimento) máxima.

No entanto, o engolimento máximo de uma unidade geradora deve representar as limitações não somente da turbina, mas também do gerador. O gerador possui uma potência máxima que pode ser gerada, denominada potência efetiva ou potência nominal, em MW, denotada por $p_{ef,j}$. Uma vez especificada a altura de queda líquida, para assegurar a integridade do gerador, deve-se garantir que a potência gerada pela turbina não seja maior que a potência efetiva do gerador. Dependendo da altura de queda líquida, diferentes situações podem ocorrer:

- Se a altura de queda líquida é muito baixa, mesmo com as palhetas completamente abertas, a potência gerada pela turbina pode ser menor que a potência efetiva do gerador. Neste caso, a máxima potência gerada pelo conjunto é a potência da turbina com abertura de 100%; o gerador não pode gerar sua potência efetiva porque a turbina não é capaz de fornecê-la. Diz-se que nesta situação a turbina limita a operação do conjunto;

- Se a altura de queda líquida é alta, a potência gerada pela turbina com as palhetas completamente abertas pode ser maior que a potência efetiva do gerador. Neste caso, a máxima potência gerada pelo conjunto é a potência efetiva do gerador; as palhetas da turbina não podem ser abertas a 100%. Diz-se que nesta situação o gerador limita a operação do conjunto;

- Há ainda um ponto de operação que separa as duas situações descritas acima. Para determinar este ponto, deve-se começar a operar a turbina com as palhetas completamente abertas a partir de sua queda mínima; nesta condição a turbina provavelmente será capaz de gerar uma potência menor que a potência efetiva do gerador. Mantendo-se as palhetas

[13]O engolimento máximo de uma turbina é definido pela vazão turbinada quando suas palhetas estão completamente abertas (abertura igual a 100%).

completamente abertas e progressivamente aumentando a queda líquida, a potência gerada pela turbina vai aumentar até sua potência gerada ser igual à potência efetiva do gerador. A altura de queda líquida, em m, referente a esta situação, é chamada de altura de queda efetiva. Ao aumentar ainda mais a altura de queda líquida, será necessário fechar as palhetas da turbina, reduzindo seu engolimento máximo e fazendo sua potência gerada ser constante e igual à potência efetiva do gerador.

As situações descritas acima podem ser visualizadas na Figura 2.15. No gráfico de engolimento máximo, são distinguidas as regiões, onde a turbina e o gerador limitam a operação do conjunto, e que o ponto divisor das duas regiões é o valor da altura de queda líquida efetiva. Na região onde a turbina limita a operação do conjunto, o engolimento máximo equivale à operação da turbina com as palhetas totalmente abertas. Como a altura de queda é relativamente baixa, a potência gerada pela turbina é menor que a potência efetiva do gerador. Logo, a máxima potência do conjunto é a máxima potência que a turbina pode gerar, tal como indicado no gráfico da potência máxima do conjunto. Na região onde o gerador limita a operação do conjunto, a turbina é obrigada a fechar parcialmente as palhetas, o que reduz seu turbinamento máximo, para que a potência fornecida não exceda a potência efetiva do gerador.

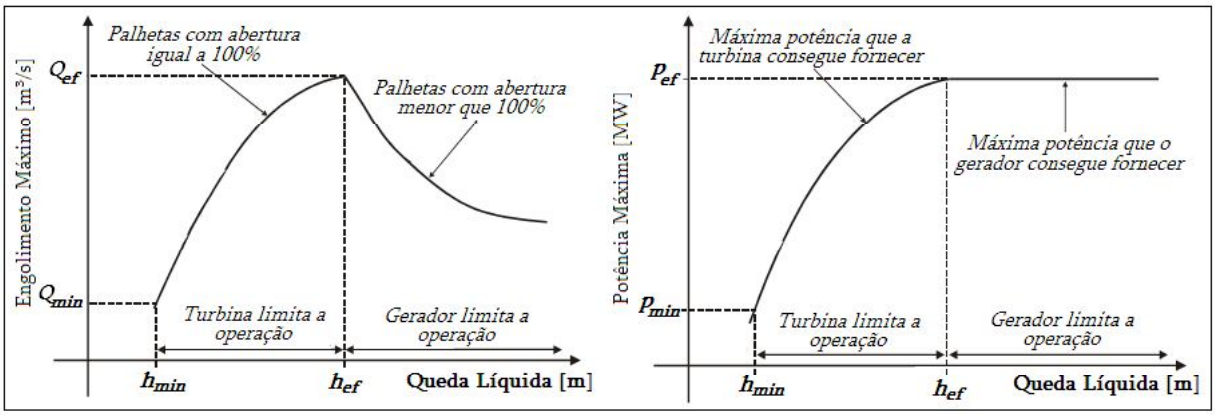

Figura 2.15: Engolimento máximo e potência máxima de um conjunto turbina/gerador em função da altura de queda líquida.

Observa-se também que, para uma altura de queda líquida menor que a altura de queda efetiva, a unidade geradora não consegue atingir sua potência efetiva e, além disso, a turbina tem um engolimento máximo menor que seu engolimento efetivo. Porém, para uma altura de queda líquida maior que a altura de queda efetiva, a unidade geradora atinge a potência efetiva

e, mais uma vez, tem seu engolimento máximo menor que o engolimento efetivo, pois o gerador não pode receber toda a potência mecânica disponível na turbina caso o engolimento seja maior. Isso significa que, para quedas maiores que a queda líquida efetiva, a unidade geradora produz sua potência efetiva e economiza água do reservatório, pois o engolimento máximo necessário é tanto menor quanto maior for a altura de queda líquida.

Nos modelos adotados pelo setor elétrico brasileiro, existem duas formas de representar a potência máxima e o engolimento máximo em função da altura de queda líquida [98]. Uma forma é a representação detalhada, obtida a partir do ajuste dos polinômios que refletem as medições de potência máxima e engolimento máximo para diversos valores de altura de queda líquida das unidades geradoras. Esses polinômios estão associados aos dados de uma unidade geradora isolada. Para obter-se os valores totais da usina hidroelétrica, deve-se multiplicar este valor pelo número de unidades geradoras de cada conjunto da usina em questão e, posteriormente, efetuar-se um somatório de todos os conjuntos de unidades geradoras da usina. A outra forma, adotada neste trabalho, é a representação simplificada.

Utilizando-se a representação simplificada, o engolimento máximo de uma unidade geradora j pode ser representado pela equação:

$$q_{max,j} = q_{ef,j} \cdot \left(\frac{h_l}{h_{ef,j}} \right)^{\alpha} \tag{2.18}$$

onde α é uma constante dada por:

$$\alpha = \begin{cases} 0,5 & \text{se} \quad h_l < h_{ef,j} \text{ e } Tipo_j = \text{(Francis ou Pelton)} \\ 0,2 & \text{se} \quad h_l < h_{ef,j} \text{ e } Tipo_j = \text{(Kaplan)} \\ -1,0 & \text{se} \quad h_l \geqslant h_{ef,j} \end{cases} \tag{2.19}$$

O engolimento máximo da usina é dado pelo somatório dos engolimentos máximos de cada conjunto turbina/gerador que constitui a usina, ou seja:

$$q_{max} = \sum_{j=1}^{N_c} (N_j \cdot q_{max,j}) \tag{2.20}$$

Ainda de acordo com a representação simplificada, a potência máxima de cada unidade

geradora j é representada pela equação:

$$p_{max,j} = p_{ef,j} \cdot \left(\frac{h_l}{h_{ef,j}} \right)^{\beta} \tag{2.21}$$

onde β é uma constante dada por:

$$\beta = \begin{cases} 1,5 & \text{se} \quad h_l < h_{ef,j} \text{ e } Tipo_j = \text{(Francis ou Pelton)} \\ 1,2 & \text{se} \quad h_l < h_{ef,j} \text{ e } Tipo_j = \text{(Kaplan)} \\ 0,0 & \text{se} \quad h_l \geqslant h_{ef,j} \end{cases} \tag{2.22}$$

A potência máxima da usina hidroelétrica corresponde ao somatório das potências máximas de cada conjunto de unidades geradoras que constitui a usina:

$$p_{max} = \sum_{j=1}^{N_c} (N_j \cdot p_{max,j}) \tag{2.23}$$

Um conceito muito utilizado na análise da capacidade de engolimento de uma usina, frente à magnitude das afluências que chegam ao seu reservatório, é a submotorização de sua casa de máquinas. A submotorização está relacionada à baixa capacidade de engolimento quando comparada a valores médios das vazões afluentes que chegam ao reservatório. Usinas submotorizadas costumam causar o efeito chamado de estrangulamento da cascata. A baixa capacidade de engolimento da usina obriga o vertimento do excedente de água que chega à usina.

2.3.6 Geração Hidráulica Máxima Contínua

A geração hidráulica máxima contínua é definida como a máxima potência que pode ser gerada continuamente pela usina, considerando a potência máxima relacionada ao volume armazenado no reservatório (p_{max}), o fator de capacidade de geração máxima contínua (fc_{max}), a taxa de indisponibilidade forçada (tax_{if}) e a taxa de manutenção programada (tax_{man}). A potência máxima relacionada ao volume do reservatório é a máxima potência ativa que pode ser produzida para um determinado valor de altura de queda líquida, limitada pelo gerador e pela turbina[14]. O fator de capacidade de geração máxima contínua é definido como a proporção

[14]Portanto, a potência máxima leva em consideração a perda de potência ativa da usina devido à redução da altura de queda líquida, provocada pelo deplecionamento do reservatório.

da máxima carga que a usina pode atender em relação à sua potência efetiva[15]. A taxa de indisponibilidade forçada indica a porcentagem de tempo em que a usina fica desligada devido a falhas em suas unidades geradoras. A taxa de manutenção programada indica a porcentagem de tempo em que a usina fica desligada para manutenção de suas unidades geradoras. A geração hidráulica máxima contínua limita a potência máxima de uma usina, pois a usina não pode garantir a potência máxima em todo o intervalo do horizonte de planejamento, devido ao fator de carga máximo, à indisponibilidade forçada e ao cronograma de manutenção. A geração hidráulica máxima contínua é dada por [160]:

$$p_{max,cont} = p_{max} \cdot fc_{max} \cdot (1 - tax_{if}) \cdot (1 - tax_{man}) \tag{2.24}$$

2.3.7 Função de Geração Hidráulica

Apresenta-se a seguir, a função de geração para uma usina hidroelétrica. No processo de geração de energia elétrica, a energia potencial da água armazenada no reservatório é transformada em energia cinética e energia de pressão dinâmica pela passagem da água através da tubulação. Ao fazer o acionamento da turbina, essa energia é convertida em energia mecânica, por sua vez transmitida ao gerador conectado à turbina em questão. No gerador, a energia mecânica é transformada em energia elétrica, a qual passa por uma subestação elevadora de tensão, sendo então injetada no sistema de transmissão que a fará chegar aos centros consumidores.

A quantidade de energia elétrica produzida por certo volume de água é o resultado da transformação da energia potencial desta massa de água em energia elétrica. A função de produção hidráulica é um componente a partir do qual se quantifica a geração de energia. Esta pode ser deduzida a partir da energia potencial armazenada no reservatório. Inicialmente, define-se a variação de energia potencial, medida em Joules (J), em relação a uma variação de massa de água no reservatório:

$$de_p = dm \cdot g \cdot h \tag{2.25}$$

onde dm é uma variação incremental da massa de água armazenada no reservatório, g é a aceleração da gravidade, e h é a diferença entre os níveis de montante e de jusante, provocada pela barragem.

[15] O fator de capacidade de geração máxima contínua também é definido como o multiplicador da potência efetiva, de forma a fornecer a potência máxima contínua de operação da usina, excluídas as taxas de indisponibilidade forçada e manutenção programada.

Essa variação de massa pode ser convertida em variação de volume, utilizando o peso específico da água, $\rho = 1000\text{Kg/m}^3$:

$$\rho = \frac{m}{v} \rightarrow dm = \rho \cdot dv \tag{2.26}$$

A variação do volume, considerando-se que ocorra num intervalo de tempo infinitesimal, pode ser convertida em vazão e, assim, pode-se escrever a equação da variação de energia potencial em função da vazão retirada do reservatório para a geração de energia.

$$q = \frac{dv}{dt} \rightarrow dv = q \cdot dt \tag{2.27}$$

$$de_p = \rho \cdot q \cdot dt \cdot g \cdot h \tag{2.28}$$

Adotar-se-á, por simplificação, que a usina possui somente uma unidade geradora. A transformação de energia potencial, e_p, em energia elétrica, e_e, depende do rendimento, η, do processo de conversão de energia:

$$e_e = \eta \cdot e_p \tag{2.29}$$

Este rendimento, η[16], refere-se ao rendimento combinado da turbina e do gerador. Dependendo dos dados disponíveis e da precisão desejada ou requerida pelo modelo da usina, o rendimento pode ser modelado de diferentes modos. Para estudos de médio e curto prazo com discretização mensal, usualmente adota-se η constante e igual ao rendimento médio η_{med}. Portanto,

$$de_e = \eta^{med} \cdot \rho \cdot q \cdot dt \cdot g \cdot h \tag{2.30}$$

Transformando a energia em potência ($p = \frac{de_e}{dt}$):

$$p = \eta^{med} \cdot \rho \cdot q \cdot g \cdot h \tag{2.31}$$

No entanto, o banco de dados da Eletrobrás não apresenta o rendimento médio das usinas, mas sim um parâmetro chamado de produtibilidade específica, k, dado pela equação abaixo:

$$k = \frac{\rho \cdot g}{10^6} \cdot \eta^{med} \tag{2.32}$$

[16]Em uma unidade geradora hidroelétrica, o processo de transformação da energia cinética e hidrodinâmica em energia elétrica está sujeito a um rendimento das máquinas envolvidas no processo.

onde o valor 10^6 é o fator de conversão de W para MW, para que a potência dada seja expressa em MW.

Assim a função de geração hidráulica resulta:

$$p = k \cdot h \cdot q \tag{2.33}$$

onde a altura de queda considerada é a altura de queda líquida do reservatório, ou seja, a altura de queda bruta menos as perdas de carga, a fim de refletir, por exemplo, a perda de carga hidráulica que ocorre, principalmente, pelo atrito entre a água e as canalizações do canal de adução.

Esta função de produção hidráulica determina a potência instantânea obtida a partir de uma usina com o seu reservatório, armazenando um volume x, uma unidade geradora "engolindo" (turbinando) uma vazão q e a usina defluindo uma vazão u, que pode ser diferente de q caso esteja havendo vertimento na usina.

Em resumo, a potência gerada numa usina hidroelétrica é uma função da vazão turbinada e da altura de queda líquida, que por sua vez, é uma função não-linear do volume armazenado, da vazão defluente e da vazão turbinada[17].

Ao considerar-se a hipótese operativa de que, toda a vazão defluente da usina seja turbinada enquanto o engolimento máximo não é atingido, o vertimento será uma vazão excedente, ou seja, ocorrerá somente no caso da vazão defluente necessária ser maior que o engolimento máximo da usina. Desta forma, a função de geração hidráulica pode ser escrita como uma função da vazão defluente e do volume.

A análise da função de produção hidráulica destaca dois pontos importantes [37, 38, 113]:

- Para um determinado valor de volume x, a função de produção é crescente em relação à u, enquanto $u < q_{max}$. Acima deste valor, a usina passa a verter e a função de geração decresce devido à diminuição da altura de queda líquida disponível. A altura de queda líquida diminui devido à consideração de volume constante aliada ao aumento da defluência da usina, o que eleva a cota do canal de fuga (nível de jusante);

- A produtividade das usinas aumenta com o volume armazenado nos reservatórios (aumento

[17]Dependendo do modelo adotado para representar a perda de carga (perda hidráulica), a altura de queda líquida pode variar conforme a turbinagem da usina.

da altura de queda líquida).

2.4 Sistemas Termoelétricos

O processo fundamental de funcionamento das usinas termoelétricas baseia-se na conversão de energia térmica em energia mecânica e esta em energia elétrica. A conversão de energia térmica em mecânica é feita com o uso de um fluido que produzirá, em seu processo de expansão, trabalho em turbinas térmicas. O acionamento mecânico de um gerador elétrico acoplado ao eixo da turbina converte energia mecânica em elétrica.

O modelo de um sistema termoelétrico deve considerar as diversas classes de usinas termoelétricas classificadas conforme os custos de operação (tipos de combustíveis), restrições de geração mínima e máxima de cada usina, tempo de ligamento e desligamento, restrições de rampa de carga, eficiência das caldeiras e dos conjuntos turbina/gerador, indisponibilidade forçada e programada, etc.

O custo total de operação de um sistema termoelétrico inclui o custo de compra do combustível e os custos de mão de obra, estoques de combustível e manutenção. Como os custos de mão de obra, estoques e manutenção são independentes da geração de energia, assume-se que estes custos são fixos [31].

O custo de operação de uma usina termoelétrica é modelado como uma função convexa e crescente da geração térmica, sendo em geral aproximado por um polinômio de segundo grau. A Figura 2.16 apresenta a forma típica da função de custo total da operação de uma usina termoelétrica $\psi(.)$.

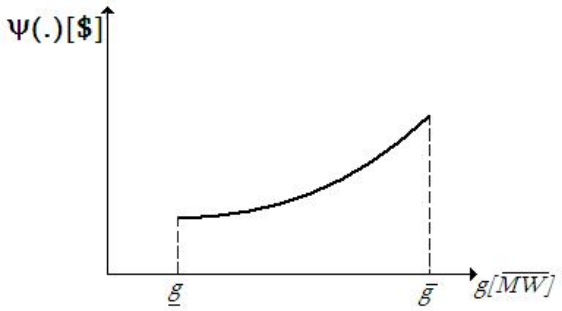

Figura 2.16: Aspecto típico da função de custo de operação de uma usina termoelétrica.

Qualquer que seja o tipo de usina termoelétrica, sua representação nos estudos de planejamento da geração é feita pelas suas características físicas e restrições operativas, tais como potência máxima, combustível usado, consumo específico, taxa de tomada de carga e nível mínimo operativo [58].

2.5 Considerações Finais

Neste capítulo, foram apresentados os modelos energéticos dos sistemas hidroelétricos e termoelétricos, necessários para o entendimento da modelagem energética dos sistemas hidrotérmicos de geração, como é o caso do sistema brasileiro de produção de energia elétrica. Foram enfatizadas as características operativas e energéticas, a fim de deixar o leitor familiarizado com os termos, com as formulações e com as magnitudes das grandezas hidráulicas e energéticas envolvidas.

No próximo capítulo é apresentado o planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração. Para isto, utiliza-se o modelo energético explicitado neste capítulo.

Capítulo 3

Planejamento da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos de Geração

3.1 Considerações Iniciais

O planejamento da operação de um sistema de geração de energia elétrica (seja ele termoelétrico, hidroelétrico ou hidrotérmico) busca determinar quais usinas geradoras e os respectivos níveis de geração que devem ser utilizados no atendimento à demanda (mercado de energia elétrica), em cada intervalo do horizonte de planejamento, de forma que o custo operativo associado ao uso dessas unidades seja o mínimo possível, devendo levar em consideração as diversas restrições relacionadas ao desempenho das unidades geradoras, bem como algumas restrições do sistema eletroenergético tais como o requisito de reserva, o comportamento do sistema de transmissão, etc.

A dificuldade em planejar a operação de sistemas geradores de energia elétrica evoluiu com o crescimento da capacidade de geração, e com o uso cada vez mais freqüente desta forma de energia, para o funcionamento e desenvolvimento das sociedades modernas. Os primeiros sistemas elétricos de potência forneciam energia basicamente para a iluminação, e eram constituídos por apenas uma unidade geradora, térmica ou hidráulica [90]. Os sistemas geravam a energia solicitada; na eventualidade de não conseguirem atender a demanda reprimiam o consumo, isto é, "cortavam carga". Pode-se afirmar que inexistia o problema do planejamento da operação. Rapidamente, a energia elétrica conquistou enorme importância para as sociedades industrializadas. As fábricas substituíram as máquinas a vapor por motores elétricos, e um grande número

de equipamentos movidos a eletricidade mostrou-se indispensável às comunidades. Em função desta realidade, os sistemas de geração de energia elétrica foram obrigados a crescer muito, baixar os custos de produção, e aumentar a confiabilidade, para garantir a continuidade do suprimento. O planejamento da operação dos sistemas de geração de energia elétrica assumiu grande importância, e foi se tornando progressivamente mais complexo.

Quando os sistemas geradores passaram a operar mais de uma unidade, tornou-se necessário descobrir a forma mais eficiente de coordenar o uso do equipamento. Por exemplo, se existiam várias máquinas térmicas, os profissionais do planejamento viram-se diante de questões como: quantas máquinas devem ser ligadas ao mesmo tempo, quando as máquinas devem ser ligadas, quanta energia deve gerar cada máquina, e quando é conveniente parar máquinas para manutenção.

A utilização simultânea de unidades geradoras térmicas e hidroelétricas levanta outras questões, além daquelas típicas de sistemas puramente térmicos. O custo de geração associado à produção hidroelétrica praticamente independe da quantidade de energia produzida. No entanto, os recursos hidroelétricos de geração (água) são limitados e, se o sistema hidroelétrico é capaz de armazenar água, é preciso avaliar, continuamente, a conveniência de utilizar estes recursos, evitando gerar nas usinas termoelétricas; ou armazenar água, na expectativa de mais benefício no futuro. O planejamento se complica ainda mais quando existem várias usinas hidroelétricas. A localização e posição relativa dessas usinas podem ter um papel importante, especialmente quando elas estão construídas em uma mesma bacia hidrográfica, sendo necessário contemplar o acoplamento delas, o que muitas vezes é dificultado por retardos na propagação das ondas de água.

O capítulo inicia com a apresentação resumida do planejamento da operação de sistemas termoelétricos e hidroelétricos, de forma a introduzir o planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos. Apresenta-se também os horizontes, a formulação, os indicadores econômicos e o cálculo da energia armazenada envolvido no planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos. Posteriormente, apresenta-se sucintamente os modelos computacionais propostos, enfatizando-se as condições de operação energética envolvidas nos estudos de otimização e simulação. O capítulo finaliza com a apresentação da rede hidráulica, a qual representa o planejamento da operação como um problema de fluxo em rede.

3.2 Planejamento da Operação de Sistemas Termoelétricos

O planejamento da operação de sistemas termoelétricos, conhecido também como Despacho Econômico Termoelétrico (DET), visa minimizar os custos operativos das usinas térmicas, pela redução do consumo de combustíveis.

O planejamento da operação em sistemas termoelétricos é um problema desacoplado no tempo, ou seja, uma decisão de operação em um instante de tempo não traz conseqüências ao custo da operação dos estágios seguintes. O fornecimento da energia elétrica depende apenas da capacidade de geração de cada unidade térmica. Vale ressaltar que os custos das unidades não exercem influência entre si, isto é, o custo da operação de uma unidade independe do nível de geração ou disponibilidade de outra unidade.

Em sua versão mais simples, o problema pode ser resolvido ordenando-se as unidades em função de seus custos marginais de operação, atendendo-se cada MWh adicional de carga com a unidade disponível de menor custo incremental. Nos sistemas térmicos, em geral, basta o conhecimento dos custos de operação e as capacidades de geração de cada usina para se calcular o despacho ótimo. Entretanto, vários fatores adicionais tornam o problema real mais complexo, tais como: custos de entrada em operação das usinas, limites nas taxas de tomada de carga dos geradores, limitações de transmissão, restrições ambientais, tempo de resfriamento das usinas, entre outros.

Como o DET pode ser decomposto no tempo, o problema de otimização do sistema térmico para um horizonte de T intervalos pode ser solucionado pela otimização de T subproblemas. O custo total de geração térmica, neste horizonte, será a soma do custo da geração ótima de cada um dos T subproblemas.

3.3 Planejamento da Operação de Sistemas Hidroelétricos

Em sistemas puramente hidroelétricos, os custos de operação envolvidos podem estar associados ao pagamento de "royalties" pela utilização da água estocada nos reservatórios e pela área inundada pela barragem, ou a custos de penalização que refletem o não atendimento ao mercado de energia. Em geral, a operação de sistemas hidroelétricos considera funções compostas de múltiplos objetivos como maximização do armazenamento no final do horizonte, minimização de vertimentos, ou a distribuição eqüitativa da reserva de potência ao longo do período de estudo,

entre outros.

Visto que o planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos incorpora às características do planejamento da operação de sistemas hidroelétricos a não-linearidade da função de custo de operação das usinas termoelétricas, estas características serão apresentadas na seção a seguir.

3.4 Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos

Em sistemas hidrotérmicos com pequena participação hidroelétrica, onde este tipo de geração não tem muita influência, embora o objetivo primordial desta geração permaneça sendo de substituição da geração de origem térmica, há uma abordagem diferente daquela em sistemas com maior peso da geração hidroelétrica. Este enfoque diferente advém das prioridades em cada caso, já que a existência de uma maior geração elétrica por parte das usinas térmicas leva a uma preocupação maior com saídas forçadas, com a contínua alocação da geração entre as unidades para minimizar custos e mesmo com o emprego ótimo de energia hidroelétrica para cobrir as rápidas variações de carga, o que seria custoso efetuar com usinas termoelétricas.

Deve-se ressaltar que, em geral, este tipo de sistema está situado em regiões onde não há muita abundância de água e os recursos hídricos servem a múltiplos objetivos, tão ou mais importantes, que restringem sua utilização pelas hidroelétricas, tais como, navegação, irrigação, controle de cheias, recreação, abastecimento de água, etc.

Dessa forma, nestes sistemas com pouca participação hidráulica na geração de energia elétrica, o planejamento da operação é feito baseado na utilização maciça de geração termoelétrica, deixando a hidroelétrica como uma complementação. Objetiva-se atender a ponta com as usinas hidroelétricas, substituindo as termoelétricas mais caras e cobrindo as variações rápidas de carga [16].

Em sistemas hidrotérmicos com grande participação de geração hidroelétrica, como é o caso do sistema brasileiro, a geração de origem hidroelétrica, que tem custo de "combustível" nulo [1], é complementada por geração de origem termoelétrica, que tem custo de combustível elevado. Portanto, o objetivo econômico do planejamento da operação consiste em determinar-se uma política de operação que visa substituir, na medida do possível, a geração de origem termoelétrica por geração de origem hidroelétrica [166]. Isto equivale a determinar um cronograma

[1] Embora no modelo seja atribuído um valor nulo à água, nos estudos referentes à operação hidrotérmica atribui-se um valor à água armazenada nos reservatórios, equivalente ao custo de geração não-hidráulica.

ótimo de geração, a cada intervalo do planejamento, de modo que o sistema atenda a demanda de forma confiável, buscando minimizar o custo esperado da operação durante o horizonte de planejamento, definindo uma estratégia adequada de complementação térmica. Como resultado, obtém-se os valores "ótimos" das variáveis de decisão do sistema hidrotérmico, tais como trajetórias dos volumes armazenados nos reservatórios, turbinagens e geração hidráulica de cada usina, complementação térmica e energia armazenada de cada usina e do sistema [143].

Uma política de operação para sistemas hidrotérmicos de geração visa determinar uma estratégia para alocação dos recursos de geração do sistema hidrotérmico, a fim de minimizar o valor esperado dos custos operativos no horizonte de planejamento. Incluem-se nestes custos os gastos com os combustíveis das usinas termoelétricas, eventuais compras de energia de sistemas vizinhos e os custos atribuídos ao não fornecimento de energia elétrica, chamado "custo de déficit". Como as funções de custo da operação das usinas termoelétricas e a função de geração hidráulica são não-lineares, o problema do planejamento da operação é não-linear.

Os recursos hidroelétricos para geração de energia elétrica, representados pela água armazenada nos reservatórios, são limitados e de uma disponibilidade muito irregular em sua forma natural. A construção de reservatórios de acumulação tenta atenuar estas dificuldades aumentando a regularização destes recursos. Ressalta-se ainda que a disponibilidade de água, num dado momento, depende do grau de sua utilização anterior, o que estabelece uma ligação entre as decisões operativas no tempo, comumente conhecida como acoplamento temporal. Baseado nisto, a otimização do gerenciamento de recursos hidráulicos para geração de energia elétrica implica em um compromisso temporal, já que o recurso usado em um dado momento poderá comprometer a disponibilidade para o restante do horizonte de planejamento. Assim, as decisões tomadas em um intervalo do planejamento dependem das decisões tomadas no passado e determinam a evolução futura do sistema hidroenergético. Dessa forma, o problema do planejamento da operação é dinâmico. A questão que se coloca ao operador é quanto utilizar os recursos hidroelétricos disponíveis no presente e num período futuro do planejamento, considerando a irregularidade das vazões afluentes. A decisão ótima deve equilibrar o compromisso entre o benefício presente do uso da água para geração hidroelétrica e o benefício esperado no futuro advindo do seu armazenamento, tudo medido em termos de economia de combustível termoelétrico.

O Brasil possui um sistema de geração predominantemente hidroelétrico, onde se localizam grandes cascatas com usinas hidroelétricas interligadas hidraulicamente e espalhadas em grande extensão territorial, sob regimes hidrológicos diversos. Assim sendo, há interdependência ope-

racional (acoplamento operativo ou acoplamento espacial) [96] das usinas hidroelétricas, pois a operação de uma usina (o uso da água armazenada em seu reservatório e a regularização da sua vazão afluente natural) afeta não apenas a usina em questão, mas também as usinas a jusante de seu posto. Isto pode ser mais bem explicado analisando a matriz Hessiana da função de custo de operação do sistema, ou função objetivo do problema do planejamento energético da operação a usinas individualizadas, onde se observam elementos não nulos, fora da diagonal principal, o que representa a interconexão entre as variáveis de usinas diferentes [19]. Assim, a matriz Hessiana não é uma matriz diagonal, pois possui, conforme supracitado, elementos diferentes de zero fora da diagonal principal, que representam as interconexões entre usinas, ou seja, como a variação do custo em relação ao parâmetro de uma usina se altera com respeito ao parâmetro de outra usina. Isto indica os efeitos cruzados de diferentes variáveis de decisão na função objetivo ou, para um sistema de reservatórios, a influência que a variável de decisão de uma usina hidroelétrica j tem sobre a variação do custo total de operação em relação à variável de decisão de outra usina hidroelétrica i. A interconexão entre as usinas hidroelétricas se traduz em uma função objetivo espacialmente não separável[2]. O parque hidroelétrico constitui-se num sistema interconectado[3] de geração, ao contrário do parque termoelétrico cujas unidades são independentes entre si, pois a operação de uma unidade térmica não afeta a operação de outra unidade, em capacidade de geração, disponibilidade ou custo de geração [26]. Uma complicação adicional vem da necessidade de atendimento a restrições hidráulicas decorrentes do uso múltiplo da água (navegação, irrigação, saneamento, controle ambiental, etc.), além das regras de segurança para controle de cheias nas bacias. Estas restrições atuam no sistema de geração tanto diminuindo sua flexibilidade operativa como sua capacidade de geração de energia.

Observe-se em contrapartida que, apesar da característica dinâmica do problema do planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos, já mencionada, não ocorrem efeitos cruzados em relação a intervalos diferentes de tempo, isto é, a variável de decisão de um intervalo de tempo não afeta o custo marginal de operação de outro intervalo de tempo. Isto se traduz na matriz Hessiana em uma estrutura bloco-diagonal (somente os blocos pertencentes à diagonal são diferentes de zero), com um bloco para cada intervalo de tempo, o que dá uma característica de "separabilidade" temporal para a função objetivo. Esta característica existe pelo fato da função objetivo ser adicionalmente separável no tempo, ou seja, ela pode ser escrita na forma de uma

[2]Dessa forma, a função objetivo não pode ser desmembrada em termos de cada usina hidroelétrica.

[3]Esta interconexão produz uma dependência com relação ao desempenho operativo. Assim, essa dependência não permite que as usinas sejam "trabalhadas" de forma separada, isto é, durante uma otimização, por exemplo, não se podem otimizar cada usina separadamente e depois "somar" os resultados.

soma de parcelas, cada uma referente a um único intervalo de tempo [72]. Isto não significa uma independência entre os vários intervalos de tempo já que a característica dinâmica, representada pela ligação entre estes intervalos, fica garantida pela restrição da equação de balanço dinâmico da água (ou balanço hídrico), em que a utilização do recurso hídrico em determinado intervalo irá afetar a sua disponibilidade nos intervalos restantes do horizonte de planejamento.

A função objetivo é não convexa em toda sua região de abrangência, o que pode ser verificado pelos autovalores da matriz Hessiana da função objetivo do planejamento da operação energética a usinas individualizadas, os quais apresentam valores positivos e negativos em algumas regiões [19].

Outro aspecto que dificulta o planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos é a incerteza sobre as vazões afluentes futuras e a demanda de energia. A incerteza das vazões faz com que a operação corra o risco de ser considerada ineficiente. "Acreditando-se" que as vazões futuras serão baixas, haverá a tendência de intensificar o uso atual de fontes mais caras de geração (usinas termoelétricas, por exemplo). Este procedimento visa evitar níveis baixos nos reservatórios, ocasionando situações mais drásticas no futuro. Se esta decisão é tomada e vazões afluentes baixas forem observadas, a operação terá sido eficiente. No entanto, se vazões afluentes altas são observadas, não haverá espaço nos reservatórios para armazenar os excessos e vertimentos indesejáveis acontecerão, representando um desperdício de energia que foi guardada. Por outro lado, "acreditando-se" que as vazões futuras serão altas, haverá a tendência de intensificar o uso da água armazenada nos reservatórios, evitando vertimentos no futuro. Se esta decisão é tomada e as vazões afluentes forem elevadas, a operação terá sido eficiente. Todavia, se as vazões forem baixas, não haverá água suficiente para o sistema atender à demanda e poderá ser necessário utilizar geração térmica, ou comprar energia de sistemas vizinhos, ou mesmo cortar a demanda por meio de políticas de racionamento. A Figura 3.1 ilustra a forte influência das incertezas relativas as vazões afluentes futuras em sistemas hidrotérmicos de geração [85]. Da mesma forma, embora em menor grau, alterações da demanda prevista de energia elétrica provocam desajustes na operação otimizada do sistema. Assim, o problema do planejamento é essencialmente estocástico.

A existência de várias bacias interligadas contendo um elevado número de aproveitamentos com reservatórios, e a necessidade de avaliação das conseqüências do uso das reservas nos anos futuros levam ao emprego de um período longo de estudo, caracterizando o planejamento da operação como um problema de grande porte.

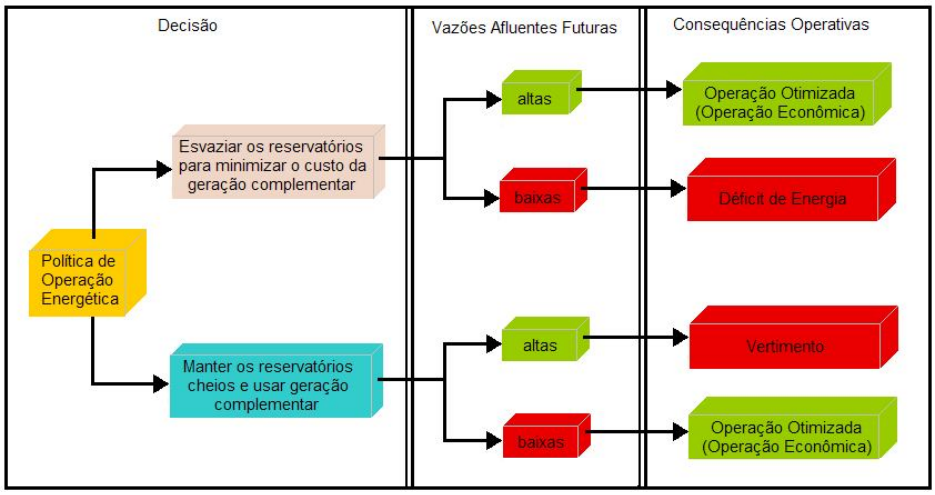

Figura 3.1: Influência das vazões afluentes futuras no planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos de geração.

As unidades termoelétricas têm um custo direto de operação, ou seja, o custo de operação de uma unidade não depende do nível de geração de outras unidades. Em sistemas hidroelétricos e hidrotérmicos, o valor da energia gerada por uma usina hidroelétrica somente pode ser medido em termos da economia resultante nos custos de geração térmica, ou de importação de energia, ou déficits; e não diretamente como uma função apenas do estado da usina. Ou seja, os benefícios da geração de uma usina hidráulica são expressos de forma indireta pela economia proporcionada no uso das fontes não hidráulicas, definindo o problema do planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos como não separável. Ora, este valor da economia proporcionada não pode ser medido isoladamente em cada usina hidroelétrica, pois depende da operação em conjunto do sistema.

O problema do planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos de potência pode ser classificado como um problema de otimização de um sistema dinâmico (acoplamento no tempo), não linear, interconectado (acoplado no espaço), não convexo, estocástico, de grande porte e não separável. Nos sistemas com grande parcela de geração hidroelétrica, como o sistema brasileiro, o planejamento da operação tem uma grande preocupação com a disponibilidade e o gerenciamento da fonte de suprimento de energia hidráulica. Além do mais, ele deve levar em conta um amplo espectro de atividades, abrangendo desde a otimização plurianual dos reservatórios até o despacho das usinas, levando em consideração as restrições físicas e operativas. Além das características relacionadas ao sistema hidrotérmico de geração, relativas ao planejamento da

operação, o problema da transmissão da energia gerada nas usinas hidroelétricas coloca-se como um aspecto adicional de complexidade do problema do planejamento. A representação do sistema de transmissão é fundamental para assegurar a viabilidade da operação do sistema elétrico. Por meio de modelos de cálculo de fluxo de carga na rede de transmissão [104], introduz-se mais um componente do acoplamento espacial das decisões operativas.

Adicionalmente, a privatização de usinas e o novo ambiente competitivo, com usinas pertencentes a diferentes empresas, dificultam a determinação de uma política de operação que, pela sua própria essência, tem que ser cooperativa. Tudo isso leva a um cenário operativo bastante complexo, em que o uso de métodos tradicionais utilizados em outros países, nem sempre traz bons resultados [83]. Como exemplo desta complexidade, tem-se que as usinas hidroelétricas brasileiras possuem características peculiares devido ao relevo suave e às grandes distâncias entre estas usinas e os centros consumidores, o que torna a transmissão a longa distância um fator importante, além de que a interconexão entre os sistemas torna sua operação complexa e vulnerável a interrupções no fornecimento (*blackouts*). Além disso, o sistema de geração hidroelétrico brasileiro está submetido a diferentes regimes hidrológicos e pluviométricos nas diversas regiões do país. Portanto, as características próprias do sistema brasileiro estimulam o desenvolvimento de métodos computacionais e critérios adequados às suas condições [127].

O planejamento da operação do sistema hidrotérmico brasileiro, em especial das usinas hidroelétricas, justifica-se não apenas pela necessidade de manutenção e controle da confiabilidade do sistema eletroenergético nacional, mas também como produto de natureza econômica de valor estimável e de fator importante para assegurar o crescimento nacional sustentado [137].

Por fim, o planejamento da operação é subdividido em planejamento energético e elétrico. O objetivo do planejamento energético[4] é determinar estratégias de geração de energia de forma confiável e econômica, satisfazendo as restrições do sistema de produção de energia elétrica. Esta etapa do planejamento da operação visa a otimização da operação energética destes sistemas compostos, geralmente, por várias usinas, considerando aspectos estocásticos e hidráulicos com maior relevância.

O planejamento elétrico é realizado para viabilizar as metas calculadas pelo planejamento da operação energética, assegurando uma operação confiável para o sistema. Como resultado do planejamento da operação elétrica, tem-se a adaptação das metas energéticas à capacidade real do sistema de transmissão [54].

[4]O planejamento energético é conhecido, também, como planejamento da operação dos recursos energéticos.

3.4.1 Horizontes do Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos

A complexidade do problema do planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos não pode ser acomodada por um modelo matemático único, tornando-se necessária a utilização de cadeias de modelos com diferentes horizontes de planejamento e graus de detalhe na representação do sistema[5] [126].

Uma das possíveis decomposições deste problema em sub-problemas é baseada na incerteza das vazões afluentes futuras [166]. Analisando a aleatoriedade das vazões futuras observa-se que a incerteza cresce com o tempo, segundo uma função como a ilustrada na Figura 3.2.

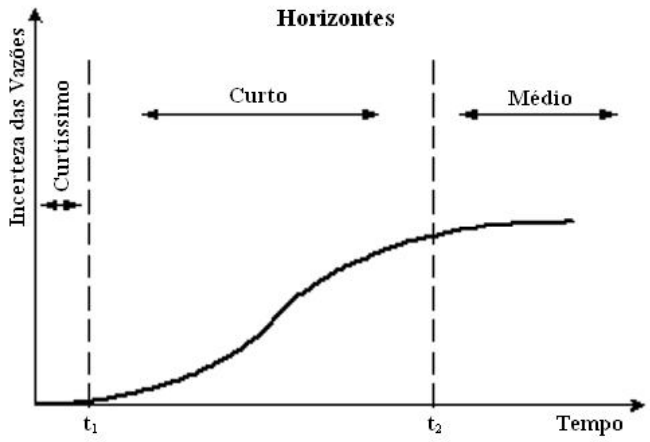

Figura 3.2: Incerteza das vazões futuras com o tempo.

A incerteza sobre as vazões a curtíssimo prazo (até t_1) é muito pequena dada a capacidade de previsão obtida pelos modelos baseados na relação chuva-vazão. Neste horizonte, o problema é praticamente determinístico, dado que a demanda de energia elétrica também pode ser estimada com bastante precisão. À medida que se avança no tempo considerando vazões num futuro mais remoto, a incerteza cresce até atingir uma saturação (t_2), representando a independência estocástica entre a vazão futura e a conjuntura presente. Trata-se da incerteza de médio prazo. No período entre t_1 e t_2, a incerteza é crescente, porém menor que a incerteza de médio prazo devido à correlação entre a vazão futura e a presente (e passadas). Trata-se da incerteza de curto prazo. Os períodos $\Delta t_1 = t_1 - t_0$ e $\Delta t_2 = t_2 - t_0$ caracterizam etapas distintas do planejamento

[5] Vale ressaltar neste ponto que a modelagem e a técnica de resolução devem ser escolhidos de acordo com as características físicas do sistema, evitando simplificações drásticas que deturpem o desempenho operativo, levando em conta o nível de incerteza de cada horizonte de planejamento e, principalmente, sabendo atribuir graus de acuidade apropriados para cada faceta do problema.

e dependem tanto do sistema hidroelétrico em questão, como do instante inicial (t_0) em que o planejamento é considerado [166].

Dessa forma, o planejamento da operação é dividido em diferentes horizontes de tempo. No sistema brasileiro, ele é dividido em horizontes de médio, curto e curtíssimo prazo (ou programação diária), em que são abordados os aspectos energéticos e elétricos da operação. A Figura 3.3 ilustra estas três etapas do planejamento da operação e o acoplamento entre elas.

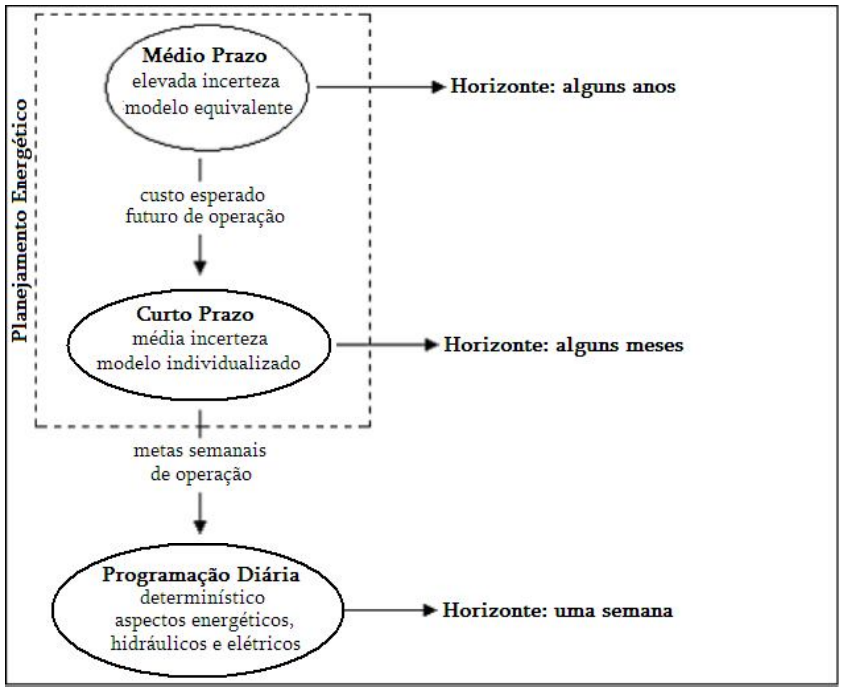

Figura 3.3: Esquema de decomposição temporal do problema do planejamento da operação.

O planejamento de médio prazo aborda aspectos relacionados com avaliações globais do sistema e seu desempenho plurianual considerando a aleatoriedade das vazões afluentes. Em sistemas hidroelétricos com reservatórios de grande capacidade de regularização, o estudo da operação a médio prazo deve abranger um horizonte de alguns anos. Para o sistema brasileiro, adota-se um horizonte de cinco anos com discretização mensal do período de planejamento, no qual se pode observar a evolução do comportamento dos reservatórios em face das variações hidrológicas. O objetivo do planejamento de médio prazo é avaliar o comportamento do sistema sob condições de elevada incerteza.

A abordagem utilizada no planejamento da operação a médio prazo requer a agregação do parque hidroelétrico em um único reservatório de energia, o modelo equivalente [7, 8]. O mo-

delo equivalente de um sistema hidroelétrico consiste de um reservatório equivalente que recebe, armazena e descarrega energia em vez de água.

Esta abordagem deve-se à necessidade de se tratar o problema como essencialmente estocástico, e dada à dificuldade de se representar, nestas condições, as usinas hidroelétricas individualmente. Esta simplificação do sistema hidroelétrico é aceitável, pois o planejamento de médio prazo abrange um período em que a precisão da representação individual de cada usina hidroelétrica perde a importância frente às incertezas das vazões afluentes. A limitação principal da abordagem do reservatório equivalente é que ela não leva em conta, adequadamente, alguns aspectos importantes da operação hidroelétrica, tais como: o efeito cota, a diversidade hidrológica e os vertimentos localizados em algumas usinas [167]. Apesar dessas limitações, o modelo equivalente pode ser aprimorado, visto que ele pressupõe produtividades médias, quando na verdade a produtividade varia com o armazenamento. Ele pode ser mais bem detalhado ainda, fazendo considerações adicionais, como a energia evaporada, por exemplo.

O planejamento de médio prazo fornece políticas de operação que especificam a geração de cada subsistema hidroelétrico e do parque térmico em função do estado dos subsistemas (quantidade de energia armazenada nos reservatórios) e das vazões afluentes. A política ótima de operação, para este horizonte de planejamento, representa o custo esperado futuro de operação do sistema e depende da condição inicial de armazenamento dos reservatórios. Esta é a informação transferida ao planejamento de curto prazo para estabelecer-se o vínculo entre essas duas etapas do planejamento.

O planejamento de curto prazo é, convencionalmente, uma etapa de planejamento energético propriamente dito, no qual há um refinamento da abordagem dos aspectos energéticos do sistema, devido à representação individualizada de suas usinas. Neste horizonte, atribuem-se as metas[6] mensais ou semanais de geração individual a cada usina hidroelétrica e termoelétrica, a partir da política ótima de operação calculada no planejamento de médio prazo, considerando-se algumas restrições, físicas e operativas, tais como, os limites de armazenamento nos reservatórios, conservação da água (balanço hídrico), atendimento à demanda, limites de turbinagem e de defluência das usinas. Este horizonte de planejamento pode variar de alguns meses a um ano, com discretização mensal ou semanal.

Para aplicações em ambiente competitivo, com usinas pertencentes a diferentes empresas, a representação individualizada das usinas hidroelétricas, no planejamento de curto prazo, é

[6] Alternativamente, podem-se atribuir os volumes-meta que os reservatórios devem atingir ao final do período.

muito interessante, principalmente porque ela permite que as decisões sejam tomadas a partir de um modelo de otimização/simulação que consegue avaliar as condições individuais de operação de cada aproveitamento. A simplificação da representação agregada do sistema faz com que o parque gerador não seja aproveitado da forma mais eficiente possível, uma vez que o reservatório equivalente de energia não consegue representar as características operativas individuais das usinas e, consequentemente, de seus respectivos acoplamentos hidráulicos [112, 158]. Esses fatores, portanto, levam a uma utilização ineficiente por parte do parque gerador hidráulico [54]. Desta forma, a representação individualizada de cada usina hidroelétrica é importante, visto que o objetivo principal do planejamento da operação energética é determinar as metas de operação de cada usina, a cada intervalo, respeitando o acoplamento hidráulico das diversas cascatas existentes no sistema, e que aproveite as possíveis diversidades hidrológicas entre os vários rios. Neste horizonte de planejamento, procura-se determinar quanto cada usina deve gerar para obter o melhor rendimento hidráulico do sistema, evitando-se vertimentos, perdas de produtividade, etc. É correto lembrar que, além deste objetivo, obtém-se no curto prazo, algumas informações que são refinamentos de informações já obtidas no médio prazo, e também outras, tais como, metas de geração térmica mensal por usinas e programas de manutenção. É importante ressaltar que, nesta etapa, diferente do planejamento de médio prazo, abrange-se um horizonte em que as incertezas sobre as afluências são menores devido à proximidade com o presente e à correlação temporal entre as vazões.

O objetivo do planejamento de curtíssimo prazo é desagregar as metas de geração, fornecidas pelo planejamento de curto prazo, em metas diárias. Por se tratar de um problema de planejamento para um horizonte muito próximo da operação em tempo real, o planejamento de curtíssimo prazo deve compatibilizar a operação elétrica com a operação energética. No trabalho de Rodrigues *et al.* ([143]), apresenta-se uma possível fragilidade na interação entre o planejamento de curto e curtíssimo prazo, especificamente no que diz respeito à interface eletroenergética, o que pode levar a uma degeneração da operação "ótima" do sistema em que os "ótimos", energético e elétrico, tendem a se distanciar, pois nos modelos convencionais a interação entre o planejamento de curto e curtíssimo prazo é caracterizada somente pelo repasse, para o curtíssimo prazo, das metas semanais de geração ou defluências ótimas (de cada usina hidroelétrica) sem considerar os aspectos elétricos do sistema.

Do exposto, o planejamento de curtíssimo prazo deve respeitar todas as restrições operativas do sistema, hidráulicas e elétricas, num cenário de vazões e demanda praticamente determinístico. Hidraulicamente, é fundamental considerar o tempo de percurso da água entre as usinas

hidroelétricas da cascata, restrições operativas das usinas como faixas de cavitação, rampas de tomada de carga, limites de variação na defluência, curva colina do rendimento (eficiência) das turbinas, reserva girante, e outros aspectos operativos que não são considerados nas etapas de planejamento com horizontes mais amplos. Também é necessário respeitar as restrições elétricas da rede como os limites de transmissão das linhas. A complexidade do planejamento de curtíssimo prazo resulta da necessidade de se levar em conta, simultaneamente, aspectos energéticos, hidráulicos e elétricos do sistema hidrotérmico.

Os diferentes horizontes de estudo correspondem a diferentes tipos de análise do desempenho do sistema, tais como efeitos de médio prazo (possibilidades de déficits futuros, valor esperado de gerações térmicas no futuro, etc.), efeitos de curto prazo (contratos anuais para suprimento de energia e demanda entre empresas do sistema, programa de manutenções, etc.) e efeitos de curtíssimo prazo (controle de cheias, restrições de segurança, etc.).

Na cadeia de procedimentos para o planejamento da operação de um sistema hidrotérmico, o grau de detalhamento cresce à medida que se reduz o horizonte de influência das decisões. Assim, vale mencionar que quanto mais próximo à operação em tempo real, maior é o grau de detalhe da modelagem do sistema, utilizando-se modelos mais acurados para a representação do sistema gerador, e também para a representação do sistema de transmissão.

A informação sobre efeitos de mais longo prazo - além do horizonte de influência de cada nível - é dada pelos resultados do nível hierárquico precedente (mais alto). Além disto, pode-se usar retro-alimentação dos níveis hierárquicos inferiores para os superiores de forma a assegurar a otimização global do planejamento.

Os horizontes de planejamento de médio e curto prazo são conhecidos pela designação de planejamento energético, já que tratam do aspecto energético da operação, assim, a sua preocupação principal é o atendimento das metas, de demanda e energia, envolvidas na operação do sistema. A divisão do planejamento energético em médio e curto prazo deve-se a dificuldade do manuseio simultâneo da estocasticidade das vazões afluentes e da demanda de energia, com a representação individualizada de cada usina hidroelétrica. O planejamento elétrico da operação engloba o planejamento de curtíssimo prazo, o qual considera as restrições advindas da operação elétrica do sistema com maior relevância.

3.4.2 Formulação do Planejamento da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos a Usinas Individualizadas (Planejamento de Curto Prazo)

Em um sistema hidrotérmico de geração, o custo de operação é dado pelo custo do combustível utilizado na operação das usinas termoelétricas, o custo de importação[7] de energia de outros sistemas, e o custo da falta de suprimento de energia (penalidade devido ao não suprimento de carga), o chamado "custo de déficit", sendo todos eles representados por uma única função de custo das fontes não hidráulicas (Figura 3.4) [27]. Esta função é o resultado do Despacho Econômico Termoelétrico [90]. Observa-se que primeiramente são utilizadas as fontes com menor custo de geração e conforme a participação destas fontes aumenta, usinas mais caras vão sendo despachadas até que sejam necessárias importações de energia, e em último caso, cortes de carga, cujos custos são representados pelo custo de déficit[8].

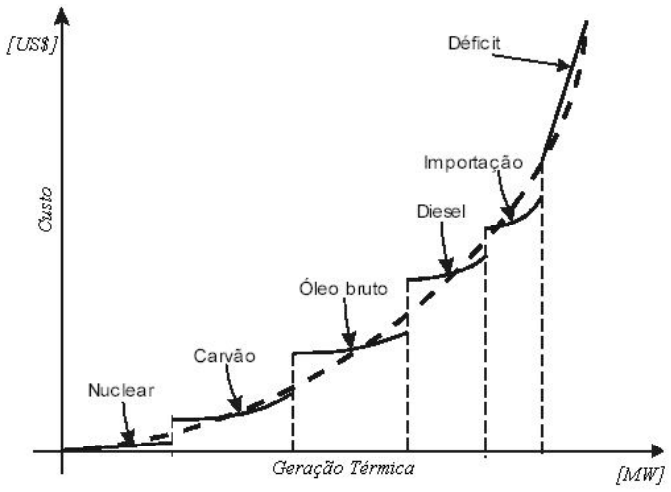

Figura 3.4: Função de custo de operação de um sistema não-hidráulico.

O objetivo do planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos a usinas individualizadas consiste em determinar-se a vazão defluente e o volume operativo de cada usina hidroelétrica, a cada intervalo do planejamento, tal que o custo operacional seja minimizado ao longo do horizonte de planejamento e sejam atendidas as restrições físicas, operativas, ambien-

[7]Em alguns casos, a importação pode ser mais barata que algumas fontes de geração existentes no próprio sistema. Isto depende, basicamente, da fonte de energia importada e das fontes disponíveis no sistema importador.

[8]Recentemente, foi introduzida uma modificação na qual as usinas termoelétricas são despachadas por Índice de Mérito [117]. Cada usina recebe seu Índice de Mérito baseado em seu custo de operação e o despacho se dá na ordem crescente de custos, entretanto uma usina com Índice de Mërito superior só poderá entrar quando a anterior tiver sua capacidade de geração esgotada.

tais, econômicas, sociais, etc. Se as vazões afluentes às unidades geradoras fossem suficientes para atender a todas estas restrições em todos os intervalos do planejamento, não haveria necessidade de reservatórios de acumulação e o custo de operação do sistema hidrotérmico de geração seria praticamente nulo. Mas, devido à existência de intervalos com altas afluências e intervalos com baixas afluências, torna-se necessária a construção de reservatórios visando o armazenamento e a regularização das vazões afluentes dos períodos úmidos para os períodos secos.

Nos modelos de planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos, o horizonte de estudo (planejamento) pode ser de alguns meses e até de alguns anos[9]. Em alguns modelos, pode-se utilizar um horizonte com qualquer discretização, citando-se, como exemplos, as discretizações semanal, mensal, bimestral, etc. Além disso, a formulação destes modelos permite que o horizonte seja discretizado utilizando-se combinações de intervalos diferentes, o que pode ser chamado de discretização mista.

No planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos, o custo de operação do sistema gerador é representado por uma soma, na qual cada parcela corresponde aos custos operativos associados a cada intervalo do horizonte de planejamento. Contudo, por se tratar de horizontes de até alguns anos, deve-se considerar uma taxa de juros na manipulação destes custos. A principal meta desta consideração é poder trazer, para o início do horizonte de planejamento, o custo total resultante do planejamento da operação energética [94], por meio do valor presente dos custos. Para este fim, utiliza-se o conceito do valor presente[10] [100] de um custo futuro simples.

Assim sendo, o custo de operação, C_t, ao longo do intervalo t pode ser dado por [181]:

$$C_t = CVP_t \cdot 0,5 \cdot E_t^2 \tag{3.1}$$

onde:

CVP_t: representa o coeficiente de valor presente do custo de operação do sistema gerador no intervalo t;

E_t: geração média das fontes não-hidráulicas durante o intervalo t, calculado por:

$$E_t = \begin{cases} D_t - H_t & \text{, para} \quad D_t \geqslant H_t \\ 0,0 & \text{, para} \quad D_t < H_t \end{cases} \tag{3.2}$$

[9] A discretização, geralmente, é estabelecida determinando-se o número de segundos de cada intervalo. Um grupo de intervalos de tempo adjacentes e com mesmo tamanho (duração) é denominando de sub-horizonte.

[10] O valor presente é localizado no início do primeiro intervalo de tempo do horizonte do planejamento (estudo).

onde:

D_t: demanda média durante o intervalo t;

H_t: geração média total das usinas hidroelétricas durante o intervalo t.

Para cada intervalo de tempo, o sistema hidrotérmico tem como custo de operação, o custo associado ao sistema não-hidráulico complementar, C_t, o qual depende da demanda D_t e da geração hidráulica H_t. Ou seja, para uma demanda D_t e uma geração hidroelétrica H_t, o custo de operação pode ser dado também por:

$$C_t = \begin{cases} CVP_t \cdot 0,5 \cdot (D_t - H_t)^2 & \text{, para} \quad D_t \geqslant H_t \\ 0,0 & \text{, para} \quad D_t < H_t \end{cases} \tag{3.3}$$

A modelagem do sistema termoelétrico e da demanda de energia elétrica, em termos da função objetivo, simplifica o planejamento hidrotérmico transformando-o num problema exclusivamente hidroelétrico [166]. A função objetivo, ilustrada abaixo, é composta pelo custo operacional do horizonte de planejamento. O custo operacional representa o custo associado ao déficit hidráulico, ou seja o custo da geração complementar a partir de recursos não-hidráulicos como geração térmica, importação de mercados vizinhos ou déficit de energia (racionamento).

$$\text{Função Objetivo} = \min \sum_{t=1}^{T} CVP_t \cdot 0,5 \cdot (D_t - H_t)^2 \tag{3.4}$$

Diferentemente do Despacho Econômico Termoelétrico, qualquer decisão tomada, em um intervalo do horizonte do planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos, especialmente os sistemas com base hidráulica, traz embutida uma conseqüência futura e um risco associado, pois as vazões afluentes são variáveis aleatórias e a capacidade de armazenamento dos reservatórios é limitada. Existem, basicamente, duas decisões conflitantes para a utilização dos recursos hidroelétricos em cada intervalo do horizonte de planejamento: armazenamento nos reservatórios para uso futuro, o que implica em uma maior utilização de geração complementar, portanto, em um aumento dos custos operativos (decisão para confiabilidade); ou geração de energia elétrica, o que minimiza o custo de operação do sistema hidrotérmico, entretanto, aumenta o risco de déficit futuro (decisão econômica). Desta forma, o planejamento da operação energética do sistema hidrotérmico não deve considerar apenas os custos de geração complementar em um intervalo t, mas, também, o custo esperado dessa geração nos intervalos seguintes. Matematicamente, esta consideração pode ser expressa pela FCI (Função de Custo Imediato),

a qual representa o benefício da utilização imediata do recurso hidroelétrico para geração de energia, e pela FCF[11] (Função de Custo Futuro), que representa o benefício de armazenar o recurso hidráulico para utilização no futuro. A Figura 3.5 ilustra estas funções. Além destas duas funções, há a função de custo total, que corresponde à soma aritmética da FCF com a FCI [28].

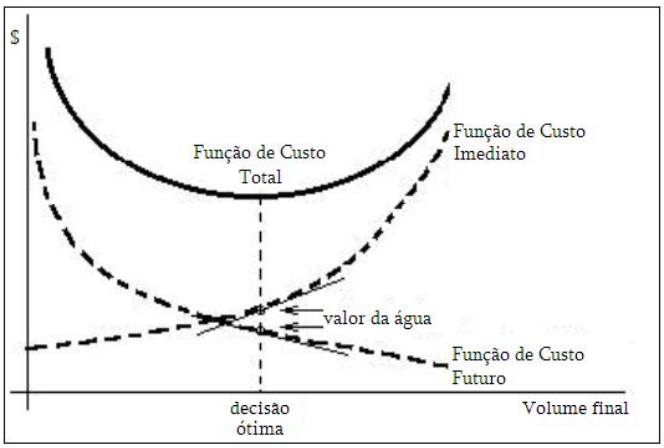

Figura 3.5: As funções de custo futuro, imediato e total em relação ao nível de armazenamento.

Observando a Figura 3.5, pode-se perceber que o custo imediato aumenta à medida que se diminui a utilização dos recursos hidroelétricos para geração de energia, ou seja, à medida que se aumenta o volume final nos reservatórios. Já o custo futuro diminui à medida que se aumenta o volume armazenado final, pois haverá uma maior quantidade de água disponível no futuro para geração, portanto, uma menor complementação não hidráulica [26]. Em termos conceituais, a FCF seria obtida a partir de simulações operativas do sistema, para cada nível de armazenamento no final do intervalo t [157]. Como ilustrado na Figura 3.6, as simulações são realizadas de maneira probabilística, usando um grande número de cenários hidrológicos.

Dessa forma, ao se planejar a operação energética de sistemas hidrotérmicos, deve-se equilibrar o benefício imediato, resultante da utilização da água para geração de energia elétrica, com o benefício futuro advindo do armazenamento da água nos reservatórios. Consequentemente, o problema do planejamento pode ser resumido a encontrar o ponto de mínimo da função de custo total.

Na definição da função objetivo, a qual representa o custo de operação associado a cada

[11] A FCF está associada ao custo esperado de geração não hidráulica no final do intervalo t (início de t+1) até o final do horizonte de planejamento.

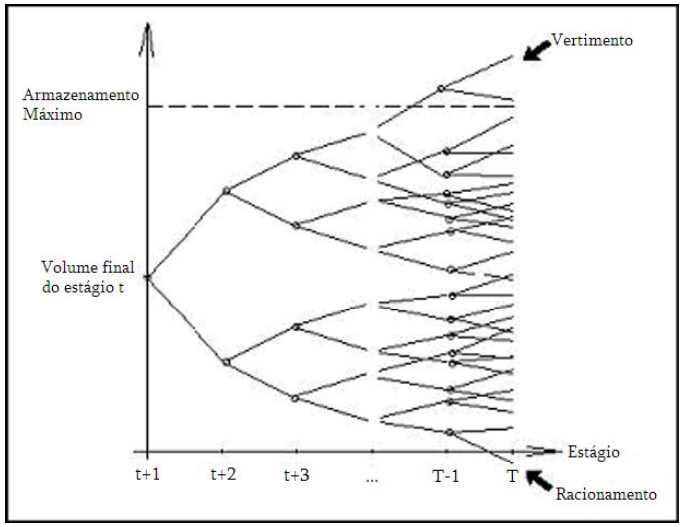

Figura 3.6: Evolução do armazenamento ao longo do horizonte de planejamento, a partir do intervalo t+1.

intervalo do planejamento, não há nenhuma condição terminal associada ao estado final dos reservatórios, ou seja, o planejamento da operação energética está livre para utilizar toda a água disponível no sistema, ao longo do seu horizonte, respeitando as restrições de defluência, do engolimento máximo, dos limites de armazenamento e outras restrições associadas ao uso múltiplo da água.

Desta forma, deve-se empregar uma condição terminal, associada à função objetivo do planejamento da operação energética. A condição terminal tem como objetivo permitir que a solução do problema seja consistente com a operação contínua do sistema, já que o sistema não deixa de operar com o final do horizonte de planejamento [99]. A influência da condição terminal na solução ótima é relevante, sobretudo quando o horizonte do planejamento é de poucos meses [98]. Uma forma de superar o problema de se obter uma condição de contorno (terminal) apropriada para o problema é estender o horizonte de planejamento de maneira a tornar desprezível a influência da condição nas decisões ótimas dos primeiros intervalos de otimização. No entanto, este tipo de consideração pode não favorecer o desempenho de abordagens a usinas individualizadas baseadas em previsão de vazões. Isso ocorre, porque com a extensão do horizonte de planejamento, o erro na estimação das vazões afluentes tende a aumentar. Por outro lado, estabelecer horizontes de planejamento mais curtos, em que os modelos de previsão de vazões possam ter um melhor desempenho, requer uma estimativa precisa da condição de contorno visto que, neste caso, a sua influência sobre as decisões ótimas do problema passa a ser crucial.

A condição terminal, adotada neste trabalho, baseia-se em uma penalização no estado final dos reservatórios de acumulação, caso os seus níveis de armazenamento no último intervalo (T) do horizonte de planejamento estejam abaixo dos valores especificados ($x_{i,T}^{esp}$), onde $x_{i,T}^{esp}$ é o volume mínimo final pré-estabelecido para o reservatório i. Desta forma, a condição terminal baseia-se na fixação do estado final de armazenamento dos reservatórios de acumulação. Além desta condição terminal específica, pode-se citar outras duas condições terminais [99]: a condição de manter o nível de armazenamento do reservatório tão cheio quanto possível no início do período seco do sistema, e a condição terminal que associa um custo esperado futuro de operação ao estado final de armazenamento do reservatório.

Incluindo a condição terminal, a função objetivo do planejamento da operação energética fica:

$$\text{Função Objetivo} = \min(\sum_{t=1}^{T} CVP_t \cdot 0,5 \cdot E_t^2) + FP \cdot (\sum_{k \in \Omega_{R.A.}} (x_{k,t} - x_{k,t}^{esp})^2) \tag{3.5}$$

onde FP é um fator de penalização a fim de incrementar o custo operativo do sistema hidrotérmico de geração, caso o volume final de alguma usina a reservatório esteja violando o valor especificado para o último intervalo de planejamento ($x_{i,T}^{esp}$), e $\Omega_{R.A}$ é o conjunto das usinas com reservatórios de acumulação.

A igualdade 3.6 representa a restrição de atendimento à demanda de energia elétrica no intervalo t. Esta igualdade é enfatizada, pois o planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos visa o atendimento dos requisitos de energia elétrica do sistema com confiabilidade [22].

$$E_t = D_t - H_t, \forall t \tag{3.6}$$

A geração hidráulica do parque hidroelétrico, no estágio t, é representada pela equação 3.7, dada pelo somatório das funções de produção hidráulica de cada usina hidroelétrica. Nesta equação, a primeira expressão entre colchetes ([]) logo após a constante de produtibilidade específica k, de cada usina, representa a altura de queda líquida da usina i. Neste ponto, vale ressaltar que a função de geração hidráulica é empregada em intervalos discretos de tempo. Entretanto, as variáveis de volume representam o volume armazenado no reservatório, no final de um determinado intervalo. Para obter-se um nível a montante mais realístico do reservatório de uma usina qualquer, este nível será calculado utilizando-se o volume médio do intervalo ($x_{i,t}^{med}$), correspondente a média aritmética entre os volumes de início e fim do intervalo em questão. Já

a segunda expressão entre colchetes ilustra a adoção da hipótese operativa[12] que uma usina só verte quando não pode mais turbinar. Para ilustrar a relevância desta hipótese, considere uma usina hidroelétrica com uma vazão turbinada inferior ao seu engolimento máximo, e simultaneamente vertendo certa vazão. Uma parcela desta vazão vertida poderia passar pelas turbinas, a fim de incrementar a geração de energia da usina. Esta parcela do vertimento que poderia ser turbinada recebe o nome de vertimento turbinável. Para sistemas hidrotérmicos, nos quais o mercado de energia elétrica não pode ser atendido de forma exclusiva pelo parque hidroelétrico, não ocorrem vertimentos turbináveis. Neste caso, sempre existe energia de origem complementar a ser substituída por energia hidroelétrica, uma vez que o sistema hidroelétrico não consegue atender completamente o mercado de energia. As usinas hidroelétricas, então, devem produzir o máximo de energia possível e isto implica em turbinar uma vazão igual ao engolimento máximo, considerando-se a altura de queda líquida disponível. No caso da vazão defluente ser menor que o engolimento máximo, a vazão turbinada será o próprio valor da vazão defluente. Para o caso da vazão defluente ser maior que o engolimento máximo, a vazão turbinada será o engolimento máximo, e a vazão vertida será a diferença entre a vazão defluente e a vazão turbinada. Com estas considerações, o problema passa a ter apenas duas variáveis de decisão (o volume armazenado no reservatório e a vazão defluente).

$$H_t = \sum_{i=1}^{N} k_i \cdot [h_{mon}(x_{i,t}^{med}) - h_{jus}(u_{i,t}) - h_p(x_{i,t}^{med}, q_{i,t}, v_{i,t})] \cdot min[u_{i,t}, q_{i,t}^{max}], \forall t \qquad (3.7)$$

A equação de igualdade 3.8 representa a restrição de balanço de água (conservação da água) no reservatório. Esta restrição está mais bem ilustrada na Figura 3.7 pela representação de três usinas hidroelétricas com reservatório. A equação de balanço hídrico indica que o volume final no estágio t (início de $t+1$) é igual ao volume inicial para esse estágio mais as vazões de entrada (vazão defluente das usinas imediatamente a montante e vazão lateral) menos as vazões de saída (turbinagem e vertimento) e o volume evaporado. Termos referentes à infiltração não são considerados, por questão de simplicidade[13].

$$x_{i,t+1} = x_{i,t} - x_{i,t}^{evap} + (y_{i,t}^{inc} + \sum_{k \in \Omega_i} u_{k,t} - u_{i,t}) \cdot [\frac{\Delta t_t}{10^6}], \forall i, t \qquad (3.8)$$

[12]Na operação real, o vertimento também pode ocorrer em condições especiais de operação, como por exemplo, no controle de cheias ou irrigação. Nestes casos, a usina pode verter sem ter alcançado seu engolimento máximo.

[13]O fator $\frac{\Delta t_t}{10^6}$ presta-se à conversão das vazões afluentes, expressas em m^3/s, em valores de volume, expressos em hm^3.

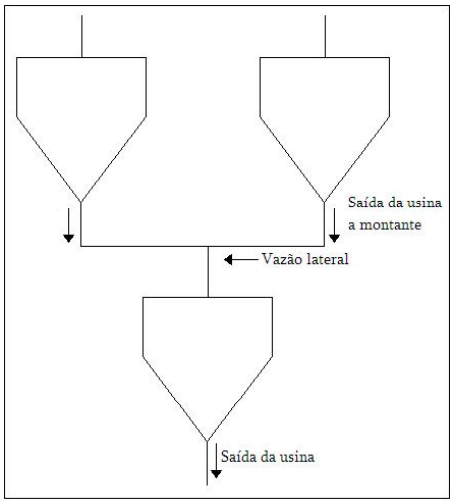

Figura 3.7: Balanço hídrico.

A vazão defluente é a soma de duas parcelas, a primeira correspondendo a defluência controlada (turbinamento), e a segunda correspondendo a defluência não controlada (vertimento) [169] e está representada pela Equação 3.9, sendo assumido, conforme mencionado anteriormente que, não haverá vertimento a menos que a capacidade de turbinamento seja excedida. Esta suposição, que é realística na maioria das situações, não é adequada, por exemplo, em períodos de vazões afluentes muito elevadas, nas quais, costumam ocorrer vertimentos turbináveis. Nestas ocasiões, a operação do sistema deixa os objetivos econômicos e se prende a políticas de controle de cheia. Como o vertimento não traz nenhum ganho, é tratado como uma variável de folga acionada somente quando a vazão defluente da usina for maior que o seu engolimento máximo. Dessa forma, conforme supracitado, a função de produção é crescente até o engolimento máximo das turbinas, permanecendo constante ou mesmo caindo ligeiramente, refletindo a perda de produtividade, devido à influência do vertimento sobre o canal de fuga da usina.

$$u_{i,t} = q_{i,t} + v_{i,t}, \forall i, t \tag{3.9}$$

As restrições 3.10 e 3.11 representam os limites de armazenamento e de defluência das usinas. São limites variáveis no tempo, pois eles refletem as restrições operacionais das usinas hidroelétricas e outras restrições associadas ao uso múltiplo da água, tais como irrigação, controle de cheias, navegação, etc. O limite mínimo de armazenamento de um reservatório pode variar no tempo em função, por exemplo, do uso do reservatório para fins recreativos e de turismo. Já o limite

máximo de armazenamento de um reservatório pode variar no tempo em função das restrições de controle e segurança de cheias. O limite mínimo para a defluência de uma usina está relacionado com o aproveitamento do manancial hidráulico a jusante da usina. Podem ser citados, como exemplos, as restrições de navegação do manancial e utilização da água para irrigação. Ambas exigem que o manancial respeite uma determinada cota mínima, acima da qual a navegação é permitida e a captação da água para fins de irrigação possa ser realizada.

$$x_{i,t}^{min} \leqslant x_{i,t} \leqslant x_{i,t}^{max} \tag{3.10}$$

$$u_{i,t}^{min} \leqslant u_{i,t} \leqslant u_{i,t}^{max} \tag{3.11}$$

Neste trabalho, considera-se também os limites da geração hidráulica (restrição 3.12), isto é, determina-se os valores mínimo e máximo da geração média de cada usina em cada intervalo do horizonte de planejamento. Estes limites podem estar relacionados a restrições físicas da própria usina hidroelétrica ou a restrições elétricas.

$$gh_{i,t}^{min} \leqslant gh_{i,t} \leqslant gh_{i,t}^{max} \tag{3.12}$$

As restrições físicas da usina podem resultar das indisponibilidades forçadas ou manutenções programadas dos equipamentos de geração, além da consideração de potência e engolimentos máximos. No caso das usinas hidroelétricas, a redução da capacidade de geração, devido à diminuição da altura de queda líquida disponível, é um fator relevante [58]. A altura de queda líquida, conforme já mencionado, é afetada tanto por variações do seu nível de montante quanto pelo seu nível de jusante. As reduções do nível de montante são resultantes do deplecionamento do reservatório, que normalmente está associado a condições hidrológicas desfavoráveis. Já a elevação do nível de jusante é causada pelo aumento da vazão defluente da usina[14].

As restrições elétricas resultam da influência dos aspectos elétricos do sistema de transmissão. Estas restrições são importantes, porque, eletricamente, é necessário se respeitar os limites de transmissão das linhas. Desta forma, pode-se realizar uma análise dos efeitos das restrições elétricas e perdas na transmissão sobre a operação energética do sistema hidrotérmico de geração [143].

Os limites mínimo e máximo da geração hidráulica são transformados em limites mínimo e

[14]Desta forma, a geração hidráulica de uma usina pode ser limitada mesmo em condições hidrológicas favoráveis.

máximo de vazão turbinada, por meio de uma estimativa da produtividade média da usina (ρ)[15]. Assim, tem-se:

$$\begin{cases} q_{i,t}^{min} = \frac{gh_{i,t}^{min}}{\rho} \\ \\ q_{i,t}^{max} = \frac{gh_{i,t}^{max}}{\rho} \end{cases} \tag{3.13}$$

$$q_{i,t}^{min} \leqslant q_{i,t} \leqslant q_{i,t}^{max} \tag{3.14}$$

Os volumes iniciais dos reservatórios, $x_{i,0}$, são dados. Assim, tem-se:

$$x_{i,0} \text{ dados}, \forall i \tag{3.15}$$

Resumindo, a formulação do planejamento da operação energética a usinas individualizadas, para sistemas hidrotérmicos de geração, pode então ser estabelecida como a minimização do custo operacional do sistema, ao longo de todo o horizonte de planejamento $[1, T]$, incluindo a condição terminal, e é dada por:

$$\text{min} \quad \sum_{t=1}^{T} CVP_t \cdot 0,5 \cdot (D_t - H_t)^2 + FP \cdot (\sum_{k \in \Omega_{R.A.}} (x_{k,t} - x_{k,t}^{esp})^2) \tag{3.16}$$

$$s.a. \quad E_t = D_t - H_t, \forall t; \tag{3.17}$$

$$H_t = \sum_{i=1}^{N} k_i \cdot [h_{mon}(x_{i,t}^{med}) - h_{jus}(u_{i,t}) - h_p(x_{i,t}^{med}, q_{i,t}, v_{i,t})] \cdot min[u_{i,t}, q_{i,t}^{max}], \forall t; \tag{3.18}$$

$$x_{i,t+1} = x_{i,t} - x_{i,t}^{evap} + (y_{i,t}^{inc} + \sum_{k \in \Omega_i} u_{k,t} - u_{i,t}) \cdot [\frac{\Delta t_t}{10^6}], \forall i, t; \tag{3.19}$$

$$u_{i,t} = q_{i,t} + v_{i,t}, \forall i, t; \tag{3.20}$$

$$x_{i,t}^{min} \leqslant x_{i,t} \leqslant x_{i,t}^{max}, \forall i, t; \tag{3.21}$$

$$u_{i,t}^{min} \leqslant u_{i,t} \leqslant u_{i,t}^{max}, \forall i, t; \tag{3.22}$$

$$q_{i,t}^{min} \leqslant q_{i,t} \leqslant q_{i,t}^{max}, \forall i, t; \tag{3.23}$$

$$x_{i,0} \text{ dados}, \forall i; \tag{3.24}$$

[15] A fórmula da produtividade média da usina está apresentada na Equação 3.32.

3.4.3 Indicadores Econômicos do Planejamento da Operação Energética a Usinas Individualizadas

O setor brasileiro de energia elétrica trabalha com indicadores econômicos para poder determinar, por exemplo, as tarifas de energia para o consumidor final. Sob essa motivação, apresentam-se, a seguir, os parâmetros econômicos que regem o planejamento da operação de curto prazo (utilizando a representação individualizada das usinas): o custo marginal de operação e o valor da água, em termos energéticos. O conhecimento do custo marginal de operação e do valor da água das usinas geradoras serve de subsídio para determinar os preços e tarifas do mercado, além do posicionamento estratégico de cada agente [150].

A teoria de custos marginais começou sua larga aplicação no setor elétrico brasileiro a partir da implantação, em meados da década de 1980, de uma nova estrutura tarifária [75]. Entende-se por custo marginal do sistema de geração a relação entre o acréscimo de custo total no sistema de geração, necessário para suprir um incremento do mercado de energia elétrica, e este incremento de mercado [58]. Este custo é usualmente expresso em unidades monetárias por unidade de energia. Os estudos de tarifação a custos marginais partem da hipótese que os consumidores devem pagar o custo incorrido pelo sistema para suprir um acréscimo de carga. Nos estudos de planejamento da operação e da expansão de sistemas geradores, distinguem-se três tipos de custos marginais:

- Custo marginal de operação;
- Custo marginal de expansão;
- Custo marginal de dimensionamento.

O custo marginal de operação é o custo incorrido, por unidade de energia produzida, ao se atender a um acréscimo de carga no sistema pelos meios já existentes, isto é, sem adicionar novas fontes geradoras ao sistema. O acréscimo de carga é suprido, num sistema hidrotérmico, pela diminuição de vertimentos (ou acréscimo das vazões turbinadas) nas usinas hidroelétricas, ou por um maior nível de geração nas usinas termoelétricas existentes, da importação de energia elétrica, ou do aumento do déficit esperado. Em estudos de planejamento da operação, o custo marginal de operação pode ser calculado sob enfoques diferentes, em função do horizonte de estudo considerado e do grau de incerteza na representação das condições de operação. Por exemplo, o custo marginal de operação calculado em estudos de planejamento que utilizam

a representação explícita da estocasticidade das vazões afluentes é, muitas vezes, denominado custo marginal de médio prazo. Um exemplo do cálculo deste custo marginal encontra-se no trabalho de Rosenblatt ([144]). Em estudos de planejamento, com representação determinística das afluências, obtém-se o custo marginal de curto prazo, que será o custo marginal adotado neste trabalho, visto que ele é empregado ao se utilizar a representação individualizada das usinas hidroelétricas. O custo marginal de expansão é o custo incorrido, por unidade de energia produzida, ao se atender a um acréscimo de carga no sistema pela incorporação de uma nova usina no sistema de geração. O custo marginal de dimensionamento representa o valor presente dos custos marginais futuros da expansão do sistema, em um horizonte de cerca de 30 anos. É utilizado para valorizar, economicamente, os benefícios energéticos de uma usina geradora, em análises econômicas de dimensionamento das usinas. Quando o custo marginal de operação é inferior ao de expansão, é mais econômico suprir um acréscimo de carga pelo sistema existente; a confiabilidade supera o nível adequado e o sistema encontra-se superdimensionado. Se o custo marginal de operação é superior ao de expansão, é mais econômico suprir um acréscimo de carga considerando a antecipação de projetos de geração; a confiabilidade situa-se aquém do desejável e o sistema está subdimensionado. Assim sendo, conclui-se que o sistema está corretamente dimensionado quando ocorrer a igualdade entre os custos marginais de expansão e operação [58]. Desta forma, analisando o custo marginal de operação e de expansão, pode-se ter a indicação da necessidade da expansão do parque gerador. Utilizando a formulação do planejamento da operação energética a usinas individualizadas, o custo marginal de operação do sistema hidrotérmico é dado, matematicamente, pelo multiplicador de Lagrange associado à restrição de igualdade do atendimento da carga. Estes multiplicadores, cuja unidade é \$/MW, representam o valor que o sistema atribui ao próximo MW produzido pelo parque de geração não-hidráulico complementar, ou seja, ele informa o valor máximo que o sistema deve pagar se quiser comprar energia, ou então, a partir de que valor deve vender sua energia de forma a ter lucro. Desta forma, em cada intervalo do horizonte de planejamento, o custo marginal expressa o acréscimo de custo que ocorreria caso houvesse um aumento incremental da geração complementar [16]. Este indicador econômico, representado pela letra λ, é dado pela Equação 3.25.

$$\lambda_t = \frac{\partial C_t}{\partial E_t}, \text{ t = 1, 2,..., T} \tag{3.25}$$

Como $D_t = H_t + E_t$, tem-se:

$$\lambda_t = \frac{\partial C_t}{\partial E_t} = -\frac{\partial C_t}{\partial H_t} \tag{3.26}$$

Logo:

$$\lambda_t = -\frac{\partial C_t}{\partial H_t} = \frac{\partial B_t}{\partial H_t} \tag{3.27}$$

A Equação 3.27 expressa o custo marginal de operação, agora como função da geração hidroelétrica, mostrando-o como o decréscimo do custo, ou o benefício que ocorreria caso houvesse um aumento incremental da geração hidráulica.

Assim, o custo marginal de operação é diretamente proporcional à derivada da função de custo em relação à geração complementar. Considerando o coeficiente de valor presente associado a cada intervalo do planejamento, o custo marginal de operação é dado por:

$$\lambda_t = \frac{\partial C_t}{\partial E_t} = \frac{\partial (CVP_t \cdot 0,5 \cdot E_t^2)}{\partial E_t} = CVP_t \cdot E_t \tag{3.28}$$

O valor da água, outro indicador econômico, pode ser utilizado na solução de problemas de otimização multiobjetivo, como por exemplo, no caso de múltiplo uso do recurso hidráulico do sistema. Este valor é representado pelo multiplicador de Lagrange associado à equação de balanço hídrico. O valor marginal da água é igual ao custo marginal de operação do sistema ponderado pela geração marginal da usina hidroelétrica i em relação à vazão turbinada. Desta forma, em cada intervalo do horizonte de planejamento e para cada usina hidroelétrica, o valor da água ($\psi_{i,t}$) pode ser dado por:

$$\psi_{i,t} = \lambda_t \cdot \frac{\partial H_t}{\partial q_{i,t}} \tag{3.29}$$

A rigor, deve-se observar que a função de produção hidráulica tem uma variação não linear com a defluência. Geralmente, a produtividade de uma usina hidroelétrica diminui com o aumento da defluência, devido ao aumento da cota do canal de fuga e conseqüente diminuição da altura líquida de queda. Este fato resulta em conseqüente variação da geração marginal em relação à vazão turbinada, fazendo com que a relação entre o valor marginal da água e o custo marginal de operação não permaneça constante.

Utilizando-se as Equações 3.25, 3.26 e 3.29, obtém-se:

$$\psi_{i,t} = -\frac{\partial C_t}{\partial q_{i,t}} = \frac{\partial B_t}{\partial q_{i,t}} \tag{3.30}$$

A Equação 3.30 reafirma o conceito do valor marginal da água, o qual pode ser expresso como o decréscimo que se obteria no custo de operação, devido a um aumento incremental no

uso da água pela usina hidroelétrica, em dado intervalo do horizonte de planejamento, ou seja, o benefício advindo de um acréscimo marginal no uso do recurso hidráulico. Daí o conceito de que este valor representa, em termos marginais, o que a água conseguiria reduzir de custo pela substituição da geração utilizando fontes não hidráulicas por hidroelétrica, na condição de operação ótima [83]. Adicionalmente, o valor da água representa o acréscimo incremental no custo operativo causado pelo aproveitamento racional da água para outra finalidade que não a geração de energia elétrica [107].

3.4.4 Energia Armazenada no Sistema

O cálculo da energia armazenada em um sistema hidroelétrico composto por uma única usina (i) em um determinado intervalo do horizonte de planejamento (t) corresponde à energia que a usina pode gerar ao esvaziar o volume útil do seu reservatório. Assim, a energia armazenada para este sistema (EAS) pode ser calculada por:

$$EAS(x_{i,t}) = f_c \cdot \rho_{i,t}^{med} \cdot (x_{i,t} - x_{i,t}^{min}) \tag{3.31}$$

onde:

- f_c: corresponde ao fator de conversão de unidades $(\frac{1}{s})$[16];
- $\rho_{i,t}^{med}$: produtividade média da usina i no intervalo t.

A produtividade média individual de uma usina hidroelétrica é calculada pelo produto da produtibilidade específica, e da altura de queda líquida média no intervalo em questão. A altura de queda líquida média ($h_{l_{i,t}}^{med}$) pode ser compreendida como uma altura de queda média que ocorreria durante o deplecionamento completo do seu reservatório, partindo do volume armazenado ($x_{i,t}$). Assim, $\rho_{i,t}^{med}$ é calculada como:

$$\rho_{i,t}^{med} = k_i \cdot h_{l_{i,t}}^{med} \tag{3.32}$$

[16] $f_c = \frac{10^6}{\Delta t_t}$.

A altura de queda líquida média é calculada como uma função do nível médio de montante, do nível médio de jusante e da perda de carga hidráulica média. Portanto:

$$h_{l_{i,t}}^{med} = h_{mon}^{med}(x_{i,t}) - cf_i^{med} - hp_{i,t}^{med} \tag{3.33}$$

O nível médio de montante é obtido pelo cálculo de uma altura com área equivalente à área abaixo do polinômio do nível de montante envolvendo a faixa do volume operativo que representa o deplecionamento do reservatório. Desta forma:

$$h_{mon}^{med}(x_{i,t}) = \frac{1}{x_{i,t} - x_{i,t}^{min}} \cdot \int_{x_{i,t}^{min}}^{x_{i,t}} h_{mon}(x_{i,t})dx \tag{3.34}$$

O nível médio de jusante é usualmente fornecido como um dado da usina hidroelétrica. O nível médio da perda de carga hidráulica pode ser calculado dependendo do modelo adotado para representar a perda de carga:

$$hp_{i,t}^{med} = \begin{cases} k_{pc} \cdot (h_{mon}^{med}(x_{i,t}) - cf_i^{med}) \\ k_{pc}, \text{ onde } k_{pc} \text{ é constante} \\ k_{pc} \cdot q_{i,t}^{med} \cdot q_{i,t}^{med} \end{cases} \tag{3.35}$$

Para um sistema hidroelétrico composto por N usinas, a energia armazenada no sistema depende de como a água dos reservatórios das usinas é utilizada, ou seja, depende de uma política de operação[17] que especifique o estado dos reservatórios durante o deplecionamento completo de todas as usinas.

Para o cálculo da energia armazenada no sistema, adotamos a política de operação em paralelo dos reservatórios, assim a energia armazenada no sistema composto por N usinas pode ser calculada como:

$$EAS(x_{i,t}) = f_c \cdot \sum_{i=1}^{N} \rho_{i,t}^{med,acum} \cdot (x_{i,t} - x_{i,t}^{min}) \tag{3.36}$$

onde:

- $\rho_{i,t}^{med,acum}$: produtividade média acumulada da usina i no intervalo t.

A energia obtida pela água armazenada no reservatório de uma usina hidroelétrica depende não apenas das condições operativas de seu reservatório, como também depende do volume

[17] Mais detalhes sobre política de operação no Capítulo 5.

armazenado nos reservatórios das usinas localizadas a sua jusante. Desta forma, a produtividade média acumulada de uma usina hidroelétrica representa o valor energético que a água armazenada no reservatório de uma usina possui, no momento em que esta água é turbinada pela usina e pelas demais usinas a sua jusante. Portanto, a produtividade média acumulada é formada pela produtividade média da usina, somada às produtividades médias das usinas a sua jusante:

$$\rho_{i,t}^{med,acum} = \sum_{j \in \Phi_i} \rho_{j,t}^{med} \tag{3.37}$$

onde Φ_i é o conjunto formado por todas as usinas a jusante da usina i inclusive.

3.5 Modelos Computacionais Propostos

Neste trabalho, propõe-se o desenvolvimento do MCSOOESH (Modelos Computacionais de Simulação e Otimização da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos), o qual é baseado em componentes de software, e aplicável ao planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração. Dois modelos estão sendo propostos: um modelo de otimização da operação energética e um modelo de simulação da operação energética[18]. Antes de apresentar a essência dos dois modelos, algumas observações devem ser explicitadas para o entendimento dos mesmos visando a sua aplicação no setor eletroenergético brasileiro.

A aplicação de modelos computacionais de simulação e otimização para o planejamento da operação energética de sistemas hidroelétricos (ou hidrotérmicos com predominância de geração hidráulica) pode variar na forma como o sistema é representado, no modo como o sistema evolui ao longo do tempo, na consideração ou não de restrições de interligação e na utilização de cenários determinísticos ou estocásticos de vazões afluentes [159, 160].

A representação do sistema hidroelétrico pode ser feita, basicamente, de duas formas:

- Reservatório equivalente: as usinas hidroelétricas do sistema são agregadas, formando um único reservatório, conhecido por reservatório equivalente de energia. As séries de vazões afluentes às usinas são transformadas em séries de energia afluente, as séries de vazões defluentes, por sua vez, são transformadas em séries de energia defluente. A capacidade de armazenamento do reservatório equivalente representa o valor energético da água ar-

[18] O modelo de simulação contempla um outro sub-modelo desenvolvido: o modelo de política de operação energética a ser comentado no Capítulo 5.

mazenada em todos os reservatórios;

- Usinas individualizadas: a representação de cada usina hidroelétrica é feita de forma individual, mantendo, portanto, dados de modelagem compatíveis com suas características físicas e operativas, e com o lugar de sua instalação. Desta forma, esta representação leva em consideração o acoplamento hidráulico da cascata, e as diversidades hidrológicas entre os mananciais hídricos.

A representação do sistema hidroelétrico adotada neste trabalho é baseada na consideração das usinas individualizadas. Mas conforme será visto no decorrer do trabalho, a ampliação para abranger a representação por meio do reservatório equivalente pode ser feita de forma mais simples pela aplicação dos componentes de software no desenvolvimento dos modelos computacionais.

Com relação à evolução do sistema hidroelétrico de geração ao longo do tempo, há dois tipos de abordagens comumente utilizadas:

- Modelos dinâmicos: são especificadas as datas de entrada e, possivelmente, de saída, da operação de cada usina hidroelétrica, ou mesmo de suas diferentes unidades geradoras. Assim, em cada intervalo do planejamento da operação energética, o mercado de energia elétrica é atendido de acordo com a capacidade instalada disponível no intervalo em questão. Estes modelos são úteis em estudos de análise conjuntural, como por exemplo, na análise de diferentes projeções futuras de demanda, na avaliação do impacto de antecipações ou atrasos no cronograma de novos empreendimentos (construção de usinas, por exemplo), bem como na avaliação energética da aquisição/construção de um novo ativo de geração. Dessa forma, os modelos dinâmicos consideram dados referentes à expansão do sistema de geração de energia elétrica no decorrer do horizonte de planejamento;

- Modelos estáticos: eles não levam em conta a expansão da capacidade instalada ao longo do horizonte de planejamento. Assim, por estes modelos, determinam-se os benefícios energéticos de um sistema hidroelétrico, supondo que o número de unidades geradoras que o compõe não evolui ao longo do tempo, ou seja, a potência instalada do sistema hidroelétrico permanece constante em todos os intervalos do horizonte. A utilidade deste tipo de modelo está na determinação dos benefícios energéticos do sistema de geração, ou seja, na avaliação dos ativos de geração disponíveis em um determinado sistema hidroelétrico.

No tocante à evolução do sistema hidroelétrico, os modelos desenvolvidos neste trabalho

permitem a abordagem de modelos dinâmicos e/ou estáticos. Assim, cabe ao operador decidir se deve-se levar em consideração ou não a variação na capacidade instalada ao longo do horizonte de planejamento.

Quanto à consideração ou não de restrições de transmissão (ou de interligação), os sistemas podem ser:

- Modelos a subsistemas: nestes modelos, cada região é considerada de forma individual, portanto, a capacidade de intercâmbio de energia entre as regiões é limitada pelos sistemas de transmissão. Estes modelos possibilitam, além de uma representação mais próxima do real, estudos de avaliação da expansão das principais linhas de transmissão, a divisão do sistema hidroenergético em subsistemas, análise em caso de falhas nas linhas de transmissão mais relevantes ao sistema, etc.;

- Modelos a barramento único: desprezam a existência de restrições de transmissão entre as regiões, portanto não há limites de interligação entre as regiões. Este modelo considera a existência de um único barramento elétrico, com todas as usinas hidroelétricas ligadas a uma extremidade, e todo o mercado de energia elétrica (carga) ligado à outra extremidade. O modelo a barramento único pode ser utilizado, de forma relevante, em estudos de operação energética de usinas hidroelétricas pertencentes a uma mesma cascata ou região, por exemplo, a fim de se avaliar políticas de operação aplicadas no sistema de geração em questão.

Os modelos computacionais propostos neste trabalho consideram as duas abordagens no tratamento das restrições de transmissão (modelo a barramento único e modelo a subsistemas). Desta forma, eles permitem a consideração das restrições de transmissão, as quais são consideradas especialmente na determinação dos limites da geração huidráulica, de forma a se respeitar os limites de transmissão das linhas.

Quanto à consideração da estocasticidade das vazões afluentes, pode-se ter:

- Modelos determinísticos: estes modelos não levam em conta, de forma explícita, a natureza aleatória das vazões afluentes aos reservatórios do sistema hidroelétrico;

- Modelos estocásticos: neste caso, considera-se explicitamente a estocasticidade das vazões afluentes, tendo como base o registro histórico disponível das afluências ao sistema hidroelétrico. A partir do registro histórico, pode-se ajustar um modelo, pelo qual se supõe que a série

histórica tenha sido produzida, mantendo as características estatísticas básicas das afluências, obtendo-se, dessa forma, séries sintéticas de vazões afluentes.

Com relação à consideração da estocasticidade das vazões afluentes, os modelos deste trabalho foram desenvolvidos para receber as vazões afluentes como parâmetros externos, ou seja, eles não estão acoplados à determinação das vazões afluentes. Entretanto, eles não consideram de forma explícita a estocasticidade na técnica de resolução do problema, como fazem as abordagens que utilizam a programação dinâmica estocástica ou programação dinâmica dual estocástica.

3.5.1 Condições de Operação Energética

Para estudos relacionados ao planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos, geralmente é necessária a utilização de ferramentas computacionais, a fim de realizar avaliações e análises, e assim, obter como resultados desde as decisões operativas que devem ser tomadas no momento presente até uma avaliação do desempenho dos sistemas hidrotérmicos de geração em um horizonte distante, sob condições de operação energética especificadas.

Neste ponto do trabalho, abordar-se-á as condições de operação energética que devem ser determinadas para que um estudo de otimização e/ou simulação possa ser realizado. Nos capítulos 4 e 5, os principais aspectos dos modelos de otimização e simulação são apresentados de forma detalhada.

Modelo de Otimização da Operação Energética

Modelos de otimização, normalmente, são baseados em técnicas que utilizam cálculo diferencial e integral para determinar os valores das variáveis de decisão. Estes modelos possuem, em sua própria estrutura, procedimentos que determinam a tomada de decisão, seguindo critérios estabelecidos na montagem de sua função objetivo, obedecendo ainda a um conjunto de restrições [159]. Geralmente, pretende-se conhecer os valores das variáveis de decisão que otimizam alguma medida de desempenho, como por exemplo, a maximização de receitas ou de benefícios líquidos, minimização de custos, etc.

Para o modelo computacional de otimização proposto, empregou-se três funções objetivo: minimização do custo da geração hidrotérmica[19], maximização dos benefícios hidroelétricos e

[19]Esta função objetivo foi escolhida para apresentação do modelo de otimização aplicado ao planejamento da operação energética.

maximização do volume armazenado nos reservatórios. As condições de operação energética relativas ao modelo de otimização proposto encontram-se ilustradas na Figura 3.8 e são detalhadas a seguir:

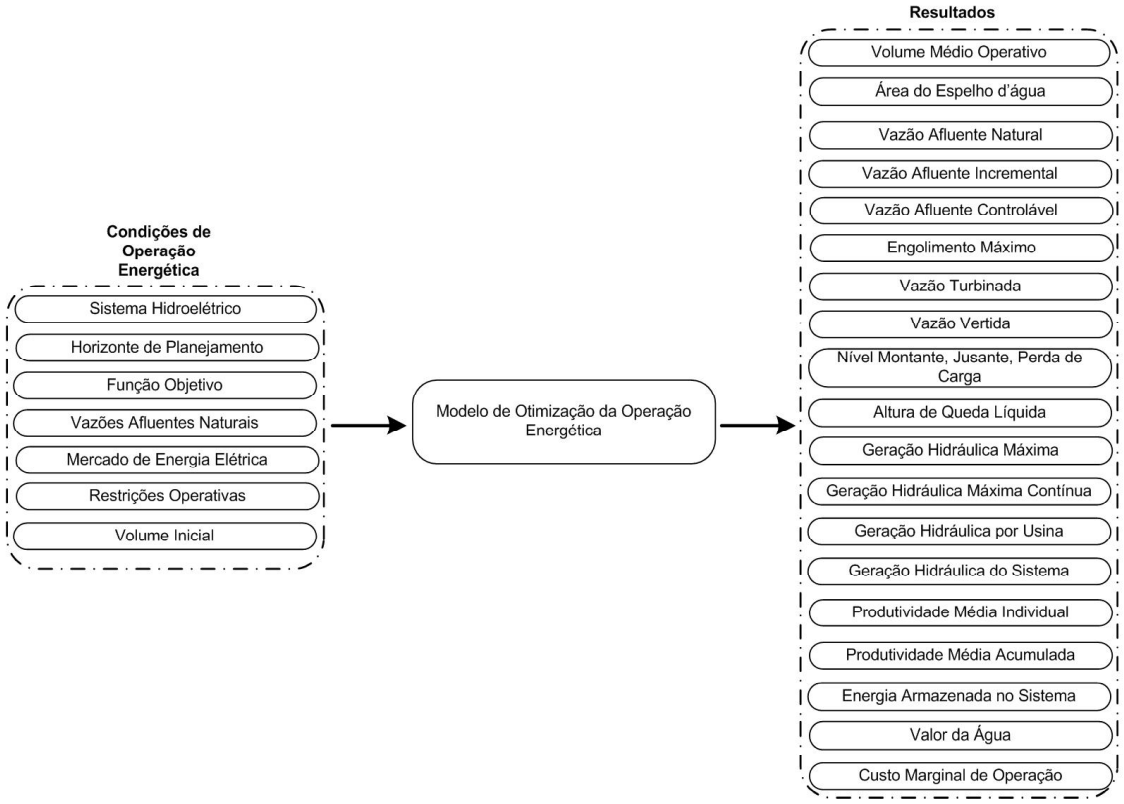

Figura 3.8: Modelo de otimização da operação energética.

- Sistema hidroelétrico: especifica o sistema hidroelétrico empregado na otimização da operação energética, por meio da definição das usinas que o compõem;

- Horizonte de planejamento: refere-se à definição do número de intervalos e da discretização dos intervalos do horizonte de planejamento. Para o modelo de otimização, a definição do horizonte ainda envolve a determinação da taxa de juros nominal a ser utilizada no coeficiente de valor presente;

- Função objetivo: envolve a definição da função objetivo empregada nos estudos (minimização do custo da geração hidrotérmica, maximização dos benefícios hidroelétricos e maximização do volume armazenado nos reservatórios);

- Vazões afluentes naturais: especifica a quantidade de água disponível para o sistema hidroelétrico durante a otimização, pela definição da vazão afluente natural para cada usina em cada intervalo do horizonte de planejamento. Pode-se utilizar três opções para definir as vazões afluentes naturais: vazões do histórico, vazões da MLT e vazões previstas (ou mesmo séries sintéticas de vazões);

- Mercado de energia elétrica: determinação do mercado de energia elétrica a ser atendido a cada intervalo do horizonte de planejamento. A definição do mercado de energia pode ser feita especificando-se uma demanda média para cada intervalo. Esta demanda pode ser constante ou variável[20];

- Restrições operativas: estas restrições são relativas a valores de volume mínimo e máximo, de vazão defluente mínima e máxima, e de geração hidráulica mínima e máxima. Estas restrições aplicam-se a cada usina e são consideradas na otimização de todos os intervalos do horizonte de planejamento;

- Volume inicial: determina o armazenamento inicial dos reservatórios das usinas hidroelétricas.

Modelo de Simulação da Operação Energética

Diferentemente dos modelos de otimização, nos modelos de simulação não há um procedimento de tomada de decisão inerente ao processo, sendo necessárias diretrizes externas, conhecidas por políticas de operação, para determinar os valores das variáveis de decisão. Estas políticas podem ser empíricas, baseadas em sugestões de especialistas, ou determinadas a partir de modelos matemáticos, por exemplo. Uma vez especificados os valores das variáveis de decisão pelo modelo de simulação, o desempenho da operação energética é medido e pode-se avaliar o impacto da política utilizada. Diferentes posições relativas dentro das cascatas e diferentes características construtivas, tais como, altura de queda líquida, capacidade de armazenamento da água, produtibilidade da usina, etc. são características peculiares de cada usina hidroelétrica. Baseado nisso, fica praticamente inviável desenvolver regras de operação generalizadas [180]. As condições de operação energética relativas ao modelo de simulação proposto encontram-se ilustradas na Figura 3.9. A diferença essencial entre os modelos de otimização e simulação consiste na utilização da função objetivo pelo primeiro e de uma política de operação energética

[20] Adicionalmente, podem ser definidos fatores de sazonalidade que determinam como a demanda média varia para cada intervalo.

pelo segundo. Portanto, para o modelo de simulação, explica-se apenas a condição de operação energética relativa à política de operação, permanecendo todas as outras condições de acordo com o modelo de otimização.

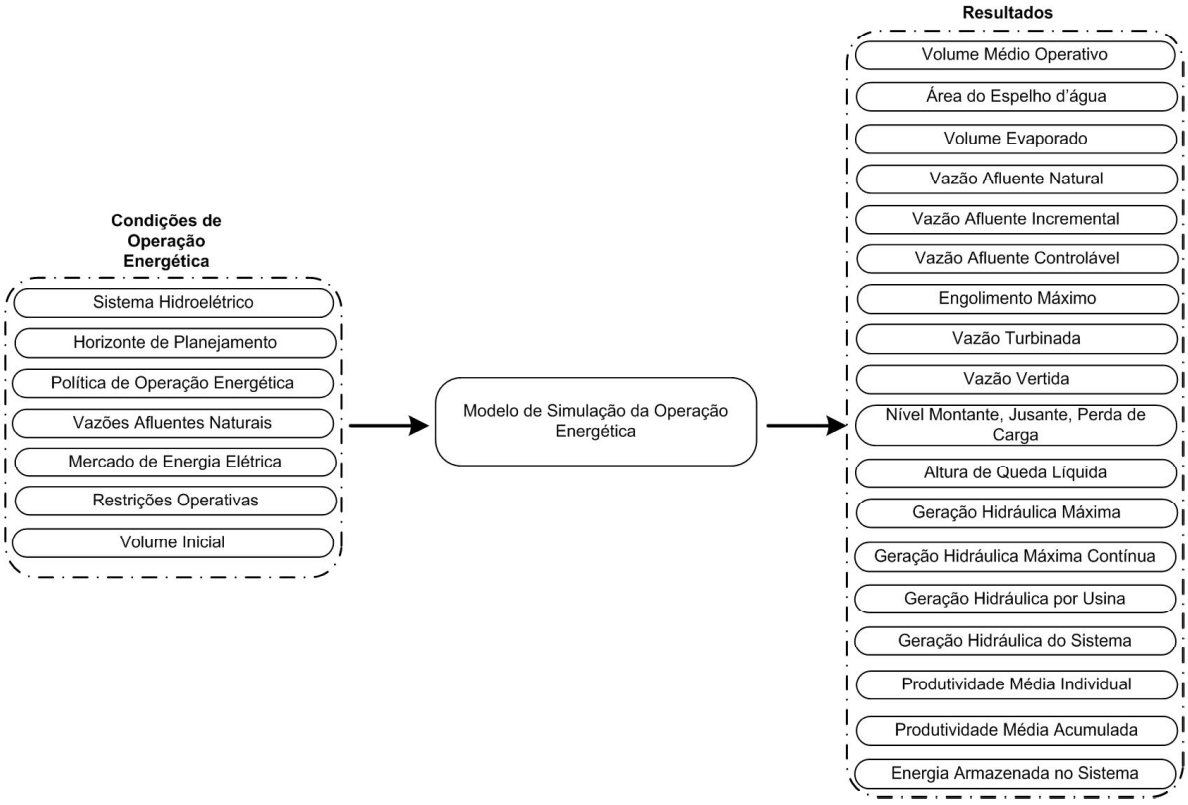

Figura 3.9: Modelo de simulação da operação energética.

- Política de operação energética: é utilizada no modelo de simulação da operação energética para definir como o mercado de energia elétrica vai ser atendido de forma conjunta pelas usinas que compõem o sistema hidroelétrico de geração. Para o modelo de simulação proposto são implementadas duas políticas de operação: a política paralela e uma política proposta baseada em sistemas de inferência *fuzzy* [133, 132]. A política proposta visa a obtenção de valores para as variáveis de decisão que conduzam a soluções próximas às mais eficientes possíveis[21]. Mais detalhes são fornecidos no Capítulo 5.

[21]Na obtenção da política de operação energética proposta, emprega-se o modelo de otimização desenvolvido.

3.5.2 Rede Hidráulica

A equação de balanço hidráulico se repete a cada intervalo t do horizonte de planejamento e para cada usina hidroelétrica i, podendo ser representada por um nó de índice (i,t), como mostra a Figura 3.10. Assim, a equação de equilíbrio de fluxos de cada nó representa a equação de balanço da água [165]. Desta forma, o planejamento da operação energética de sistemas hidroelétricos a usinas individualizadas pode ser representado como um problema de fluxo em rede. A abstração necessária, para entender esta representação, é considerar que cada nó da rede representa o comportamento de uma usina hidroelétrica durante um intervalo do horizonte de planejamento. Os arcos convergentes ao nó representam o volume armazenado no início do intervalo t, a afluência incremental[22] durante o referido intervalo e as defluências das usinas imediatamente a montante; enquanto que os arcos divergentes do nó são a defluência durante o intervalo t e o volume armazenado no final do mesmo intervalo.

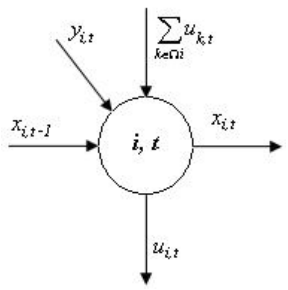

Figura 3.10: Representação do balanço hídrico por meio dos nós da rede.

Baseado nesta representação, uma cascata de usinas pode ser representada por uma arborescência, denominada rede básica (Figura 3.11). Nesta rede, os arcos representam a vazão defluente descarregada de uma usina para a usina diretamente a jusante. Considerando-se a estrutura topológica usual do sistema hidroelétrico brasileiro, isto é, cada usina possui apenas uma usina diretamente a jusante, pode-se afirmar que, na rede básica, em cada nó, há somente um arco divergente de defluência. A repetição temporal desta arborescência, nos vários intervalos do horizonte de planejamento, constitui a rede hidráulica (Figura 3.12), também conhecida como arborescência expandida no tempo ou arborescência temporalmente expandida [145]. Desta forma, a rede básica pode ser compreendida como a representação da cascata de usinas hidroelétricas para um intervalo específico do horizonte de planejamento. O nó sumidouro representa o fim do

[22] A afluência incremental é tratada como uma injeção no nó.

aproveitamento dos recursos hidráulicos.

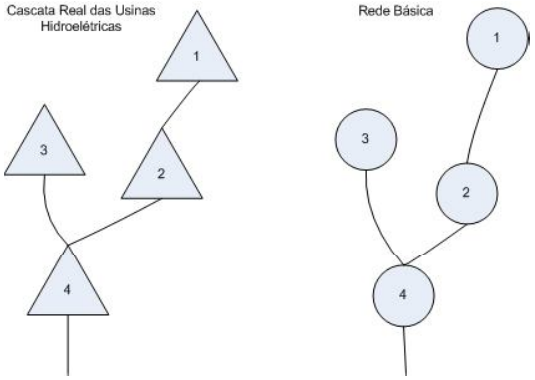

Figura 3.11: Representação da rede básica associada a uma cascata com quatro usinas hidroelétricas.

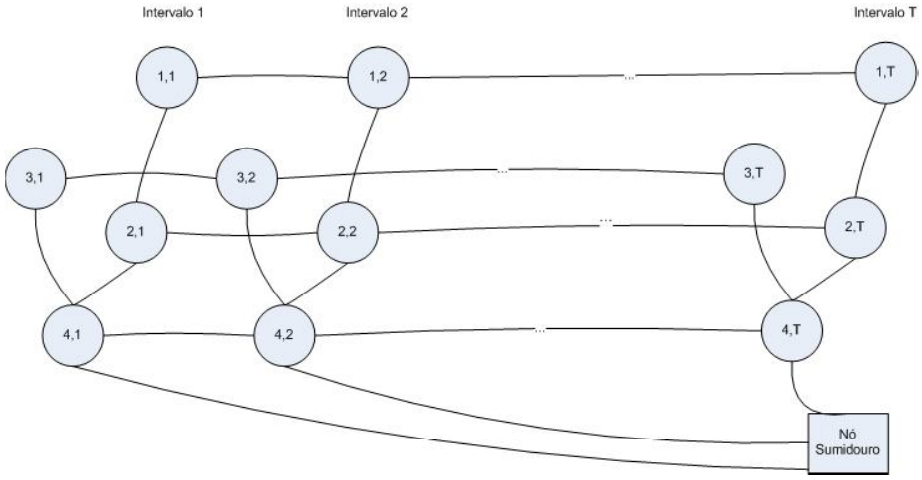

Figura 3.12: Representação da rede hidráulica associada a uma cascata com quatro usinas hidroelétricas em um horizonte de T intervalos.

Na rede hidráulica, as variáveis de volume das usinas com reservatório de acumulação são responsáveis pela informação do estado dos reservatórios de um intervalo para o intervalo seguinte. Para as usinas a fio d'água não há arcos de volume ligando as redes básicas de cada intervalo, pois a faixa de operação normal destas usinas é igual a zero. Desta forma, as defluências das usinas a fio d'água são determinadas de forma direta pela soma da sua vazão afluente incremental com as defluências das usinas imediatamente a montante, tornando desnecessária a representação de sua equação de balanço hidráulico. Entretanto, a consideração do engolimento máximo, por exemplo, para estas usinas deve permanecer no modelo.

3.6 Considerações Finais

Neste capítulo, apresentou-se o planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração. Inicialmente, apresentou-se uma motivação do estudo do planejamento da operação, por meio da sua complexidade e das suas características. Posteriormente, enfocou-se sua modelagem matemática, uma breve introdução aos modelos computacionais propostos e as condições de operação energética. Por fim, apresentou-se a rede hidráulica, a estrutura utilizada para representar o planejamento da operação como um problema de fluxo em rede.

O próximo capítulo enfoca a apresentação detalhada do modelo de otimização da operação energética. Serão apresentados detalhadamente o algoritmo de otimização da operação energética e as questões concernentes à otimização da operação, como as estratégias de partições dos arcos adotadas.

Capítulo 4

Modelo de Otimização da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos de Geração

4.1 Considerações Iniciais

No Capítulo 3, o planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração foi classificado como um problema de otimização. Além do mais, mostrou-se que a modelagem do sistema termoelétrico e da demanda (mercado de energia elétrica) por meio da função objetivo simplifica o planejamento hidrotérmico, transformando-o num problema exclusivamente hidroelétrico, como será tratado a partir de agora, em virtude, especialmente, da forte predominância da geração de origem hidráulica no sistema hidrotérmico brasileiro de produção de energia elétrica.

Adicionalmente, neste capítulo, apresentar-se-á, adiante, uma formulação matemática específica para o planejamento da operação energética de sistemas hidroelétricos a usinas individualizadas, a fim de evidenciar algumas particularidades deste problema, visando, também, uma apresentação mais didática do método de solução deste problema.

Neste capítulo serão evidenciados alguns aspectos importantes da otimização da operação energética. Dentre estes aspectos, destacam-se a matriz indicadora das variáveis básicas, as estratégias de partição dos arcos, a identificação dos ciclos, o cálculo da direção de caminhada dos arcos, o cálculo do passo máximo e do passo ótimo, e por fim, a atualização dos valores

das variáveis de decisão. Para finalizar o capítulo, apresenta-se o algoritmo de otimização da operação energética, de forma a ilustrar efetivamente a aplicação dos aspectos envolvidos na otimização.

4.2 Formulação Alternativa para o Planejamento da Operação Energética de Sistemas Hidroelétricos

Reescrevendo o problema do planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos (ou hidroelétricos) a usinas individualizadas em forma matricial tem-se:

$$\min \qquad F(vd) \tag{4.1}$$

$$s.a. \qquad A \cdot vd = b; \tag{4.2}$$

$$vd^{min} \leqslant vd \leqslant vd^{max} \tag{4.3}$$

O problema acima é um problema de fluxo em rede não-linear com arcos capacitados no qual se pretende minimizar a função objetivo sujeita a um conjunto de restrições. A função objetivo a ser minimizada representa o custo total de produção de energia do sistema hidrotérmico adicionada a uma condição terminal, já que o sistema de geração não deixa de operar com o final do horizonte de planejamento. Esta função é não-linear, não separável espacialmente, porém aditivamente separável no tempo. A restrição de igualdade representa as equações de equilíbrio de fluxos em cada nó da rede[1]. A matriz A representa o acoplamento espacial nos aproveitamentos hidroelétricos das bacias hidráulicas, e o acoplamento temporal em cada hidroelétrica ao longo do horizonte de planejamento. O acoplamento espacial fica definido pelas defluências das usinas de montante para as de jusante na cascata. O acoplamento temporal se dá pelos volumes dos reservatórios de acumulação sucessivamente nos intervalos de tempo ao longo do horizonte de planejamento. A restrição de desigualdade, denotando os limites para as variáveis de decisão, é representada pelas canalizações impostas aos arcos da rede, ou seja, os arcos são ditos capacitados [11]. A matriz A é a matriz de incidência nó-arco da rede hidráulica, vd é o vetor de todas as variáveis de decisão[2] e b é o vetor das vazões afluentes incrementais. Pode-se observar então, que o conjunto de restrições, que representam a rede e a canalização das variáveis, é um conjunto de

[1] A equação de equilíbrio de fluxos em cada nó da rede representa a equação de balanço hídrico.

[2] As variáveis de decisão do problema hidroelétrico são a vazão defluente (variável de controle) e o volume armazenado (variável de estado).

equações e inequações lineares, respectivamente.

4.3 Otimização da Operação Energética

Definidas as condições de operação, o objetivo do planejamento da operação energética de sistemas hidroelétricos a usinas individualizadas é, a partir de um conjunto inicial de vazões defluentes e volumes armazenados nos reservatórios, obter-se uma política otimizada de gerenciamento dos recursos hidráulicos, tal que os reservatórios sejam usados no sentido de evitar, tanto quanto possível, a utilização da complementação não hidráulica ao longo de todo o horizonte de planejamento. Ressalta-se que, devido ao tamanho e à limitação dos recursos do sistema hidroelétrico brasileiro, um planejamento da operação, que trate das necessidades energéticas de forma coordenada, torna-se necessário para determinar quanto, quando e onde se utilizar os recursos hidráulicos e térmicos, a fim de minimizar o custo total de produção de energia do sistema hidrotérmico de geração ou, de modo equivalente, a fim de maximizar os benefícios econômicos da geração hidráulica. Daí resulta a relevância da aplicação de um algoritmo de otimização para o planejamento da operação energética do sistema hidrotérmico brasileiro, a ser apresentado adiante.

Quatro aspectos, em particular, tornam bastante complexo o problema de gerenciamento dos recursos hidroelétricos. O primeiro deles é a estocasticidade com relação às futuras vazões afluentes e ao mercado de energia elétrica. A incerteza das vazões afluentes, por exemplo, é considerada, de forma explícita, somente por modelos que agregam o sistema hidroelétrico em um reservatório equivalente. O segundo aspecto é o acoplamento hidráulico (ou espacial) entre os vários aproveitamentos, devido à intrincada rede hidráulica que forma grandes e complexas cascatas com forte interdependência operativa entre as usinas, o que exige uma representação individualizada de cada usina hidroelétrica. O terceiro aspecto é a limitação física e operativa dos reservatórios das usinas. O quarto aspecto é o acoplamento temporal, pois a disponibilidade dos recursos hidroelétricos de geração em um dado intervalo do planejamento da operação depende de sua utilização no(s) intervalo(s) anterior(es).

O problema do planejamento da operação energética de sistemas hidroelétricos foi formulado como um problema de otimização não-linear de fluxo em rede com arcos capacitados. Baseado na estrutura topológica usual entre as usinas hidroelétricas brasileiras, na qual cada usina possui apenas uma usina diretamente a jusante, pode-se concluir que este problema possui uma estrutura

muito especial, além de uma função objetivo aditivamente separável no tempo, com significado econômico (custo da operação) bem definido que, uma vez aproveitado, pode nortear o algoritmo de otimização fazendo uso de estratégias adequadas de partição de variáveis. O bom emprego destas particularidades permite o desenvolvimento de um algoritmo específico para o sistema hidroelétrico brasileiro, inspirado em [21, 23, 24, 31, 32, 53, 108, 113, 169], e que será discutido neste capítulo.

Os problemas representados por um modelo de fluxo em rede têm seus métodos de solução baseados na partição do conjunto total de arcos entre arcos não básicos e básicos. Os arcos não básicos representam as variáveis independentes do problema em questão, ao passo que os arcos básicos representam as variáveis dependentes. O conjunto de arcos básicos forma uma estrutura de árvore na rede do problema. A inclusão de um arco não básico à árvore forma, particularmente, um ciclo em que a orientação dos arcos básicos da árvore pode concordar ou discordar com o ciclo formado [31].

Métodos de otimização visam determinar uma direção de caminhada para as variáveis independentes do problema, a fim de obter melhores valores para a função objetivo. O algoritmo de otimização utilizado neste trabalho baseia-se no método do Gradiente Reduzido para alcançar uma direção de caminhada para as variáveis independentes. A vantagem do método do Gradiente Reduzido é que ele reduz a dimensionalidade do problema, representando todas as variáveis em termos de um subconjunto de variáveis independentes [12]. O método do Gradiente Reduzido foi primeiramente desenvolvido por Wolfe [179] *apud* [12] para resolver um problema de programação não-linear com restrições lineares. Posteriormente, o método foi generalizado por Abadie e Carpentier [1] para manusear restrições não-lineares.

Resumidamente, o método do Gradiente Reduzido, específico para estruturas de rede aplicado à operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração pode ser definido assim: primeiramente, calcula-se o gradiente reduzido para os arcos não básicos. Após obter-se o gradiente reduzido para cada arco não básico, determina-se a direção de caminhada para cada um destes arcos. Como trata-se de um problema com arcos capacitados, é necessário verificar se a direção de caminhada dos arcos não básicos está respeitando a canalização destes arcos. Para impedir que um arco não básico viole um de seus limites, deve-se anular a sua direção de caminhada, desde que a variável independente representada por este arco esteja em um de seus limites e a direção de caminhada implicar no desrespeito da canalização. Este processo é denominado de projeção do vetor de direção dos arcos não básicos. Após este processo, deve-se calcular a direção

de caminhada das variáveis dependentes, representadas pelos arcos básicos. Feito isto, a direção de caminhada do conjunto total de arcos fica determinada. Normalmente, procura-se definir uma base com o maior número possível de arcos dentro do intervalo de seus limites de canalização, para que a direção de caminhada dos arcos não básicos não resulte na violação da canalização de alguma variável dependente (arco básico). Com todas as direções de caminhada determinadas, calcula-se o tamanho do passo máximo (α^{max}) que mantém a factibilidade, visto que o método do Gradiente Reduzido é um método primal. Com a obtenção do passo máximo do conjunto de arcos, calcula-se o passo ótimo (α^*) por meio de uma busca unidimensional, seguido pela atualização dos valores das variáveis de decisão e por uma verificação na convergência do problema. Se o problema ainda não tiver convergido, deve-se retornar ao início do processo iterativo.

Alguns trabalhos [31, 44, 108, 145] propõem a utilização parcial dos arcos não básicos para determinar a direção de caminhada. Estes trabalhos sugerem a partição do conjunto de arcos não básicos em arcos fixos e super básicos. Esta partição dos arcos não básicos, em particular, objetiva amenizar os cálculos computacionais na determinação da direção de caminhada por meio de heurísticas contidas na estrutura de alguns problemas. Ou seja, estas heurísticas permitem a utilização de um subconjunto do conjunto total de arcos não básicos, durante as iterações do algoritmo de otimização.

Assim, os arcos não básicos são particionados em dois conjuntos: um conjunto formado por arcos não básicos que devem permanecer inalterados, não sofrendo mudanças em seus fluxos, ou seja, a direção de caminhada destes arcos é nula. O outro conjunto é formado por arcos super básicos que serão as variáveis independentes do problema, isto é, são os arcos não básicos que podem variar seus valores (fluxos) entre os seus limites de canalização. Dependendo da heurística escolhida para a partição dos arcos, os arcos super básicos podem ser uma fração do conjunto não básico ou corresponder a todo o conjunto de não básicos.

Antes de apresentar-se o algoritmo de otimização da operação energética, algumas características do problema serão abordadas, de forma a permitir uma maior eficiência no processo de otimização e um menor esforço computacional. Posteriormente, alguns itens do processo de otimização, serão apresentados, de forma a facilitar o entendimento do algoritmo implementado.

4.3.1 Matriz Indicadora das Variáveis Básicas

Considerando-se a estrutura topológica usual entre as usinas hidroelétricas brasileiras, cada usina possui apenas uma usina diretamente a jusante. Desta forma, de cada nó da rede hidráulica

(arborescência expandida no tempo) saem, no máximo, dois arcos: um de defluência e outro de volume. Declarando um destes arcos como pertencente ao conjunto de variáveis básicas e o outro como pertencente ao conjunto de variáveis não básicas, é possível elaborar um algoritmo de fluxo em rede usando somente um único índice. Utilizando-se esta particularidade da rede hidráulica, pode-se obter, uma base e modificar toda a estrutura da árvore associada a ela, além de facilitar e melhorar a eficiência da identificação do ciclo formado ao se introduzir um arco super básico na árvore. Em [23], propõe-se a identificação da base, por uma estrutura chamada MDB (Matriz de Defluência Básica). Esta matriz tem o número de linhas igual ao número de usinas do sistema hidroelétrico em estudo, e o número de colunas igual ao número de intervalos do horizonte de planejamento. Na MDB, cada linha está associada a um reservatório e cada elemento da linha corresponde ao intervalo de tempo no qual a defluência desse reservatório é variável básica.

Para o algoritmo usando a representação de fluxo em rede aqui apresentada, generaliza-se a ideia da MDB, resultando-se na MIVB (Matriz Indicadora das Variáveis Básicas). O armazenamento da árvore de arcos básicos é feito pela MIVB, na qual cada elemento da matriz representa um nó da rede hidráulica. A MIVB possui mesma dimensão da MDB, porém os valores armazenados em cada uma são diferentes. Na MIVB, quando um arco de volume é declarado básico, o elemento da matriz correspondente ao nó de origem daquele arco terá valor 0. Entretanto, se neste nó de origem o arco de defluência for declarado básico, o elemento na matriz terá valor 1. Desta forma, a MIVB pode ser constituída apenas de 0s e 1s. A Figura 4.1 apresenta a rede hidráulica para o sistema de quatro usinas e três intervalos de planejamento.

A MIVB que representa a árvore de arcos básicos da Figura 4.1 é dada por:

$$\mathbf{MIVB} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Durante todo o processo iterativo, quando um arco básico atinge o seu limite, o outro arco divergente do mesmo nó toma seu lugar na base [24, 72]. A identificação da estrutura da árvore de uma solução básica a partir da MIVB faz com que a atualização dos arcos básicos seja facilitada, visto que esta atualização é baseada na troca de um 0/1 para um 1/0 em uma das posições da MIVB.

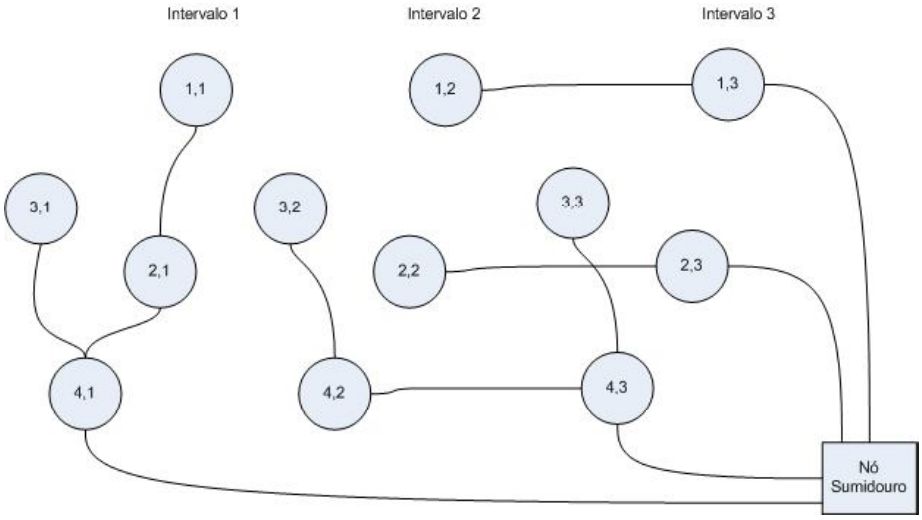

Figura 4.1: Representação da árvore composta por arcos básicos associada a uma cascata com quatro usinas hidroelétricas e três intervalos do horizonte.

4.3.2 Estratégia de Partição dos Arcos

A rede hidráulica é uma arborescência expandida no tempo que possui, no máximo, somente dois arcos divergentes por nó. Os arcos divergentes da rede hidráulica devem ser particionados em arcos básicos e não básicos e, utilizando-se o conjunto de arcos não básicos, estes podem ser particionados em arcos fixos e super básicos. A partição de arcos entre não básicos e básicos deve formar uma base com o número máximo de arcos básicos fora dos seus limites de canalização. Desta forma, estratégias de partição dos arcos devem ser definidas, a fim de se obter a partição mais eficiente sob o ponto de vista dos objetivos da otimização da operação energética e por conseqüência da convergência do algoritmo. Estratégias de partição de arcos são formadas por um conjunto de procedimentos que procuram guiar a partição dos arcos. Neste trabalho, são apresentadas três estratégias, baseadas nas particularidades do problema e inspiradas em [23]. É importante ressaltar que não existe uma estratégia de partição dos arcos que seja ótima do início ao fim, ou seja, cada uma deve ser aplicada no seu devido tempo. Além do mais, o emprego de uma determinada estratégia de partição possui um significado físico quando aplicado ao problema hidrotérmico [24].

Estratégia de Partição de Arcos Baseada na Função de Produção Hidráulica - (EPA - FPH)

A estratégia de partição de arcos baseada na função de produção hidráulica (EPA - FPH) sugere que o conjunto de arcos básicos seja constituído pelos volumes, sempre que possível. Desprezando-se a perda de carga e um possível efeito de remanso, a função de produção hidráulica para uma usina hidroelétrica qualquer é definida como:

$$p = k \cdot [h_{mon}(x) - h_{jus}(u)] \cdot min[u, q_{max}] \tag{4.4}$$

Supondo que a defluência não atingiu o valor do engolimento máximo, e derivando (4.4) em relação ao volume e à defluência, resulta:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = k \cdot u \cdot \frac{dh_{mon}(x)}{dx} \tag{4.5}$$

$$\frac{\partial p}{\partial u} = k \cdot [h_{mon}(x) - (h_{jus}(u) + \frac{dh_{jus}(u)}{du} \cdot u)] \tag{4.6}$$

Desprezando-se o efeito da variação do canal de fuga[3] e calculando a relação entre as derivadas parciais, obtém-se:

$$\frac{\frac{\partial p}{\partial x}}{\frac{\partial p}{\partial u}} = \frac{\frac{u \cdot dh_{mon}(x)}{dx}}{h_{mon}(x) - h_{jus}(u)} \tag{4.7}$$

Substituindo-se em (4.7) os valores médios mensais de volume armazenado e vazão defluente, observa-se que, de forma aproximada, o gradiente em relação ao volume é uma casa decimal menor que o gradiente em relação à defluência. Este fator indica que o conjunto ideal de arcos não básicos deve ser composto pelos arcos de defluência [16, 24, 68].

Dessa forma, sob o ponto de vista da função de produção hidráulica, o conjunto de arcos básicos deve ser o conjunto dos volumes armazenados nos reservatórios, e assim deve permanecer até que um de seus limites de capacidade impeçam essa partição. Assim, se um arco de volume (i,t) estiver "dentro" do intervalo aberto de seus limites, este arco estará na base e MIVB(i,t) = 0. Caso contrário, MIVB (i,t) = 1. Entretanto, se na(s) iteração(ões) seguinte(s) a variável correspondente ao volume abandonar seu limite, a defluência deixa automaticamente a base para

[3] $\frac{dhjus(u)}{du} = 0$.

a volta do volume.

Além de se basear na análise da função de produção hidráulica, esta estratégia corresponde a uma intuição física do problema, pois, na operação energética, a defluência é uma variável de controle enquanto o volume do reservatório não atinge um de seus limites, quando, obrigatoriamente, a defluência deixa de ser uma variável controlável.

Estratégia de Partição de Arcos Baseada na Transferência de Energia da Cascata (EPA - TEC)

A estratégia de partição de arcos baseada na transferência de energia procura fazer a transferência de energia de intervalos com custos marginais baixos para períodos com custos marginais elevados. Na existência de reservatórios de acumulação, estes poderiam ser usados para tentar igualar custos marginais de operação durante o horizonte de planejamento [99]. Uma alternativa pode ser estocar água em períodos nos quais sua disponibilidade é relativamente abundante, e utilizar deste armazenamento para geração de energia em períodos de relativa escassez. Desta forma, a otimização hidrotérmica procura distribuir a produção hidráulica de forma a igualar o custo marginal ao longo do horizonte de planejamento [169]. Caso não fosse assim, uma diferença de custos marginais de operação entre dois intervalos induziria o período com custo marginal menor a transferir energia para o período de custo marginal maior, proporcionando um ganho líquido para o sistema como um todo [166].

A estratégia de partição de arcos baseada na transferência de energia é dividida em duas estratégias para facilitar esta transferência. A primeira, denominada estratégia de partição de arcos baseada na transferência de energia da cascata (EPA - TEC), procura fazer a transferência de energia em toda a cascata entre diferentes intervalos do planejamento. A segunda, denominada estratégia de partição de arcos baseada na transferência de energia da usina (EPA - TEU), procura fazer a transferência de energia de um mesmo reservatório de uma usina hidroelétrica em diferentes intervalos do planejamento.

A EPA - TEC permite a transferência de grandes blocos de energia desde que os reservatórios de acumulação envolvidos tenham capacidade para tal. Nesta estratégia, identificam-se os intervalos com o maior e menor custo marginal de operação, a fim de possibilitar a transferência de um grande bloco de energia entre estes intervalos. Para isto, declaram-se as defluências das usinas da cascata do intervalo mais a direita como variáveis básicas, enquanto que, todos os arcos de volume das usinas que não atingiram seus limites também devem pertencer ao conjunto

básico, conforme a EPA - FPH determina. Os arcos super básicos serão os arcos de defluência das usinas do intervalo mais à esquerda, a fim de se fechar o ciclo entre os dois intervalos.

Em uma nova iteração, poderá ser necessária uma nova partição que identifique os "melhores" intervalos sob o ponto de vista da transferência de energia. A EPA - TEC permite que o valor do volume armazenado nos reservatórios das usinas da cascata, em intervalos pertencentes ao ciclo, seja alterado. Esta transferência ocorre porque os arcos super básicos de defluência formam ciclos envolvendo as usinas da cascata, em intervalos consecutivos.

A EPA - TEC é eficiente no início do processo e quando a solução inicial é a solução a fio d'água. Entretanto, durante e ao final do processo esta não deverá ser a melhor estratégia, devido a necessidade de ajustes tênues entre os reservatórios, de forma mais individualizada. Para esse fim, utiliza-se a EPA - TEU, que faz o ajuste energético usina a usina.

Estratégia de Partição de Arcos Baseada na Transferência de Energia da Usina (EPA - TEU)

A EPA - TEU propõe que se verifique a curva de custo marginal de operação do sistema, e declare como básica a defluência que possibilite a maior transferência de energia de um intervalo do planejamento para outro intervalo, de uma determinada usina.

Ressalta-se que após a utilização destas três estratégias, parte-se para um ajuste bem mais fino em toda a rede hidráulica. Nesta etapa final, os arcos super básicos de todas as usinas irão corresponder a todo o conjunto de arcos não básicos. O algoritmo de otimização continuará a executar até que a convergência seja obtida. O teste da convergência será baseado em outro parâmetro de otimização fornecido pelo usuário, denominado *tolerância_permitida.*

4.3.3 Solução Inicial

Na otimização da operação energética empregou-se, como solução inicial, a solução a fio d'água, isto é, as vazões defluentes das usinas hidroelétricas são consideradas iguais às suas vazões afluentes naturais. Portanto, a solução a fio d'água não utiliza a capacidade de armazenamento e de regularização dos reservatórios.

4.3.4 Identificação dos Ciclos

No algoritmo implementado, duas partições consecutivas[4] no conjunto total de arcos são realizadas: uma partição entre arcos básicos e não básicos, e uma partição do conjunto não básico entre arcos super básicos e fixos. Com os arcos super básicos (variáveis independentes) estabelecidos, deve-se introduzir cada um destes arcos na estrutura de árvore, a qual representa a solução básica corrente. A inclusão de cada arco super básico forma um ciclo, que é a base de informação para se determinar a sua direção de caminhada. O conjunto de arcos de um ciclo e suas respectivas derivadas permitem calcular o efeito na função objetivo ao se circular um fluxo pelo ciclo. Além do mais, os ciclos podem ser vistos como conjuntos não-disjuntos de arcos básicos e super básicos. Os ciclos são considerados conjuntos não-disjuntos, porque alguns arcos básicos estão contidos, simultaneamente, em mais de um ciclo.

Uma das formas de identificar um ciclo, e adotada no algoritmo, consiste em utilizar a MIVB como um guia, norteando para onde aponta o arco básico de um determinado nó da estrutura de árvore. Se MIVB $(i,t) = 1$, deve-se seguir para baixo da árvore, usando-se um arco de defluência; se MIVB $(i,t) = 0$, deve-se seguir para a direita, utilizando-se um arco de volume. O algoritmo específico [31] para identificar os ciclos utiliza duas trilhas: a trilha origem e a trilha destino. A trilha origem é formada pelos arcos básicos que existem entre o nó de origem do arco super básico formador do ciclo até o nó sumidouro. A trilha destino é constituída por arcos básicos que existem entre o nó de destino do arco super básico formador do ciclo até o nó sumidouro. As trilhas, origem e destino, são determinadas, simultaneamente, obedecendo a seguinte regra: caso uma trilha receba um arco de defluência, a busca nesta trilha é interrompida, (re)iniciando-se a busca na outra trilha. Esta poderá também ser interrompida caso receba um arco de defluência. Para evitar a interceptação das trilhas, a cada arco que se acrescenta nas trilhas, deve-se testar se os últimos nós das duas trilhas são iguais. Se os últimos nós forem iguais, a busca será interrompida.

A partir das trilhas de origem e destino, o ciclo é identificado pelo seguinte agrupamento: o arco super básico, posicionado como primeiro arco, a trilha destino seguida pela trilha origem, com seus arcos em ordem inversa, porque estes arcos discordam do sentido do ciclo formado pelo arco super básico. A Figura 4.2 ilustra os ciclos formados por três arcos super-básicos ($x_{1,1}$, $u_{2,2}$ e $u_{1,3}$).

[4]Estas duas etapas de partição de variáveis são definidas pelas estratégias de partição de arcos, especificada na subseção anterior.

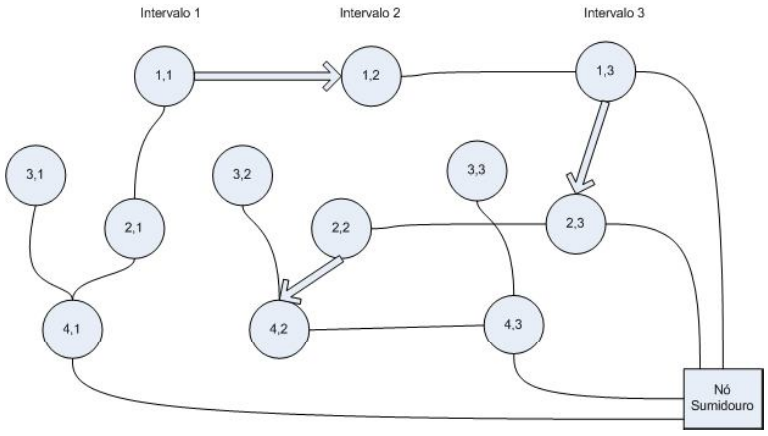

Figura 4.2: Exemplo de ciclos formados por três arcos super-básicos.

Os ciclos formados pelos três arcos super-básicos estão descritos a seguir. Ressalta-se que o sinal +/-, que aparece qualificando os arcos, significa se o arco concorda ou não com o sentido do ciclo formado pelo arco super-básico.

- Ciclo $(x_{1,1}) = x_{1,1} + x_{1,2} + x_{1,3}$ - $u_{4,1}$ - $u_{2,1}$ - $u_{1,1}$;
- Ciclo $(u_{2,2}) = u_{2,2} + x_{4,2} + u_{4,3}$ - $x_{2,3}$ - $x_{2,2}$;
- Ciclo $(u_{1,3}) = u_{1,3} + x_{2,3}$ - $x_{1,3}$.

Neste exemplo, o arco básico de volume $x_{1,3}$ está contido, simultaneamente, em dois ciclos, ilustrando o caso em que um arco básico participa de mais de um ciclo de forma simultânea.

4.3.5 Direção de Caminhada dos Arcos Super Básicos

O cálculo da direção de caminhada dos arcos super básicos é baseado no Método do Gradiente Reduzido. O Gradiente Reduzido é um método primal[5] de primeira ordem e corresponde ao método do Gradiente, porém ele é reduzido ao espaço das variáveis não-básicas [108].

No algoritmo implementado para otimização da operação energética, por meio do Gradiente Reduzido com fluxo em rede, os ciclos formados facilitam o cálculo da direção de caminhada dos arcos super básicos. Para exemplificação, pode-se considerar os ciclos formados na Figura 4.2.

O gradiente reduzido (g_s) relativo à cada arco super básico é calculado da seguinte maneira:

[5]Os métodos primais iniciam com uma solução factível e mantêm a factibilidade até o final do processo de otimização.

- $g_s(x_{1,1}) = \nabla f(x_{1,1}) + \nabla f(x_{1,2}) + \nabla f(x_{1,3})$ - $\nabla f(u_{4,1})$ - $\nabla f(u_{2,1})$ - $\nabla f(u_{1,1})$;
- $g_s(u_{2,2}) = \nabla f(u_{2,2}) + \nabla f(x_{4,2}) + \nabla f(u_{4,3})$ - $\nabla f(x_{2,3})$ - $\nabla f(x_{2,2})$;
- $g_s(u_{1,3}) = \nabla f(u_{1,3}) + \nabla f(x_{2,3})$ - $\nabla f(x_{1,3})$.

Do exposto, o cálculo do gradiente reduzido para um arco super básico consiste em uma somatorório de posições do vetor gradiente, cujas parcelas (arcos e sinais) estão presentes no ciclo formado pelo arco super básico.

Nos métodos de primeira ordem, utiliza-se somente o gradiente reduzido para calcular a direção de caminhada dos arcos super básicos (d_s). Como trata-se de um problema de minimização (considerando o objetivo de minimizar o custo da geração hidrotérmica)[6], a direção de caminhada de cada arco super básico é definida como o inverso aditivo (oposto aditivo) do gradiente reduzido. Portanto:

- $d_s(x_{1,1}) =$ - $g_s(x_{1,1})$;
- $d_s(u_{2,2}) =$ - $g_s(u_{2,2})$;
- $d_s(u_{1,3}) =$ - $g_s(u_{1,3})$.

A convergência dos métodos de primeira ordem é muito boa para pontos longe do ótimo. O método do Gradiente Reduzido, além de reduzir a dimensão do problema, assegura a convergência do algoritmo, pois a direção de caminhada das variáveis será sempre uma direção de melhora da função objetivo do problema. Entretanto, a medida que a solução se aproxima do ponto ótimo, a convergência perde a eficiência, tornando-se lenta [113].

4.3.6 Projeção da Direção de Caminhada dos Arcos Super Básicos

A projeção da direção de caminhada visa impedir a violação da canalização dos arcos super básicos. Para impedir que um arco super básico viole um de seus limites, deve-se anular a direção de caminhada deste arco, quando ele estiver em um dos seus limites, e a sua direção de caminhada implicar no desrespeito da canalização.

[6]Neste ponto insere-se a principal diferença na consideração e implementação das três funções objetivo, permanecendo o resto do algoritmo similar para os três objetivos.

A projeção da direção de caminhada das variáveis de decisão super básicas é feita da seguinte maneira:

$$\text{se } vd_{i,t} = vd_{i,t}^{max} \text{ e } d_s(vd_{i,t}) > 0 \text{ então } d_s(vd_{i,t}) = 0 \tag{4.8}$$

$$\text{se } vd_{i,t} = vd_{i,t}^{min} \text{ e } d_s(vd_{i,t}) < 0 \text{ então } d_s(vd_{i,t}) = 0 \tag{4.9}$$

4.3.7 Direção de Caminhada dos Arcos Básicos

A direção de caminhada dos arcos básicos (d_b) também aplica as informações contidas nos ciclos formados pelos arcos super básicos. Para cada ciclo, circula-se por ele, um fluxo com valor igual à direção de caminhada do arco super básico formador. A direção de caminhada dos arcos básicos corresponde aos valores combinados (soma) das direções de caminhada dos arcos super básicos, no qual o sinal (+/-) depende se o arco básico concorda (+) ou não (-) com o sentido do ciclo formado. Diz-se combinado porque, alguns arcos básicos pertencem, de forma simultânea, a mais de um ciclo. Para exemplificação, considera-se os ciclos formados na Figura 4.2.

- $d_b(x_{1,2}) = d_s(x_{1,1})$;
- $d_b(x_{1,3}) = d_s(x_{1,1})$ - $d_s(u_{1,3})$;
- $d_b(x_{2,2}) =$ - $d_s(u_{2,2})$.

Pelo exposto, pode-se ressaltar que, a identificação dos ciclos formados por cada arco super básico facilita o cálculo das direções de caminhada dos arcos básicos e super básicos[7]. Além do mais, pode-se reduzir o esforço computacional durante a otimização, ao se desprezar as computações com arcos não básicos fixos, visto que estes arcos não pertencem aos ciclos formados, permanecendo com seus valores inalterados.

4.3.8 Cálculo do Passo Máximo

Após o cálculo da direção de caminhada das variáveis de decisão (arcos básicos e super básicos), deve-se calcular o passo máximo nesta direção de caminhada, para que nenhuma das variáveis de decisão viole seus limites de canalização. Como as variáveis de decisão que sofrerão

[7]Isto porque os ciclos são a base da informação para se determinar a direção de caminhada dos arcos super básicos e, consequentemente, a direção de caminhada dos arcos básicos.

mudanças em seus valores estão contidas nos ciclos, utiliza-se os ciclos de modo a indicar para quais arcos se deve calcular o passo máximo.

Dependendo do sinal da direção de caminhada da variável de decisão, negativo ou positivo, a variável de decisão pode variar seu valor até o limite inferior ou superior, respectivamente[8]. Desta maneira, cada variável de decisão determina seu próprio passo máximo, de forma a não violar um de seus limites de canalização. O passo máximo de todas as variáveis de decisão é dado pelo menor valor encontrado entre os passos máximos não-nulos de cada variável.

$$\alpha^{max} = \begin{cases} \frac{vd_{i,t}^{min} - vd_{i,t}}{d(vd_{i,t})} & \text{se } d(vd_{i,t}) < 0 \\ \\ \frac{vd_{i,t}^{max} - vd_{i,t}}{d(vd_{i,t})} & \text{se } d(vd_{i,t}) > 0 \end{cases} \tag{4.10}$$

4.3.9 Cálculo do Passo Ótimo

A busca unidimensional resume-se a encontrar o tamanho do passo ótimo, pela solução do seguinte problema:

$$\alpha^* = \begin{cases} min_\alpha \ f(vd_{i,t}^k + \alpha \cdot d^k(vd_{i,t})) \\ \qquad\qquad s.a. \ 0 \leq \alpha \leq \alpha^{max} \end{cases} \tag{4.11}$$

onde f é a função objetivo do problema, vd^k é uma solução factível do problema e $d^k(vd_{i,t})$ é uma direção de melhora da função objetivo. A variável α é unidimensional (um escalar) e α^{max} é o tamanho do passo máximo que mantém a factibilidade do problema [108, 113].

O método de busca unidimensional implementado foi o método da Razão Áurea. Para maiores detalhes pertinentes a este método, pode-se consultar a referência [12].

4.3.10 Atualização das Variáveis de Decisão

Com o passo ótimo calculado por meio da busca unidimensional, pode-se calcular (atualizar) os valores das variáveis de decisão.

$$vd_{i,t}^{k+1} = vd_{i,t}^k + \alpha^* \cdot d^k(vd_{i,t})^9 \tag{4.12}$$

[8] Se $d(vd_{i,t}) = 0$, pode-se desconsiderar, pois esta direção implica que o arco não sofrerá mudança em seu valor.
[9] K especifica a iteração durante a otimização.

4.4 Algoritmo de Otimização da Operação Energética

A Figura 4.3 resume os passos do algoritmo para otimização da operação energética de sistemas hidroelétricos. Logo após, cada passo apresentado na figura será explicado.

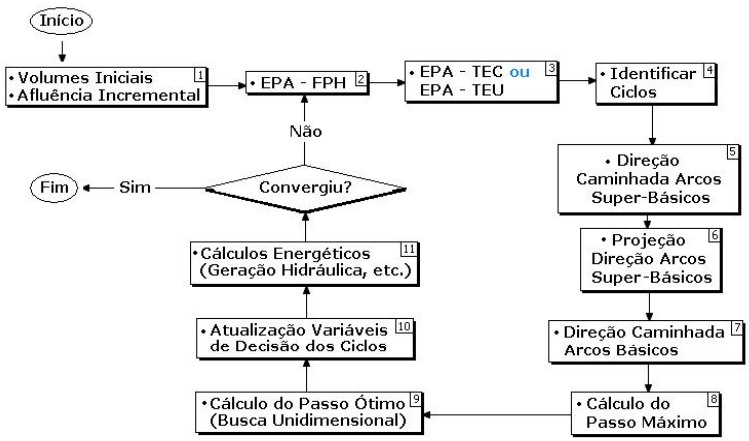

Figura 4.3: Algoritmo para otimização da operação energética.

1. Carrega-se o valor dos volumes (armazenamento) iniciais do planejamento da operação energética. Calculam-se os valores das vazões afluentes incrementais para todo o horizonte de planejamento;

2. A estratégia de particão EPA - FPH é executada para priorizar os arcos de volume para o conjunto de arcos básicos, desde que não estejam em seus limites de canalização. Esta estratégia de partição é adotada, pois sob o ponto de vista da função de geração hidráulica, o conjunto de arcos super básicos deve ser constituído preferencialmente pelos arcos das vazões defluentes;

3. Os arcos do problema de fluxo em rede são particionados em arcos não básicos e básicos, e o conjunto de arcos não básicos é particionado em arcos fixos e super básicos. As duas partições são realizadas dependendo da estratégia de partição adotada (EPA- TEC ou EPA - TEU);

4. Com a escolha dos arcos super básicos e básicos pelas estratégias de partição de arcos, é necessário identificar os ciclos formados pelos arcos super básicos, de forma a permitir a realização dos cálculos computacionais relativos a direção de caminhada destes arcos;

5. Realiza-se o cálculo do gradiente reduzido, para definir-se a direção de caminhada dos arcos super básicos;

6. Com a determinação da direção de caminhada dos arcos super básicos, realiza-se a projeção da direção de caminhada destes arcos. Esta projeção é realizada para que os arcos super básicos tenham seus limites de canalização respeitados;

7. O próximo passo envolve o cálculo da direção de caminhada dos arcos básicos, pela utilização dos ciclos formados pelos arcos super básicos;

8. Calcula-se o passo máximo na direção de caminhada dos arcos básicos e super básicos, de forma que nenhum deste arcos ultrapasse seus limites de canalização;

9. Determina-se o valor do passo ótimo por busca unidimensional (método da Razão Áurea);

10. Com os valores das direções de caminhada dos arcos super básicos e básicos, e do passo ótimo, atualiza-se os valores das variáveis de decisão;

11. Com os valores atualizados das variáveis de decisão, realiza-se os cálculos energéticos (geração hidráulica, geração complementar, energia armazenada no sistema, custo marginal de operação, etc.).

4.5 Considerações Finais

Neste capítulo, apresentou-se uma formulação alternativa para o planejamento da operação energética, enfocando a predominância da geração hidráulica do sistema brasileiro de produção de energia elétrica. Adicionalmente, este capítulo apresentou alguns importantes aspectos da otimização da operação energética. Para finalizá-lo, apresentou-se o algoritmo de otimização proposto para a otimização da operação energética.

O próximo capítulo apresenta detalhadamente o modelo de simulação da operação energética, enfatizando a política de operação energética proposta, a qual é baseada no sistema de inferência *fuzzy* de Takagi-Sugeno.

Capítulo 5

Modelo de Simulação da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos de Geração

5.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta a simulação da operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração, enfatizando a sua ampla aplicação no planejamento da operação e expansão de sistemas de produção de energia elétrica. Especificamente, modelos de simulação são muito usados em estudos relacionados ao planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos, sendo em geral, modelos que necessitam de uma política de operação para que possam ser implementados. Assim, o capítulo apresenta uma caracterização acerca de política de operação energética. O capítulo apresenta também a política de operação energética paralela e a política proposta, a qual é baseada no sistema de inferência *fuzzy* de Takagi-Sugeno. A fim de tornar mais claro para o leitor o funcionamento da política proposta, o capítulo apresenta os principais conceitos e operações envolvidos no desenvolvimento e funcionamento de um sistema de inferência *fuzzy*, por meio da apresentação da teoria de conjuntos *fuzzy* e da Lógica *Fuzzy*. O capítulo segue com a apresentação do sistema de inferência *fuzzy* Takagi-Sugeno implementado. Para finalizar o capítulo, é apresentado o algoritmo proposto para a simulação da operação energética.

5.2 Simulação da Operação Energética

Os algoritmos de simulação buscam reproduzir o comportamento operativo das usinas do sistema hidroelétrico sob condições de operação preestabelecidas. Desta forma, a simulação da operação pode ser utilizada para uma avaliação energética de sistemas hidroelétricos de geração, bem como para a desagregação das metas de geração hidráulica total entre todas as usinas do sistema hidroelétrico. No primeiro caso, pretende-se realizar uma análise energética do sistema hidroelétrico, com determinadas condições de operação podendo-se incluir um conjunto de restrições, tais como: atendimento do mercado de energia elétrica, usos múltiplos da água, limites físico-operativos dos reservatórios, configuração dinâmica do sistema gerador, programas de manutenção e falhas na operação das usinas hidroelétricas, além de restrições hidrológicas como, por exemplo, o fenômeno da evaporação na superfície dos reservatórios [32]. No segundo caso, o modelo de simulação da operação trata, de forma específica, da divisão da geração hidráulica do sistema hidroelétrico, entre as várias usinas do sistema [160]. Para exemplificar a funcionalidade do modelo de simulação, a Figura 5.1 ilustra um caso no qual um sub-sistema teste composto por algumas usinas hidroelétricas do sistema brasileiro deve gerar ghMW para o suprimento a um mercado de energia elétrica. O modelo de simulação não especificou que a geração do sistema hidroelétrico deveria ser ghMW; esta meta de geração foi determinada por outros modelos, como um modelo de médio prazo utilizando o reservatório equivalente de energia, por exemplo. Com isto, o modelo de simulação é responsável por desagregar esta meta de geração hidráulica, determinando quanto cada usina hidroelétrica deve gerar para que a meta estipulada seja atendida.

Nos estudos do planejamento da expansão de sistemas de geração, podem-se definir duas atividades distintas que se desenvolvem paralelamente: o dimensionamento das fontes de geração e a determinação do programa de expansão do sistema. O critério básico para o dimensionamento de uma fonte de geração é o de maximizar a função benefício total menos custo total da usina, com relação aos parâmetros que se deseja dimensionar. Entende-se por benefício energético de uma usina, ou de um conjunto de usinas, a sua capacidade de geração de energia e potência. Assim, nesses estudos é necessário avaliar esses benefícios, valorizá-los economicamente, e compará-los com os custos correspondentes. As características de operação de uma usina, assim como sua capacidade de geração, são funções da configuração do sistema gerador em que a usina está inserida. Portanto, os benefícios energéticos são sempre avaliados tomando-se por base uma configuração de referência, representativa da época em que a usina em estudo será agregada ao

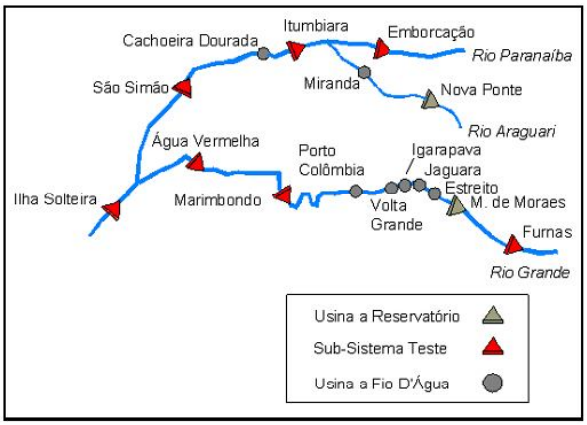

Figura 5.1: Sistema hidroelétrico para o fornecimento de energia elétrica no sistema sudeste/centro-oeste brasileiro.

sistema. No sistema brasileiro, são três os benefícios energéticos considerados nos estudos de dimensionamento de um aproveitamento hidroelétrico: o ganho de energia garantida, o ganho de energia secundária e o ganho de potência garantida. Esses parâmetros são calculados por meio da simulação da operação do sistema de referência, considerando ou não a inserção da usina em análise [58]. Desta forma, modelos de simulação também são utilizados no planejamento da expansão da geração do sistema elétrico brasileiro [72].

Modelos de simulação são amplamente utilizados em estudos relacionados ao planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos, sendo em geral, modelos que necessitam de uma política de operação para que possam ser implementados [148].

5.3 Política de Operação Energética

O processo de planejamento pode ser definido como a análise, sistemática e ordenada, de informações com o objetivo de subsidiar a tomada de decisões [58]. O planejamento da operação de um sistema de energia elétrica tem por objetivo determinar uma política de operação que atenda o mercado de energia elétrica de forma econômica e confiável. No planejamento de sistemas de geração de energia elétrica, as principais informações a serem tratadas são as características físico-operativas e econômicas das fontes de geração, buscando-se tomar decisões que alcancem o melhor compromisso entre estas fontes visando o atendimento dos requisitos de energia do sistema com economia e confiabilidade.

O planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração pretende determinar uma política de operação energética, que especifique como os subsistemas térmico e hidráulico devem ser operados para que os recursos disponíveis para geração de energia elétrica sejam utilizados de forma eficiente. Em sistemas hidrotérmicos de geração com grande participação hidráulica, a política de operação energética visa substituir, na medida do possível, a geração de origem complementar (usinas termoelétricas, importação de energia de outros sistemas e o déficit) por geração de origem hidroelétrica. Como as variáveis de decisão do planejamento hidroelétrico são a defluência e o volume armazenado nos reservatórios das usinas, a definição de uma política de operação energética de um sistema de geração predominantemente hidroelétrico significa, basicamente, encontrar as trajetórias destas variáveis de decisão. Deve ser ressaltado que, a quantidade de geração de cada subsistema será diferente, dependendo da política de operação energética vigente [108].

O planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração, com grande participação hidráulica, tem como ponto fundamental a determinação de uma política de operação energética para os reservatórios que compõem o sistema hidroelétrico de geração. O planejamento da operação energética dos reservatórios de um sistema hidroelétrico ao longo de um horizonte de planejamento é necessário, especialmente, devido à natureza cíclica de períodos de baixas e altas afluências. No caso de sistemas hidroelétricos sem capacidade de armazenamento (regularização) de água, toda a vazão afluente ao sistema deve ser liberada no próprio período, e o sistema de geração complementar (não hidráulico) deve satisfazer os requisitos do mercado de energia não atendidos no corrente período. Reservatórios de acumulação podem ser usados para estocar água em períodos em que sua disponibilidade é relativamente abundante, e utilizar deste armazenamento para geração de energia em períodos de relativa escassez, a fim de minimizar, em média, o custo de produção de energia elétrica. Desta forma, pode-se afirmar que o planejamento da operação energética de sistemas hidroelétricos tem como objetivo o gerenciamento dos recursos hidroelétricos de geração.

Uma política de operação energética pode ser compreendida como um conjunto de regras de operação, uma para cada usina a reservatório do sistema hidroelétrico, a qual define como estas usinas serão operadas de forma acoplada [160]. A política de operação energética do sistema hidroelétrico é especificada pelas usinas a reservatório, porque sob o ponto de vista da operação energética, exceto por pequenas variações de volume, praticamente não há controle direto sobre a operação das usinas a fio d'água. Somente as usinas com reservatórios de acumulação podem variar a quantidade de água armazenada, de forma significativa, e assim regularizar as vazões

afluentes naturais ao sistema. Isto confere as usinas a reservatório a característica de pontos de controle da operação de um sistema hidroelétrico [32].

No planejamento de médio prazo, a representação do sistema hidroelétrico geralmente é feita por um reservatório equivalente em energia. Considerando-se este tipo de representação, tanto a água armazenada em cada reservatório, como as vazões afluentes devem ser transformadas em energia armazenada e energia afluente, respectivamente. Para isso, faz-se necessária a utilização de regras de operação de reservatórios, as quais são de fundamental importância para a definição do reservatório equivalente em energia. Quanto mais próximas da realidade forem estas regras, mais fiel será o resultado equivalente [147].

Com o planejamento de médio prazo, estarão definidas, dentre outras coisas, as metas energéticas de operação do reservatório equivalente para o horizonte de planejamento. Contudo, estas metas apresentam-se de forma agregada, sendo necessária a realização de sua desagregação, o que pode ser feito por meio de simulações operativas. Mas, na simulação, não há um procedimento de tomada de decisão inerente ao processo. Desse modo, as regras de operação são necessárias para distribuir a demanda entre as usinas do sistema, estabelecendo-se uma política de enchimento/deplecionamento dos reservatórios, a fim de se obter um adequado aproveitamento dos recursos hidroenergéticos disponíveis.

As regras de operação encontram-se presentes em várias etapas do planejamento da operação energética, apresentando um papel importante no funcionamento eficiente dos sistemas de potência. Como supracitado, elas são necessárias no procedimento de agregação para obtenção do reservatório equivalente de energia assim como na simulação da operação para a desagregação das metas de geração hidráulica total entre todas as usinas, feita no planejamento de curto prazo [72]. Elas também são importantes no estudo da performance do sistema hidrotérmico, por meio de simulações da operação, pois os modelos de simulação permitem que a operação seja reproduzida em condições muito próximas à real, possibilitando a avaliação dos sistemas em diversas condições, o que é de suma importância para o bom desempenho dos mesmos [149].

O dimensionamento de uma usina hidroelétrica consiste na determinação das principais características físicas da usina que determinarão sua capacidade de geração de energia. O princípio básico que norteia o dimensionamento de uma usina hidroelétrica é a busca por parâmetros de projeto que maximizem a diferença entre os benefícios e os custos do empreendimento. Uma das dificuldades encontradas no processo de dimensionamento é a forma como é realizada a busca por valores ótimos para os parâmetros. Devido à necessidade de estudos de simulação, adotam-se

valores para o conjunto de parâmetros, realiza-se a respectiva simulação e medem-se os benefícios energéticos, com base nos resultados alteram-se os valores dos parâmetros e realiza-se outro estudo de simulação, até que valores satisfatórios sejam encontrados. Desta forma, o processo de dimensionamento depende diretamente dos estudos de simulação, pois todos os cálculos dos benefícios energéticos são realizados por modelos de simulação da operação das usinas. Adicionalmente, uma das características dos modelos de simulação que pode alterar sensivelmente os estudos de dimensionamento é a política de operação adotada, a qual define a participação de cada usina hidroelétrica no atendimento da carga total do sistema. Dependendo da política de operação, alteram-se os benefícios energéticos das usinas e, consequentemente, suas respectivas dimensões ótimas [162].

Uma política de operação de reservatórios para sistemas hidrotérmicos é uma estratégia operacional que determina a utilização da água num sistema hidrotérmico composto por usinas hidroelétricas. A política de operação leva à determinação da quantidade de energia elétrica produzida por cada uma das usinas, por meio da definição do estado de armazenamento de cada reservatório. Essa quantidade de energia produzida depende da forma como as usinas são operadas, isto é, como se darão o enchimento e o deplecionamento dos reservatórios do sistema hidroelétrico, visto que a geração hidráulica depende da defluência e da altura de queda líquida das usinas, a qual depende dos volumes operativos dos reservatórios.

Diferentemente de alguns sistemas hidrotérmicos com predominância de geração hidroelétrica, nos quais as usinas localizam-se em regiões montanhosas, e assim a altura de queda líquida em geral não é afetada, significativamente, por variações do volume armazenado no reservatório; na quase totalidade das usinas brasileiras existe uma forte dependência de forma não-linear entre a altura de queda líquida e o volume do reservatório. Neste caso, o estado do reservatório afeta a produtividade da usina e, portanto, a trajetória de volume das usinas, em um período de operação, irá afetar significativamente a energia total gerada pelo sistema. Em sistemas em cascata, este efeito torna-se mais acentuado nas usinas mais a jusante, por onde passa toda a água, e onde uma pequena perda de produtividade pode significar uma grande perda de energia, pois seriam aproveitadas as vazões defluentes das demais usinas a montante sem que seu volume útil esteja com uma condição favorável. Por isso, a política de operação exerce um papel particularmente relevante no caso do Brasil [17].

As regras de operação adotadas para cada reservatório de um sistema hidroelétrico composto por várias usinas em cascata podem alterar de forma significativa a quantidade total de energia

produzida. Exemplificando, num sistema de duas usinas x e y, com reservatórios localizados em um mesmo rio, inicialmente cheios, e desconsiderando as vazões afluentes (considerando-se somente a água armazenada nos dois reservatórios), a energia total que poderá ser gerada dependerá de como será operado este sistema hidroelétrico. Se a regra de operação adotada for a de gerar primeiro somente com a usina x e depois desta vazia gerar com a usina y, obtém-se uma energia diferente do valor que se obteria se fosse operada a usina y primeiro e depois a usina x. Isto se deve, principalmente, ao fato da água localizada no reservatório da usina a montante gerar energia elétrica, tanto quando passa pelas turbinas da mesma, como quando passa pelas turbinas da usina a jusante.

Além do mais, admitindo-se que o combustível utilizado em uma usina termoelétrica esteja sempre disponível quando for necessário gerar energia elétrica, pode-se dizer que, a menos do consumo interno das unidades geradoras e das indisponibilidades devido às paradas forçadas e programadas para manutenção, toda a potência instalada em uma usina termoelétrica está disponível para atendimento ao mercado de energia, pois sua capacidade de geração não depende de quaisquer outros fatores, a não ser a decisão de gerar. Desta forma, a geração termoelétrica apresenta uma disponibilidade constante de energia [95]. Em se tratando de um aproveitamento hidroelétrico, além do consumo interno e das paradas por indisponibilidade e manutenção, a capacidade de geração de energia elétrica está condicionada à disponibilidade de água no reservatório, a qual é função da energia afluente e da política de operação energética dos reservatórios para atender ao mercado consumidor. Este aspecto, inerente a sistemas com base hidroelétrica, como é o parque gerador brasileiro, agrega um fator aleatório à capacidade de geração de energia, além de reforçar o papel da política de operação. Não existindo garantia de disponibilidade dos recursos hídricos, não se pode garantir que todos os aproveitamentos hidroelétricos gerem suas capacidades plenas a qualquer momento que o mercado de energia solicite [29].

As regras de operação procuram determinar qual o comportamento de cada usina a reservatório, a fim de estabelecer um comportamento relativo entre elas ao longo de um processo operativo. Para isso, o melhor parâmetro a ser considerado para cada usina é seu volume, sendo este, então, a "variável de decisão" para as regras de operação. Considerando o comportamento global do sistema, o parâmetro mais significativo seria sua energia armazenada total. Dessa forma, as regras de operação procuram estabelecer relações entre os volumes de cada usina (comportamento do reservatório) e a energia armazenada total do sistema [159]. Assim, uma alternativa, para implementar o acoplamento na operação energética de sistemas hidroelétricos, consiste na especificação de um parâmetro global, denominado fator de acoplamento da opera-

ção energética entre as usinas, denotado por λ, definido no intervalo $0 \leq \lambda \leq 1$. Assim, pode-se calcular o volume operativo do reservatório de cada usina em função deste parâmetro. Desta forma, o volume de cada usina a reservatório será determinado pela seguinte equação:

$$x_i(\lambda) = x_i^{min} + f_i(\lambda) \cdot (x_i^{max} - x_i^{min}) \tag{5.1}$$

onde:

- $x_i(\lambda)$: volume operativo da usina i em função do fator de acoplamento da operação energética;
- $f_i(\lambda)$: regra de operação, a qual expressa as regras de enchimento/esvaziamento do reservatório da usina i em função do parâmetro λ.

O fator de acoplamento da operação energética representa a porcentagem de armazenamento do sistema, e é calculado como a proporção entre a energia armazenada no sistema e a energia armazenada máxima no sistema. A função $f_i(\lambda)$ é a regra de operação da usina i, portanto, ela expressa as regras de esvaziamento/enchimento do reservatório. Entretanto, para que a função $f_i(\lambda)$ possa ser considerada uma regra de operação, ela deve respeitar as considerações de armazenamento mínimo e máximo no sistema (Equação 5.2). Portanto, dois pontos da regra de operação são automaticamente determinados[1]: quando a energia armazenada é considerada nula, todos os reservatórios do sistema encontram-se com seus volumes iguais a seus volumes mínimos (volume útil igual a zero); e quando a energia armazenada no sistema é considerada 1, isto é, a energia armazenada no sistema corresponde à energia armazenada máxima, todos os reservatórios estão cheios (volume útil igual a um). Assim, quando $\lambda = 1$, a regra de operação de cada reservatório indica que ele encontra-se no seu limite máximo de armazenamento, já quando $\lambda = 0$, a regra de operação do reservatório determina que ele encontra-se no seu limite mínimo de armazenamento. O problema agora consiste na união destes dois pontos, a fim de definir-se a regra de operação para cada reservatório, em função de cada valor de λ.

$$\begin{cases} f_i(0) = 0 \\ f_i(1) = 1 \end{cases} \tag{5.2}$$

[1]Para facilidade de entendimento, os volumes são normalizados, ou seja, serão expressos em p.u. Desta forma, quando o volume é um, o reservatório da usina está em seu nível máximo de armazenamento; e quando o volume é zero, o reservatório da usina está em seu nível mínimo de armazenamento.

Com o fator de acoplamento, a operação energética do sistema hidroelétrico de geração pode ser implementada de forma acoplada, operando-se cada usina hidroelétrica em função de um parâmetro global. Portanto, o fator de acoplamento permite relacionar o estado de armazenamento do sistema hidroelétrico com o estado de armazenamento de cada reservatório de acumulação. Adicionalmente, a política de enchimento/deplecionamento de cada reservatório pode ser realizada segundo a Equação 5.1, baseada no mercado de energia elétrica a ser atendido e na disponibilidade de água no sistema hidroelétrico. O enchimento acontece quando as vazões afluentes naturais ao sistema hidroelétrico são superiores à quantidade de água necessária para suprir o mercado de energia elétrica. Portanto, o excesso de água deve ser armazenado, enchendo-se os reservatórios, isto é, aumentando-se o valor de λ. Por outro lado, o deplecionamento ocorre quando as vazões afluentes naturais ao sistema hidroelétrico não são suficientes para garantir o atendimento do mercado de energia elétrica. Neste caso, as usinas deverão utilizar (deplecionar) a água armazenada nos reservatórios para aumentar o montante de energia elétrica gerada, isto é, diminui-se o valor de λ. Deve ser frisado que, as variações de λ não podem violar a restrição de que $0 \leq \lambda \leq 1$. Isto é, se durante o enchimento dos reservatórios, obtém-se $\lambda = 1$, isto significa que todos os reservatórios de acumulação estão em seus níveis máximos de armazenamento, e se ainda houver excesso de água, este excesso deverá ser descarregado (vertido e/ou turbinado). Similarmente, se durante o deplecionamento dos reservatórios obtém-se $\lambda = 0$, isto significa que todos os reservatórios de acumulação encontram-se em seus níveis mínimos de armazenamento, e se o mercado de energia ainda não tiver sido completamente atendido, haverá um déficit de energia hidráulica, ou seja, o mercado de energia não poderá ser completamente atendido pelo sistema hidroelétrico em questão. Assim, com o fator de acoplamento da operação energética, as decisões de encher ou deplecionar os reservatórios podem ser feitas de forma integrada, variando-se λ, e fazendo com que o volume armazenado no reservatório de cada usina seja especificado por sua respectiva regra de operação ($f_i(\lambda)$).

5.3.1 Política de Operação Energética Paralela

Uma política de operação, que poderia ser utilizada para a operação energética, poderia determinar que todos os reservatórios do sistema hidroelétrico devem permanecer com a mesma porcentagem de seus volumes úteis. Se para um determinado intervalo da operação energética, tem-se por exemplo, $\lambda = 0,5$, então todas as usinas a reservatório devem manter, neste intervalo, um volume equivalente a 50% de seus volumes úteis. Assim, devido a esta característica de sincronismo entre os reservatórios, essa política é conhecida como política paralela e pode ser

expressa por uma função linear do fator de acoplamento da operação energética (Equação 5.3), isto é, a união entre os pontos de operação é feita por uma reta. Desta forma, o volume operativo de cada usina pode ser especificado como:

$$x_i(\lambda) = x_i^{min} + \lambda \cdot (x_i^{max} - x_i^{min}) \tag{5.3}$$

Esta política, classicamente adotada pelo sistema elétrico brasileiro [95, 148, 162, 168], estipula que os reservatórios devem ser operados em paralelo ou com variações dela, isto é, os armazenamentos e deplecionamentos são feitos paralelamente em volume [147]. A política de operação energética paralela pode ser visualizada na Figura 5.2. Como todos os reservatórios do sistema hidroelétrico devem manter-se sob uma mesma porcentagem de seus volumes úteis, a política paralela é representada por uma reta. Esta política de operação tem como maior atrativo sua simplicidade, entretanto, ela não obedece aos princípios da operação otimizada dos reservatórios [16, 22, 151, 167], além de subestimar a capacidade de geração de sistemas hidroelétricos [39, 40].

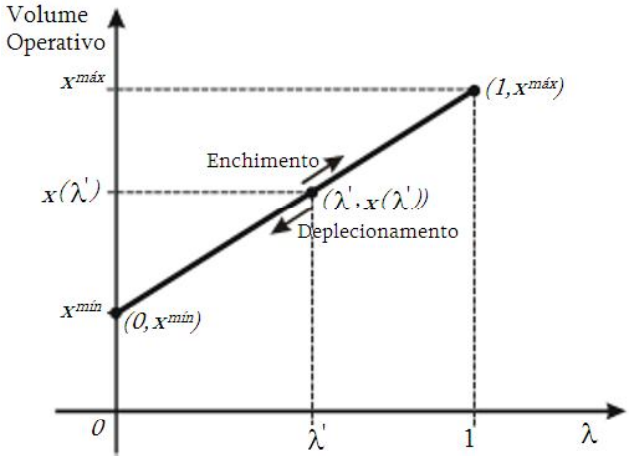

Figura 5.2: Política de operação energética paralela.

No sistema brasileiro, adota-se também a política de operação em paralelo por faixas[2], na qual os reservatórios são divididos em faixas e dentro destas faixas eles são operados em paralelo. Entretanto, mesmo com esta política de operação, há ainda o problema de se determinar estas faixas de forma otimizada [17, 149].

[2]Ela é uma variante da política paralela.

5.3.2 Política de Operação de Deplecionamento dos Reservatórios das Usinas de Montante a Jusante

A política de esvaziamento dos reservatórios de montante à jusante, um de cada vez, por completo, é, na teoria, a política com a qual obter-se-ia, de um sistema hidroelétrico estático em cascata, a maior quantidade de energia possível [72]. Entretanto, a operação dos reservatórios de um sistema hidroelétrico inclui outros compromissos tais como a vazão defluente mínima obrigatória, compromissos com a navegação e irrigação, controle de cheias, além de outros que tornam esta política inviável do ponto de vista prático.

5.3.3 Política de Operação Energética Proposta

Conforme visto, a política de operação energética paralela define que os reservatórios devem manter o mesmo valor percentual em volume de armazenamento. Entretanto, não há critérios intuitivos ou mesmo matemáticos que a justifiquem como meio de utilização racional dos recursos hidroelétricos de geração. Adicionalmente, a política paralela está longe de uma operação otimizada, conforme evidenciam os resultados obtidos com a aplicação do modelo de otimização e ilustrados no capítulo 8.

A operação energética de sistemas hidroelétricos realizada por modelos de simulação, e a construção de modelos equivalentes de energia mais eficientes estão diretamente relacionadas com a qualidade da política de operação energética adotada. Desta forma, pode-se afirmar que a determinação de uma política de operação energética otimizada é de vital relevância para os estudos concernentes ao planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos (hidroelétricos) de geração.

A determinação de uma política de operação energética otimizada tem por objetivo a obtenção de regras de operação que reproduzam o comportamento operativo otimizado dos reservatórios. A ideia é estudar o comportamento diferenciado dos reservatórios das usinas hidroelétricas e encontrar os parâmetros que relacionam os comportamentos desses reservatórios, operando na condição otimizada, com o estado global do sistema hidroelétrico. Portanto, a obtenção de uma política de operação energética otimizada consiste na definição de regras tais que, dado o estado global de armazenamento do sistema, tenha-se uma regra de operação otimizada para cada uma das usinas hidroelétricas. Assim, a aplicação da política de operação energética otimizada visa reproduzir as trajetórias de volume operativo obtidas por um modelo de otimização a usinas

individualizadas.

Para obter uma política de operação energética que reflita o comportamento otimizado dos reservatórios [161], inicialmente, a operação do sistema hidroelétrico é otimizada sob as mais diversas condições (mercado de energia e vazões afluentes, especialmente), as quais representam as várias situações que podem ser encontradas na operação energética do sistema. Com a otimização, obtém-se um conjunto de pontos de operação, os quais relacionam o estado global de armazenamento do sistema, representado pela energia armazenada, com o estado do reservatório de cada usina hidroelétrica.

A política de operação energética proposta consiste na utilização dos padrões do comportamento otimizado dos reservatórios [161]. Para que o conjunto de pontos de operação possa ser utilizado como indicativo para uma regra de operação, deverá ser necessário o ajuste de "curvas médias"[3] que descrevam, pelo menos em média, o comportamento da operação energética otimizada dos reservatórios. Com estas "curvas médias", determina-se para cada usina a reservatório uma função que representa a regra de operação otimizada da usina para o sistema hidroelétrico considerado.

Vários trabalhos relacionam-se com a obtenção de políticas de operação, diferenciando somente na técnica empregada para o ajuste dos pontos obtidos relativos à operação otimizada, bem como na aplicação da política de operação obtida. Em [168], os autores utilizam funções polinomiais de terceiro grau para ajustar os pontos obtidos com a otimização da operação energética de forma a obter a política de operação. A política de operação alcançada foi testada comparativamente com a política de operação em paralelo, por meio de modelos de simulação e de reservatório equivalente. Em [17, 72], os autores fazem o ajuste das curvas por um algoritmo que usou o método dos mínimos quadrados, obtendo funções polinomiais e exponencias para representar a política operacional. As funções obtidas foram utilizadas em um modelo computacional de simulação de forma a serem avaliadas pela comparação de seu desempenho com a política de operação em paralelo e com o resultado obtido por meio da operação otimizada a usinas individualizadas, com o conhecimento prévio das vazões afluentes. Já em [36, 39, 40], os autores também utilizam o método dos mínimos quadrados no ajuste das funções polinomiais, exponenciais e lineares por partes. Entretanto, as funções obtidas foram aplicadas na

[3]É dito "curva média" porque não existe um modelo matemático simples que descreva, com exatidão, o modelo físico estudado (comportamento operativo otimizado dos reservatórios), sendo que, estas curvas são resultantes de aproximações obtidas, analisando-se a tendência do conjunto de pontos de operação, oriundos da otimizações realizadas sobre os sistemas hidroelétricos [72].

construção do reservatório equivalente de energia, em vez da simulação da operação do sistema hidroelétrico, e comparando-as com a política de operação em paralelo. Em [148, 149], os autores utilizam redes neurais artificiais (RNAs), mais especificamente as redes SONARX, para a obtenção de uma política de operação que siga os princípios da operação otimizada. A rede SONARX foi integrada a um simulador da operação de sistemas hidroelétricos, em que a cada instante de tempo, o conjunto rede-simulador decide quanto cada usina deve gerar. Em [163], os autores apresentam uma metodologia para simulação da operação de usinas hidroelétricas utilizando redes neurais artificiais, mais especificamente, redes RBF. A política de operação obtida utilizando a rede RBF visou reproduzir as complexas relações existentes entre os reservatórios de um sistema hidroelétrico durante sua operação otimizada. A idéia de utilizar redes RBF na operação de usinas hidroelétricas é fazer com que os comportamentos diferenciados que os reservatórios possuem durante a operação otimizada determinística possam ser "aprendidos" pela rede e utilizados durante a operação normal do sistema. Entretanto, apesar das RNAs serem conhecidas pelo bom desempenho quando utilizadas como aproximadores funcionais, estas não permitem ao usuário uma compreensão facilitada de como suas decisões foram realizadas, ou seja, são designadas como caixas pretas, devido a sua incapacidade de explicar como e por que suas respostas foram geradas. As RNAs também exigem um longo tempo de treinamento, não possuem um mecanismo explicativo, nem um mecanismo automático e eficiente para auxiliar o desenvolvedor no projeto da rede. Além disso, RNAs necessitam de um grande conjunto de treinamento para garantir que os pesos sinápticos sejam ajustados de forma a fornecer soluções que generalizem o problema.

Uma aplicação bastante comum dos sistemas de inferência *fuzzy* é sua utilização para aproximação de funções. As expressões analíticas destas funções podem ser de difícil cálculo ou mesmo não estarem disponíveis. Nestes casos, são necessários sistemas capazes de aproximar o comportamento de tais funções a partir de dados práticos existentes [141]. Neste trabalho, empregou-se um sistema de inferência *fuzzy*, pois, como vantagem adicional destes sistemas, procurou-se modelar, por meio de regras lingüísticas, o modo aproximado de raciocínio [92], pretendendo-se imitar a habilidade humana de tomar decisões racionais em um ambiente de imprecisões e incertezas. Isto porque, sistemas *fuzzy* são potencialmente capazes de expressar e processar, de uma maneira sistemática, informações imprecisas, incertas, mal definidas e vagas. Outra vantagem na aplicação de sistemas *fuzzy* deve-se ao fato dos operadores humanos (especialistas) poderem traduzir, de forma consistente, e em termos de regras linguísticas, o seu processo de tomada de decisões, fazendo com que a ação do sistema *fuzzy* seja tão fundamentada e consistente quanto

a deles. Na subseção a seguir, explicar-se-á o funcionamento dos sistemas de inferência *fuzzy*.

5.3.4 Sistemas de Inferência *Fuzzy*

Seres humanos são capazes de lidar com processos bastante complexos, baseados em informações aproximadas ou imprecisas. A estratégia adotada pelos seres humanos também é de natureza imprecisa e geralmente pode ser expressa em termos linguísticos. A teoria de conjuntos *fuzzy* e os conceitos de Lógica *fuzzy* podem ser utilizados para traduzir, em termos matemáticos, a informação imprecisa expressa por um conjunto de regras linguísticas. Se um operador humano for capaz de articular sua estratégia de ação como um conjunto de regras da forma *se...então*, um algoritmo passível de ser implementado em computador pode ser construído. O resultado é um sistema de inferência baseado em regras, no qual a teoria de conjuntos *fuzzy* e a Lógica *fuzzy* fornecem o ferramental matemático necessário para se lidar com tais regras linguísticas [115].

A teoria de conjuntos *fuzzy* foi concebida com a meta de prover um ferramental matemático para o tratamento de informações imprecisas e incertas. Já a Lógica *fuzzy*, baseada na teoria de conjuntos *fuzzy*, foi inicialmente desenvolvida com base nos conceitos da lógica clássica, a fim de fornecer uma estratégia para tratar de problemas de natureza imprecisa ou aproximada. O objetivo desta sub-seção consiste em apresentar os conceitos fundamentais da teoria de conjuntos *fuzzy* e da Lógica *fuzzy*, necessários para o projeto e desenvolvimento de um sistema de inferência *fuzzy*.

Teoria de Conjuntos *Fuzzy*

O encapsulamento de objetos em uma coleção cujos todos os membros compartilham algumas características ou propriedades gerais implica, de forma natural, na noção de um conjunto. A noção de conjunto ocorre frequentemente, quando tende-se a organizar, resumir e generalizar conhecimento sobre objetos pertencentes a um universo definido. Este universo de discurso pode ser contínuo ou discreto, dependendo da natureza dos objetos que o compõem. Na teoria clássica de conjuntos, o conceito de pertinência de um elemento a um conjunto é bem definido. Dado um conjunto A em um universo de discurso X, os elementos deste universo simplesmente pertencem ou não pertencem a aquele conjunto. Pode-se definir este conjunto por meio de uma função, dita função característica[4], que associa a cada elemento do universo de discurso X um valor binário.

[4]Também conhecida como função de pertinência bivalente.

A função característica pode ser expressa por:

$$f_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se e somente se } x \in A \\ 0 & \text{se e somente se } x \notin A \end{cases} \tag{5.4}$$

Desta forma, a função característica provoca uma restrição, representada por uma fronteira bem definida, nos objetos do universo de discurso que podem ser atribuídos ao conjunto. O conceito subjacente dos conjuntos *fuzzy* baseia-se no relaxamento desta restrição e na admissão de valores intermediários para a pertinência [123]. Desta forma, a teoria de conjuntos *fuzzy* pode ser vista como uma extensão da teoria clássica de conjuntos, e foi criada para tratar graus de pertinência intermediários entre a não-pertinência e a pertinência total de elementos de um universo de discurso com relação a um dado conjunto. Assim, um conjunto *fuzzy* consiste em uma generalização da noção clássica de um conjunto deste universo [141].

Um conjunto *fuzzy* F em um universo de discurso é caracterizado por uma função característica real, comumente denominada função de pertinência (μ_F), que associa a cada elemento do universo de discurso um número real no intervalo [0, 1], representando o grau de pertinência do elemento no conjunto F. O conjunto suporte de um conjunto *fuzzy* F é o conjunto de elementos do universo de discurso para os quais $\mu_F(x) > 0$ [187]. Um conjunto *fuzzy* cujo conjunto suporte é um único ponto no universo de discurso com $\mu_F(x) = 1$, é chamado conjunto *fuzzy* unitário ou *singleton.*

A representação de conjuntos *fuzzy*[5] depende, basicamente, da dimensão e da natureza do universo de discurso definido. Se o universo for discreto e finito, o conjunto *fuzzy* é normalmente representado:

- Por um vetor contendo os graus de pertinência no conjunto *fuzzy* dos elementos do universo de discurso;
- Por meio da notação $\sum_{i=1}^{N} \mu_F(x_i)/x_i$. Assim, cada elemento do universo é representado na forma $\mu_F(x_i)/x_i$, na qual o primeiro termo representa o grau de pertinência de x_i no conjunto *fuzzy* F[6], e o segundo termo identifica o próprio elemento.

Se o universo de discurso for contínuo ou possuir uma grande quantidade de elementos dis-

[5]Ressalta-se que a representação de um conjunto *fuzzy* pode ser feita por meio do gráfico de sua função de pertinência.

[6]O grau de pertinência indica o quanto o elemento é compatível com o conjunto F, ou seja, representa o quanto o elemento satisfaz o conceito representado pelo conjunto *fuzzy* F.

cretos, o conjunto *fuzzy* pode ser representado por:

$$\int_x \mu_F(x_i)/x_i \tag{5.5}$$

O conceito de variável linguística é fundamental dentro da teoria de conjuntos *fuzzy*. Informalmente, uma variável linguística é uma variável cujos valores são palavras ou sentenças, ao invés de números [123]. Assim, uma variável linguística pode ser utilizada para representar de modo linguístico e, portanto, impreciso, um conceito ou uma variável de um dado problema. Variáveis linguísticas admitem como valores apenas expressões linguísticas (também denominadas de termos primários). Estes valores contrastam com os valores assumidos por uma variável numérica, que admite apenas valores precisos.

Um termo primário de uma dada variável linguística pode ser representado por um conjunto *fuzzy* existente no universo de discurso no qual a variável está definida. Desta forma, cada conjunto *fuzzy*, definido neste universo de discurso, é associado a um conceito linguístico, que define um valor impreciso para a variável em questão. Por exemplo, a energia armazenada em um sistema hidroelétrico (EAS)[7] pode ser considerada uma variável linguística com os termos primários muito baixa, baixa, média, alta e muito alta (Figura 5.3). Estes valores são especificados por intermédio de conjuntos *fuzzy*, representados por suas funções de pertinência[8]. Ressalta-se que, a definição da função de pertinência de um conjunto *fuzzy* depende do significado linguístico definido para este conjunto e da sua interpretação no contexto do universo de discurso utilizado. Em princípio, as funções de pertinência podem ser qualquer função que produza valores entre 0 e 1[9]. Além do mais, as funções de pertinência geralmente são definidas a partir da experiência e da perspectiva dos usuários. Entretanto, nas aplicações práticas, a forma (triangular, sigmóide, gaussiana e trapezoidal) e a distribuição (como as formas estão distribuídas ao longo do universo de discurso) escolhidas de cada função são passíveis de ajustes em função dos resultados encontrados.

A principal função das variáveis linguísticas consiste em fornecer uma maneira sistemática para uma caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos. Em essência, a utilização do tipo de descrição linguística empregada por seres humanos, e não de variáveis quantificadas, permite o tratamento de sistemas que são muito complexos para ser analisados

[7]Definida em termos percentuais relativos a energia armazenada máxima no sistema.
[8]O universo de discurso utilizado é o intervalo real fechado [0,1].
[9]A teoria de conjuntos *fuzzy* permite que um elemento pertença a mais de um conjunto com diferentes graus de pertinência no intervalo entre 0 e 1.

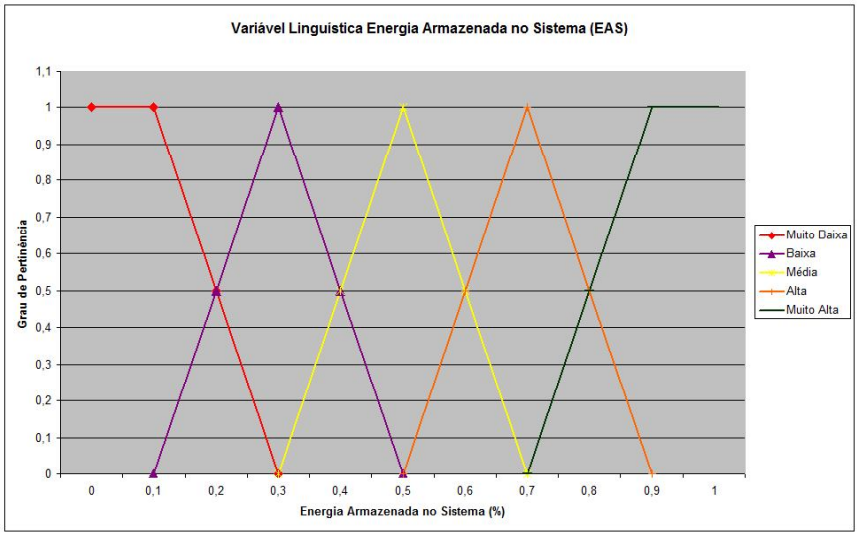

Figura 5.3: Variável linguística representando a energia armazenada no sistema.

pelos termos matemáticos convencionais [115].

Similarmente aos conjuntos clássicos, há uma série de definições e operações envolvendo conjuntos *fuzzy*. As operações que se aplicam aos conjuntos *fuzzy* são extensões das operações utilizadas nos conjuntos clássicos. Apresenta-se, neste ponto, as mais importantes para o propósito deste trabalho.

Um conjunto *fuzzy* F em um universo de discurso X é considerado vazio, se e somente se, sua função de pertinência for igual a zero para todo elemento de X:

$$F = \emptyset \text{ se e somente se } \mu_F(x) = 0, \forall x \in X \tag{5.6}$$

O complemento de um conjunto *fuzzy* F é definido por:

$$\mu_{F'}(x) = 1 - \mu_F(x), \forall x \in X \tag{5.7}$$

Um conjunto *fuzzy* F é um subconjunto de um conjunto *fuzzy* G, se a sua função de pertinência for menor ou igual à de G sobre todo o universo de discurso:

$$F \subset G \text{ se } \mu_F(x) \leqslant \mu_G(x), \forall x \in X \tag{5.8}$$

Dois conjuntos *fuzzy*, F e G, são iguais se as suas funções de pertinência forem iguais sobre todo o universo de discurso:

$$F = G \text{ se } \mu_F(x) = \mu_G(x), \forall x \in X \tag{5.9}$$

A interseção é a parte comum de dois conjuntos e, como resultado, nunca é maior que qualquer um dos conjuntos individuais. Para um operador ser considerado um operador de interseção, ele deve ser considerado uma *t-norma*. Existem vários exemplos de operadores que são considerados *t-normas* e, portanto, podem ser empregados para realizar a interseção entre dois conjuntos *fuzzy*, entretanto o operador *t-norma* mais utilizado é o mínimo. Ao aplicar-se a interseção com o operador de mínimo, tem-se:

$$\mu_{F \cap G}(x) = \mu_F(x) \text{ t } \mu_G(x) = \text{Min}[\mu_F(x), \mu_G(x)] \tag{5.10}$$

Para um operador ser considerado um operador de união, ele deve ser considerado uma *s-norma*. Existem, também, vários exemplos de operadores que são considerados *s-norma*[10] e, por isso, podem ser aplicados para efetuar a união entre dois conjuntos *fuzzy*, entretanto o operador *s-norma* mais utilizado é o máximo. Ao calcular-se a união com o operador de máximo, tem-se:

$$\mu_{F \cup G}(x) = \mu_F(x) \text{ s } \mu_G(x) = \text{Max}[\mu_F(x), \mu_G(x)] \tag{5.11}$$

As referências [122, 123, 187] apresentam várias *t-normas* e *s-normas*, entretanto, em aplicações, principalmente em Engenharia [146], têm sido utilizados preponderantemente os operadores mínimo para interseção, e máximo para união.

Lógica *Fuzzy*

A maneira mais comum de armazenar informações em uma base de conhecimento *fuzzy* é a representação por meio de regras de produção *fuzzy*[11] [141]. As regras são expressas por meio de implicações lógicas da forma "*se...então*", as quais representam uma relação entre um ou mais antecedentes e um ou mais consequentes. Assim, um exemplo de regra de produção pode ser

[10] Conhecida também como *co-norma-t*.
[11] Também conhecidas como declarações condicionais *fuzzy*.

visualizado abaixo:

Se <antecedente> Então <consequente>, ou Se <condição> Então <ação> (5.12)

Na Lógica *Fuzzy*, uma regra será disparada se houver um grau de similaridade diferente de zero, entre a entrada, correspondendo a um fato, e o antecedente da regra[12]. Desta forma, por uma regra disparada[13], entende-se uma regra cujo processamento do antecedente para as entradas atuais gerou graus de pertinência não-nulos, ou seja, a relação fuzzy entre as entradas e os termos primários do antecedente é maior que zero. O grau de pertinência da entrada (fato) no termo primário da variável linguística do antecedente da regra estabelece o grau de ativação de determinada regra de produção[14]. Quanto maior o valor do grau de pertinência, maior é a compatibilidade da entrada com o antecedente da regra, e, portanto, o consequente da regra terá um peso maior no resultado final.

Dado um conjunto de regras *fuzzy*, o qual representa o comportamento de determinado sistema, e um vetor de entradas, pode-se definir inferência *fuzzy* como o processo pelo qual se obtém as saídas do sistema, pela avaliação dos níveis de compatibilidade do vetor de entradas com os antecedentes das regras, ativando os consequentes. Portanto, o processamento do consequente será realizado mesmo quando as condições do antecedente forem satisfeitas parcialmente. Desta forma, um dos objetivos da Lógica *Fuzzy* consiste em estabelecer a base teórica para o raciocínio sobre proposições imprecisas [146], tal raciocínio tem sido referido como raciocínio aproximado. De forma resumida, pode-se afirmar que a Lógica *Fuzzy* é capaz de processar informações incertas, qualitativas e imprecisas de forma geral; informações representadas pela teoria de conjuntos *fuzzy*.

A declaração condicional *fuzzy* "Se x é F Então y é G" tem uma função de pertinência que mede o grau de verdade da relação de implicação entre x e y. A função de pertinência associada a uma regra de produção é definida por intermédio do operador de implicação. Assim, para tornar possível o processo de inferência, é necessária a definição da operação *fuzzy* de implicação (Então). Este operador define a implicação de cada regra linguística sobre uma dada variável de saída (variável do consequente). Em outras palavras, ele relaciona o antecedente com

[12]Na lógica clássica, uma regra será disparada somente se a entrada for exatamente igual ao antecedente da regra, e o resultado será exatamente o consequente da regra.

[13]Também denominada regra ativada.

[14]O grau de ativação de uma regra é conhecido também como coeficiente de disparo. Assim, todas as regras para as quais o coeficiente de disparo for maior que zero são ditas regras que dispararam para as entradas atuais. Isto quer dizer que elas vão contribuir para o cálculo da saída correspondente do sistema de inferência.

o consequente. O operador de implicação mais utilizado é o operador de *Mamdani*, definido abaixo, entretanto, em [187] pode-se encontrar vários outros operadores de implicação.

$$\mu_R(x, y) = min[\mu_F(x), \mu_G(y)] \tag{5.13}$$

Sistema de Inferência *Fuzzy*

Os sistemas de inferência *fuzzy* são sistemas baseados em regras de produção que fazem uso das variáveis linguísticas para executar um processo de tomada de decisão. Eles servem para representar a interdependência entre as variáveis independentes (entrada) e dependentes (saída) de um determinado sistema[15] (do mundo real ou não). A base de conhecimento destes sistemas consiste em um conjunto de regras de produção *fuzzy* do tipo "*se...então*", e têm seu funcionamento baseado em três etapas: *fuzzificação*, procedimentos de inferência e *defuzzificação*. Um sistema de inferência *fuzzy* está ilustrado na Figura 5.4, na qual estão identificados os seus blocos constituintes:

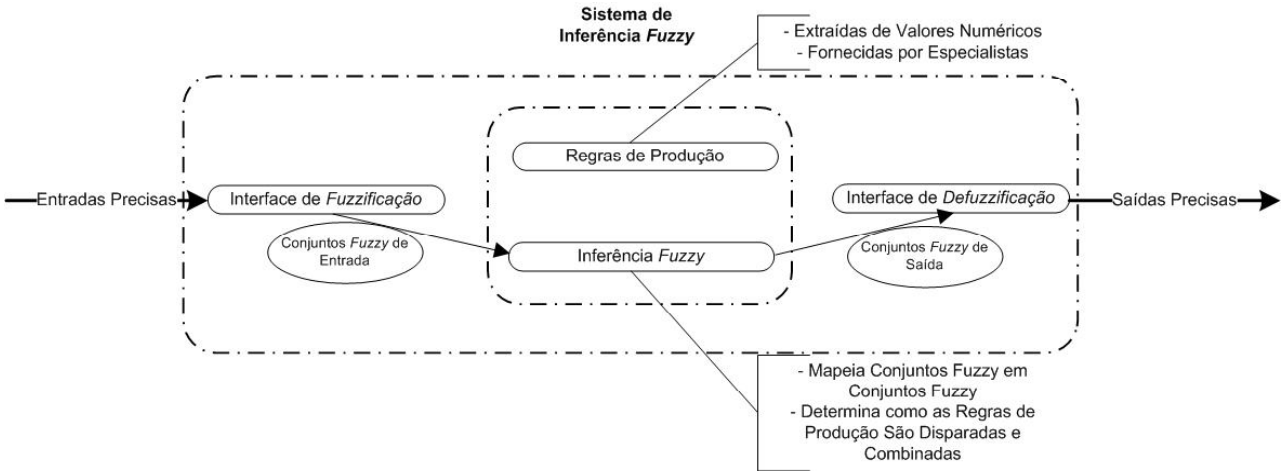

Figura 5.4: Sistema de inferência *fuzzy*.

- *Fuzzificação*: nos sistemas de inferência *fuzzy*, geralmente, consideram-se entradas não-*fuzzy*, ou precisas; resultantes de observações ou medições (conjunto de dados, por exemplo), que é o caso da grande maioria das aplicações práticas. Em virtude disso, é necessário

[15] As regras de produção *fuzzy* são responsáveis por descrever a dependência entre as variáveis linguísticas de entrada e saída.

efetuar-se um mapeamento desses dados precisos para os conjuntos *fuzzy* (de entrada). Por exemplo, no sistema de inferência *fuzzy* proposto, o qual tem por objetivo determinar o volume operativo das usinas de um sistema hidroelétrico, utilizando, como entrada, a energia armazenada no sistema, há a necessidade de transformar esse dado de entrada em conjuntos *fuzzy*, porque sistemas *fuzzy* trabalham com termos primários. Para que haja esta transformação, o valor numérico da energia armazenada no sistema, em p.u., é avaliado mediante as funções de pertinência associadas à variável linguística correspondente, resultando o grau de pertinência de cada valor de entrada nos termos primários correspondentes. Desta forma, a *fuzzificação* é um mapeamento do domínio da variável de entrada para o domínio *fuzzy*, representando a atribuição de valores linguísticos, descrições vagas ou qualitativas, definidas por funções de pertinência, às variáveis de entrada. A *fuzzificação* é uma espécie de pré-processamento de categorias ou classes de sinais de entrada, reduzindo o número de valores a serem processados. Uma menor quantidade de valores processados significa que há um menor esforço computacional. As funções de pertinência também podem ser um conjunto tabulado de valores numéricos, e um prodecimento de consulta a tabelas, a fim de acelerar a *fuzzificação* [164];

- Base de Regras: as regras podem ser fornecidas por especialistas, em forma de sentenças linguísticas, e constituem-se em um aspecto fundamental no desempenho de sistemas de inferência *fuzzy*. Alternativamente ao uso de especialistas para a definição da base de regras, existem métodos de extração de regras de dados numéricos [115];

- Inferência *fuzzy*: a etapa da inferência *fuzzy*, também chamada lógica de tomada de decisão, é a responsável por avaliar os termos primários das variáveis de entrada aplicando as regras de produção e atribuindo respostas ao processamento. Ela consiste em três passos: avaliação dos antecedentes, implicação e agregação dos consequentes. Após a *fuzzificação* das variáveis de entrada, as regras *fuzzy* são avaliadas uma a uma, e calculam-se os graus de pertinência de cada proposição[16]. A cada combinação de proposições (de cada regra) é aplicada uma função $t-norma$ ou $s-norma$, dependendo do operador lógico usado na combinação das proposições, para produzir um número no intervalo real fechado [0,1], o qual representa o grau com que a expressão condicional da regra é satisfeita (grau de aplicabilidade da regra). Esse passo constitui a avaliação das premissas. O passo da implicação consiste em calcular os consequentes das regras cujas condições são satisfeitas, com base

[16]Uma frase da forma x é F, onde x é o nome de uma variável linguística e F é um conjunto *fuzzy* definido no universo de discurso de x, é chamada proposição *fuzzy*.

no respectivo grau de aplicabilidade (grau de pertinência, grau de ativação ou coeficiente de disparo). No caso em que as regras possuem mais de um consequente, todos eles são igualmente afetados pelo grau de aplicabilidade. Quando o sistema de inferência *fuzzy* trata as variáveis linguísticas de entrada e verifica as regras aplicáveis, geralmente, encontra-se mais de uma regra aplicável. Entretanto, é necessário gerar uma resposta única para cada variável de saída. A agregação dos consequentes consiste em agregar, ou combinar, os consequentes obtidos pela inferência dessas regras. De forma resumida, o procedimento de inferência é responsável por processar os dados *fuzzy* de entrada juntamente com as regras, de modo a inferir as contribuições na saída *fuzzy* do sistema de inferência;

- *Defuzzificação*: uma vez obtido o conjunto *fuzzy* de cada saída, pelo processo de inferência, no estágio de *defuzzificação* é efetuada uma interpretação dessa informação. Essa etapa é necessária, pois, em aplicações práticas, geralmente são requeridas saídas precisas. A *defuzzificação* é usada tipicamente para associar valores numéricos a conjuntos *fuzzy* de saída. Desta forma, a *defuzzificação* pode ser considerada uma espécie de síntese do conjunto *fuzzy* por meio de um valor numérico[17]. Existem vários métodos de *defuzzificação* na literatura e eles podem ser encontrados em [146].

Quando colocado em operação, um sistema de inferência *fuzzy*, a partir de valores conhecidos das variáveis de entrada, pode realizar inferências sobre esses dados, e obter os valores das variáveis de saída. Para isto, as regras são inferidas de forma paralela, sem considerar a ordem em que elas estão implementadas. A inferência ou interpretação de cada regra consiste na avaliação das proposições antecedentes (condições), seguida da aplicação dos consequentes (ações).

No desenvolvimento de um sistema de inferência *fuzzy*, o número de funções de pertinência pode ser estabelecido de forma arbitrária. Entretanto, quanto maior o número de termos primários associados às variáveis linguísticas dos antecedentes, maior a dificuldade em se estabelecer uma base de regras consistente. Um procedimento automático para atribuição do número de termos permite tornar essa tarefa menos relevante, mas, mesmo assim, há que se considerar que uma base de regras muito grande implica em um maior custo computacional. Assim, um aspecto relevante, passa a ser a definição dos conjuntos *fuzzy* correspondentes às variáveis de entrada (antecedentes) e às de saída (consequentes), porque o desempenho do sistema de inferência, quando colocado em operação, irá depender do número de conjuntos e de sua forma.

[17]De forma complementar, a *defuzzificação* é usada para transformar um conjunto *fuzzy* de saída em um elemento do universo de discurso da variável de saída.

Adicionalmente, um sistema de inferência *fuzzy* só terá um bom desempenho se as regras de produção que definem a estratégia de tomada de decisão forem consistentes[18].

Em resumo, o desempenho de um sistema de inferência *fuzzy* depende da escolha de uma base de regras adequada, e do número e forma dos conjuntos *fuzzy* atribuídos a cada variável. Além deles, pode-se incluir também a escolha do operador de implicação e do método de *defuzzificação*, que também pode se valer de procedimentos automáticos [115].

Sistema de Inferência *Fuzzy* Implementado

O modelo a ser implementado tem uma variável de entrada, que é o valor normalizado da energia armazenada no sistema (EAS), definida respectivamente no conjunto de termos lingüísticos (Muito Baixa, Baixa, Média, Alta e Muito Alta)(Figura 5.3).

Dois modelos de inferência *fuzzy* são particularmente importantes:

- Modelo de Mamdani: uma regra típica desse modelo é: se x é F e y é G (onde F e G são conjuntos *fuzzy*), então z é H (H é um conjunto *fuzzy*). O processo de *defuzzificação* visa obter um resultado não-*fuzzy* na saída do sistema de inferência;

- Modelo de Takagi-Sugeno: uma regra típica desse modelo é: se x é F e y é G, então, $z = f(x, y)$, onde F e G são conjuntos *fuzzy* e f é uma função polinomial de x e y. O procedimento de inferência no modelo Takagi-Sugeno consiste em obter todas as contribuições individuais z_i advindas de cada uma das regras ativadas. Após esta etapa, deve-se ponderar (combinar) todas as contribuições individuais para produzir a resposta final z. Desta forma, a saída numérica é calculada diretamente pela soma das saídas das regras, ponderada pelo grau de ativação de cada uma delas. Portanto, um processo de *defuzzificação* é desnecessário [187]. Este modelo foi proposto como um esforço para desenvolver uma abordagem sistemática para gerar regras *fuzzy* a partir de um conjunto de dados de entrada e saída[19] [146].

Para o ajuste dos pontos de operação, relacionados à operação energética otimizada, empregou-se o sistema de inferência *fuzzy* de Takagi-Sugeno [173]. A existência de funções paramétricas nos

[18] Entretanto, extrair regras de especialistas na forma de declarações condicionais pode não ser uma tarefa fácil, por mais conhecedores que eles sejam do problema em questão.

[19] Conforme será visto mais adiante, o conjunto de pontos de entrada/saída é dado pelos pontos obtidos com a otimização da operação energética.

consequentes de suas regras e a facilidade de ajuste a partir de um conjunto de dados de entrada e saída faz com que eles sejam intrinsicamente relacionados com a tarefa de aproximação de funções [141]. Considerando o sistema constituído de uma variável linguística de entrada (EAS), e de N variáveis de saída, onde N representa o número de usinas de um sistema hidroelétrico, pode-se ilustrar o sistema *fuzzy* empregado para determinar a política de operação energética (Figura 5.5).

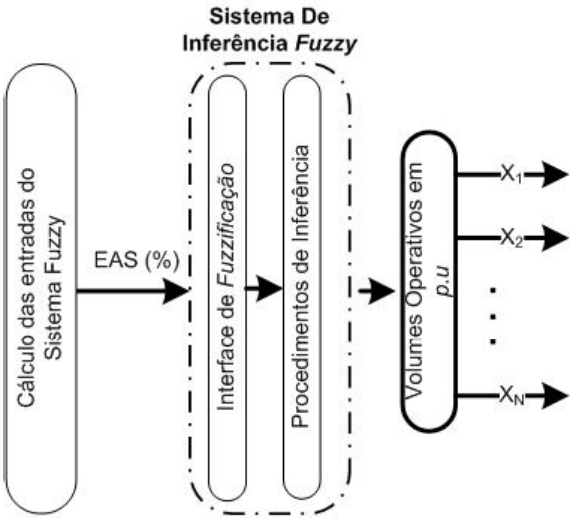

Figura 5.5: Sistema *fuzzy* para política de operação energética.

Entretanto, um sistema *fuzzy* com múltiplas saídas pode ser transformado convenientemente em múltiplos sistemas de saída única. Portanto, foram implementados N sistemas *fuzzy*, um para cada usina hidroelétrica (Figura 5.6).

Na abordagem proposta nesta tese de doutorado, especializou-se um sistema *fuzzy* Takagi-Sugeno, composto por 5 regras de inferência[20], para cada usina a reservatório:

- Regra 1: Se (EAS *é Muito Baixa*) Então $y_1 = f_1(EAS) = a_1 \cdot EAS + b_1$
- Regra 2: Se (EAS *é Baixa*) Então $y_2 = f_2(EAS) = a_2 \cdot EAS + b_2$
- Regra 3: Se (EAS *é Média*) Então $y_3 = f_3(EAS) = a_3 \cdot EAS + b_3$
- Regra 4: Se (EAS *é Alta*) Então $y_4 = f_4(EAS) = a_4 \cdot EAS + b_4$

[20]Nas funções polinomiais dos consequentes das regras, são empregadas funções lineares de primeiro grau: Modelo Takagi-Sugeno de ordem um

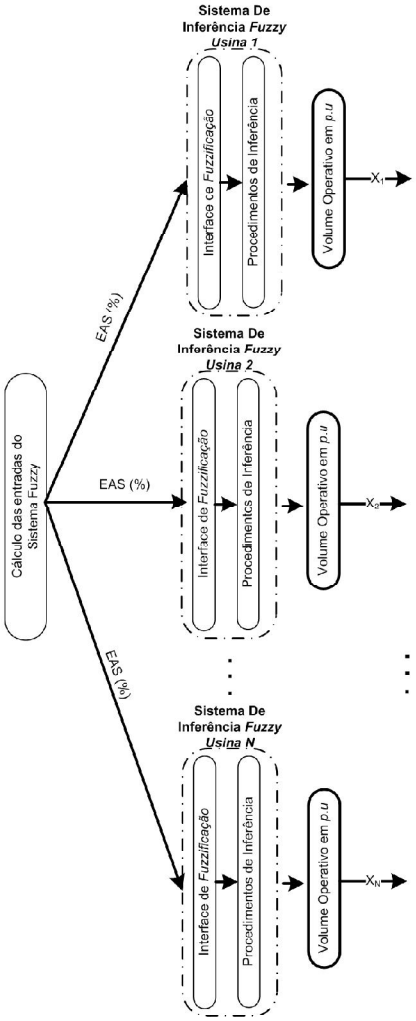

Figura 5.6: N sistemas *fuzzy* para política de operação energética.

- Regra 5: Se (EAS *é Muito Alta*) Então $y_5 = f_5(EAS) = a_5 \cdot EAS + b_5$

Para cada uma das 5 regras que compõem cada sistema *fuzzy*, aplica-se regressão linear [15] nos pontos pertencentes ao seu domínio de ativação, utilizando os pontos de entradas/saídas conhecidos (obtidos da otimização da operação energética para diversas condições de operação), a fim de se determinar os parâmetros (a_i, b_i) de cada uma das $(5 \cdot N)$ funções polinomiais relativas aos consequentes dos N sistemas *fuzzy*[21]. A partir daí, pode-se colocar o sistema *fuzzy* em operação. No caso particular, a operação de cada sistema de inferência *fuzzy* determina a regra

[21] Os parâmetros dos consequentes das regras de produção de todos os sistemas de inferência *fuzzy* Takagi-Sugeno podem ser encontrados no Apêndice A.

de operação de cada uma das usinas do sistema hidroelétrico:

$$f_i(\lambda) = \frac{\sum_{j=1}^{5}(y_j \cdot \mu_j)}{\sum_{j=1}^{5}\mu_j};\ i = 1,..., N \tag{5.14}$$

5.4 Algoritmo de Simulação da Operação Energética

Com a definição das condições de operação, o algoritmo de simulação pretende satisfazer a meta de geração hidráulica (esta meta de geração pode ser o montante de energia requisitada pelo mercado de energia elétrica, por exemplo), a partir do ajuste das vazões turbinadas, obtidas com a determinação dos volumes operativos segundo a política de operação especificada, isto é, para cada intervalo do horizonte de planejamento, a simulação tem por fim o ajuste da geração hidráulica do sistema hidroelétrico com a meta de geração preestabelecida. Esta geração do sistema hidroelétrico é obtida a partir de uma vazão turbinada em cada usina, ao utilizar-se a quantidade de recursos hidráulicos disponíveis (água armazenada nos reservatórios e sob a forma de vazões afluentes), devendo obedecer as restrições impostas às usinas.

Há várias formas de fazer com que um sistema hidroelétrico atenda, de forma conjunta, a uma determinada meta de geração de energia elétrica. Ressalta-se que, dependendo de como as usinas hidroelétricas são operadas, a geração hidráulica de cada usina será diferente, resultando em diferentes níveis de consumo de recursos hidráulicos. Para a divisão da geração entre usinas, deve-se utilizar uma política de operação energética que acopla a operação energética das usinas e especifica como as usinas irão variar seus volumes armazenados, para que o excesso ou escassez do recurso hidroelétrico de geração (água) seja gerenciado e a meta de energia elétrica seja plenamente satisfeita.

A Figura 5.7 resume os passos do algoritmo para simulação da operação energética de sistemas hidroelétricos, o qual é inspirado em [147, 163]. Logo após, cada passo apresentado na figura é explicado.

1. Carrega-se o valor dos volumes (armazenamento) iniciais do planejamento da operação energética;

2. Calculam-se os valores das vazões afluentes incrementais, da energia armazenada no sistema e da energia armazenada máxima no sistema, bem como, carrega-se o volume inicial do intervalo atual (volume final do intervalo anterior);

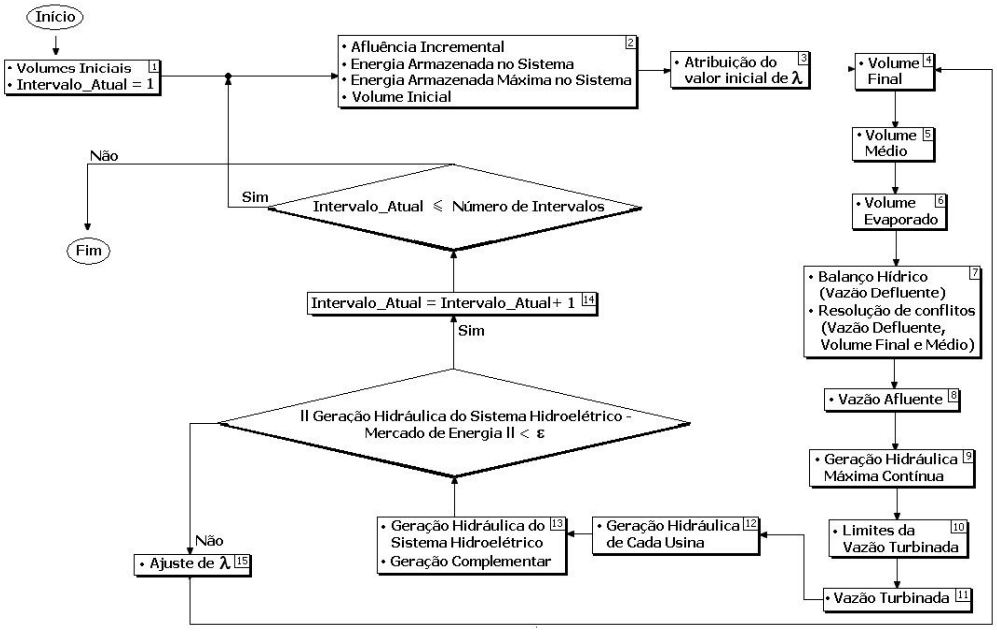

Figura 5.7: Algoritmo para simulação da operação energética.

3. O valor inicial de λ (fator de acoplamento da operação energética) é feito igual ao valor da energia armazenada no sistema em p.u. Este valor é obtido dividindo-se a energia armazenada no sistema (no início do intervalo atual) pela energia armazenada máxima no sistema;

4. O valor de λ é utilizado pela política de operação energética para determinar o valor do volume armazenado no reservatório de cada usina (volume final)[22];

5. Calcula-se o volume médio para as usinas, utilizando-se a média entre os volumes iniciais e finais do intervalo em questão. Este cálculo é necessário, pois, geralmente, os reservatórios de acumulação passam de um estado de armazenamento, no início do intervalo, para um outro estado de armazenamento, no final do intervalo. Caso o valor de volume, inicial ou final, seja utilizado nos cálculos energéticos (nível de montante, engolimento máximo, potência gerada, geração hidráulica máxima contínua, etc.), estes resultados seriam menos realísticos do que os resultados obtidos com o volume médio do intervalo;

6. Calcula-se o volume evaporado de cada usina do sistema hidroelétrico, a fim de avaliar-se a

[22]O algoritmo de simulação desenvolvido permite a substituição de uma política de operação energética por outra. Desta forma, ele permite a simulação da operação por qualquer política de operação. Para isto, é necessário apenas que se substitua o bloco de cálculo dos volumes dos reservatórios, ou seja, o passo atual.

perda energética que ocorre, já que a água evaporada não é utilizada na geração de energia elétrica [48];

7. Conhecendo-se os volumes evaporado, inicial e final do intervalo atual, e as vazões afluentes incrementais a cada reservatório, determinam-se os valores de vazão defluente de cada usina, por meio da equação de balanço hídrico. Concomitantemente, realiza-se a resolução de conflitos, a qual destina-se a ajustar a decisão da política de operação energética às restrições operativas do sistema hidroelétrico. A restrição de volume é garantida pela política de operação energética. Entretanto, o algoritmo de simulação deve contemplar a implementação dos limites operativos das vazões defluentes. No caso da vazão defluente violar os seus limites operativos, a operação energética desta usina é desacoplada da operação do resto do sistema hidroelétrico, com a fixação de sua vazão defluente neste limite e o consequente ajuste do volume final e médio. Por exemplo, se uma determinada usina violar o seu limite inferior de vazão defluente, fixa-se sua vazão defluente no limite mínimo estipulado, e corrige-se seu volume, por meio da equação de balanço hídrico. Uma violação no limite superior da vazão defluente deve ser tratada da mesma forma;

8. Calculam-se os valores das vazões afluentes efetivamente ocorridas a cada reservatório, visto que a interconexão hidráulica entre as usinas faz com que as vazões afluentes a um reservatório difiram sensivelmente de suas vazões afluentes naturais, por causa da operação dos reservatórios localizados a montante;

9. Calculam-se os valores da geração hidráulica máxima contínua de cada usina, a qual é definida como a máxima potência ativa que pode ser gerada continuamente pela usina, considerando a potência máxima relacionada ao estado do reservatório, o fator de capacidade de geração máxima contínua, a taxa de manutenção programada e a taxa de indisponibilidade forçada;

10. Os limites mínimo e máximo da geração hidráulica são transformados em limites de vazão turbinada para cada usina, utilizando-se uma estimativa da produtividade média da usina. Estes valores mínimo e máximo da geração de cada usina podem ser obtidos a partir das restrições físicas da própria usina, bem como das restrições elétricas;

11. Determina-se o valor da vazão turbinada de cada usina, ou seja, a vazão que efetivamente gera energia. Neste trabalho, emprega-se a hipótese operativa de eliminar vertimentos turbináveis, ou seja, uma usina só verte quando não pode mais turbinar;

12. Calcula-se a geração hidráulica de cada usina por meio de sua função de geração;

13. Utilizando-se os valores da geração hidráulica de cada usina, calcula-se a geração total do sistema hidroelétrico. No caso que a meta de energia não puder ser atendida pelo parque hidroelétrico isoladamente, deve-se determinar a geração complementar para suprir o déficit de geração hidráulica;

14. Se a geração total for igual ao mercado de energia (sob uma determinada tolerância ε), incrementa-se o intervalo atual. Neste caso, deve-se testar se o intervalo atual ainda é menor que o número de intervalos do horizonte de planejamento. Caso positivo, retorna-se ao passo 2 e continua-se o processo de simulação. Caso negativo, finaliza-se a simulação da operação energética;

15. Se a geração total não for igual ao mercado de energia, ajusta-se o valor de λ. O ajuste de λ é feito de forma a esvaziar (déficit de geração, no caso da geração hidroelétrica total ser menor que a meta de energia) ou encher (excesso de geração, no caso da geração hidroelétrica total ser maior que a meta de energia) cada reservatório. Numericamente, o ajuste de λ pode ser escrito como[23]:

$$\lambda = \lambda + \alpha \cdot \frac{H(t) - D(t)}{D(t)} \tag{5.15}$$

Portanto, o armazenamento do sistema (λ) é corrigido de acordo com a diferença relativa entre o mercado de energia elétrica e a geração hidráulica obtida. Mais uma vez, deve ser frisado que, o ajuste de λ não pode violar a restrição de que $0 \leq \lambda \leq 1$. Isto é, se durante o enchimento dos reservatórios, obtém-se $\lambda = 1$, isto significa que todos os reservatórios de acumulação estão em seus níveis máximos de armazenamento, e se ainda houver excesso de água, este excesso deverá ser descarregado, e incrementa-se o intervalo de simulação. Similarmente, se durante o deplecionamento dos reservatórios obtém-se $\lambda = 0$, isto significa que todos os reservatórios de acumulação encontram-se em seus níveis mínimos de armazenamento, e se o mercado de energia ainda não tiver sido completamente atendido, haverá um déficit de energia hidráulica, ou seja, o mercado de energia não poderá ser atendido exclusivamente pelo sistema hidroelétrico em questão, e incrementa-se o intervalo de simulação.

[23] α é uma constante positiva, cujo valor determina a intensidade da variação de λ.

5.5 Considerações Finais

Neste capítulo, apresentou-se conceitualmente o modelo de simulação da operação energética de sistemas hidrotérmicos. Enfatizou-se a política de operação energética, a qual é empregada nos modelos de simulação. Apresentou-se também as duas políticas implementadas: a política paralela, adotada pelo setor elétrico, e a política proposta, a qual é baseada em sistemas de inferência *fuzzy*. Para isso, foi necessária uma seção sobre os sistemas de inferência *fuzzy*, de forma a facilitar o entendimento do leitor no funcionamento da política baseada em sistemas de inferência *fuzzy*. Para finalizar o capítulo, apresentou-se o algoritmo para a simulação da operação energética.

O próximo capítulo apresenta os componentes de software e o desenvolvimento baseado em componentes. Ele enfatiza os princípios dos componentes de software, suas vantagens num processo de desenvolvimento de software e o processo de desenvolvimento efetivamente utilizado (UML *Components*).

Capítulo 6

Desenvolvimento Baseado em Componentes

6.1 Considerações Iniciais

O desenvolvimento baseado em componentes (ou engenharia de software baseada em componentes) surgiu como uma abordagem baseada na reutilização para o desenvolvimento de sistemas de software. Sua principal motivação foi a frustração de que o desenvolvimento orientado a objetos não tinha conduzido a uma extensiva reutilização, como originalmente foi sugerido. Os blocos de construção a serem reutilizados no desenvolvimento de software não devem ser limitados apenas àqueles oferecidos pela linguagem de programação, mas também incluir unidades encapsuladas de maior granularidade. Neste contexto, pode-se inserir os componentes de software.

Neste capítulo são apresentadas algumas definições dos componentes de software, incluindo a definição adotada pelo autor neste trabalho, os princípios dos componentes de software, os benefícios do desenvolvimento baseado em componentes, e o processo de desenvolvimento adotado (UML *Componentes*) com seus fluxos de trabalho e artefatos.

6.2 Componentes de Software

Há diversas definições de componentes de software na literatura, não havendo uma definição comum para o termo. Vários pesquisadores e autores apresentam definições de componente,

e o caracterizam da maneira mais adequada para o seu contexto e objetivos. Definido por Sametinger ([152]) e adotado em Moura *et al.*([105]), componentes de software são artefatos auto-contidos, claramente identificáveis, que descrevem ou realizam uma função específica e têm interfaces claras, documentação apropriada e um grau de reutilização definido. Já em Gimenes e Huzita([63]), o termo componente é utilizado em um sentido mais amplo, pois considera-se que a especificação e o projeto de componentes podem ser posteriormente implementados. Assim, refere-se a componente como um empacotamento de elementos de projeto. Para Sommerville ([170]), componente é uma entidade executável independente, na qual o código-fonte não precisa estar disponível, de modo que o componente não exige que sua compilação seja feita com outros componentes do sistema. Segundo Szyperski([172]), um componente de software é uma unidade de composição com interfaces especificadas contratualmente. Além do mais, um componente de software pode ser entregue independentemente e está sujeito a composição com outros componentes. Para D'Sousa e Wills ([50]), um componente é um pacote de software que inclui implementação, com uma especificação das interfaces fornecidas e requeridas. Councill e Heineman ([71]) definem um componente como um elemento de software que está em conformidade com um modelo de componente e pode ser independentemente implantado e composto sem modificação de acordo com um padrão de composição.

Para este trabalho, um componente é definido como uma unidade de software que encapsula dentro de si, sua especificação e sua implementação, e oferece serviços, por meio de interfaces bem definidas, para o meio externo (clientes). Adicionalmente, o componente de software é definido como uma abstração para a construção de sistemas computacionais que pode ser adaptada sobre diversos paradigmas de programação, como os paradigmas funcionais, lógicos, orientados a objetos e imperativos.

6.2.1 Princípios de Componentes de Software

Componentes de software têm pontos de interconexão[1], chamados de interfaces, que concentram um conjunto de serviços relacionados. As interfaces podem ser classificadas em dois tipos: interfaces fornecidas (*provided interfaces*) e interfaces requeridas (*required interfaces*). A primeira define os serviços oferecidos pelo componente, por meio das suas operações, enquanto a segunda define os serviços que o componente necessita dos outros componentes. Portanto, elas especificam quais serviços devem estar disponíveis a partir do sistema que está usando o componente.

[1] Ou pontos de acesso.

Caso essas interfaces não sejam fornecidas, o componente não funcionará corretamente.

A ênfase numa especificação clara e precisa das interfaces é um princípio chave no DBC [63]. A única forma de interação de um componente com outros é pelas suas interfaces. Assim, componentes que utilizam os serviços oferecidos por um outro componente devem fazê-lo com base apenas nas interfaces definidas e serviços especificados, não sendo feita suposição alguma sobre a sua implementação.

Desta forma, a interface pode ser definida como um sistema intermediário, de forma semelhante a um controle remoto de uma televisão [74]. Quando o usuário pressiona o botão ligar, o controle remoto transmite a solicitação recebida para o componente apropriado da televisão. Este componente cuida de todos os procedimentos complexos necessários para ligar a televisão. O controle remoto é especificado e implementado para saber como a solicitação do usuário deve ser transmitida ao aparelho de televisão. Desta forma, para interagir com a televisão, o usuário só precisa aprender como utilizar os botões do controle remoto. Não é necessário saber o que acontece depois que um botão do controle remoto é pressionado. Portanto, o controle remoto pode ser considerado uma interface, e os seus botões podem ser considerados como as operações providas pela interface.

6.3 Benefícios do Desenvolvimento Baseado em Componentes

O DBC surgiu como uma perspectiva de desenvolvimento de software caracterizada pela composição de partes já existentes. Além do mais, sistemas de componentes aderem ao princípio de divisão e conquista, para gerenciar a complexidade durante o processo de desenvolvimento, pela divisão de grandes problemas (sistemas de software) em partes menores (subsistemas ou componentes de software) e da resolução de cada uma dessas partes. Dessa forma, são construídas soluções mais elaboradas a partir de partes mais simples. O uso de paradigmas para resolver problemas nos quais os subproblemas são versões menores do problema original geralmente leva a soluções eficientes e elegantes [188]. Alguns dos principais benefícios do DBC são listados nas subseções seguintes.

6.3.1 Reutilização

Seja qual for a aplicação que se pense hoje, desde sistemas operacionais, suporte aos sistemas distribuídos até as aplicações comerciais, usando ou não a *World Wide Web*, ela tende a ser

grande e complexa. Portanto, para que a produção do software se dê com a esperada qualidade, dentro de prazos e orçamentos aceitáveis, não é mais viável sempre se iniciar a construção de software a partir do zero [63].

O processo de projeto, na maioria das disciplinas de engenharia, tem como base a reutilização de componentes. Engenheiros mecânicos e eletricistas geralmente não especificam um projeto em que cada componente tenha de ser fabricado especialmente. Eles baseiam o projeto em componentes que já foram experimentados e testados em outros sistemas [170]. Esses componentes não são apenas pequenos componentes, como válvulas e fusíveis, mas podem ser componentes maiores como motores, geradores, turbinas e relés. Esses componentes são construídos para que o engenheiro se concentre somente nos elementos realmente inovadores de um projeto, fazendo com que a reutilização de componentes seja natural nas disciplinas de engenharia. Assim, a engenharia de software pode aproveitar a experiência da engenharia e de setores da indústria na utilização de componentes. Essas experiências podem indicar a necessidade de um conjunto de componentes, a partir do qual as aplicações possam ser construídas. Para isso, os componentes devem ser especificados de uma forma precisa com a declaração de suas interfaces e serviços oferecidos. Como exemplo, as interfaces gráficas com o usuário podem ser construídas com componentes reutilizáveis que permitem a criação de janelas gráficas e uma ampla variedade de mecanismos de interação [128].

A engenharia de software baseada na reutilização é uma abordagem para desenvolvimento, a fim de maximizar a reutilização do software já existente. O software deve ser considerado um ativo e a reutilização desses ativos é essencial para aumentar o retorno de seus custos de desenvolvimento. Entretanto, deve ser ressaltado que as unidades de software que são reutilizadas podem ser de tamanhos radicalmente diferentes. Por exemplo:

- A reutilização de sistemas de aplicações: todo o sistema de aplicações pode ser reutilizado pela sua incorporação em outros sistemas, ou pelo desenvolvimento de família de aplicações, que podem ser executadas em plataformas diferentes ou ser especializadas para as necessidades de determinados clientes;

- Reutilização de componentes: os componentes de uma aplicação, que podem variar em tamanho incluindo desde subsistemas até objetos isolados, podem ser reutilizados;

- Reutilização de funções: as unidades de software que implementam uma única função, como uma função matemática, podem ser reutilizadas.

A reutilização de sistemas de aplicações tem sido amplamente praticada à medida que as empresas de software implementam seus sistemas em uma série de máquinas e fazem ajustes para diferentes ambientes. A reutilização de funções também está bem estabelecida por meio de bibliotecas de funções reutilizáveis. Entretanto, embora tenha havido interesse na reutilização de componentes, foi somente nos últimos anos que ela se tornou aceita como uma abordagem prática para o desenvolvimento de sistemas de software.

Existem várias características dos componentes de software que levam à possibilidade de reutilização [170]:

- O componente deve refletir abstrações estáveis do domínio, que são conceitos fundamentais no domínio de aplicações, as quais se modificam aos poucos. Por exemplo, em um sistema aplicado ao planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração, as abstrações de domínio podem ser usinas hidroelétricas, casa de máquinas, política de operação energética, rede hidráulica, etc.;

- O componente deve ocultar a maneira como seu estado é representado e deve fornecer operações que permitam que o estado seja acessado e atualizado. Por exemplo, em um componente que representa um sistema hidroelétrico, deve haver operações de consulta ao número de usinas hidroelétricas do sistema, além de operações para o cálculo da energia armazenada no sistema, entre outras;

- O componente deve ser tão independente quanto possível. Idealmente, um componente deve se manter isolado, de maneira que não precise de qualquer outro componente para entrar em operação. Na prática, isso só é possível para os componentes muito simples; os componentes mais complexos, inevitavelmente, terão algumas dependências de outros componentes. Entretanto, com a divisão das funcionalidades de um componente em interfaces, por exemplo, pode-se minimizar esta dependência. Mais detalhes sobre esta divisão são comentados mais adiante neste capítulo;

- Todas as exceções devem ser parte da interface do componente. Os componentes não devem manipular as próprias exceções, uma vez que diferentes aplicações terão diferentes requisitos para a manipulação de exceções. Em vez disso, o componente deve definir que exceções podem surgir e deve publicá-las como parte da interface.

Uma vantagem da reutilização de componentes de software implica na diminuição dos custos gerais de desenvolvimento, porque menos componentes de software têm de ser especificados,

implementados (ou comprados) e validados. Entretanto, a redução de custos é apenas uma das vantagens da reutilização, as quais são listadas a seguir [50], [63], [170]:

- Maior confiabilidade: os componentes reutilizados que já encontram-se em operação tendem a ser mais confiáveis do que os novos componentes, pois já foram experimentados e testados em diferentes ambientes. Os defeitos de especificação e de implementação são descobertos e eliminados no uso inicial dos componentes, de forma a reduzir o número de falhas quando o componente é reutilizado;
- Redução dos riscos de processo: ao utilizar-se um componente já existente, as incertezas sobre os custos relacionados à reutilização desse componente tendem a ser menores do que as incertezas relativas aos custos de desenvolvimento. Esse é um fator importante no gerenciamento de projetos, pois diminui-se as incertezas nas estimativas de custo;
- Uso efetivo dos especialistas: em vez dos especialistas em aplicações fazerem o mesmo trabalho em diferentes projetos, eles podem desenvolver componentes reutilizáveis, que englobam seu conhecimento;
- Conformidade com padrões: alguns padrões, como os padrões de interface com o usuário, podem ser implementados como um conjunto de componentes-padrão. Por exemplo, os componentes reutilizáveis podem ser desenvolvidos para implementar menus em uma interface com o usuário. Com isso, todas as aplicações apresentam o mesmo formato de menus para os usuários. O uso de interfaces-padrão com o usuário melhora a confiabilidade, uma vez que os usuários provavelmente devem cometer menos erros enquanto utilizam uma interface familiar;
- Desenvolvimento acelerado: de modo geral, é mais importante fornecer um sistema para o mercado do modo mais rápido possível. A reutilização de componentes acelera a produção, porque o tempo de desenvolvimento e o de validação devem ser reduzidos;

6.3.2 Redução do Acoplamento

O DBC diferencia-se das outras abordagens de desenvolvimento pela separação envolvendo a especificação do componente e a sua implementação, e na divisão da especificação funcional dos componentes em interfaces. A separação clara entre a especificação do componente e a sua implementação é uma importante característica dos componentes de software. Com esta separação, a montagem de uma aplicação baseada em componentes de software dependerá somente

da sua especificação, ou seja, a aplicação será construída utilizando unicamente a informação do que cada componente de software é capaz de prover, sem levar em conta detalhes de como esses componentes foram construídos, ou mesmo em qual linguagem eles foram implementados [30].

Assim, as interfaces podem ser compreendidas como uma representação explícita das funcionalidades de um componente, sendo o meio de comunicação entre eles. Deste modo, evita-se que mudanças na implementação de um componente afetem os demais, uma vez que os serviços continuam sendo garantidos pelas interfaces [105].

Acoplamento é uma medida qualitativa do grau em que os elementos de software (classes, componentes) são conectados[2] entre si. À medida que os componentes (e classes) tornam-se mais interdependentes, o acoplamento cresce. Um objetivo importante no desenvolvimento de software e, em especial, no DBC, é preservar o acoplamento tão baixo quanto possível. Se há acoplamento ou dependência, quando o elemento do qual se depende é modificado, o dependente pode ser afetado [77]. A redução do acoplamento aplica-se a muitas dimensões do desenvolvimento de software, porque um acoplamento mais baixo tende a reduzir o tempo, o esforço e o número de problemas na sua manutenção, utilização e compreensão.

Assim, um elemento de software com acoplamento alto depende de muitos outros elementos. Esses elementos podem ser indesejáveis pois são mais difíceis de serem entendidos isoladamente, além de terem uma reutilização mais complexa, pois a sua utilização exige a presença adicional de outros elementos dos quais eles são dependentes.

Portanto, com a redução do acoplamento no DBC, pelo uso das interfaces, minimiza-se o número de componentes afetados por atualizações em outros componentes, além de prover um entendimento mais simples deles e torná-los convenientes para reutilização.

Ressalta-se que o software deve se comunicar interna e externamente. Assim, acoplamento é um fato da vida [128]. No entanto, o desenvolvedor deve trabalhar para reduzí-lo sempre que possível e entender as ramificações do alto acoplamento quando ele não pode ser evitado.

Estruturar um sistema em subsistemas ajuda a reduzir a complexidade. Um objetivo comum de todos os projetos é minimizar a comunicação e as dependências entre subsistemas. Uma maneira de atingir este objetivo é introduzir um objeto fachada, o qual fornece uma interface para os recursos e facilidades de um subsistema [62]. Assim, a interface é responsável por isolar os clientes das suas classes (ou componentes), fornecendo uma visão mais simples deles. Ao intro-

[2]Ou seja, é uma medida de quão fortemente um elemento está conectado a, tem conhecimento de, ou depende de outros elementos.

duzir uma fachada, tem-se como resultado o desacoplamento do subsistema (classe, componentes, etc.) dos seus clientes, promovendo-se a independência e portabilidade dos subsistemas.

Atribuir a responsabilidade para a interface de ser a mediadora entre um componente (e suas funcionalidades) e seus clientes, implica que o componente e os seus clientes não estão diretamente acoplados. A interface, atuando como um intermediário, cria um nível de indireção entre eles. Utilizando-se do princípio da indireção[3], é possível atribuir a responsabilidade de evitar o acoplamento direto entre um componente e seu cliente. Adicionalmente, ao desacoplar-se o componente de software do seu cliente o potencial de reutilização permanece mais alto.

6.3.3 Aumento da Coesão

A especificação de todas as funcionalidades de um componente pode ser dividida em várias interfaces. Ao dividir-se as especificações das funcionalidades de um componente de software em uma ou mais interfaces, tem-se que as dependências entre os componentes ficam restritas às interfaces individuais, ao invés de englobar a especificação inteira do componente, pois os componentes que utilizam os serviços oferecidos por um outro componente devem fazê-lo apenas com base nas interfaces necessárias, ou seja, não é necessário que eles estejam ligados às outras interfaces oferecidas, tornando-os independentes em relação a elas. Além do mais, evita-se que a especificação do componente seja muito complexa por assumir responsabilidades em demasia. Consequentemente, os serviços oferecidos por cada interface estarão melhor relacionados entre si, tornando-os mais coesos. Coesão (ou, mais especificamente, a coesão funcional) é uma medida de quanto as responsabilidades de um elemento (no caso, as interfaces) estão fortemente relacionadas e focalizadas. Uma interface com coesão baixa provê muitos serviços não relacionados, além de ser responsável por muitos serviços[4].

Uma interface com coesão alta é vantajosa porque é relativamente fácil de manter, compreender e reutilizar. O alto grau de funcionalidade relacionada, combinada com um número adequado de serviços, também simplifica a manutenção e o aperfeiçoamento. Apesar de todos os serviços providos pela especificação poderem ficar agrupados em uma única interface, a separação das funcionalidades em várias interfaces fornece coesão e acoplamento adequados, além

[3]A motivação principal para indireção é a redução do acoplamento; um intermediário é acrescentado para desacoplar elementos de software.

[4]O padrão coesão alta tem uma analogia interessante no mundo real. É uma observação comum que, se uma pessoa assume responsabilidades não relacionadas em excesso, especialmente aquelas que deveriam ser delegadas a outras pessoas, então a pessoa não é eficiente. Isso é observado em alguns gerentes que não aprenderam como delegar responsabilidades [77].

de um maior potencial de reutilização, pois as interfaces passam a concentrar apenas um conjunto de serviços relacionados. O artífício da divisão da especificação do componente de software em interfaces, pode ser relacionado com o princípio da invenção pura [77], sendo cada uma das interfaces considerada uma invenção.

6.3.4 Flexibilidade para Atualização e Substituição

A divisão da especificação do componente em interfaces reduz o impacto das mudanças, porque um componente pode substituir um outro, mesmo que eles tenham uma especificação diferente, com a única restrição de que o novo componente deve incluir as mesmas interfaces que os clientes requisitavam ao componente original.

Observando-se a Figura 6.1, pode-se notar que o componente (*ComponenteA*) foi atualizado (*ComponenteA+*), provendo uma nova interface *IY*. Entretanto, o *ClienteD* não deverá sofrer impacto significativo com esta mudança (atualização), pois tudo que ele requeria do *ComponenteA* estava contido na interface *IX*, a qual é fornecida pela versão atualizada do componente. Já observando-se a Figura 6.2 pode-se notar que o *ComponenteA* foi substituído por um novo componente: (*ComponenteB*). Mais uma vez, o *ClienteD* não deverá sofrer impacto significativo com esta mudança (substituição), pois todas as funcionalidades solicitadas por ele são providas pelo novo componente, por meio da interface *IX*. Além do mais, novas funcionalidades também foram fornecidas, pela interface *IZ*. Desta forma, clientes podem ser flexíveis nos seus requisitos de componentes de software. Eles podem requerer certas interfaces de início, mas também podem utilizar novas interfaces, se estas já se encontram disponíveis.

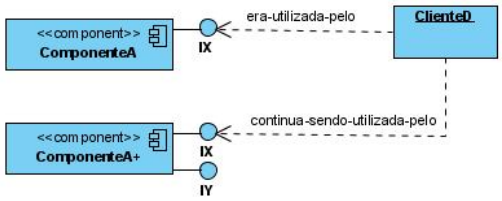

Figura 6.1: Exemplo de atualização de componentes.

6.3.5 Facilidade de Modificações pelo Contrato de Uso e de Realização

Ao visualizar um componente como uma unidade de software que fornece algum tipo de serviço, e solicita serviços de outros, pode-se fazer uma analogia entre componentes e empresas

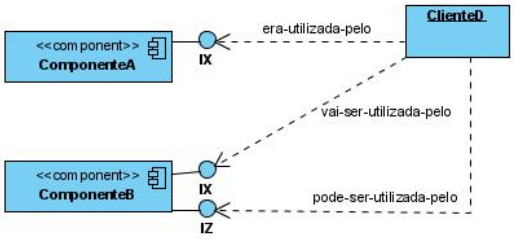

Figura 6.2: Exemplo de substituição de componentes.

[30].

Empresas são entidades que fornecem serviços para seus clientes (os quais podem ser outras companhias ou mesmo indivíduos) e que frequentemente dependem dos serviços de outras empresas. Empresas conseguem gerenciar essas relações por meio de contratos. Um contrato é um acordo formal entre duas ou mais partes. Ele especifica os detalhes do acordo de uma forma não ambígua, declarando as responsabilidades ou obrigações de cada parte. O contrato não estabelece como o contratado irá satisfazer suas responsabilidades. Ele simplesmente declara o que o contratado irá fazer.

O projeto por contrato (*design by contract*) tem sido muito útil no projeto de software. Ele foi desenvolvido extensivamente no domínio orientado a objetos [102] e aplicado para o mundo de componentes de software em [50]. Em DBC, pode-se distinguir dois tipos de contrato:

- Contrato de uso: contrato entre uma interface do componente e seus clientes;
- Contrato de realização: contrato entre uma especificação do componente e sua implementação.

É importante distinguir esses contratos porque eles desempenham papéis diferentes no DBC. Como exemplo, as pessoas que constróem os componentes, frequentemente, não são as mesmas pessoas que os utilizam. A especificação de um componente é composta de muitas partes, nem todas relevantes para os clientes. A definição de quais interfaces o componente deve oferecer é só uma parte da especificação completa do componente. A interface define tudo que o cliente precisa saber, mas nada mais que isso[5]. Uma interface, por exemplo, não especifica como sua implementação deve interagir com outros componentes para satisfazer suas responsabilidades.

[5]Componentes também podem fornecer informações aos seus clientes sobre propriedades não funcionais, tais como segurança, desempenho (em espaço e velocidade) e confiabilidade.

Além do mais, a especificação de uma interface pode implicar em interações envolvendo outros componentes e outras interfaces, mas ela não é responsável por especificar como essas interações acontecem[6].

Assim, um dos benefícios de se manter separados os contratos de uso dos contratos de realização é facilitar mudanças. Uma mudança no contrato de realização não constitui uma mudança para o contrato de uso, e portanto não deve afetar os clientes. Isto é importante porque fornece a capacidade de mudar especificações que afetam a realização sem ter que revalidar o contrato de uso.

Embora a primeira vista não pareça ser aparente a necessidade de ambas, especificação do componente e da interface, como conceitos separados, elas executam funções bastante diferentes. A especificação da interface define um conjunto de serviços que é fornecido pelo componente que a implementa. Desta forma, a interface forma o contrato com o cliente do componente, especificando o que o cliente pode solicitar do componente de software. Ao especificar-se um conjunto de interfaces que devem ser suportadas, uma especificação de componente define a capacidade total de qualquer componente criado em tempo de execução. A especificação do componente define como as interfaces suportadas serão implementadas, além de incluir informações de como essas implementações devem interagir com outros componentes. O registro dessa interação é importante pois deve-se instruir qualquer implementador da especificação do componente a incluir interações particulares com outros componentes, como parte da implementação das operações. O conhecimento dessas interações não faz parte da especificação das interfaces e, portanto, não é de conhecimento dos clientes. Finalmente, uma especificação de componente pode especificar como uma interface suportada por ele deve relacionar-se com outra interface. Uma especificação de interface contém um modelo de informação[7]. Quando um componente suporta duas ou mais interfaces, os elementos no modelo de informação de uma interface frequentemente correspondem, de forma direta, a elementos nos modelos de informação das outras interfaces suportadas, e devem sempre ter o mesmo valor. De forma similar, um elemento no modelo de informação de uma interface suportada pode corresponder a um elemento em uma interface usada. Essas restrições entre os modelos de informação da interface também fazem parte da especificação do componente. A especificação do componente forma o contrato com o implementador, montador e testador dos componentes. Uma especificação de componente delimita a unidade de implementação, define a fronteira de encapsulamento, e consequentemente determina a granularidade de

[6]Outras partes da especificação do componente cuidam disto.
[7]Um modelo de informação é um modelo abstrato da informação retida pelo componente entre as operações.

substituições no sistema. Desta forma, a separação entre especificação de componente e especificação de interface é feita especialmente para facilitar alterações e substituições, uma vez que as modificações na implementação não devem afetar os clientes de um componente de software [30].

6.4 Camadas Arquiteturais

Componentes de software podem ser usados para diferentes propósitos e para manter interesses separados. A abordagem utilizada visa identificar diferentes camadas nas quais os componentes podem ser adaptados. Isto é útil porque permite raciocinar sobre o propósito de cada unidade de software colocada na aplicação. As camadas arquiteturais[8] da aplicação podem ser (Figura 6.3):

- Interface com o usuário: a apresentação da informação para os usuários e a captura das suas entradas;
- Diálogo com o usuário: gerenciamento do diálogo do usuário em uma sessão;
- Serviços do sistema: a representação externa do sistema, fornecendo acesso aos serviços do sistema. Esta camada atua como uma fachada para a camada abaixo (serviços do negócio), fornecendo um contexto dentro do qual os serviços do negócio mais gerais são usados para satisfazer as necessidades do sistema em particular;
- Serviços do negócio: a implementação das informações, regras e transformações do núcleo do negócio. Esses serviços são frequentemente usados em vários sistemas.

Com a divisão da aplicação em camadas, os componentes de software são alocados em camadas hierárquicas, de forma que cada camada fornece serviços para a camada acima e solicita serviços da camada abaixo. Assim, componentes de software podem ser encontrados em todas as quatro camadas supracitadas. Entretanto, este trabalho está interessado com o lado servidor da aplicação (Figura 6.3), portanto, irá focar na modelagem dos componentes que residem nas camadas serviços do sistema e serviços do negócio. Portanto, a arquitetura dos componentes está

[8]Uma arquitetura de software pode ser compreendida como a definição da estrutura geral de um sistema de software, seus elementos constituintes e como esses elementos se conectam para assegurar funcionalidade e qualidade ao sistema [30].

voltada para a estrutura e as dependências entre os componentes nas camadas serviços do sistema e serviços do negócio. Além do mais, se todo acesso aos componentes do serviço de negócio for realizado utilizando os componentes do serviço de sistema, pode-se manter os componentes de mais baixo nível (componentes de negócio) isolados, resultando na melhoria envolvendo suas atualizações, substituições e potencial reúso.

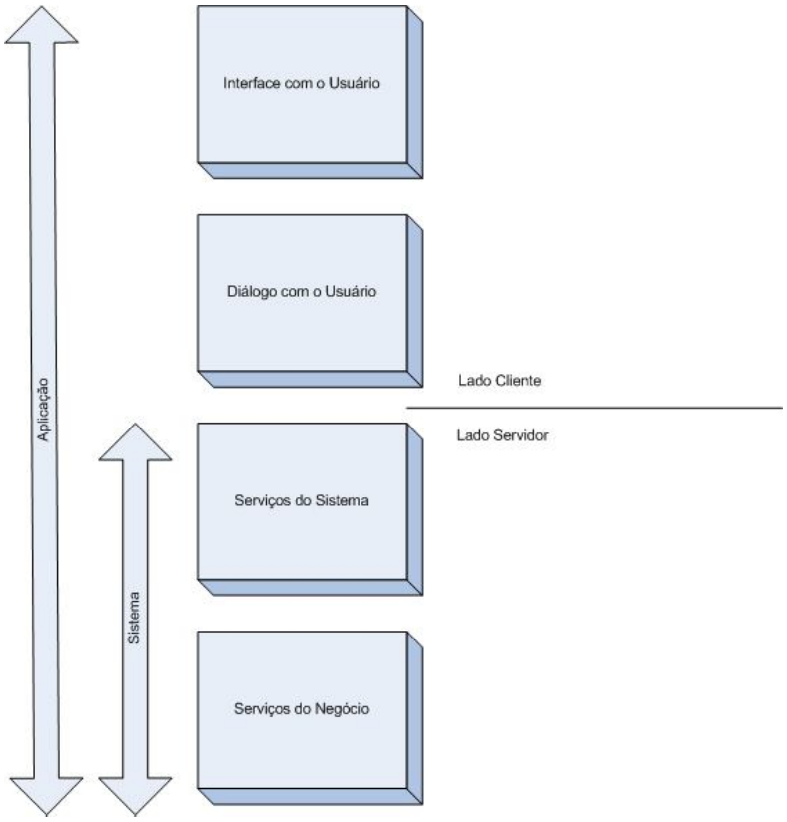

Figura 6.3: As camadas arquiteturais [30].

6.5 O Processo de Desenvolvimento Adotado

Vários autores têm apresentado métodos para o desenvolvimento de software baseado em componentes, dentre os quais destacam-se o método Catalysis ([50]), o método KobrA ([9]) e o método UML *Components* ([30]). Os três usam notação baseada na UML com pequenas adaptações e oferecem abordagens para a modelagem de componentes [49].

O método Catalysis é abrangente, relativamente complexo e dá suporte à modelagem de diferentes domínios de aplicação. Embora a estratégia para chegar ao código a partir dos modelos

seja boa, o método não soluciona problemas de mapeamento dos elementos da análise para o projeto e do projeto para a codificação. Outro problema é que o Catalysis não define em qual nível de refinamento se deve descrever todas as principais decisões, nem o impacto que os requisitos funcionais podem ter. De acordo com eles, isso resulta em modelos abstratos que ainda não são implementáveis ou estão muito longe dos detalhes necessários para a codificação [10].

KobrA propõe um apoio concreto para o desenvolvimento de frameworks[9] de domínio específico baseado em componentes. Para desenvolver uma aplicação, o framework genérico, que é o artefato principal produzido pelo método, é instanciado pela tomada de decisões sobre quais funcionalidades farão parte da aplicação a ser gerada. Cada componente KobrA (*Komponent*) do framework é descrito por um diagrama UML adequado, como se fosse um sistema independente, conhecido como princípio de localidade. O problema fundamental com os frameworks é sua complexidade inerente e o tempo necessário para aprender a usá-los, além do fato de que é muito caro aplicá-lo nos processos de desenvolvimento de software [170]. Além do mais, o desenvolvimento dirigido por frameworks ainda está imaturo e muito ainda precisa ser entendido [63].

Este trabalho segue o processo de desenvolvimento baseado em componentes denominado UML *Components* [30]. O UML *Components* é um método para a construção de sistemas computacionais baseados em componentes de software, enfatizando a especificação dos componentes, os quais são vistos como elementos de modelagem, e não apenas como elementos de implementação. Este processo de desenvolvimento baseia-se no RUP [76] (do inglês, *Rational Unified Process*), seguindo um ciclo de vida iterativo e incremental, além de usar o conceito de fluxos de trabalho. Cada fluxo de trabalho define uma sequência de atividades que produz um resultado de valor observável. Além disso, o processo utiliza a UML como linguagem de modelagem, desde as fases iniciais do desenvolvimento, com casos de uso e diagramas de classes, até as fases finais do processo, com diagramas de sequência.

O processo de desenvolvimento é necessário pois, da mesma forma que a reutilização pode ajudar, também pode requerer esforço adicional. Este esforço deve-se à necessidade dos componentes serem flexíveis, estáveis e corretos a fim de permitir a sua reutilização futura. Este esforço é consideravelmente superior ao necessário para outro software desenvolvido para uma aplicação específica [63].

[9]Um framework é uma estrutura genérica que pode ser ampliada para criar um subsistema ou uma aplicação mais específica. Ele é composto por um conjunto de classes abstratas e concretas [178].

6.5.1 Fluxos de Trabalho e Artefatos

A Figura 6.4 apresenta o processo de desenvolvimento completo [30]. Os retângulos representam os fluxos de trabalho, e as flechas representam o fluxo de artefatos entre os fluxos de trabalho. Este trabalho enfoca o fluxo de trabalho da especificação, entretanto, alguns aspectos do fluxo de trabalho dos requisitos serão considerados, pois este fluxo de trabalho gera artefatos relevantes para a especificação.

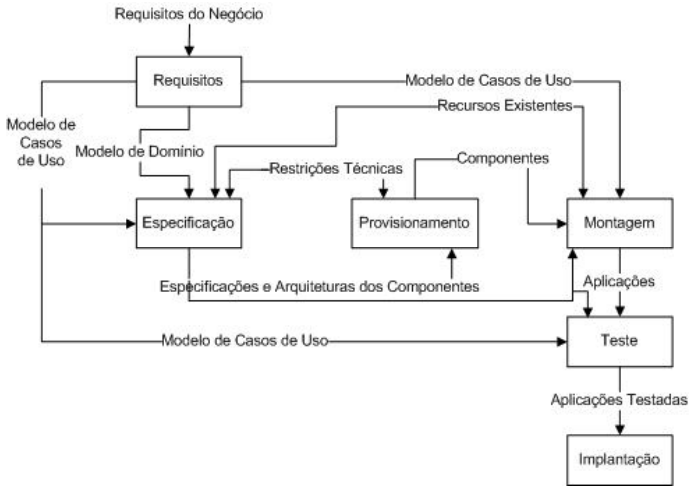

Figura 6.4: Processo de desenvolvimento UML *Components* (adaptado de [30]).

O processo de desenvolvimento tem como entrada os requisitos do negócio. O fluxo de trabalho dos requisitos é responsável por produzir, baseado nos requisitos de negócio, o modelo de domínio e o modelo de casos de uso. O fluxo de trabalho da especificação recebe dos requisitos o modelo de domínio e o modelo de casos de uso. Além dos artefatos produzidos no fluxo de trabalho dos requisitos, a especificação também utiliza recursos de software existentes (sistemas legados, pacotes e banco de dados) e restrições técnicas, tais como o uso de arquiteturas particulares ou ferramentas. O fluxo de trabalho da especificação é responsável por produzir um conjunto de especificações de componentes e uma arquitetura de componentes. A especificação dos componentes inclui as especificações das interfaces fornecidas e requeridas, e a arquitetura dos componentes ilustra a estrutura e as dependências entre os componentes. Com a definição das especificações e da arquitetura dos componentes, no fluxo de trabalho do provisionamento os componentes são implementados (ou adquiridos de terceiros). Após o fluxo de trabalho do provisionamento, o fluxo de trabalho da montagem é responsável por guiar a integração correta dos componentes utilizando os recursos de software existentes, os componentes requeridos e o modelo

de casos de uso. Em seguida, o fluxo de trabalho dos testes utiliza os artefatos da especificação como entrada para os scripts dos testes. Em seguida, a aplicação testada é disponibilizada para entrar em operação no fluxo de trabalho da implantação.

O fluxo de trabalho da especificação pode ser considerado como o mais importante no processo de desenvolvimento UML *Components*, porque nele são avaliadas e tomadas as decisões mais críticas para a construção do software baseado em componentes, visando a reutilização dos componentes de software, um baixo acoplamento e uma alta coesão. Além disso, os maiores benefícios resultantes da utilização de componentes de software estão relacionados a uma boa especificação, pois o provisionamento, a montagem e os testes da aplicação são baseados nos artefatos do fluxo de trabalho da especificação, ou seja, na especificação das interfaces, na especificação dos componentes e na arquitetura de especificação dos componentes. Assim, com uma especificação clara e precisa, os componentes de software podem ser facilmente substituídos, seja por uma implementação completamente diferente dos mesmos serviços ou por uma versão atualizada da implementação corrente (Figuras 6.1 e 6.2). O fluxo de trabalho da especificação é dividido em três estágios (Figura 6.5) [30]:

- Identificação dos componentes: este estágio recebe, como entrada do fluxo do trabalho dos requisitos, o modelo de domínio e o modelo de casos de uso. O objetivo deste estágio é identificar um conjunto inicial de interfaces de negócio para os componentes de negócio e um conjunto inicial de interfaces de sistema para os componentes de sistema e colocá-los juntos em uma arquitetura de componentes inicial. O modelo de tipos do negócio é um artefato intermediário do qual as interfaces de negócio são concebidas, além de ser utilizado mais tarde, no estágio da especificação dos componentes, como matéria prima para o desenvolvimento dos modelos de informação da interface. Adicionalmente, quaisquer componentes ou recursos de software existentes precisam ser levados em conta, bem como quaisquer padrões arquiteturais. Em adiçao à identificação das interfaces de sistema, o estágio da identificação também investiga as operações que devem ser suportadas pelo sistema. Essas operações são identificadas pelo nome, mas suas assinaturas (parâmetros e tipo de retorno) e outros detalhes são adicionadados no estágio posterior (interação dos componentes). As operações requeridas das interfaces de sistema são derivadas da análise dos passos dos diferentes casos de uso e das decisões tomadas pertinentes às responsabilidades do sistema;

- Interação dos componentes: este estágio examina como as operações do sistema serão realizadas usando a arquitetura de componentes. Ele também usa modelos de interação para

descobrir as operações nas interfaces de negócio. A alocação das responsabilidades torna-se mais clara e as operações podem ser movidas de uma interface para outra. Agrupamento alternativo de interfaces em componentes pode ser investigado. Este estágio é o momento de pensar voltado para o gerenciamento das referências entre os componentes, de modo que as dependências sejam minimizadas e as políticas de integridade referencial sejam acomodadas. Assim, o estágio da interação dos componentes é onde os detalhes completos da estrutura do sistema aparecem, visando um claro entendimento das dependências entre os componentes;

- Especificação dos componentes: o estágio final da especificação é onde a especificação detalhada[10] das operações e restrições são consideradas. Para uma dada interface, isto significa definir os estados potenciais dos componentes em um modelo de informação da interface, e então especificar pré e pós-condições para as operações e capturar regras[11] do negócio (domínio) como restrições. As pré e pós-condições e outras restrições fazem referência aos tipos no modelo de informação da interface e aos tipos dos parâmetros. Em adição a esses detalhes da especificação das interfaces, este estágio também assinala a especificação das restrições que são específicas a uma especificação do componente particular e independente de cada interface. Essas restrições da especificação dos componentes determinam como as definições de tipos nas interfaces individuais irão corresponder mutuamente no contexto do componente em questão.

[10]Esta especificação detalhada é realizada no último estágio da especificação, pois ela deve ser feita somente depois que a arquitetura dos componentes estiver estabilizada e todas as operações das interfaces tiverem sido identificadas.

[11]O ato de escrever regras precisas para cada operação pode ajudar no descobrimento de parâmetros ou informações ausentes.

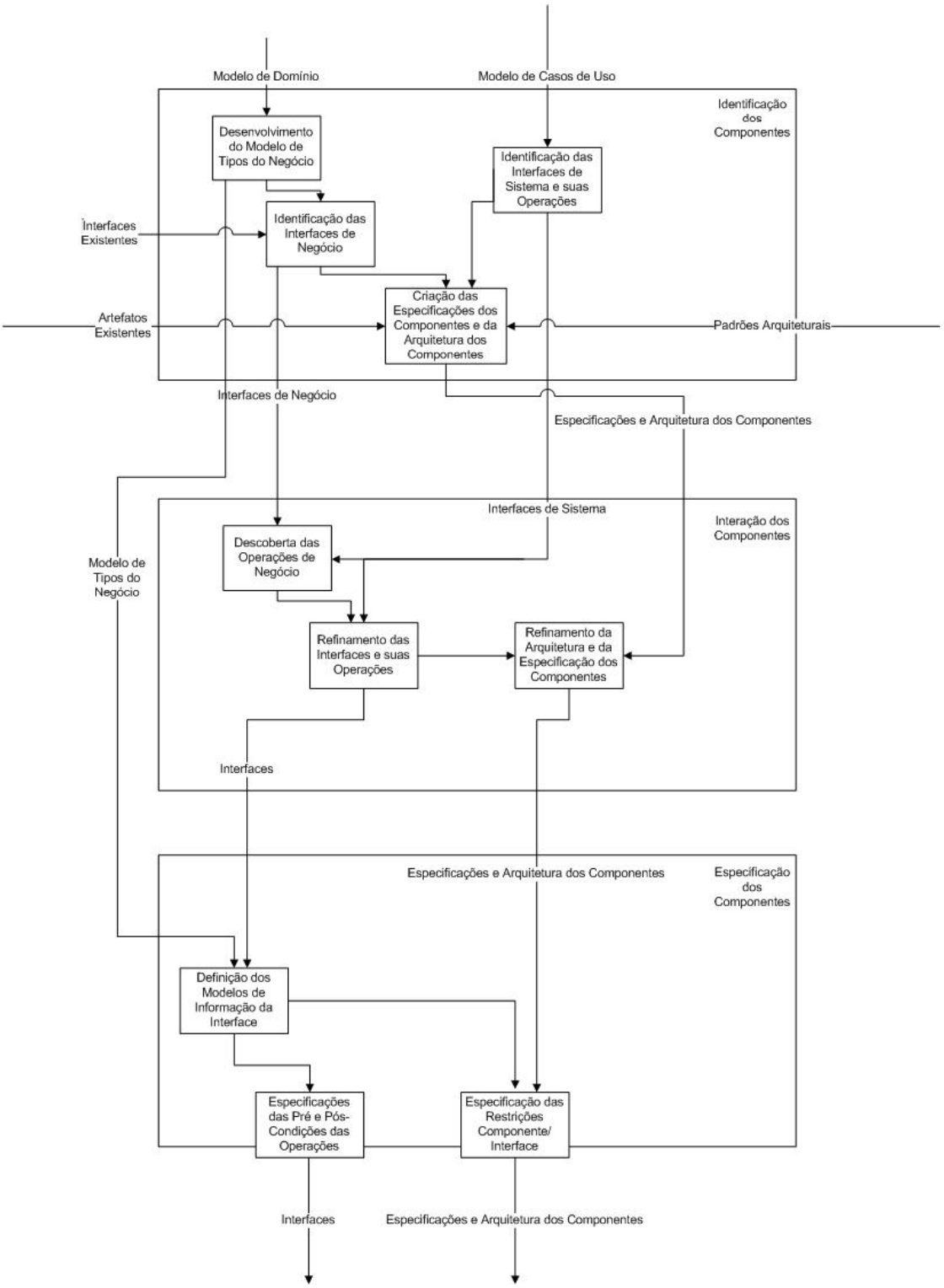

Figura 6.5: Os três estágios do fluxo de trabalho da especificação [30].

6.5.2 UML

A UML é a linguagem padrão para especificar, visualizar, documentar e construir artefatos de um sistema e pode ser utilizada com vários processos ao longo do ciclo de desenvolvimento e com diferentes tecnologias de implementação. A UML pode ser usada, principalmente, para [61]:

- Mostrar as fronteiras de um sistema e suas funções principais utilizando atores e casos de uso;
- Ilustrar a realização de casos de uso com diagramas de interação;
- Representar uma estrutura estática de um sistema utilizando diagramas de classe[12];
- Modelar o comportamento de objetos com diagramas de transição de estado;
- Apresentar a arquitetura de implementação física com diagramas de componentes e de implantação.

Entretanto, o vocabulário e as regras de uma linguagem, como a UML, indicam como construir e ler modelos, mas não apontam quais modelos deverão ser criados, nem quando deve-se criá-los. Essa tarefa cabe ao processo de desenvolvimento do software. Um processo bem definido servirá como guia para decidir quais artefatos serão produzidos, quais atividades e trabalhadores serão escolhidos para criá-los e gerenciá-los e como esses artefatos serão empregados para medir e controlar o projeto como um todo [13]. Diagramas, tais como os propostos pela UML, ajudam a enxergar ou explorar mais do panorama, e relacionamentos entre elementos de análise ou software, ao mesmo tempo em que se permite ignorar ou ocultar detalhes considerados irrelevantes. Esse é o valor da UML [77].

A UML fornece uma linguagem padrão que pode ser utilizada de diferentes formas. Em particular, é útil distinguir as três diferentes perspectivas que são frequentemente consideradas ao desenhar-se com ela:

- Perspectiva conceitual: os diagramas são considerados como descrevendo conceitos em uma situação do mundo real ou domínio de interesse;

[12]Entretanto, a UML não impõe uma perspectiva de modelagem. A mesma notação UML de diagramas de classes pode ser utilizada para desenhar imagens de conceitos do mundo real ou de classes de software em C++.

- Perspectiva de especificação: os diagramas descrevem abstrações dos componentes com especificações e interfaces, mas nenhum comprometimento com uma implementação particular;

- Perspectiva de implementação: os diagramas descrevem implementações de software e/ou componentes em uma tecnologia particular.

Como já mencionado, uma das características mais importantes de um componente de software consiste em uma separação clara entre a sua especificação e a sua implementação. O DBC postula que as funcionalidades dos componentes devem ser especificadas por meio de interfaces bem definidas, de forma que podem ser utilizadas por clientes que, não necessariamente, conheçam detalhes da sua implementação. Visto que o interesse da abordagem computacional concentra-se na modelagem de componentes e suas dependências, neste trabalho lida-se, principalmente, com a perspectiva de especificação. Assim, pretende-se mostrar como a UML pode ser aplicada na modelagem de especificação do sistema. Portanto, não enfatiza-se[13] o projeto interno e a implementação dos componentes, confirmando o fato que os componentes especificados nesta tese poderiam ter sido implementados em qualquer linguagem de programação.

A UML pode ser utilizada por diferentes processos de desenvolvimento de software [63]. Assim, a dicussão deixa de ser a forma dos diagramas para o que realmente deve ser feito em cada fase do processo. Baseado nisso, este trabalho não preocupa-se em cobrir minuciosamente os aspectos da UML. Ele enfoca os diagramas[14] mais utilizados, os recursos mais comuns nesses diagramas e a notação básica.

6.6 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentadas as definições de componentes de software, incluindo-se a definição adotada pelo autor. Enfatizou-se também os princípios dos componentes de software, os benefícios do desenvolvimento baseado em componentes e o processo de desenvolvimento utilizado com todos os seus fluxos de trabalho e artefatos, enfatizando os fluxos de trabalho e artefatos utilizados neste trabalho.

[13] Somente as dependências de implementação de outros componentes serão enfatizadas.

[14] A ferramenta CASE (*Computer-Aided Software Engineering* ou Engenharia de Software Auxiliada por Computador) utilizada para criar os diagramas foi o *Visual Paradigm for UML*. Esta ferramenta oferece uma edição para a comunidade, que pode ser copiada gratuitamente da sua página (*http://www.visual-paradigm.com*).

O próximo capítulo ilustra a aplicação dos componentes de software e do UML *Components* no desenvolvimento dos modelos computacionais propostos para o planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração.

Capítulo 7

Desenvolvimento Baseado em Componentes Aplicado ao Planejamento da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos de Geração

7.1 Considerações Iniciais

Este capítulo ilustra a aplicação do UML *Components* no desenvolvimento dos modelos computacionais propostos para o planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração. Enfatiza-se a aplicação dos fluxos de trabalho dos requisitos e da especificação, bem como a apresentação dos vários artefatos produzidos pelos fluxos de trabalho supracitados. O capítulo pretende apresentar, adicionalmente, a interconexão entre os fluxos de trabalho e os artefatos, considerando as várias atividades sugeridas pelo UML *Components*. O capítulo finaliza com uma comparação entre o desenvolvimento dos modelos computacionais de otimização e de simulação utilizando a modelagem orientada a objetos e a modelagem baseada em componentes.

7.2 Modelagem dos Requisitos

O propósito do fluxo de trabalho dos requisitos é prover um conjunto de artefatos que facilitem o entendimento dos conceitos do domínio e seus relacionamentos, incluindo os serviços (tarefas,

funções) realizadas no domínio. Os principais artefatos deste fluxo de trabalho são o modelo de casos de uso e o modelo de domínio (Figura 6.4).

7.2.1 Modelo de Caso de Uso

Informalmente, casos de uso são narrativas em texto enfatizando a utilização de um sistema por um ator para atingir objetivos. Eles são amplamente utilizados para identificar e registrar requisitos, influenciando muitos aspectos de um projeto de software, e servem de entrada para vários artefatos subseqüentes[1]. Metas de alto nível e diagramas de casos de uso da UML são utilizados como entrada para a criação do texto dos casos de uso. Ressalta-se que casos de uso incluem documentos de texto e não apenas diagramas. Um exemplo de caso de uso, no formato resumido, segue abaixo:

- Definir vazões afluentes naturais: este caso de uso define as vazões afluentes naturais a serem utilizadas na operação energética, para o caso específico em que foi escolhida a MLT como opção entre as disponíveis (MLT, histórico de vazões e vazões previstas) ao sistema hidroelétrico.

Tanto na orientação a objetos como nas abordagens estruturadas, cenários típicos têm sido utilizados na tentativa de compreender melhor os requisitos. No DBC, casos de uso também são relevantes no fluxo de trabalho dos requisitos, servindo de entrada para o fluxo de trabalho da especificação. Isto porque casos de uso fornecem um modo de descrever a visão externa do sistema e suas interações com o mundo exterior, representando uma visão de alto nível de funcionalidade intencional mediante o recebimento de um tipo de requisição do usuário. Um outro ponto de vista relacionado é aquele que define um caso de uso como um contrato de como o sistema se comportará. As características principais de um caso de uso são [61]:

- Um caso de uso é sempre iniciado por um ator que, por sua vez, deve solicitar direta ou indiretamente ao sistema tal realização;
- Um caso de uso é completo, ou seja, deve ser uma descrição completa, portanto, não estará completo até que o valor final seja produzido, mesmo se várias comunicações ocorrerem durante a interação;

[1]Num escopo mais amplo, os casos de uso podem descrever como um negócio é usado por seus clientes e sócios. Esta descrição do processo no nível da empresa é chamada de caso de uso de negócio e ilustra a ampla aplicabilidade dos casos de uso.

Nome do caso de uso	identificação do caso de uso
Resumo	resumo explicando os objetivos do caso de uso
Ator principal	ator que tem objetivos de usuário satisfeitos por meio do uso dos serviços do sistema
Ator de suporte	ator que fornece um serviço para o sistema
Pré-condições	declaram o que deve sempre ser verdadeiro antes do início do caso de uso
Pós-condições	declaram o que deve ser verdadeiro quando da conclusão bem sucedida do caso de uso
Fluxo Básico	descreve um cenário típico de sucesso que satisfaz os objetivos dos atores
Fluxos Alternativos	descrevem todos os outros cenários, tanto de sucesso como de fracasso

Tabela 7.1: Gabarito de caso de uso.

- Um caso de uso provê valor a um ator em resposta à sua solicitação.

Casos de uso podem ser mais bem detalhados do que no exemplo anterior, mas o essencial é descobrir e registrar os requisitos funcionais, escrevendo narrativas de uso de um sistema para satisfazer as metas do usuário. Desta forma, apresenta-se a seguir os principais formatos e níveis de formalidade na escrita de um caso de uso [77]:

- Resumido: resumo sucinto de um parágrafo, geralmente o cenário de sucesso principal. Geralmente ele é elaborado durante a análise de requisitos inicial, a fim de obter-se uma rápida idéia do escopo e assunto. O exemplo precedente, definir vazões afluentes naturais, encontra-se no formato resumido;

- Informal: formato informal de parágrafos abrangendo vários cenários;

- Completo: todos os passos e variantes são escritos em detalhe. Desta forma, depois que uma boa parte dos casos de uso tiverem sido identificados e escritos em formato resumido, alguns deles arquiteturalmente significativos e de alto valor são escritos em detalhe. Ressalta-se que vários gabaritos de formatos estão disponíveis para casos de uso completo. O formato utilizado neste trabalho é uma mistura resultante dos formatos propostos em [35, 65] e está ilustrado na Tabela 7.1.

Deve ser ressaltado que não existe um formato específico de documentação para casos de uso definido pela UML, ou seja, o formato de documentação de um caso de uso é bastante flexível, permitindo que o caso de uso seja documentado da forma que se considerar mais conveniente pelos participantes no projeto do software. Um exemplo do caso de uso, definir vazões afluentes

Nome do caso de uso	Definir Vazões Afluentes Naturais
Resumo	Descreve as etapas percorridas por um operador para definir as vazões afluentes naturais a serem utilizadas na operação energética
Ator principal	Operador
Ator de suporte	
Pré-condições	Um sistema hidroelétrico e um horizonte de planejamento já devem ter sido definidos
Pós-condições	Para cada usina do sistema hidroelétrico e para intervalo do horizonte de planejamento, um valor de vazão afluente natural é associado
Fluxo Básico	
Ação do Ator (Intenção)	*Responsabilidade do Sistema*
	1 - O sistema apresenta as três opções para definir as vazões afluentes naturais
2 - O operador decide utilizar a MLT	
	3 - O sistema solicita o mês de início
4 - O operador fornece o mês de início	
	5 - O sistema associa os valores da MLT em cada usina e em cada intervalo, utilizando para isto o mês de início, fornecido pelo operador, e o tamanho do horizonte, definido na especificação do horizonte de planejamento

Tabela 7.2: Caso de uso Definir Vazões Afluentes Naturais (Fluxo Básico).

naturais, no formato completo é apresentado na Tabela 7.2, e os fluxos alternativos na Tabela 7.3.

Do exposto, um caso de uso pode ser considerado como uma coleção de cenários relacionados, que descrevem um ator utilizando um sistema para atingir um objetivo. Um cenário é uma sequência específica de ações e interações entre o sistema e os atores, sendo também chamado de instância de caso de uso. É uma narrativa particular de uso de um sistema, por exemplo, o cenário de definir as vazões afluentes naturais como sendo correspondentes à MLT, ou o cenário de não realizar por completo a otimização da operação energética devido à infactibilidade.

Neste trabalho, empregou-se o estilo essencial de escrita para casos de uso, utilizando o formato completo. Nesse estilo, a narrativa é expressa no nível da intenção do usuário e das responsabilidades do sistema e não de suas ações concretas. Elas permanecem independentes da tecnologia e dos detalhes de mecanismos, especialmente aqueles relacionados com a interface com o usuário. Em contraste, existe um estilo concreto de caso de uso. Nesse estilo, as decisões sobre a interface do usuário estão embutidas no texto do caso de uso. O texto pode até ilustrar

Nome do caso de uso	Definir Vazões Afluentes Naturais
Fluxos Alternativos (1)	
1 - O operador decide utilizar o histórico de vazões afluentes naturais	
	2 - O sistema solicita o mês e o ano de início
3 - O operador fornece o mês e o ano de início	
	4 - O sistema calcula o mês e o ano finais, utilizando para isto o mês e o ano de início, fornecido pelo operador, e o tamanho do horizonte, definido na especificação do horizonte de planejamento, associando os valores do histórico para cada usina e para cada intervalo
Fluxos Alternativos (2)	
1 - O operador decide utilizar valores de vazões, baseadas em um modelo externo de previsões de vazões ou em um modelo de séries sintéticas	
	2 - O sistema solicita o "arquivo" desejado contendo os valores das vazões afluentes naturais
3 - O operador especifica o "arquivo"	
	4 - O sistema associa os valores das vazões afluentes naturais "importadas" em cada usina e em cada intervalo

Tabela 7.3: Caso de uso Definir Vazões Afluentes Naturais (Fluxos Alternativos).

imagens da tela com janela, discutir a navegação entre janelas, entre outros.

Na modelagem de casos de uso, o sistema é visto como uma caixa preta que fornece situações de aplicação (ou caso de uso). Não é importante, nesta fase, determinar como o sistema implementa os casos de uso ou como ocorre o funcionamento interno do sistema. Em vez disso, o sistema é descrito como tendo responsabilidades. Definindo as responsabilidades do sistema com casos de uso caixa preta, pode-se registrar o que o sistema deve fazer (o comportamento ou os requisitos funcionais) sem especificar como ele o fará (fluxo de trabalho de especificação no DBC ou fase de projeto no Desenvolvimento O.O.). Esta separação é importante para o bom desenvolvimento de software, assim durante a análise de requisitos deve-se evitar tomar decisões de especificação ou projeto, devendo-se enfocar no comportamento externo do sistema.

O modelo de casos de uso pode, opcionalmente, incluir um diagrama de caso de uso UML para ilustrar os nomes dos casos de uso, atores e seus relacionamentos, fornecendo um diagrama de contexto de um sistema e do seu ambiente, mostrando a fronteira de um sistema, o que está fora dele e como o sistema é usado, servindo como uma ferramenta de comunicação que resume o comportamento do sistema e dos seus atores. Além do mais, este diagrama ilustra os tipos de usuário que irão interagir com o sistema, quais papéis esses usuários irão assumir e quais funções serão requisitadas por cada usuário específico [65]. O diagrama de casos de uso concentra-se em dois itens principais: atores e caso de uso [2].

Os atores representam os papéis desempenhados pelos diversos usuários que poderão utilizar de alguma maneira os serviços e as funções do sistema. Eventualmente, um ator pode representar algum hardware especial ou mesmo um outro software que interaja com o sistema. Além do mais, o próprio sistema pode ser considerado um ator quando invoca os serviços e funções de outros sistemas.

Já os casos de uso referem-se aos serviços, funções ou tarefas que podem ser utilizadas pelos usuários do sistema, como definir as condições de operação energética, e otimizar ou simular a operação energética. Os casos de uso podem ser associados uns com os outros. Por exemplo, um caso de uso, como definir as condições de operação energética, pode fazer parte de alguns casos de uso, como otimizar operação energética e simular operação energética. Importante ressaltar que, organizar os casos de uso em relacionamentos não tem impacto sobre o comportamento ou sobre os requisitos do sistema. O relacionamento entre casos de uso é simplesmente um mecanismo de organização visando melhorar a compreensão e a comunicação dos casos de uso, reduzir a

[2] O ator interage com o sistema pelo envio e do recebimento de mensagens.

duplicação de texto e aprimorar o gerenciamento dos documentos de caso de uso.

O relacionamento incluir (*include*) pode ser usado para a maioria dos problemas de relacionamento de caso de uso [77]. Por exemplo, é normal ter algum comportamento parcial que seja comum a vários casos de uso. A definição das condições de operação energética ocorre em alguns casos de uso, como otimizar e simular a operação energética. Em vez de duplicar o texto acerca da definição das condições, é desejável separá-lo em seu próprio caso de uso e indicar a sua inclusão. A Figura 7.1 ilustra a notação UML do relacionamento incluir, que é o único que está sendo usado no estudo de caso. Apesar de haverem outros relacionamentos entre casos de uso, como estender (*extend*) e generalizar (*generalize*), recomenda-se o relacionamento incluir em detrimento dos outros dois [34].

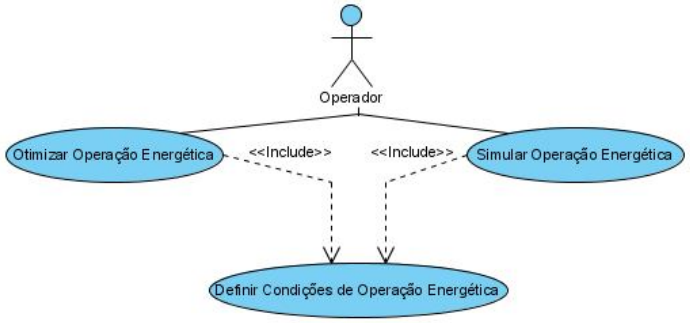

Figura 7.1: Exemplo de Relacionamento de Caso de Uso - Comportamento Parcial Comum.

Assim, aplica-se o relacionamento incluir quando houver repetição de texto (ou cenários) em dois ou mais casos de uso separados, a fim de evitar-se repetição. Outra motivação é simplesmente decompor um caso de uso demasiadamente longo e complexo para melhorar sua compreensão. A Figura 7.2 ilustra o relacionamento incluir utilizado na decomposição de um caso de uso considerado complexo (definir condições de operação energética), pois este caso de uso deve incluir a definição do sistema hidroelétrico, do horizonte de planejamento, das vazões afluentes naturais, das restrições operativas, do volume inicial e do mercado de energia.

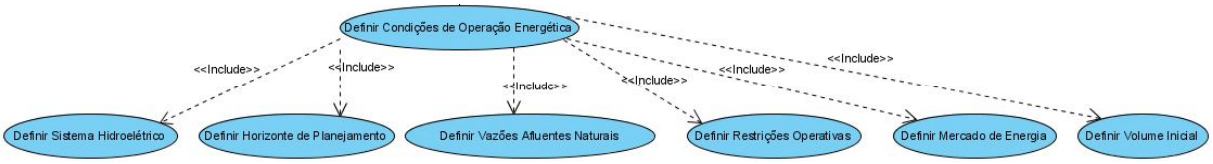

Figura 7.2: Exemplo de Caso de Uso - Comportamento Complexo.

A Figura 7.3 apresenta o diagrama de casos de uso para o sistema em questão (planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração). Conforme supracitado, o diagrama de caso de uso representa uma imagem do contexto do sistema, mostrando a fronteira do sistema, o que está fora dele e como o sistema é usado. Adicionalmente, pode servir como uma ferramenta de comunicação que resume o comportamento do sistema e seus atores. É importante abordar ainda a questão da temporalidade aos processos descritos neste diagrama de casos de uso. Pode-se perceber que no diagrama são apresentados processos que ocorrem em momentos diferentes durante a utilização do sistema, como o momento em que se define as condições de operação energética e o momento em que se simula ou otimiza a operação energética do sistema hidrotérmico de geração. Assim, o diagrama de casos de uso não se preocupa com a questão da temporalidade, seu objetivo é identificar todas as possíveis funções (serviços, tarefas) que o sistema irá oferecer, sem se preocupar muito com o tempo em que elas ocorrerão.

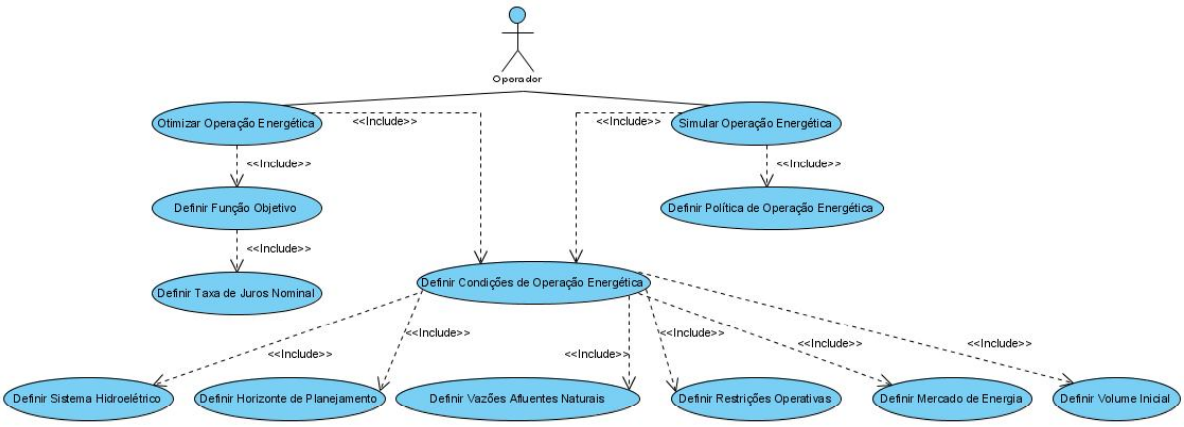

Figura 7.3: Diagrama de casos de uso do sistema.

7.2.2 Modelo de Domínio

Um modelo de domínio é uma representação visual de classes conceituais, ou objetos do mundo real, em um domínio [59, 97]. Trata-se de um artefato do domínio do problema e não do domínio da solução. Assim, o modelo de domínio considera apenas o mundo exterior ao sistema, e nunca seu interior. Portanto, o modelo de domínio não deve ser confundido com o modelo de tipos de negócio (artefato do desenvolvimento baseado em componentes), bem como com o diagrama de classes do projeto (no desenvolvimento orientado a objetos), pois estes dois últimos, embora inicialmente derivados do modelo de domínio, pertencem ao fluxo de trabalho

da solução, e então, servem a objetivos diferentes. Além disso, o modelo de domínio também não deve ser confundido com o modelo de dados, porque o modelo de dados enfatiza a organização e a representação dos dados a serem armazenados, enquanto o modelo de domínio visa representar a compreensão da informação e do domínio, e não sua representação física.

O desenvolvimento baseado em componentes surge como uma técnica que carrega os recursos necessários para, a partir do entendimento do domínio de uma aplicação, poder dividí-la em componentes de software. Assim, técnicas para efetuar uma modelagem do domínio são extremamente valiosas, pois oferecem orientações de como modelar as aplicações visando um domínio, e não apenas uma aplicação específica[3].

O objetivo do fluxo de trabalho dos requisitos é estudar o problema. Entretanto, o sistema computacional seria uma solução para o problema, portanto, objeto de estudo da fase de especificação. O sistema nem precisa ser considerado um sistema computacional nesse momento. Seria possível modelar os requisitos de todo um problema e propor uma solução manual para implementá-lo, na qual os dados são armazenados em fichas de papel e as operações são efetuadas por funcionários de uma organização com o uso de calculadoras, canetas, etc., por exemplo. Ou seja, as informações do problema têm uma existência independente de um computador para armazená-las. Assim, o modelo de domínio deve ser independente da solução física que virá a ser adotada e deve conter apenas elementos referentes ao domínio do problema em questão, ficando relegados ao fluxo de trabalho de especificação (ou projeto) os elementos da solução.

Os conceitos registrados nos casos de uso relacionados, a visão aprofundada dos especialistas e as descrições textuais do domínio de um problema (capítulos 2 e 3) vão servir de entrada para a criação do modelo de domínio. Ele, por sua vez, pode influenciar os artefatos do fluxo de trabalho da especificação, como o modelo de tipos do negócio. Empregando-se a notação UML, um modelo de domínio é representado por um conjunto de diagramas de classes em que nenhuma operação é definida.

A Figura 7.4 ilustra um modelo de domínio parcial utilizando a notação UML para diagramas de classes. O modelo informa, entre outras coisas:

- As classes conceituais *UsinaHidroeletrica*, *CasaDeMaquinas* e *ConjUnidadesGeradoras* são significativas no domínio;

[3]Com isto, os requisitos de novas aplicações, pertencentes ao mesmo domínio, podem ser adaptados aos componentes existentes.

- Uma *CasaDeMaquinas* está relacionada a uma *UsinaHidroeletrica* (pela associação pertence-a-uma);

- Uma *CasaDeMaquinas* é composta por um ou mais conjuntos de unidades geradoras (*ConjUnidadesGeradoras*), pela associação compõe;

- Uma *CasaDeMaquinas* tem um número de conjuntos de unidades geradoras (representado pelo atributo *numeroConjuntosUnidadesGeradoras*);

- Uma *UsinaHidroeletrica* tem uma produtibilidade específica (representada pelo atributo *produtibilidadeEspecifica*).

Figura 7.4: Modelo de domínio parcial.

O modelo conceitual representa somente o aspecto estático da informação. Portanto, não podem existir no modelo conceitual referências a operações ou a aspectos dinâmicos dos sistemas [177]. Observa-se então que um modelo de domínio não é uma descrição dos componentes e/ou objetos de software, ele é uma visualização de conceitos ou modelos mentais do domínio do mundo real[4] [77]. Além do exposto, a Figura 7.4 permite visualizar e relacionar termos ou conceitos do domínio. Ela também ilustra uma abstração das classes conceituais, visto que há muitos detalhes que poderiam ser apresentados sobre usinas hidroelétricas, casa de máquinas e conjuntos de unidades geradoras. A informação que ela exibe (usando a notação UML) poderia, de forma alternativa, ter sido expressa por texto em prosa (como no capítulo 2). Entretanto, ao empregar-se uma linguagem visual, facilita-se a compreensão dos termos e dos seus relacionamentos. Desta forma, o modelo de domínio pode ser considerado um dicionário visual das abstrações relevantes, do vocabulário de domínio e do conteúdo da informação do domínio.

[4]Isto é, ele enfoca um domínio, como o de sistemas hidrotérmicos de geração. Via de regra, entretanto, o desenvolvedor deve ter em mente os objetivos do sistema enquanto procura descobrir os elementos do modelo de domínio. Não é interessante representar, no modelo de domínio, uma informação irrelevante para o sistema. Assim, o desenvolvedor tem responsabilidade de compreender quais são as reais necessidades de informação e filtrar as irrelevâncias. Frisa-se que é válido ter classes conceituais sem atributos ou classes conceituais que têm um papel simplesmente comportamental no domínio, em vez de um papel de informação.

Refinamentos para o Modelo de Domínio

A construção do modelo de domínio envolve mais do que simplesmente juntar classes conceituais, associações e atributos. Desta forma, é necessário utilizar certos recursos de modelagem, a fim de obter um refinamento do modelo para que ele consista em uma representação fiel e organizada do domínio. É importante identificar e registrar as associações necessárias para satisfazer aos requisitos de informação, as quais auxiliam na compreensão do modelo de domínio. A necessidade de classes descritivas é comum e importante, especialmente para reduzir informação redundante ou duplicada. Classes associativas também são necessárias, especialmente como um repositório para armazenar as informações produzidas pelas associações. Generalização e especialização são conceitos relevantes da modelagem de domínio que favorecem a economia de expressão. Além disso, as hierarquias de classes conceituais frequentemente são a base de inspiração das hierarquias de interfaces, componentes e classes de software que exploram a herança e reduzem a duplicação do código. Pacotes são um modo de organizar modelos de domínio. Estes refinamentos e outros mais serão apresentados a seguir, ilustrando suas aplicações na construção do modelo de domínio para o sistema em questão. O modelo refinado[5] do modelo de domínio será apresentado posteriormente.

Uma associação descreve um vínculo geralmente entre duas classes, complementando a informação que se tem sobre elas em um determinado instante, ou referenciando informação associativa nova. Este tipo particular de associação entre duas classes é chamado de associação binária, mas é perfeitamente válido que uma classe esteja vinculada a si mesma (Figura 7.5), caso conhecido como associação unária, ou que uma mesma associação seja compartilhada por várias classes, o que é conhecido como associação n-ária[6] [65].

Figura 7.5: Associação unária.

A associação "localiza-se-a" (Figura 7.5) indica uma possível relação entre uma ou mais ins-

[5]O modelo de domínio do sistema foi desenvolvido incrementalmente, considerando os requisitos em cada iteração.

[6]Este tipo de associação é mais raro e complexo.

tâncias da classe *UsinaHidroeletrica* com outras instâncias da própria classe, ou seja, esta associação determina que uma determinada usina localiza-se imediatamente a montante de outra usina hidroelétrica, e que uma usina hidroelétrica localiza-se diretamente a jusante de outra usina hidroelétrica. Assim, com esta associação, consegue-se registrar, no modelo conceitual, uma importante informação do domínio de sistemas hidrotérmicos de geração: a rede básica[7], sem a necessidade de criar uma classe conceitual para a informação.

Dada uma associação, cada um dos seus lados corresponde a um papel. Por exemplo, dada a associação "localiza-se-a", pode-se especificar que uma determinada usina hidroelétrica representa o papel de uma usina diretamente a jusante de outra usina. Se for conveniente, é possível nomear esses papéis indicando a função que um conceito (ou objeto) desempenha em relação a outro por meio da associação [177]. Explicitar um nome de papel é útil quando o papel desempenhado ("imediatamente-a-montante" e "diretamente-a-jusante") pela instância da classe (*UsinaHidroeletrica*) não está claro. Na mesma associação, percebe-se que existe outra informação, além de seu próprio nome ("localiza-se-a") e dos papéis ("imediatamente-a-montante" e "diretamente-a-jusante"), representada pelos valores "0..*" e "0..1"; esta informação é conhecida como multiplicidade. O valor da multiplicidade informa quantas instâncias podem ser associadas corretamente com outra, em um determinado momento, em vez de ao longo do tempo [77]. Assim, a multiplicidade indica um relacionamento numérico entre as instâncias das classes. Por exemplo, a multiplicidade "0..1" para o papel da usina hidroelétrica "diretamente-a-jusante", indica que uma usina hidroelétrica pode possuir nenhuma ou apenas uma usina diretamente a jusante, pois neste trabalho está sendo considerada apenas a estrutura topológica usual entre as usinas brasileiras. Desta forma, o valor da multiplicidade informa uma restrição do domínio que poderá ser refletida no software. Uma multiplicidade de valor 1 significa que uma instância está associada, em um determinado momento, a apenas uma instância de outra classe conceitual. Ao longo da vida da instância, ela poderá ser associada a muitas outras, porém somente a uma de cada vez. No exemplo da Figura 7.7, é possível que um conjunto de unidades geradoras possa ter vários tipos de turbinas hidráulicas ao longo do tempo. Entretanto, em um determinado instante, um conjunto possui somente um tipo de turbina hidráulica, pois conforme já apresentado, um determinado conjunto possui características semelhantes.

Uma classe descritiva contém informação que descreve uma classe conceitual em mais detalhes. Um exemplo da necessidade deste tipo de classe pode ser encontrada na classe *Desc-*

[7] A rede básica representa uma cascata de usinas hidroelétricas.

TurbinaHidraulica (7.7). A casa de máquinas de uma usina hidroelétrica pode ser composta por um ou mais conjuntos de unidades geradoras com características semelhantes. Cada um dos conjuntos tem o mesmo tipo de turbina, com o mesmo α e β (utilizados no cálculo do engolimento máximo e da geração hidráulica máxima). A única diferença entre os conjuntos é o número de unidades geradoras, a potência efetiva, a altura de queda líquida efetiva e o engolimento efetivo.

Poderia-se propor que, neste caso, existiria apenas a classe conceitual *ConjUnidadesGeradoras*, com os atributos específicos do conjunto de unidades, bem como com os atributos da turbina hidráulica da unidade (Figura 7.6). Há alguns problemas relacionados nesta estrutura da informação. Este modelo, caso seja implementado em software, similar ao do modelo de domínio, possuiria dados duplicados (relacionados à turbina hidráulica do conjunto), seria ineficiente em termos de espaço de armazenamento, além de possibilitar inconsistências (devido à informação replicada), porque o nome, o tipo, o "alfaHLMenor", o "alfaHLMaior", o "betaHLMenor" e o "betaHLMaior" seriam duplicados para cada instância do conjunto que possui a mesma turbina. Este problema ilustra a necessidade de classes que sejam descrições (também chamada de especificações) de outras classes. Para solucionar este problema, é necessária uma classe *DescTurbinaHidraulica* que seja responsável por armazenar informações sobre as turbinas hidráulicas relacionadas ao conjunto de unidades geradoras. Portanto, a classe *ConjUnidadesGeradoras* ficaria apenas com os atributos que são distintos para cada conjunto, de forma a reduzir a informação redundante ou duplicada. A Figura 7.7 ilustra que para cada instância de *ConjUnidadesGeradoras* haverá exatamente uma instância de *DescTurbinaHidraulica*, a qual especifica a turbina hidráulica e seus parâmetros (α e β), os quais são atributos comuns a outras instâncias de *ConjUnidadesGeradoras*.

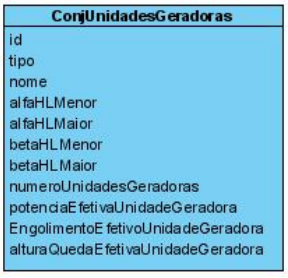

Figura 7.6: Motivação para classes descritivas.

Na representação adotada (rede hidráulica), cada nó representa o comportamento operativo de uma usina hidroelétrica durante um intervalo do horizonte de planejamento. O fato de que

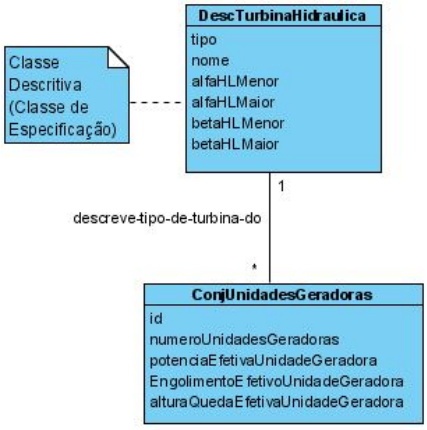

Figura 7.7: Classes descritivas.

um nó está relacionado tanto a uma usina hidroelétrica como a um intervalo do horizonte de planejamento é um indício de que ele depende do relacionamento entre os dois. O *volumeMedio* e a *vazaoDefluente* podem ser vistos como alguns dos atributos relacionados à associação entre *UsinaHidroeletrica* e *IntervaloHorizonte*. Isto ocorre porque a *vazaoDefluente* representa o valor da vazão descarregada por uma usina durante um intervalo do planejamento. Já *volumeMedio* representa o estado médio de armazenamento do reservatório de uma usina durante a operação num intervalo específico. Isso conduz à noção de uma classe associativa, na qual pode-se registrar as características da associação propriamente dita[8]. A Figura 7.8 ilustra a modelagem de *NoHidroEnergetico* como uma classe associativa relacionada à associação entre *UsinaHidroeletrica* e *IntervaloHorizonte*.

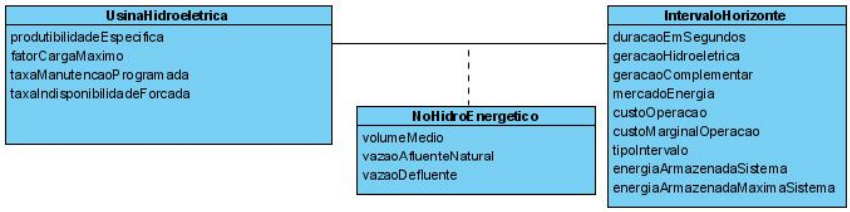

Figura 7.8: Classe associativa.

Os conceitos usina a reservatório e usina a fio d'água são muito semelhantes. Neste contexto, é possível organizá-los em uma hierarquia de classes generalização-especialização[9] (ou simples-

[8] Classes associativas captam a informação sobre uma associação.

[9] A hierarquia de classes é obtida quando duas classes se associam por meio de um relacionamento especial,

mente hierarquia de classes), na qual uma superclasse *UsinaHidroeletrica* representa um conceito mais geral (abrangente) e as subclasses representam conceitos mais especializados. A Figura 7.9 ilustra esta hierarquia de classes conceituais.

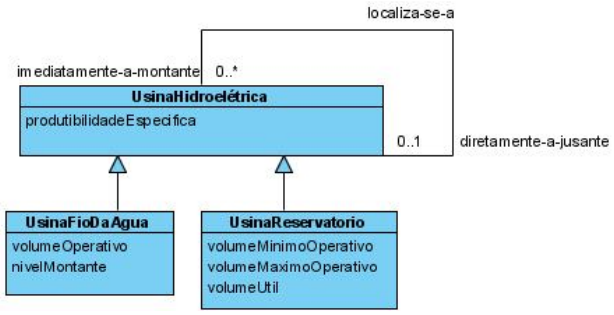

Figura 7.9: Hierarquia de classes.

O exemplo da Figura 7.10 ilustra a superclasse *Polinomio* e suas subclasses (*PolinomioJusante*, *PolinomioAreaEspelhoDaAgua* e *PolinomioMontante*). A identificação da superclasse e das subclasses é importante, pois ela permite entender os conceitos em termos mais gerais, abstratos e refinados. Pode-se registrar na superclasse o que há de comum entre os conceitos (*grau*, *coeficientes*, *coeficientesDerivadaPrimeira* e *coeficientesIntegral*), conduzindo a uma economia de expressão, a uma compreensão aprimorada e a uma redução de informações repetidas. Desta forma, somente os conceitos especializados são capturados nas subclasses, como na subclasse *PolinomioJusante*, que possui um *nivelReferencia*. Isto ocorre porque determinadas usinas hidroelétricas possuem mais de um polinômio para o nível de jusante, tendo cada um desses polinômios um nível de referência do reservatório imediatamente a jusante.

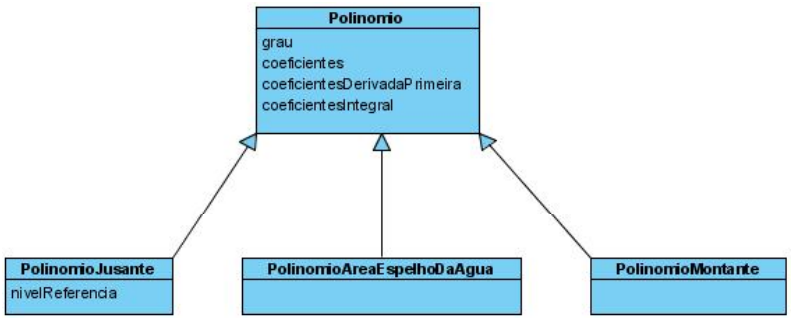

Figura 7.10: Hierarquia de classes.

denominado generalização ou especialização.

Quando uma hierarquia de classes é criada, afirmações podem ser feitas a respeito das superclasses que se aplicam às subclasses. Por exemplo, a Figura 7.11 ilustra que todas as usinas têm uma produtibilidade específica, e estão associadas a uma *CasaDeMaquinas* e a uma ou mais instância da classe *PolinomioJusante*. Todas as subclasses de *UsinaHidroeletrica* devem obedecer à regra de ter uma produtibilidade específica e estarem associadas a uma *CasaDeMaquinas*, por exemplo. Essa regra de conformidade com a definição de uma superclasse é conhecida como regra dos 100% [77]. Desta forma, 100% da definição da superclasse conceitual deve ser aplicável às subclasses. Por isso, a subclasse deve estar 100% de acordo com os atributos e as associações da superclasse.

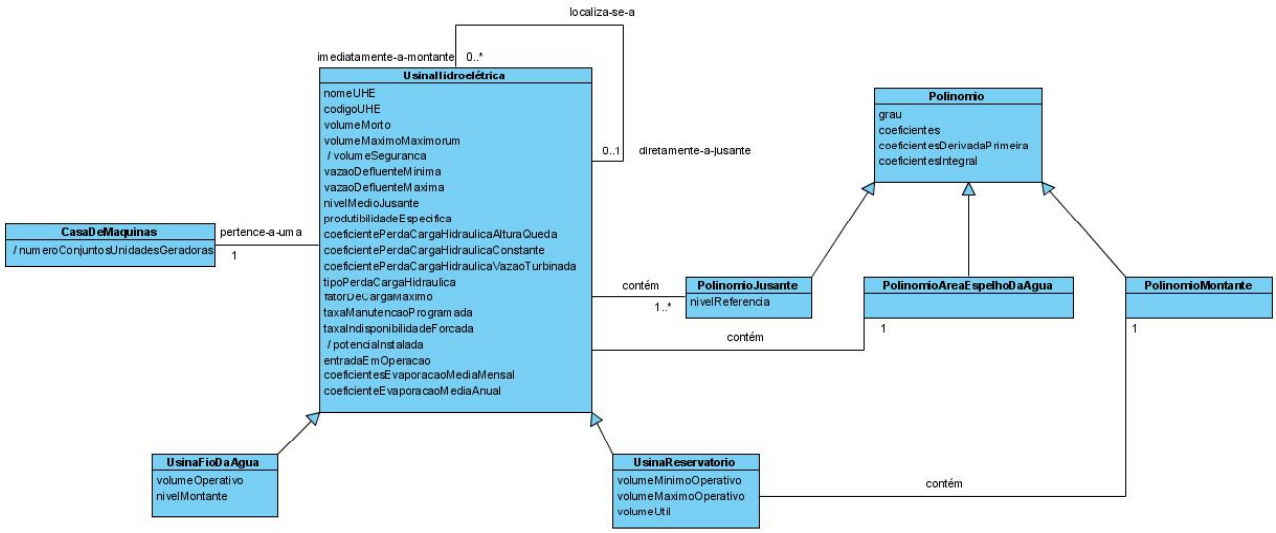

Figura 7.11: Hierarquia de classes.

Uma subclasse conceitual deve ser membro do conjunto da superclasse. Assim, *UsinaReservatorio* deve ser membro do conjunto definido por *UsinaHidroeletrica*. Informalmente, isso expressa a noção de que a subclasse conceitual é um elemento[10] da superclasse. Desta forma, todos os membros do conjunto de uma subclasse devem ser membros do seu conjunto superclasse. Em linguagem natural, esta regra pode ser testada informalmente, verificando a veracidade da informação: a *subclasse* é uma *superclasse*. Por exemplo, a declaração "*UsinaFioDaAgua* é uma *UsinaHidroeletrica*" faz sentido e transmite a noção de conformidade com a pertinência a conjuntos.

Apresenta-se a seguir, as principais razões para particionar uma classe em subclasses [77]:

[10]Resumidamente, a relação "é-um-elemento-de" é chamada de "é-um".

- A subclasse tem atributos adicionais de interesse. Uma usina a reservatório tem um volume útil (diferente de zero), um volume mínimo operativo e um volume máximo operativo;
- A subclasse tem associações adicionais de interesse. Uma *UsinaReservatorio* associa-se a ("contém") um *PolinomioMontante*;
- O conceito da subclasse é operado, tratado ou manipulado de forma diferente da superclasse ou de outras subclasses. Na rede hidráulica, as variáveis de volume das usinas a reservatório são responsáveis pela informação do estado dos reservatórios de um intervalo para o outro. Para as usinas a fio d'água não há arcos de volume. No cálculo do nível de jusante de uma usina com mais de um polinômio, o valor da cota é obtida por interpolação dos polinômios, de acordo com o nível d'água do reservatório da usina diretamente a jusante. Caso a usina possua somente um polinômio para o nível de jusante, o cálculo é realizado diretamente, sem necessidade da interpolação entre os polinômios;
- O conceito da subclasse representa algo animado (por exemplo, um robô) que se comporta de maneira diferente da superclasse ou de outras subclasses, de forma que sejam interessantes de se considerar.

A generalização em uma superclasse comum geralmente é recomendável quando são identificados aspectos comuns entre as subclasses em potencial. Apresenta-se a seguir, os principais motivos para generalizar e definir uma superclasse [77]:

- As subclasses conceituais representam variações de um conceito semelhante. Uma usina a reservatório é diferenciada, em essência, de uma usina a fio d'água pela capacidade de regularização do seu reservatório;
- Todas as subclasses tiverem o mesmo atributo, o qual possa ser removido e colocado na superclasse. Tanto uma usina a reservatório, quanto uma usina a fio d'água possuem uma produtibilidade específica. Logo, este atributo poderia ser alocado na superclasse *UsinaHidroeletrica*;
- Todas as subclasses tiverem a mesma associação, a qual possa ser removida e relacionada com a superclasse. Tanto uma usina a reservatório como uma usina a fio d'água possuem uma casa de máquinas.

Portanto, não se deve usar o relacionamento de generalização quando a superclasse não possuir nenhum atributo ou associação, ou seja, não existem propriedades generalizadas; ou

quando todas as propriedades são colocadas na superclasse, ou seja, não existem propriedades específicas.

O relacionamento de generalização tem uma natureza muito diferente das associações do modelo conceitual. Se duas classes como *UsinaHidroeletrica* e *CasaDeMaquinas* são relacionadas por uma associação simples do modelo conceitual, então as instâncias de *UsinaHidroeletrica* poderão ser ligadas às instâncias de *CasaDeMaquinas*, pelas realizações concretas desta associação. Entretanto, se duas classes como *UsinaHidroeletrica* e *UsinaReservatorio* são ligadas pela relação de generalização, então uma instância de *UsinaReservatorio* também é uma instância de *UsinaHidroeletrica*, ou seja, não existem instâncias de *UsinaReservatorio* sem estarem ligadas a instâncias de *UsinaHidroeletrica*: as instâncias de *UsinaReservatorio* são simultaneamente instâncias de *UsinaHidroeletrica*.

Algumas associações podem ser consideradas mais fortes do que outras, por definirem um objeto composto por outros [177]. Agregação é um tipo especial de associação que sugere que um tipo de objeto é composto, pelo menos em parte, de outro em uma relação de todo-parte. Composição, também conhecida como agregação composta, é uma espécie forte de agregação todo-parte. Especificamente, um relacionamento de composição implica que:

- Uma instância da parte (por exemplo, uma *CasaDeMaquinas*) pertence a apenas uma instância composta (*UsinaHidroeletrica*) de cada vez (Figura 7.12);

- A instância da parte deve sempre pertencer a uma composição. No domínio considerado, um polinômio nível de jusante e uma casa de máquinas não são considerados relevantes caso não estejam associados a uma usina hidroelétrica. Assim, não são permitidas partes soltas. Se a composição é destruída, suas partes devem ser destruídas ou acopladas a outra composição;

- A composição é responsável pela criação e remoção de suas partes.

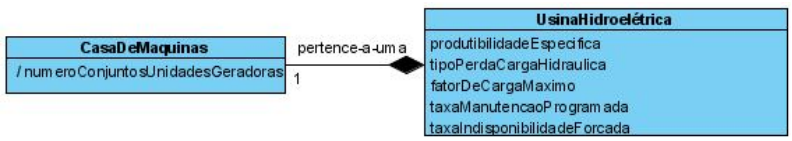

Figura 7.12: Composição entre usina hidroelétrica e casa de máquinas.

Em alguns casos, a presença de composição é óbvia, normalmente entre classes que representam conjuntos e seus elementos. No domínio de sistemas hidrotérmicos de geração, *ConjUnidadesGeradoras* pode ser considerado uma parte de um composto *CasaDeMaquinas*[11] (Figura 7.13). Usando justificativa similar, *CatalogoDescTurbinaHidraulica* pode ser considerado um composto de *DescTurbinaHidraulica* (Figura 7.14). Como alguns arcos estão contidos simultaneamente em mais de um ciclo, representa-se esse relacionamento todo-parte por uma agregação (Figura 7.15).

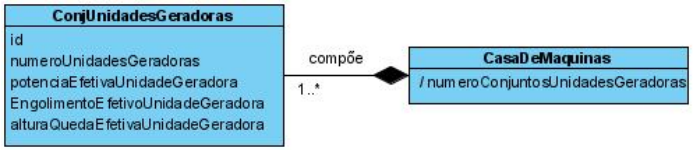

Figura 7.13: Composição entre casa de máquinas e conjuntos de unidades geradoras.

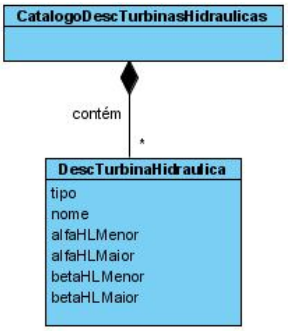

Figura 7.14: Composição entre catálogo e a descrição de uma turbina hidráulica.

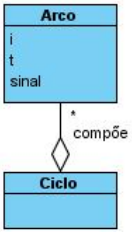

Figura 7.15: Agregação entre arco e ciclo.

É útil identificar classes conceituais abstratas no modelo de domínio, pois elas restringem

[11] A casa de máquinas de uma usina hidroelétrica é composta por conjuntos de unidades geradoras.

de quais classes é possível obter-se instâncias concretas, registrando algumas regras adicionais do domínio do problema. Se uma superclasse puder ter suas próprias instâncias, então ela será considerada uma classe normal [177]. Entretanto, se não for possível instanciar diretamente instâncias da superclasse, mas apenas das subclasses, então a superclasse será abstrata. Desta forma, todo elemento de uma determinada classe abstrata deve ser também membro de alguma subclasse. Uma *UsinaHidroeletrica* é uma classe conceitual abstrata. Uma instância de *UsinaHidroeletrica*[12] deve estar em conformidade com uma das subclasses: *UsinaReservatorio* ou *UsinaFioDaAgua* (Figura 7.16).

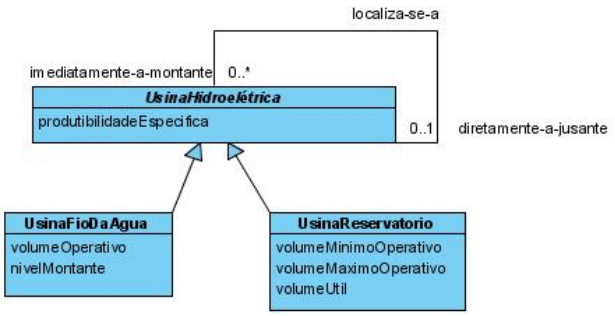

Figura 7.16: Classe conceitual abstrata.

Um elemento derivado pode ser determinado a partir de outros. Os atributos e as associações são os elementos derivados mais comuns [77]. Geralmente, evita-se mostrar os elementos derivados em um diagrama, porque eles aumentam a complexidade sem acrescentar novas informações. No entanto, alguns elementos derivados foram registrados [13](*numeroConjuntoUnidadesGeradoras*, *potenciaInstalada* e *volumeSeguranca*) por proverem uma maior compreensão e informações acerca do domínio do problema. O elemento derivado *numeroConjuntoUnidadesGeradoras*, ilustrado na Figura 7.13, pode ser derivado do número de instâncias da classe *ConjUnidadesGeradoras* associadas à *CasaDeMaquinas*.

Considerados os possíveis refinamentos apresentados nesta sub-seção, o modelo de domínio para o planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração, é apresentado a seguir. Como o modelo de domínio em questão é muito grande, com várias classes conceituais, atributos e associações, optou-se por decompô-lo em vários modelos de domínio parciais ("pacotes") fortemente relacionados, com a decomposição servindo, adicionalmente, como um auxílio

[12]Na UML, indica-se que uma classe é abstrata, colocando-se o nome da classe em itálico, ou usando a palavra-chave *abstract*.

[13]Na UML, um elemento derivado é ilustrado com uma "/" precedendo seu nome.

à compreensão.

O primeiro pacote (Figura 7.17) refere-se aos conceitos diretamente relacionados com o sistema hidroelétrico, os quais foram sendo introduzidos na explanação sobre modelos de domínio. O segundo pacote (Figura 7.18) apresenta o modelo de domínio parcial referente ao horizonte de planejamento. O terceiro pacote (Figura 7.19) ilustra conceitos de interesse relacionados à otimização da operação energética, enquanto a Figura 7.20 ilustra os conceitos que estão relacionados com a simulação da operação energética. Por fim, a Figura 7.21 apresenta as classes conceituais, relacionadas à rede hidráulica. Na Figura 7.21 observa-se a dependência de elementos. Um elemento pertence ao pacote dentro do qual é definido, mas pode ser referenciado em outros pacotes. Nesse caso, o nome do elemento é qualificado pelo nome do pacote, usando o formato de nome de caminho *NomeDoPacote::NomeDoElemento*. Uma classe apresentada em um pacote importado pode ser modificada com novas associações, mas, do restante, deve permanecer inalterada.

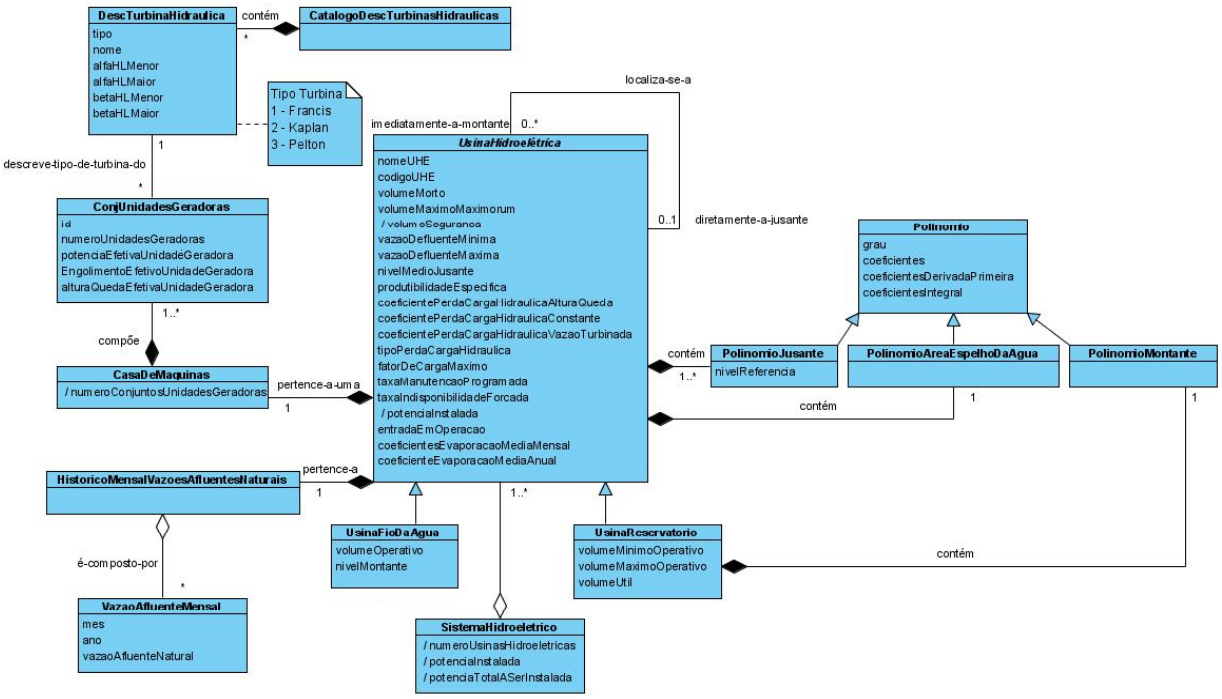

Figura 7.17: Modelo de domínio parcial: sistema hidroelétrico de geração.

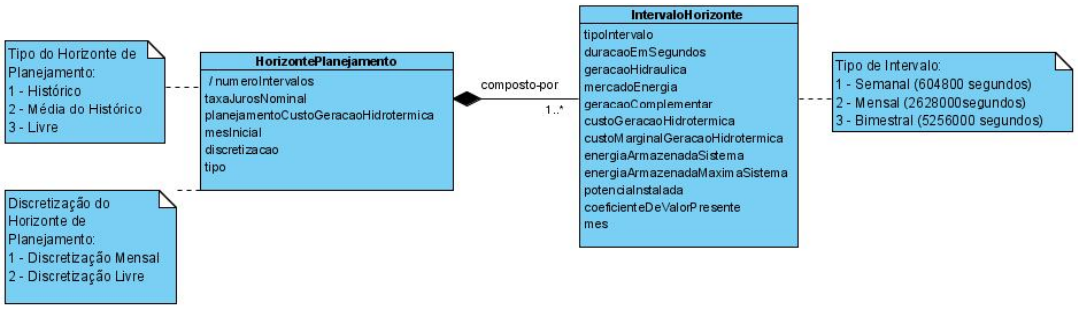

Figura 7.18: Modelo de domínio parcial: horizonte de planejamento.

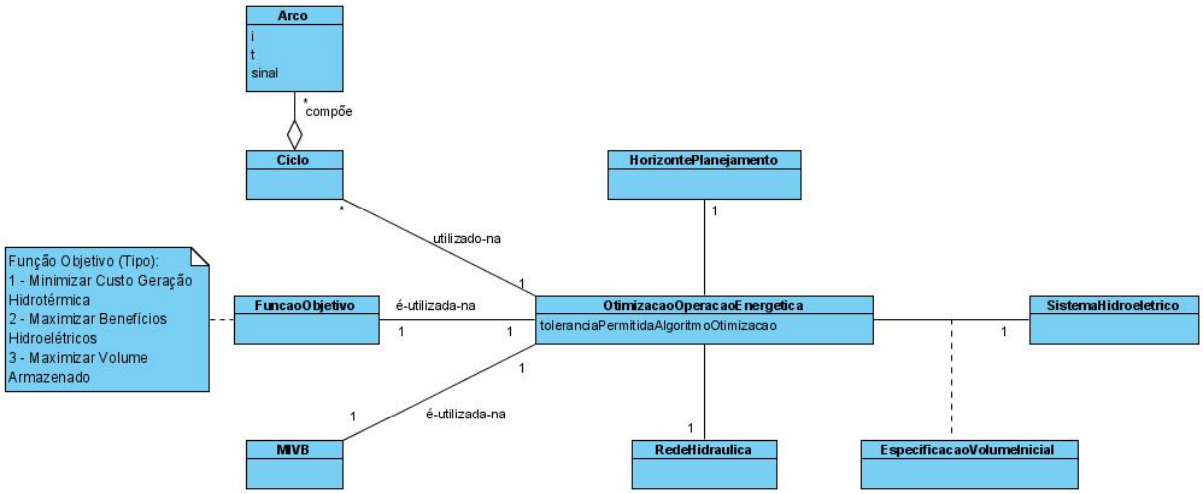

Figura 7.19: Modelo de domínio parcial: otimização da operação energética.

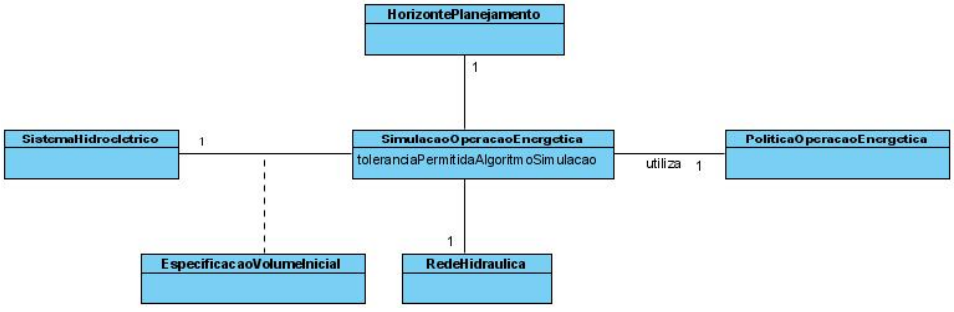

Figura 7.20: Modelo de domínio parcial: simulação da operação energética.

Figura 7.21: Modelo de domínio parcial: rede hidráulica.

7.3 Modelagem da Especificação

Após o término do fluxo de trabalho de requisitos, entra-se no fluxo de trabalho da especificação, que envolve a concepção de um sistema de software para resolver um problema (satisfazer os requisitos). Os artefatos da especificação representam elementos de software utilizados na solução do problema em questão. Os artefatos do fluxo de trabalho da especificação são o modelo de tipos do negócio, as especificações das interfaces, as especificações dos componentes e a arquitetura dos componentes (Figura 6.4). O foco principal é a definição em um nível alto de abstração, dos serviços oferecidos pelos componentes vistos como caixas pretas. É nesta etapa que a arquitetura de componentes começa a ser definida e os componentes, especificados. Além do mais, no fluxo de trabalho da especificação, enfoca-se os mecanismos e as regras para garantir que os componentes de software não interfiram inapropriadamente uns com os outros depois que eles forem instalados em um sistema.

7.3.1 Identificação dos Componentes

A identificação dos componentes é o primeiro estágio do fluxo de trabalho da especificação. O objetivo deste estágio é a criação de um conjunto de interfaces e especificações de componentes, além de uma arquitetura inicial de componentes. Desta forma, pretende-se identificar as interfaces de sistema e os componentes de sistema na camada de serviços do sistema, e as interfaces de negócio e os componentes de negócio na camada de serviços do negócio[14]. Ela também produz um importante artefato interno do fluxo de trabalho da especificação, o modelo de tipos do negócio, o qual será usado no estágio da especificação dos componentes para desenvolver os modelos de informação da interface. A ênfase no estágio da identificação está no descobrimento: quais informações precisam ser gerenciadas, quais interfaces são necessárias para gerenciá-las, quais componentes são necessários para fornecer essas funcionalidades e como esses componentes de software deverão estar relacionados estruturalmente para satisfazer suas responsabilidades[15].

A camada de diálogo com o usuário é responsável por invocar as operações nas interfaces de sistema. Portanto, essas interfaces e suas operações são derivadas das interações do sistema com

[14]A abordagem está baseada na visão das camadas arquiteturais mencionadas no Capítulo 6, isto é, o sistema é separado em duas camadas distintas: camada de serviços do sistema e camada de serviços do negócio. Esta separação difunde-se pelo fluxo de trabalho da especificação.

[15]Ressalta-se que em adição à descoberta de novos componentes, é necessário levar em conta interfaces, sistemas, banco de dados e componentes existentes, além da aplicação de padrões arquiteturais e critérios de projeto, quando apropriado.

o usuário, e surgem de uma análise realizada sobre os modelos de casos de uso (Figura 7.22). Já o modelo de domínio foca na informação que o sistema precisa gerenciar[16], entretanto este modelo deve ser refinado para a construção do modelo de tipos do negócio[17], o qual é utilizado de forma direta para desenvolver o conjunto de interfaces de negócio. Ressalta-se que as operações dos componentes de sistema põem em prática seu trabalho pela invocação das operações dos componentes de negócio, por meio da interface de negócio apropriada.

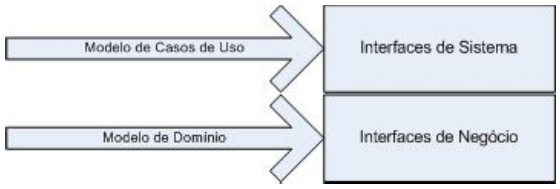

Figura 7.22: Artefatos do fluxo de trabalho dos requisitos como entradas para o fluxo de trabalho da especificação.

Identificação das Interfaces de Sistema e suas Operações

Inicialmente, define-se uma interface de sistema para cada caso de uso de base[18], conforme ilustrado na Figura 7.23. A partir daí, examina-se cada caso de uso e para cada passo do caso de uso deve-se considerar a existência de responsabilidades do sistema que necessitam ser modeladas. Neste caso, as responsabilidades serão mapeadas como uma ou mais operações da interface de sistema apropriada. Com isto, tem-se um conjunto inicial de interfaces e suas operações[19].

Para o caso de uso *Simular operação energética*, define-se uma interface de sistema chamada *ISimularOperacaoEnergetica*. No cenário de sucesso principal desse caso de uso, observa-se que o ator (operador) deve definir o sistema hidroelétrico e o horizonte de planejamento, entre outras condições de operação energética. Portanto, para a interface satisfazer esta responsabilidade, ela deve prover duas operações (*definirSistemaHidroeletrico()* e *definirHorizontePlanejamento()*). Para o caso de uso *Otimizar operação energética*, define-se a interface de sistema denominada *IOtimizarOperacaoEnergetica*. Da mesma maneira que a interface *ISimularOperacaoEnergetica*,

[16]O modelo de domínio representa a visão humana do domínio.
[17]O modelo de tipos do negócio representa a visão do sistema do domínio.
[18]Um caso de uso que inclui outro ou que é estendido ou especializado por outro caso de uso é chamado de caso de uso de base. Por outro lado, o caso de uso que é uma inclusão, extensão ou especialização é chamado de caso de uso de adição.
[19]Ressalta-se que no estágio da interação dos componentes, reavalia-se quais interfaces são responsáveis por determinadas operações.

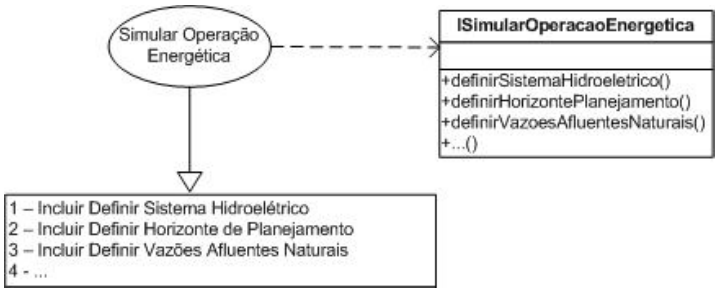

Figura 7.23: Mapeamento dos casos de uso para a identificação das interfaces de sistema e das suas operações.

deve-se especificar as operações para a definição das condições de operação energética por parte do operador.

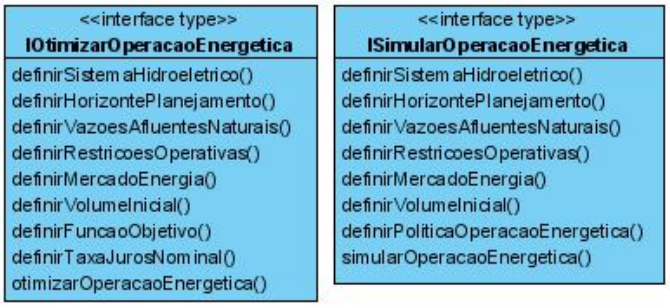

Figura 7.24: Interfaces de sistema e suas operações.

As duas interfaces de sistema definidas até o momento estão ilustradas na Figura 7.24. Observa-se que os parâmetros ainda não foram especificados. Os detalhes dos parâmetros das operações das interfaces de sistema são deixados para o estágio seguinte do fluxo de trabalho da especificação. Vale ressaltar que as interfaces definidas encontram-se no nível de serviços do sistema e são específicas para o sistema em questão e, portanto, não são reutilizadas, geralmente, por diferentes sistemas. Reutilização de interfaces por meio dos sistemas é o propósito das interfaces de negócio, as quais são independentes dos sistemas e serão discutidas a seguir.

Identificação das Interfaces de Negócio

As interfaces de negócio são abstrações da informação que deve ser gerenciada pelo sistema. O processo de identificação dessas interfaces consiste em:

- Produção de um modelo de tipos do negócio, como uma cópia do modelo de domínio: o primeiro passo na identificação das interfaces de negócio é converter o modelo de domínio, produzido no fluxo de trabalho dos requisitos, em um modelo de tipos do negócio. O modelo de tipos do negócio é representado por um diagrama de classes da UML, como o modelo de domínio, mas seus propósitos são bem diferentes. Enquanto o modelo de domínio é simplesmente um mapeamento da informação de interesse no domínio do problema, o modelo de tipos do negócio contém as informações específicas do negócio que devem ser mantidas pelo sistema que está sendo especificado. É importante frisar que os tipos do negócio podem corresponder a artefatos não-físicos do negócio, tal como polinômios, tanto quanto artefatos físicos do negócio, como usinas, turbinas e geradores;

- Refinamento do modelo de tipos do negócio e especificação de quaisquer regras de negócio adicionais na forma de restrições: o modelo de tipos do negócio pode ser refinado pelo preenchimento de detalhes[20] que geralmente são omitidos no nível conceitual (modelo de domínio), como os detalhes dos tipos de dados de cada atributo, e por meio das restrições, como as multiplicidades das associações. Como a multiplicidade das associações já foi inserida ao desenvolver o modelo de domínio, o refinamento do modelo de tipos do negócio enfoca a definição dos tipos de dados dos atributos. O modelo de tipos do negócio parcial para o modelo de domínio parcial do horizonte de planejamento está ilustrado na Figura 7.25;

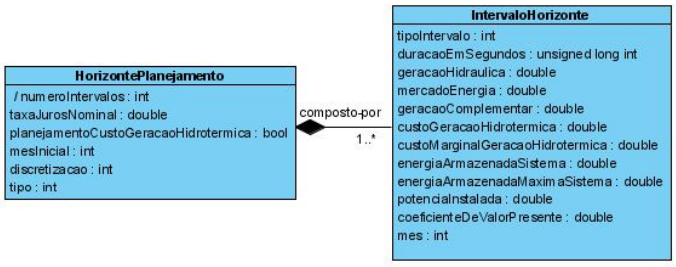

Figura 7.25: Modelo de tipos do negócio parcial.

- Identificação dos tipos centrais do negócio: o propósito da identificação dos tipos centrais do negócio é identificar qual informação é dependente de outra, e qual informação pode permanecer sozinha[21]. Este é um passo importante para a alocação das responsabilidades de

[20]Deve ser frisado que o modelo de tipos do negócio mostra uma visão integrada de como a informação gerenciada pelo sistema como um todo está relacionada.

[21]Chama-se de conceito dependente aquele que precisa estar ligado a outros conceitos para fazer sentido. Os

informação para as interfaces. Um tipo central do negócio é um tipo que tem uma existência independente dentro do domínio do negócio, o qual pode ser caracterizado, geralmente, por um identificador. Assim, todos os outros tipos fornecem detalhes dos tipos centrais, o que resulta em uma associação obrigatória (direta ou indireta) dos tipos dependentes com os tipos centrais. Tipos centrais são indicados no modelo de tipos do negócio pelo estereótipo *core*. A Figura 7.26 ilustra o modelo de tipos do negócio com os tipos centrais do negócio *CatalogoDescTurbinasHidraulicas* e *SistemaHidroeletrico* para o modelo de domínio parcial do sistema hidroelétrico de geração. Já a Figura 7.27 ilustra o refinamento do modelo de tipos do negócio da Figura 7.25 pela identificação do tipo central do negócio *HorizontePlanejamento*;

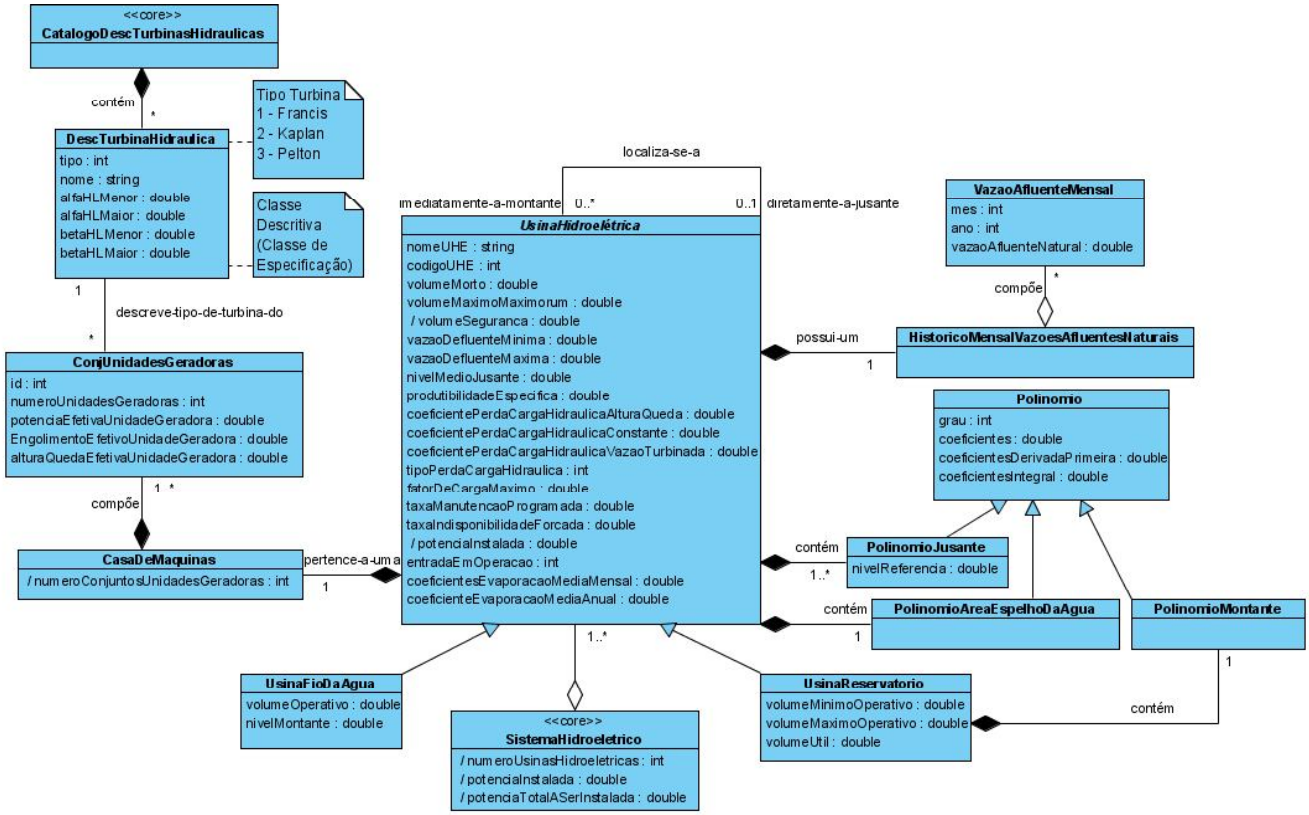

Figura 7.26: Modelo de tipos do negócio parcial com os tipos centrais do negócio *CatalogoDescTurbinaHidraulica* e *SistemaHidroeletrico*.

- Criação das interfaces de negócio para os tipos centrais e adicioná-las ao modelo de tipos do negócio: para as interfaces de sistema, adotou-se a regra de uma interface de sistema

demais conceitos são chamados de independentes [177].

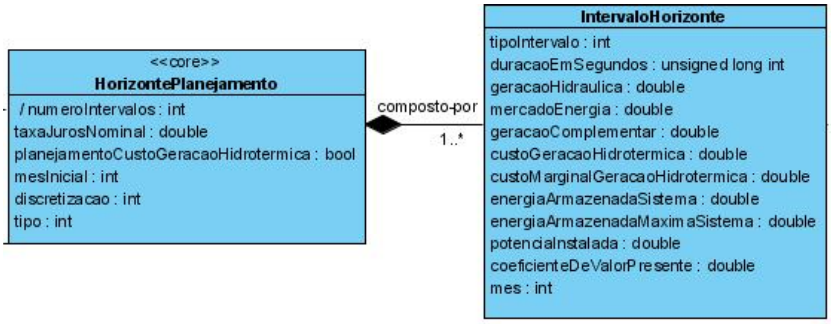

Figura 7.27: Modelo de tipos do negócio parcial com o tipo central do negócio *HorizontePlanejamento*.

para cada caso de uso de base. A regra geral aqui é a criação de uma interface de negócio para cada tipo central no modelo de tipos do negócio. Desta forma, cada interface de negócio gerencia a informação representada pelo tipo central e pelos tipos que o detalham. Com a adição das interfaces de negócio para o modelo de tipos do negócio, o diagrama que descreve essas interfaces passa a ser denominado como diagrama de responsabilidade das interfaces. As Figuras 7.28 e 7.29 exemplificam estes diagramas;

- Refinamento do modelo de tipos do negócio para indicar as responsabilidades das interfaces de negócio: O propósito do diagrama de responsabilidade da interface é ajudar a esclarecer qual informação será gerenciada por qual interface e iniciar o gerenciamento das dependências. Para isto, aloca-se o direito de propriedade do tipo que detalha o tipo central para a sua interface apropriada. Cada tipo detalhador (dependente) deve pertencer a exatamente uma interface. Se um tipo detalhador somente fornece detalhes de um único tipo, ele é alocado à mesma interface do tipo, como é o caso do tipo do núcleo *SistemaHidroeletrico* e o tipo detalhador *CasaDeMaquinas* (Figura 7.28). Se um tipo detalha mais que um tipo, mas todos eles estão alocados na mesma interface, o tipo detalhador também pertence à interface em questão. A grande questão aparece quando um tipo detalhador fornece detalhes de tipos que estão alocados em diferentes interfaces. Por exemplo, o tipo *DescTurbinaHidraulica* fornece detalhes para o catálogo[22] *CatalogoDescTurbinasHidraulicas* e para o conjunto de unidades geradoras[23] *ConjUnidadesGeradoras*. Portanto, deve-se decidir qual interface ficará responsável por gerenciar o tipo *DescTurbinaHidraulica*. No projeto em questão, decidiu-se alocar o tipo *DescTurbinaHidraulica* à interface *ICatalo-*

[22] Ao informar os vários tipos de turbinas hidráulicas.
[23] Ao informar a descrição da turbina hidráulica do conjunto de unidades geradoras da usina hidroelétrica.

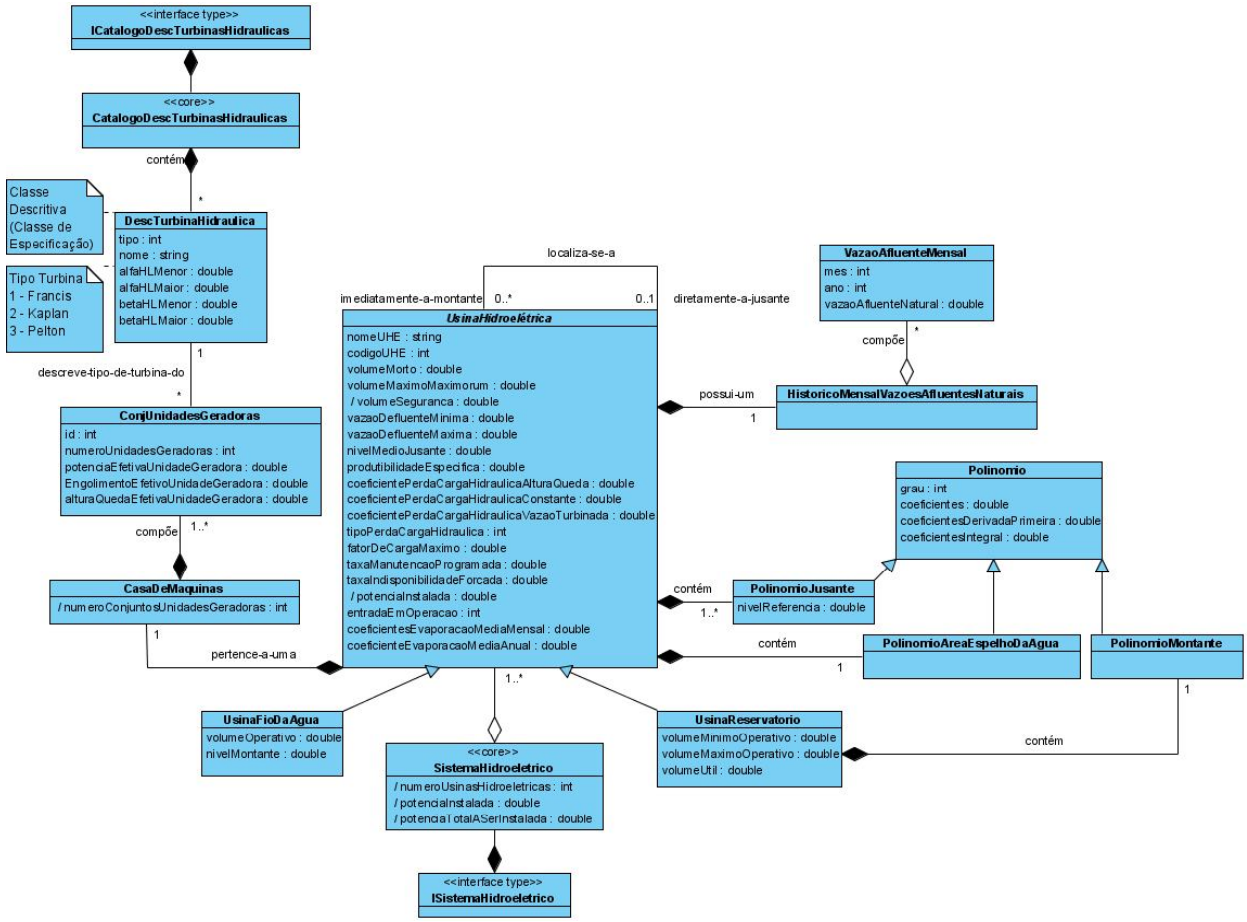

Figura 7.28: Diagrama de responsabilidade da interface para o modelo de tipos do negócio do sistema hidroelétrico de geração.

goDescTurbinasHidraulicas, pois ele é muito mais relacionado ao catálogo das turbinas hidráulicas[24] do que ao conjunto de unidades geradoras. Para indicar esta decisão de especificação, altera-se a navegabilidade da associação entre *ConjUnidadesGeradoras* e *DescTurbinaHidraulica* permitindo-a somente ser voltada em direção a *DescTurbinaHidraulica*, ou seja, a associação passa a ser unidirecional (Figura 7.30).

Uma associação entre tipos gerenciados por diferentes interfaces é chamada associação entre interfaces. A associação entre *ConjUnidadesGeradoras* e *DescTurbinaHidraulica* é um exemplo desta associação. Uma decisão a ser tomada quando este tipo de associação aparece, consiste em decidir onde a informação da associação será armazenada (ou seja,

[24]Na realidade, o catálogo é composto pelas descrições das turbinas, enquanto que no conjunto de unidades geradoras, a descrição é usada somente para indicar o tipo de turbina do conjunto.

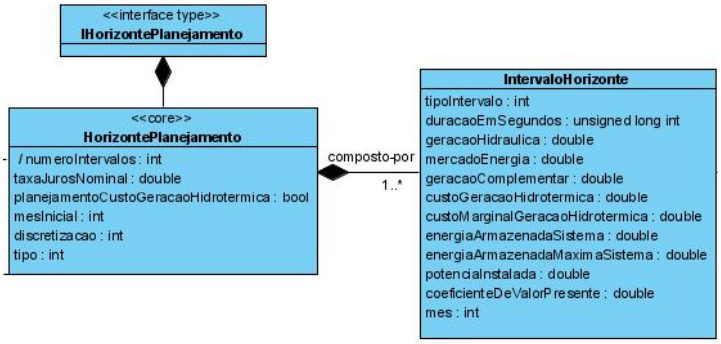

Figura 7.29: Diagrama de responsabilidade da interface para o modelo de tipos do negócio do horizonte de planejamento.

quais interfaces irão armazenar as referências e onde a integridade referencial será mantida)[25]. Associações entre interfaces podem ser vistas como uma forma específica de dependência. Por esta razão, deve-se evitar, sempre que possível, as referências bidirecionais entre interfaces e portanto, deve-se atribuir navegabilidade unidirecional para todas as associações entre interfaces. Esta atribuição permite determinar qual interface é responsável por armazenar a referência. Em nosso exemplo, decidiu-se que *ConjUnidadesGeradoras* referencia *DescTurbinaHidraulica*, e, portanto, *DescTurbinaHidraulica* é independente de *ConjUnidadesGeradoras*. Isto significa que a interface *ISistemaHidroeletrico* será responsável por armazenar a referência para *DescTurbinaHidraulica*. Adicionalmente, esta decisão representa uma entrada importante para a tarefa de especificação da interface, a qual foca na especificação de uma interface simples. Atribuir direção de referência para as associações entre interfaces significa que o projetista está definindo, mais precisamente, qual informação cada interface tem que manter (e gerenciar), além de usá-la para desenvolver o modelo de informação da interface (estágio de especificação dos componentes).

Interfaces e Sistemas Existentes

No estágio da identificação de componentes, identificou-se as interfaces de sistema, as quais são derivadas dos casos de uso, e as interfaces de negócio, as quais foram descobertas com o auxílio do modelo de tipos do negócio. Agora, pretende-se aumentar o conjunto das interfaces, de forma a incluir outras interfaces que compõem o ambiente no qual o sistema será implantado.

[25]Neste estágio, a preocupação está onde a informação será armazenada. A integridade referencial será considerada no estágio da interação dos componentes.

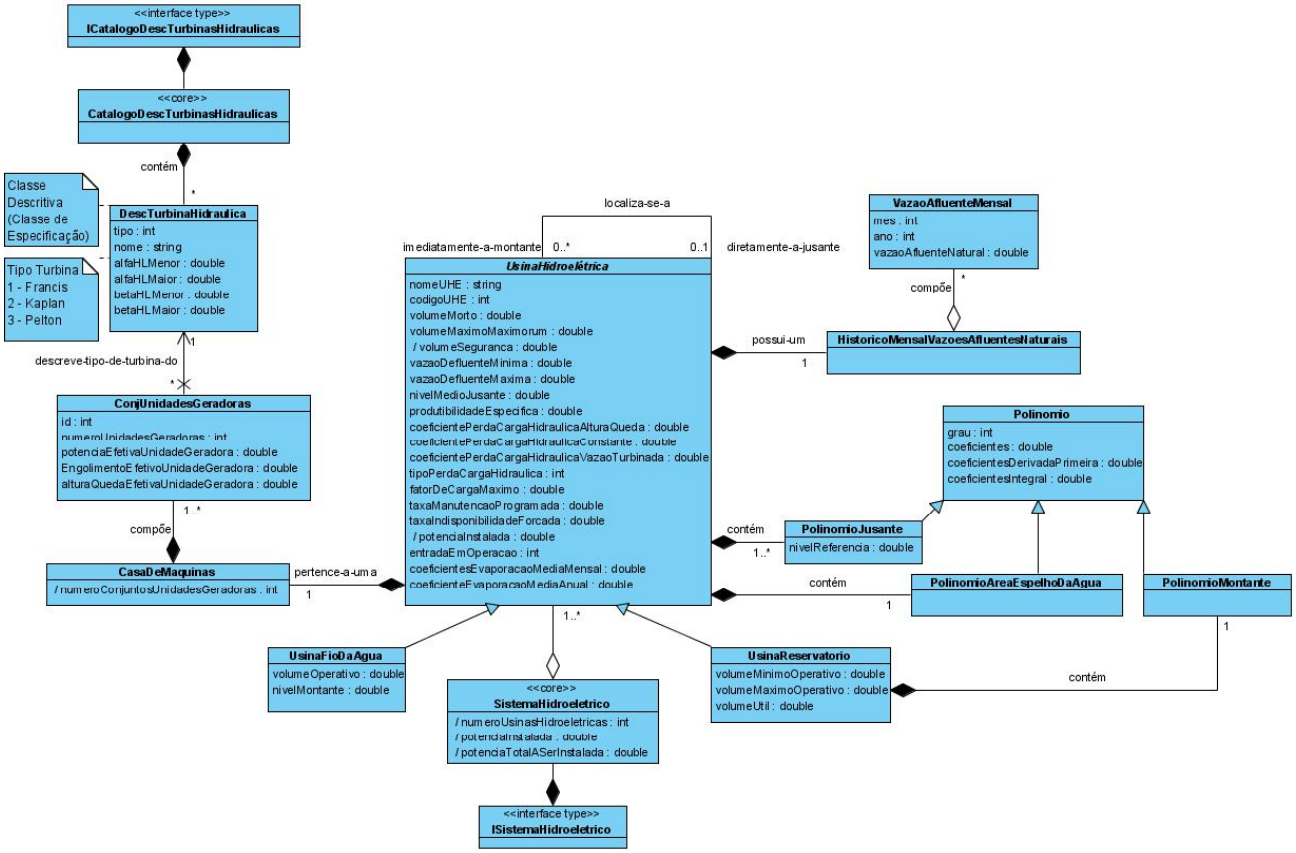

Figura 7.30: Diagrama final de responsabilidade da interface para o modelo de tipos do negócio.

Em particular, deve-se verificar a existência de interfaces que são obrigatórias, bem como a existência de sistemas com os quais é necessária a comunicação, mas que estão do lado de fora do escopo do projeto em desenvolvimento. No estudo de caso, tem-se um sistema *fuzzy* com uma interface projetada *ISistemaFuzzyModeloTS*. Este sistema é utilizado no modelo de simulação da operação energética, na determinação de uma política de operação energética otimizada, utilizando o modelo de inferência *fuzzy* de Takagi-Sugeno. Portanto, adiciona-se esta interface ao conjunto de interfaces de sistema.

Especificações e Arquitetura dos Componentes

Após a identificação das interfaces, o estágio da identificação de componentes volta-se para a criação de um conjunto inicial de especificações de componentes, além de idealizar como as especificações irão adaptar-se juntas. O componente de software é a unidade de implantação e

substituição em um sistema de componentes. Componentes são o que se constrói ou se compra num desenvolvimento baseado em componentes; enfim, eles são as unidades de realização[26]. Portanto, deve-se escolher componentes tal que faça sentido construir ou comprar a unidade de funcionalidade por ele representada. Além do mais, pode-se atualizar um sistema substituindo componentes seletivamente. Portanto, deve-se tomar cuidado ao especificar componentes, de forma que as unidades de implantação e substituição sejam o que se quer e o que se pode gerenciar.

Há um conjunto de entradas potenciais para esta atividade neste estágio do fluxo de trabalho:

- As interfaces identificadas;
- As especificações de componentes existentes;
- Uma arquitetura existente de especificação de componentes para adaptar-se ao sistema em desenvolvimento;
- Uma escolha dos padrões de arquitetura de especificação dos componentes.

Na maioria dos casos, cria-se uma especificação de componente distinta para cada interface identificada. Entretanto, uma especificação de componente pode suportar múltiplas interfaces nas seguintes circunstâncias:

- Os conceitos representados pelas diferentes interfaces têm o mesmo tempo de vida (isto é, eles são criados e destruídos ao mesmo tempo);
- As interações entre as interfaces são complexas, frequentes ou envolvem grandes quantidades de dados;
- As implementações das interfaces são substituídas simultaneamente, como uma unidade;
- Deseja-se manter a granularidade dos componentes em um tamanho razoável para gerenciamento de projeto e propósitos de organização.

No sistema em questão, as interfaces de sistema derivadas dos casos de uso são altamente coincidentes e gerenciam conceitos que têm o mesmo tempo de vida. Poderia-se escolher suportá-las em uma especificação de componente simples. Entretanto, empacotar o sistema *fuzzy* dentro do

[26]Ou unidades de reconhecimento.

sistema em desenvolvimento não faz sentido quando considera-se as implicações para implantação e substituição dos componentes. Portanto, coloca-se *ISimularOperacaoEnergetica* e *IOtimizarOperacaoEnergetica* em uma especificação de componente, e mantém-se *ISistemaFuzzyModeloTS* separada em outra especificação de componente. O sistema Planejamento da Operação Energética faz uso das interfaces *ISistemaFuzzyModeloTS*, *IOtimizacaoOperacaoEnergetica* e *ISimulacaoOperacaoEnergetica*, portanto, adiciona-se a dependência entre eles. Deste modo, identifica-se dois componentes de sistema distintos, como ilustrado na Figura 7.31. Ressalta-se que as interfaces *IOtimizacaoOperacaoEnergetica* e *ISimulacaoOperacaoEnergetica* foram adicionadas, pois o componente de sistema Planejamento da Operação Energética não é capaz de satisfazer a responsabilidade de otimizar ou de simular a operação energética, pois ele é um componente de sistema, ou seja, atua apenas como uma fachada para a camada de serviços do negócio.

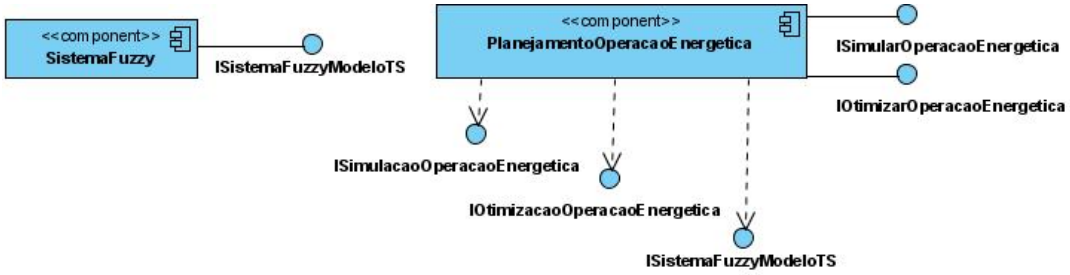

Figura 7.31: Especificações de componentes de sistema.

Para as interfaces de negócio, o ponto de partida consiste em uma especificação de componente por interface. Baseado nisso, a Figura 7.32 ilustra a especificação do componente de negócios do catálogo das descrições das turbinas hidráulicas relativo à interface *ICatalogoDescTurbinasHidraulicas*, já a Figura 7.33 ilustra a especificação do componente de negócios sistema hidroelétrico[27].

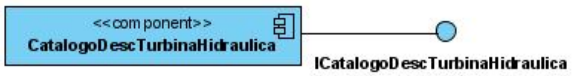

Figura 7.32: Especificação do componente de negócio do catálogo das descrição das turbinas hidráulicas.

Com as especificações de componentes produzidas, incluindo as interfaces requeridas e as

[27]As figuras ilustram apenas um conjunto das especificações dos componentes de negócio.

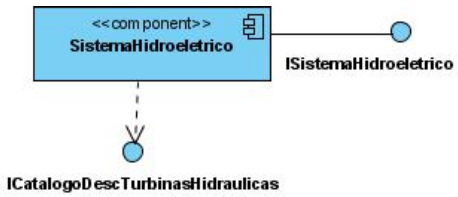

Figura 7.33: Especificação do componente de negócio do sistema hidroelétrico.

interfaces suportadas, pode-se ligar as dependências das interfaces das especificações dos componentes diretamente, dando início a uma arquitetura de especificação dos componentes, mostrada na Figura 7.34. Uma arquitetura de componentes[28] é um conjunto de componentes de software envolvendo seus relacionamentos estruturais e suas dependências comportamentais, ou seja, ela enfoca a estrutura e as dependências entre os componentes. Esta é uma definição lógica e é independente do nível de tecnologia no qual a arquitetura será implantada. A arquitetura de componentes pode ser empregada em uma aplicação simples ou em um contexto mais amplo, tal como um conjunto de aplicações servindo a uma área particular de negócios, como o planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração. Ao criar esta visão lógica dos componentes de software, pode-se verificar o quão fortemente ou fracamente acoplado o sistema está, além de permitir realizar análises sobre os efeitos de modificar ou substituir um componente de software.

[28] É possível criar arquiteturas de componentes que focam na especificação dos componentes, na implementação dos componentes ou nos objetos componentes. Neste trabalho, enfoca-se a arquitetura de especificação dos componentes.

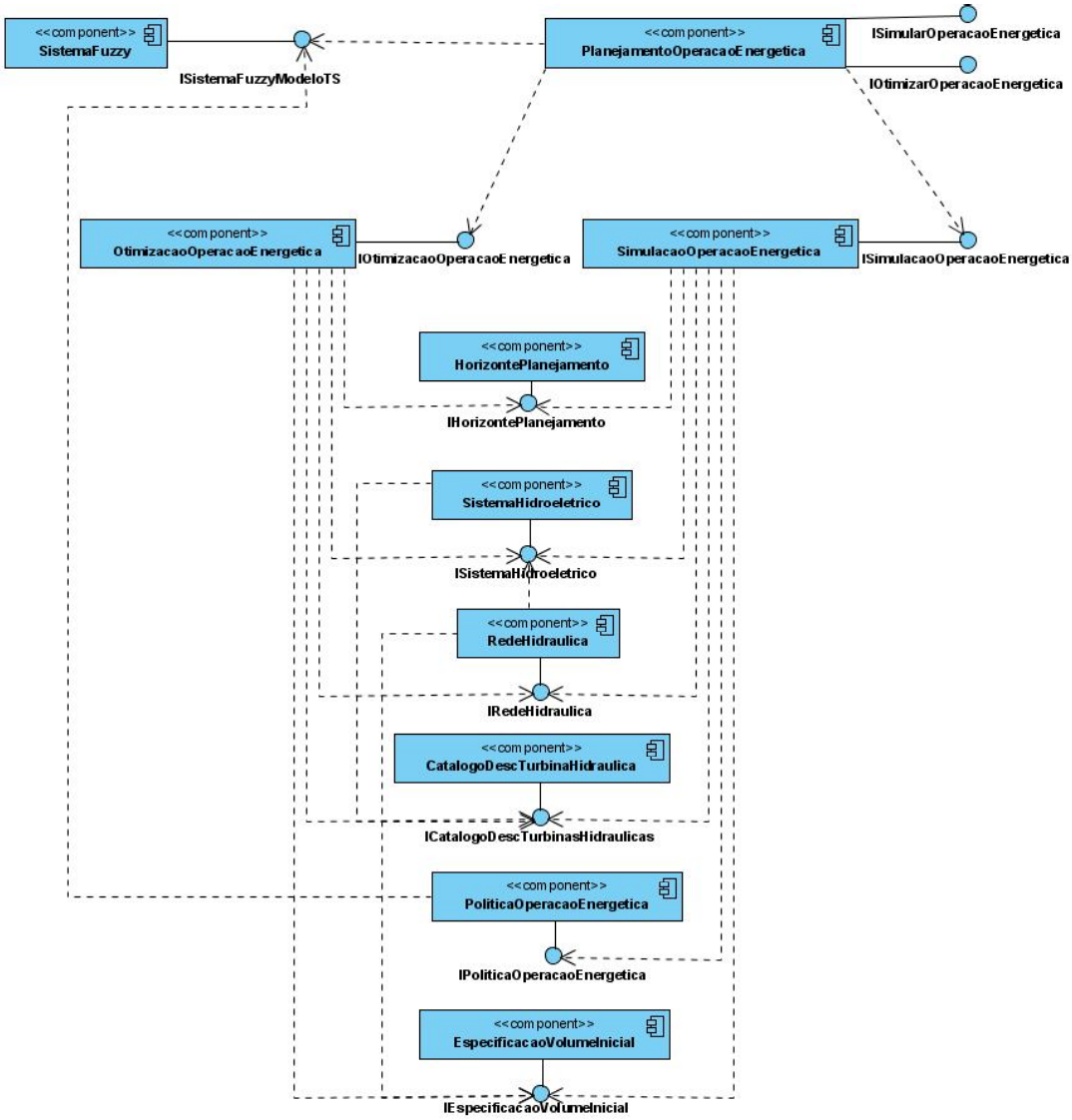

Figura 7.34: Arquitetura inicial de especificação dos componentes.

Resumo da Identificação dos Componentes

No estágio da identificação dos componentes foram produzidas as especificações das interfaces de sistema e de negócios, as especificações dos componentes e uma arquitetura de componentes inicial. Adicionalmente, foi criado o modelo de tipos do negócio, o qual contém um rico conjunto de informações e regras do negócio. Ressalta-se que este é o material cru (não refinado) do qual as especificações das interfaces são construídas. Desta forma, pode-se resumir os princípios do estágio da identificação dos componentes em:

- As interfaces de sistema correspondem aos casos de uso, as operações das interfaces de sistema são derivadas dos passos dos casos de uso;
- Um modelo de tipos do negócio é desenvolvido representando a visão do sistema em relação ao domínio do negócio, utilizando o modelo de domínio como base. As regras do negócio são capturadas no modelo de tipos do negócio como restrições. O modelo de tipos do negócio é um artefato interno do fluxo de trabalho da especificação;
- As interfaces de negócio são descobertas ao identificar-se os tipos centrais no modelo de tipos do negócio e ao criar interfaces para gerenciar os tipos centrais e os tipos que os detalham;
- As especificações de componentes iniciais são definidas e colocadas em uma arquitetura de componentes inicial. Interfaces, sistemas e arquiteturas existentes devem ser levadas em conta também.

7.3.2 Interação dos Componentes

A identificação dos componentes fornece um conjunto inicial de interfaces e especificações de componentes. O próximo passo consiste em decidir como os componentes especificados irão interagir para satisfazer as funcionalidades requeridas. A interação dos componentes é o estágio do fluxo de trabalho da especificação responsável por esta atividade.

A UML inclui diagramas de interação para ilustrar como os objetos/componentes interagem por meio de mensagens. Há dois tipos comuns de diagramas de interação: diagramas de sequência e de comunicação. Para modelar as interações, foram utilizados os diagramas de sequência da UML[29]. O diagrama de sequência foi escolhido por mostrar com clareza a sequência ou

[29]Em [30] emprega-se o diagrama de comunicação para modelar as interações.

ordem temporal das mensagens, bem como por fornecer um amplo conjunto de opções detalhadas [77]. Já a principal vantagem do diagrama de comunicação refere-se a economia de espaço, pois este diagrama é mais flexível na adição de novos objetos em duas dimensões, mas tem como desvantagem a dificuldade em ver a sequência das mensagens e por possuir menos opções de notação [77].

A modelagem de interações é uma técnica de modelagem comportamental[30] genérica. Ela é usada neste estágio para definir as várias interações que precisam acontecer dentro do sistema, para refinar as definições das interfaces existentes, para identificar como as interfaces serão usadas, e para descobrir novas interfaces e operações. Como a modelagem de interações engloba a avaliação de múltiplas interações, ela também envolve o reconhecimento de padrões comuns de uso, a identificação de operações gerais para substituir operações específicas, e o entendimento das dependências entre interfaces. Tudo isto, por sua vez, obriga uma nova avaliação e um refinamento na arquitetura inicial de especificação dos componentes.

Descoberta das Operações de Negócio

A Figura 7.34 mostra a arquitetura de componentes que foi criada no estágio de identificação dos componentes, enquanto a Figura 7.24 apresenta as operações requeridas nas duas interfaces de sistema. Ressalta-se que até este ponto do fluxo de trabalho da especificação, não determinou-se as assinaturas das operações das interfaces de sistema, nem como elas serão implementadas usando os componentes de negócio. Além do mais, não foram identificadas as operações necessárias nas interfaces de negócio. É importante manter em mente que este fluxo de trabalho tenta produzir um projeto de especificação e não um projeto de implementação, e portanto, deve-se tomar muito cuidado para evitar uma super-especificação. Por exemplo, a arquitetura de componentes já alerta aos implementadores do componente de sistema *PlanejamentoOperacaoEnergetica* que eles devem usar as interfaces *ISistemaFuzzyModeloTS*, *IOtimizacaoOperacaoEnergetica* e *ISimulacaoOperacaoEnergetica*. Desta forma, não é necessário, na fase da especificação, colocar quaisquer restrições adicionais na forma precisa pela qual as implementações deste componente de sistema devem usar essas interfaces.

Para descobrir as operações nas interfaces de negócio, é necessário considerar cada operação

[30]Os diagramas da UML dividem-se em diagramas estruturais e diagramas comportamentais. Os diagramas estruturais abrangem os diagramas de classes, de estrutura composta, de objetos, de componentes, de implantação e de pacotes, enquanto os diagramas comportamentais englobam os diagramas de casos de uso, atividade, máquina de estados, sequência, comunicação, de interação geral e de tempo.

da interface de sistema por vez e desenhar um ou mais diagramas de sequência que irão esboçar a sequência de mensagens, além de quaisquer restrições nos fluxos de execução resultantes da invocação da operação da interface de sistema. Cada diagrama de sequência deverá ilustrar uma ou mais interações, onde cada interação ilustra um fluxo de execução possível.

A seguir, apresenta-se algumas interações, por meio de vários diagramas de sequência, para algumas das operações das interfaces de sistema identificadas até o momento no processo de desenvolvimento.

Sabe-se do caso de uso que a finalidade da operação de sistema *simularOperacaoEnergetica()* é realizar a simulação da operação energética propriamente dita, mediante a definição das condições de operação energética necessárias à simulação. Assim, deve-se fornecer à operação em questão, o horizonte de planejamento, o sistema hidroelétrico, a política de operação energética, a especificação dos volumes iniciais, o mercado de energia elétrica, as restrições operativas e as vazões afluentes naturais. Entretanto, as informações sobre o mercado de energia elétrica já fazem parte do horizonte de planejamento; e as informações sobre as restrições operativas e as vazões afluentes naturais fazem parte da rede hidráulica. Desta forma, os parâmetros da operação *simularOperacaoEnergetica()* são: um objeto/componente para o horizonte de planejamento, um objeto/componente para o sistema hidroelétrico, um objeto/componente para os volumes iniciais, um objeto/componente para a política de operação energética e um objeto/componente para a rede hidráulica. Portanto, pode-se refinar a definição da interface *ISimularOperacaoEnergetica*, adicionando-se os detalhes da assinatura desta operação (Figura 7.35).

Figura 7.35: Interface de sistema com a assinatura da operação *simularOperacaoEnergetica*.

Em tempo de execução, a operação *simularOperacaoEnergetica()* é invocada pela camada de diálogo com o usuário no componente de sistema *PlanejamentoOperacaoEnergetica*. Este componente não é capaz de satisfazer esta operação porque componentes de sistema não armazenam, nem processam dados do negócio, portanto, o componente *PlanejamentoOperacaoEnergetica* deve

utilizar o componente que oferece a interface *ISimulacaoOperacaoEnergetica*. O componente de sistema pode utilizar a interface *ISimulacaoOperacaoEnergetica*, pois na definição da arquitetura inicial de especificação dos componentes, já foi prevista a dependência de uso da interface pelo componente, confirmada pela interação. A interação requerida está ilustrada na Figura 7.36. A primeira mensagem foi considerada mensagem *found*, pois o remetente (invocador, cliente) não será especificado. Assim, qualquer cliente habilitado a utilizar os serviços da interface, poderá fazer uso desta operação. Os próximos diagramas de sequência não ilustrarão a mensagem *found*, por brevidade de espaço. Além do refinamento da interface de sistema, com a adição da assinatura das operações, a interação foi útil no sentido de descobrir a primeira operação na interface de negócio. Portanto, deve-se atualizar a definição da interface *ISimulacaoOperacaoEnergetica* (Figura 7.37).

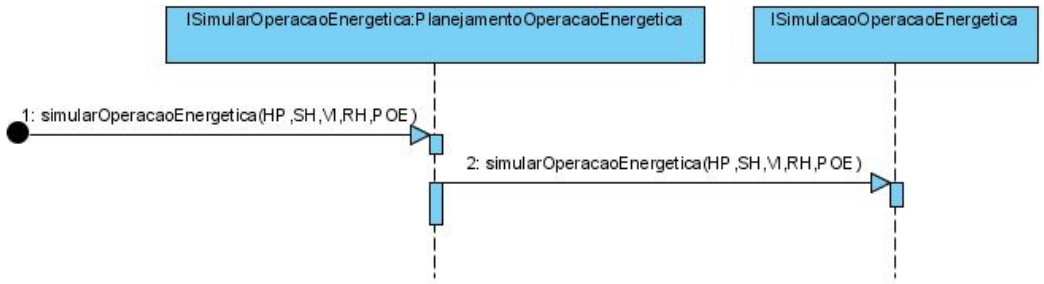

Figura 7.36: Interação da operação de sistema *simularOperacaoEnergetica*.

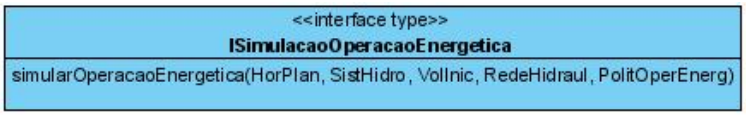

Figura 7.37: Interface de negócio com a definição da primeira operação.

Como mostrado na Figura 7.36, a interface *ISimulacaoOperacaoEnergetica* deverá ter uma operação *simularOperacaoEnergetica()*, com a mesma assinatura da operação da interface de sistema. Desta forma, o componente de sistema *PlanejamentoOperacaoEnergetica* simplesmente transmite a chamada a um componente[31] que implementa a interface *ISimulacaoOperacaoEn-*

[31] Observa-se que o nome do componente oferecendo a interface *ISimulacaoOperacaoEnergetica*, por exemplo, não foi exibido no diagrama de sequência, pois não é necessário. Entretanto, se este componente enviasse uma mensagem, esta seria uma restrição de implementação e, portanto, seria necessário especificar qual componente que implementa esta interface realiza a chamada da mensagem. Isto porque, caso não determine-se o componente que invoca a chamada, ter-se-ia uma restrição que todos os componentes implementando a interface teriam que fazer tal invocação.

ergetica, ou seja, um componente que é capaz de satisfazer a responsabilidade de realizar a simulação da operação energética. Ressalta-se que os argumentos da operação (parâmetros) também são ilustrados na interação, para verificar como a informação é passada no fluxo de execução, e para escrever quaisquer condições ou restrições baseadas no valor desses argumentos.

Entretanto, o componente de negócio *SimulacaoOperacaoEnergetica* não é capaz de satisfazer a responsabilidade de simular a operação energética sozinho. Esta afirmação pode ser verificada, de forma parcial, ao analisar-se a arquitetura de componentes e verificar as dependências do componente em relação a várias interfaces. Portanto, novas mensagens devem ser invocadas entre os componentes de negócio, a fim de satisfazer, totalmente, a responsabilidade de simular a operação energética. Um fragmento da interação resultante está ilustrado na Figura 7.38[32].

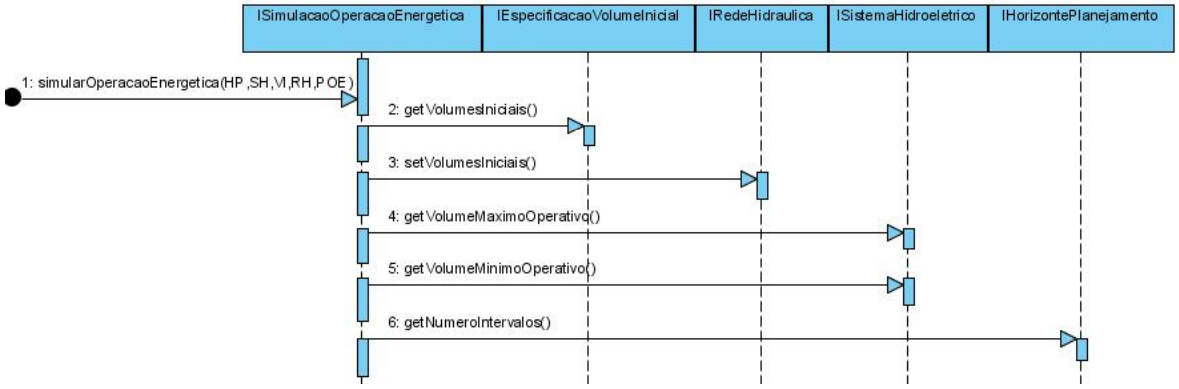

Figura 7.38: Interação parcial da operação de negócio *simularOperacaoEnergetica.*

Pela Figura 7.38, pode-se perceber a necessidade de várias operações entre as interfaces de negócio. A primeira operação *getVolumesIniciais()* é necessária, pois a simulação precisa conhecer os volumes iniciais de cada reservatório do sistema hidroelétrico. Esta mesma informação precisa ser passada para o componente que implementa a interface *IRedeHidraulica*, a fim de possibilitar o cálculo do volume médio para o primeiro intervalo, por exemplo. Portanto, a interface de negócio *IRedeHidraulica* deve fornecer uma operação (*setVolumesIniciais()*) para receber os dados dos volumes iniciais. A seguir, o componente de negócio *SimulacaoOperacaoEnergetica* precisa conhecer os volumes, máximo e mínimo, operativos de cada usina, a fim de determinar a energia armazenada máxima no sistema. Para isto, a interface *ISistemaHidroeletrico* deve fornecer as operações *getVolumeMaximoOperativo()* e *getVolumeMinimoOperativo()*. A seguir,

[32]Por motivo de espaço, nos diagramas de sequência a seguir, os nomes dos componentes implementando as interfaces serão omitidos. Mas com a arquitetura dos componentes, é possível determinar esses componentes e suas interfaces. Adicionalmente, pelos mesmo motivo supracitado, omitir-se-á os argumentos das operações.

deve-se obter o número de intervalos do horizonte de planejamento, pela operação *getNumeroIntervalos()* na interface *IHorizontePlanejamento*. Com essas operações de inicialização, pode-se partir para a simulação da operação energética propriamente dita.

Seguindo o algoritmo de simulação da operação energética (Figura 5.7), percebe-se que o próximo passo consiste na determinação das vazões afluentes incrementais (laterais) a cada usina no intervalo atual do horizonte de planejamento. Entretanto, nenhum dos componentes com suas interfaces é capaz de satisfazer esta responsabilidade, pois ela envolve um conjunto de informações espalhadas pelos componentes de negócio, como, por exemplo, as vazões afluentes naturais (no componente *RedeHidraulica*), e a cascata do sistema hidroelétrico (no componente *SistemaHidroeletrico*). Portanto, torna-se necessário a existência de um novo componente (*OperacaoEnergetica*) com uma interface *IOperacaoEnergeticaRepIndiv*, para satisfazer a responsabilidade de efetuar cálculos relacionados à operação energética[33], no caso, o cálculo das vazões afluentes incrementais. Esta interface é responsável por fornecer operações relacionadas à operação energética, considerando a representação individualizada das usinas hidroelétricas. Caso o projetista deseje expandir a funcionalidade deste componente com as operações considerando a representação equivalente (composta) das usinas, bastaria a especificação de uma nova interface para tal. Por isto, a nova arquitetura de componentes especifica a dependência do componente *SimulacaoOperacaoEnergetica* em relação à interface *IOperacaoEnergeticaRepIndiv* (Figura 7.39).

[33]Outros cálculos como o cálculo da geração hidráulica serão ilustrados mais adiante.

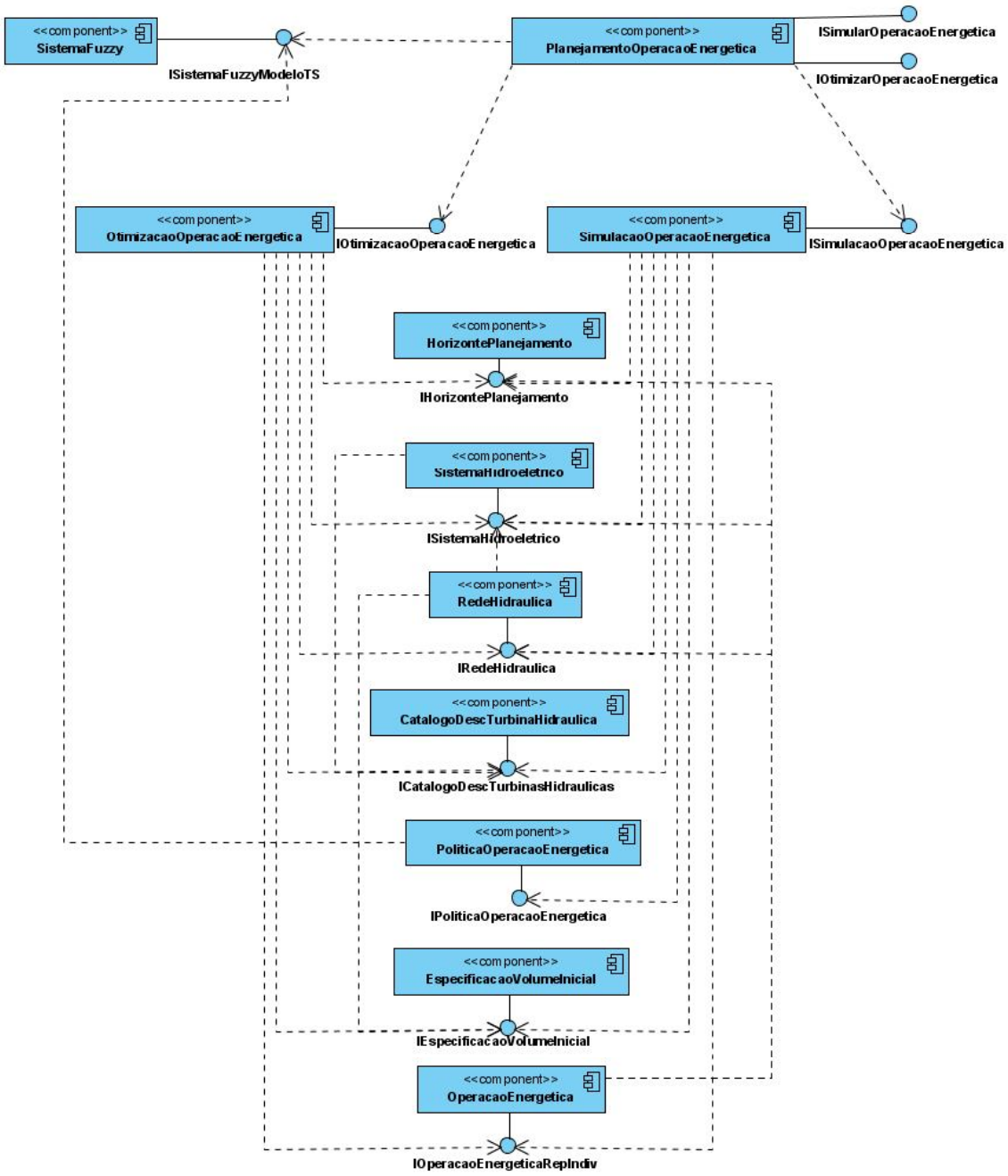

Figura 7.39: Arquitetura intermediária de especificação dos componentes.

Após a determinação das vazões afluentes incrementais, precisa-se determinar o volume inicial dos reservatórios no intervalo atual. Depois disso, o algoritmo de simulação precisa determinar a energia armazenada no sistema e a máxima energia armazenada no sistema. Para isto, a interface *ISistemaHidroeletrico* deve fornecer uma operação *obterEnergiaArmazenadaSistema()*, que irá servir para o cálculo da energia armazenada e da máximia energia armazenada, diferindo apenas nos parâmetros da chamada. Esses valores serão utilizados para determinar o fator de acoplamento da operação energética. Com a determinação do fator de acoplamento da operação energética, o algoritmo de simulação precisa conhecer os limites operativos impostos pelo usuário (operador) a fim de determinar as metas de volume operativo para cada usina, de forma que essas metas não violem esses limites. Portanto, a interface *IRedeHidraulica*, responsável por essa informação, deve fornecer as operações *getLimiteMinimoVolume()* e *getLimiteMaximoVolume()*. Com o fator de acoplamento e os limites operativos de volume determinados, o algoritmo de simulação, por meio da política de operação energética selecionada pelo usuário (operador), determina os volumes operativos de cada usina. A Figura 7.40 ilustra a interação até o momento, considerando a utilização da política de operação energética otimizada.

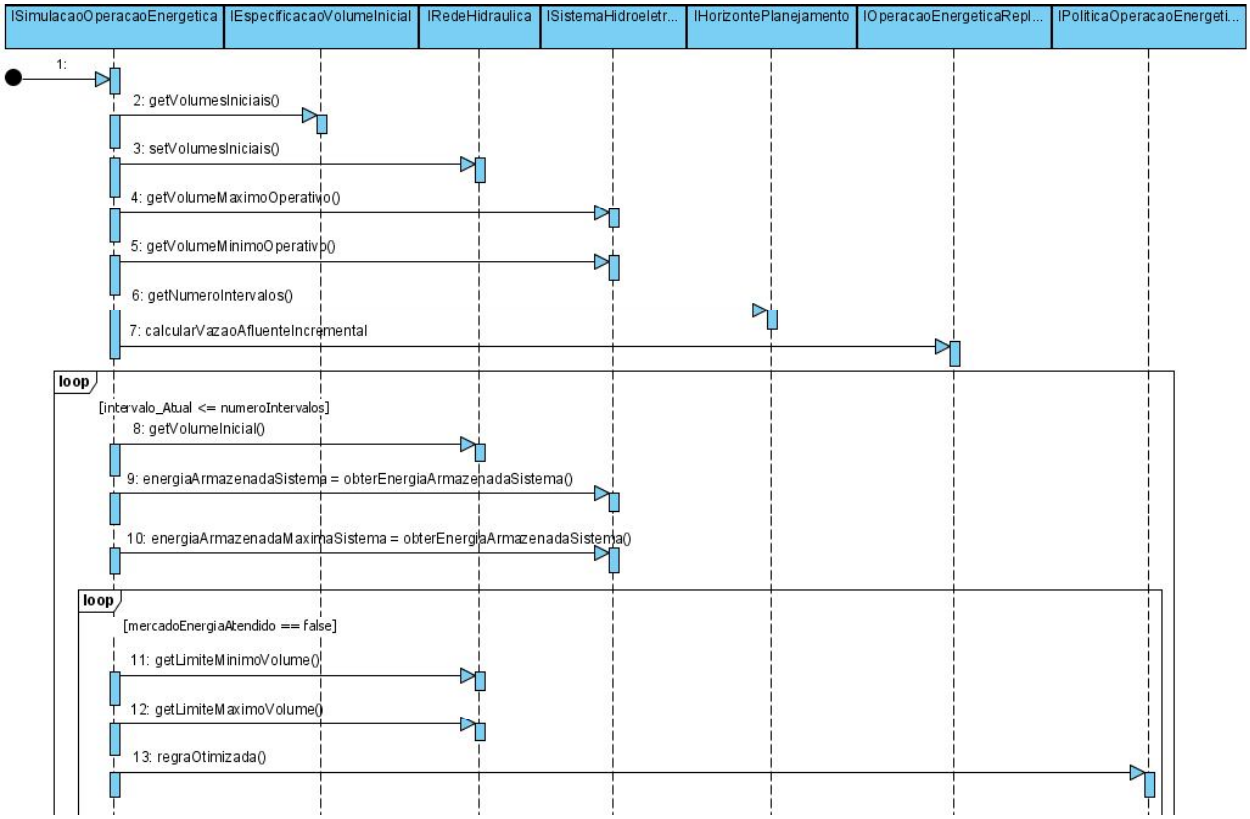

Figura 7.40: Interação parcial da operação de negócio *simularOperacaoEnergetica* com a descoberta de algumas operações de negócio adicionais.

Com a determinação do volume operativo de cada usina, do intervalo atual do horizonte de planejamento, deve-se fornecer esses valores para o componente de negócio *RedeHidraulica*, porque ele é o responsável por armazenar os valores hidroenergéticos da operação energética. Para isto, este componente deve fornecer a operação *setVolumeFinal()* na sua interface *IRedeHidraulica*. Após a determinação do volume final, deve-se realizar o cálculo do volume operativo médio de cada usina, pois o cálculo do nível de montante do reservatório[34] de uma usina hidroelétrica será um valor mais realístico, se este nível for calculado utilizando-se o volume médio. Para realizar esta operação energética, a interface *IOperacaoEnergeticaRepIndiv* oferece a operação *calcularVolumeMedio()*. Após o cálculo do volume médio, realiza-se o cálculo do volume evaporado pelas usinas do sistema hidroelétrico, para o intervalo atual. Para isto, a interface *IOperacaoEnergeticaRepIndiv* deve fornecer a operação *calcularVolumeEvaporado()*, de modo a satisfazer esta responsabilidade para o cálculo do volume evaporado. Conhecendo-se os volumes evaporado, inicial e final do intervalo atual, e as vazões afluentes incrementais a cada reservatório, deve-se calcular os valores de vazão defluente de cada usina, pela equação de balanço hídrico. Concomitantemente, deve-se realizar a resolução de conflitos, a qual destina-se a ajustar a decisão da política de operação energética às restrições operativas do sistema hidroelétrico. Para satisfazer essas responsabilidades, o componente de negócio *SimulacaoOperacaoEnergetica* implementa essas funcionalidades na sua interface *ISimulacaoOperacaoEnergetica*, pois o ajuste da política de operação energética, por exemplo, é função da simulação[35], visto que a otimização da operação energética e seu respectivo componente *OtimizacaoOperacaoEnergetica* também satisfazem essa responsabilidade por meio de operações apropriadas na interface *IOtimizacaoOperacaoEnergetica*. Assim, a interface *ISimulacaoOperacaoEnergetica* deve prover a operação *calcularVazaoDefluenteBalancoHidrico()* para a determinação da vazão defluente. Como o componente *SimulacaoOperacaoEnergetica* envia uma mensagem para sua própria interface, utilizou-se uma mensagem *self*[36] (mensagem 17 da Figura 7.41). Como a determinação da vazão defluente está fortemente relacionada com o ajuste da decisão da política de operação energética, decidiu-se inserir esta funcionalidade naquela. Desta forma, a operação *calcularVazaoDefluenteBalancoHidrico()* satisfaz ambas as responsabilidades: de determinar a vazão defluente e de realizar o ajuste da decisão feita pela política. A Figura 7.41 ilustra essas interações

[34] Além de alguns cálculos posteriores no algoritmo de simulação que também fazem uso do nível de montante, como geração hidráulica, volume evaporado, etc.

[35] Na otimização, o cálculo do passo máximo impede que os valores de volume e vazão defluente ultrapassem seus limites. E o valor da vazão defluente (e do volume operativo) é determinado pelo passo ótimo e da direção de caminhada, comprovando a especificidade dessas responsabilidades para o componente de otimização.

[36] Conhecida também como auto-chamada ou auto-delegação [65].

adicionais até o momento.

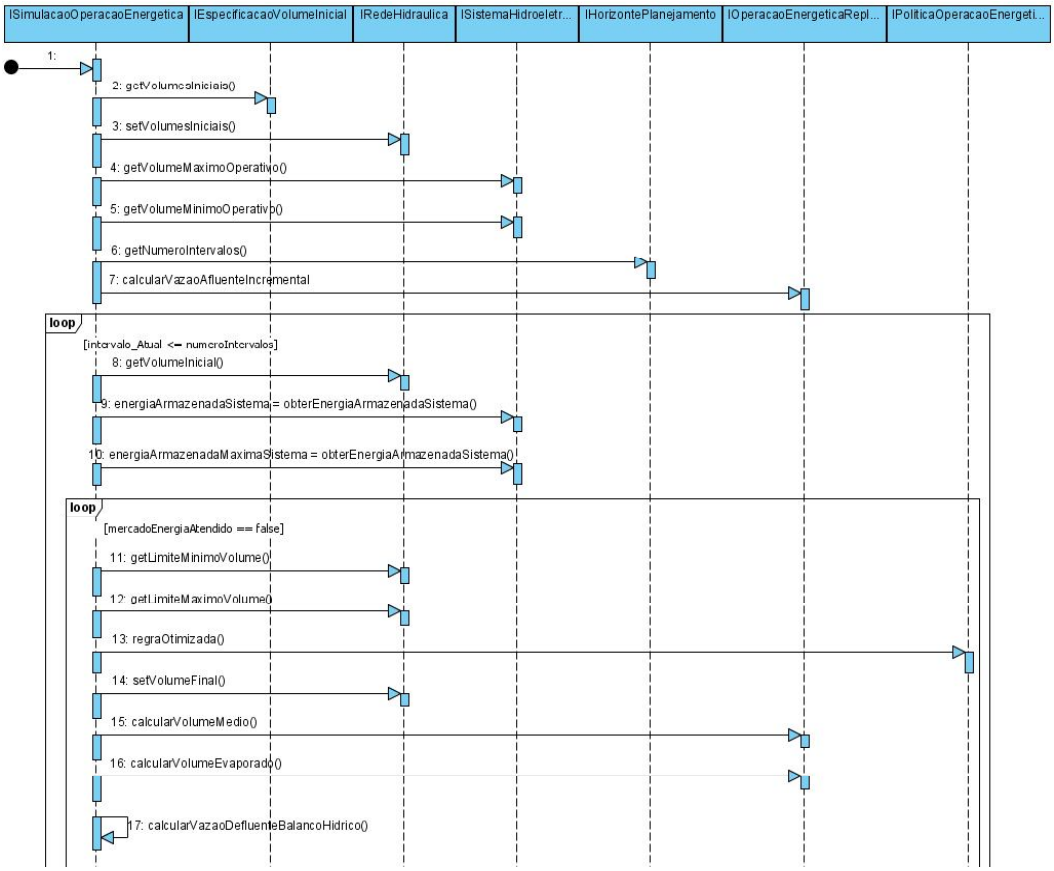

Figura 7.41: Interação parcial da operação de negócio *simularOperacaoEnergetica* com a descoberta de mais algumas operações de negócio.

Com a determinação dos valores de volume (inicial, final, médio e evaporado) e das vazões defluentes, parte-se para o cálculo da vazão afluente, efetivamente ocorrida em cada reservatório, durante a operação energética. Para isto, a interface *IOperacaoEnergeticaRepIndiv* deve fornecer a operação *calcularVazaoAfluente()*. O próximo passo da simulação envolve o cálculo dos valores da geração hidráulica máxima contínua de cada usina. Para tal, deve-se realizar o cálculo do engolimento máximo de cada usina. Por isto, a interface *IOperacaoEnergeticaRepIndiv* fornece as operações *calcularEngolimentoMaximo()* e *calcularGeracaoHidraulicaMaximaContinua()*. Para concluir a simulação do intervalo atual, deve-se calcular a geração hidráulica de cada usina hidroelétrica (*calcularGeracaoHidraulicaUsinasHidroeletricas()*) e do sistema hidroelétrico como um todo (*calcularGeracaoHidraulicaSistemaHidroeletrico()*). Entretanto, deve-se calcular primeiramente, os limites da vazão turbinada, considerando não somente o engolimento máximo, mas as restrições físicas e elétricas estabelecidas pelo usuário (operador). Portanto, a interface *IOperacaoEnergeticaRepIndiv* deve oferecer a operação *calcularLimiteMinimo_MaximoVazaoTurbinada()*. A Figura 7.42 ilustra as interações encontradas até o momento, além das interações restantes para a realização da simulação da operação energética, considerando a política de operação energética otimizada. Ressalta-se que, durante o desenvolvimento dos modelos computacionais de simulação e de otimização da operação energética, outras interações complementares, como o cálculo dos volumes operativos, utilizando a política paralela, também foram consideradas, além das interações necessárias para a otimização da operação energética.

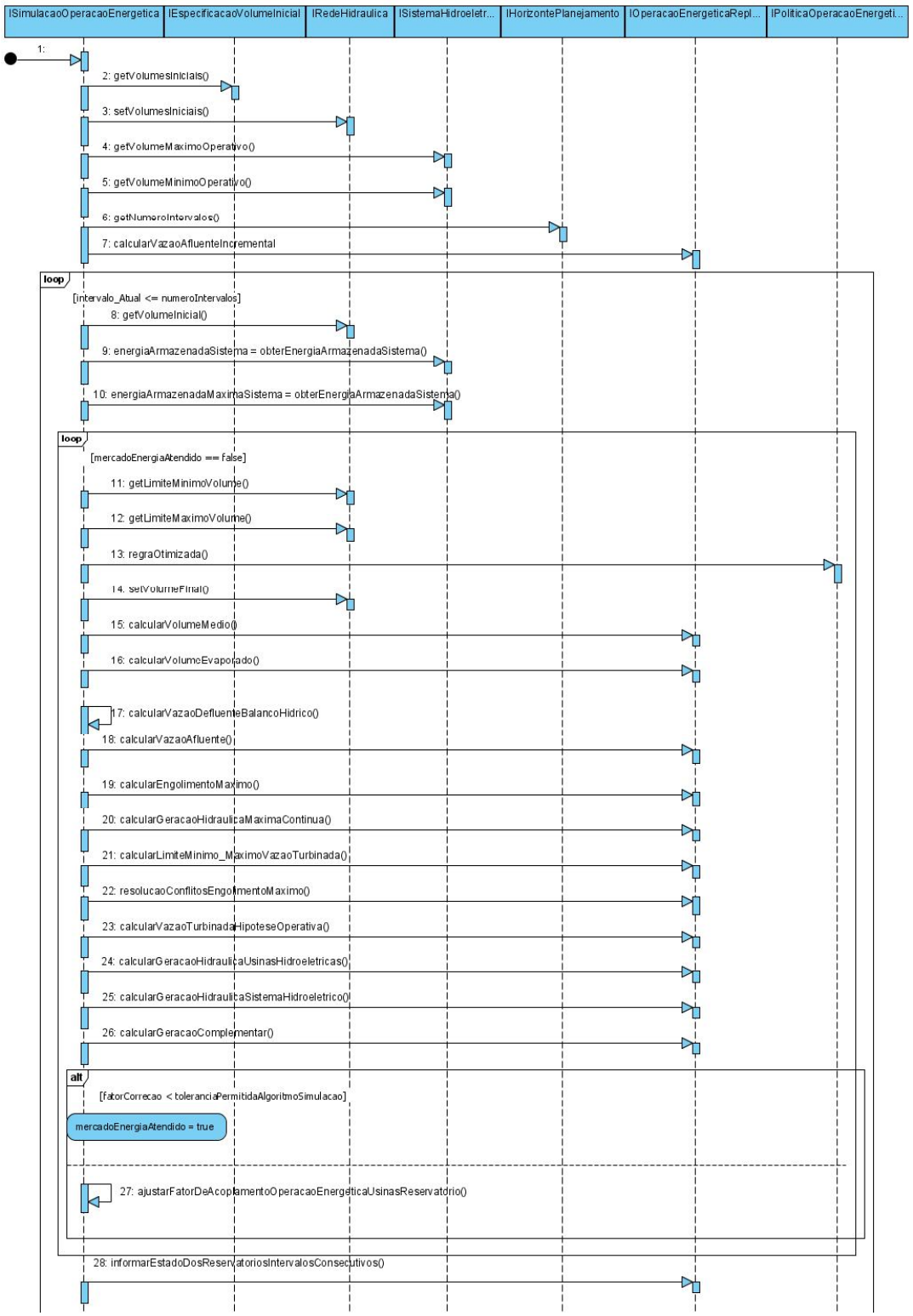

Figura 7.42: Interação completa da operação de negócio *simularOperacaoEnergetica* considerando a política de operação energética otimizada.

Com a especificação completa das interações entre as interfaces para a realização da simulação da operação energética, apresenta-se, a seguir, um detalhamento da operação *CalcularVolumeEvaporado()* da interface *IOperacaoEnergeticaRepIndiv* (Figura 7.43). Este detalhamento também é importante para ajudar no descobrimento de algumas operações adicionais nas interfaces de negócio. Para o componente de negócio *OperacaoEnergetica* efetuar o cálculo do volume evaporado, é necessário que ele tenha os valores dos volumes médios dos reservatórios de cada usina. Para isto, a interface *IRedeHidraulica* deve fornecer a operação *getVolumeMedio()*, pois o componente *RedeHidraulica* é o responsável pelo armazenamento das informações de volume. A seguir, deve-se determinar o tipo de discretização adotada (consultar Figura 7.18) para o horizonte de planejamento. Portanto, a interface de negócio *IHorizontePlanejamento* deve prover a operação *getDiscretizacao()*. Dependendo da discretização adotada, a interface *ISistemaHidroeletrico* deve fornecer as operações *obterVolumeEvaporadoDiscretizacaoMensal()* e *obterVolumeEvaporadoDiscretizacaoLivre()* para realizar o cálculo do volume evaporado nas usinas do sistema hidroelétrico. Com a realização do cálculo do volume evaporado, deve-se passar esta informação para o componente *RedeHidraulica*, mediante a operação *setVolumeEvaporado()* na sua interface *IRedeHidraulica*.

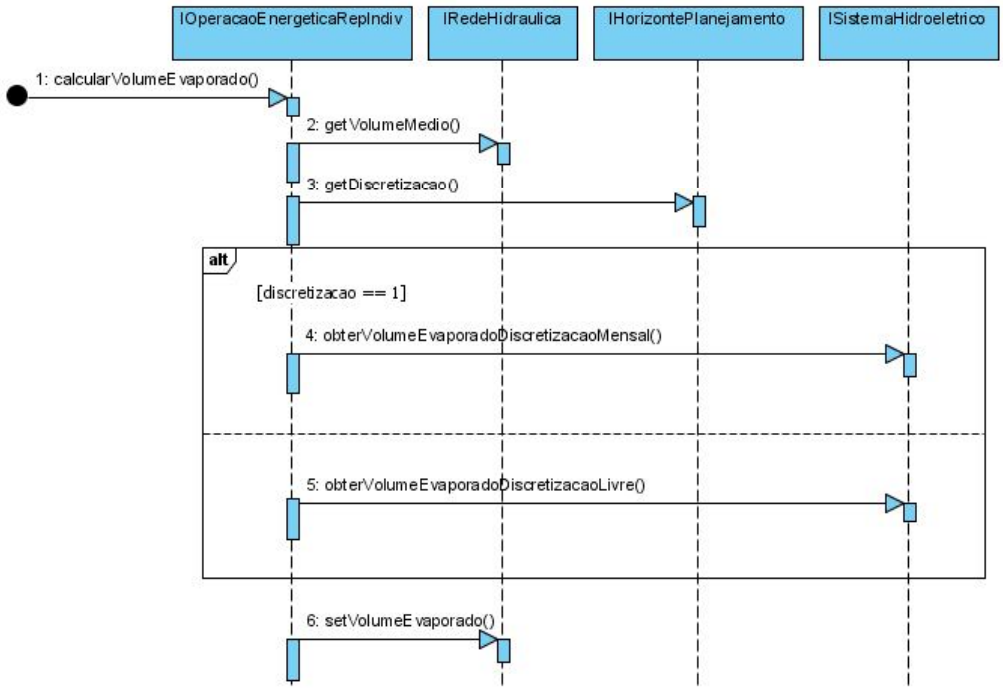

Figura 7.43: Interação da operação de negócio *CalcularVolumeEvaporado*.

As Figuras 7.44, 7.45, 7.46, 7.47, 7.48 e 7.49 ilustram algumas das interfaces de negócio, com a especificação de suas operações, obtidas pela análise de todas as interações[37].

Outro ponto importante na modelagem das interações consiste no entendimento claro das responsabilidades de cada interface e de cada componente, além das dependências entre eles. Isto porque, um modo popular de raciocinar sobre projetos de objetos e componentes de software é em termos de responsabilidades. Isto é parte de uma abordagem chamada Projeto Guiado por Responsabilidade (PGR) [77]. Em PGR, os objetos e/ou componentes são encarados como tendo responsabilidades - uma abstração do que eles fazem e/ou conhecem.

Responsabilidades são atribuídas a classes de objetos durante o projeto orientado a objetos e a componentes de software durante o fluxo de trabalho da especificação[38]. Além do mais, PGR inclui a idéia de colaboração. Responsabilidades são implementadas por meio de operações (métodos, funções, etc.) que ou atuam sozinhas ou colaboram com outras operações e componentes. Assim, na UML e no processo de desenvolvimento adotado, o desenho de diagramas de interação (no caso, o diagrama de sequência) torna-se a ocasião para considerar as responsabilidades dos componentes e das interfaces (realizadas como operações). Portanto, quando desenha-se um diagrama de interação UML, está se decidindo sobre atribuições de responsabilidade.

[37]Novamente, por motivo de brevidade, omitiu-se os argumentos das operações.
[38]Seguindo o processo de desenvolvimento UML Components [30].

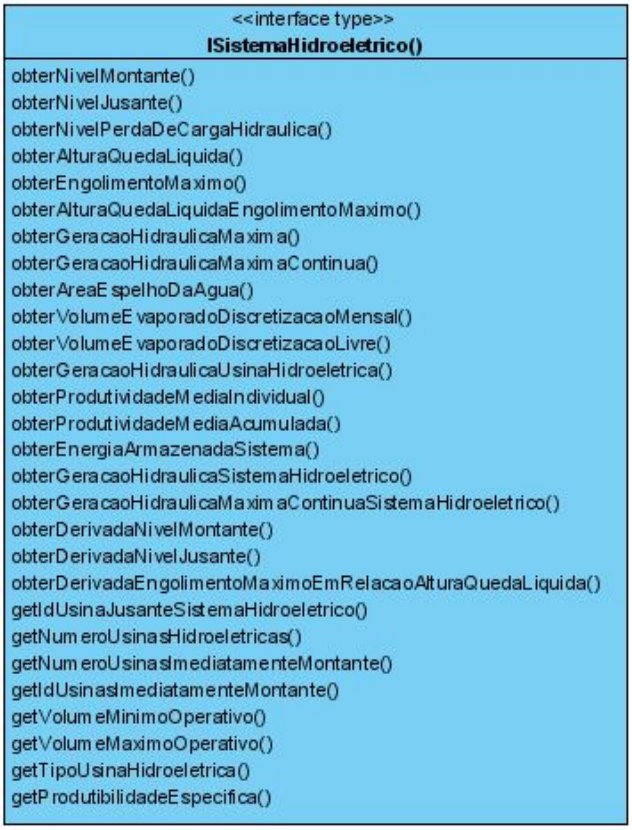

Figura 7.44: Interface de negócio *ISistemaHidroeletrico.*

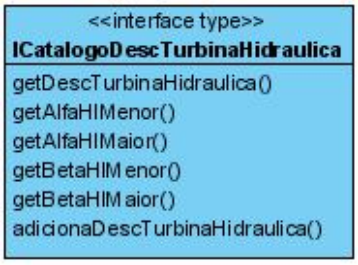

Figura 7.45: Interface de negócio *ICatalogoDescTurbinaHidraulica.*

Figura 7.46: Interface de negócio *IHorizontePlanejamento*.

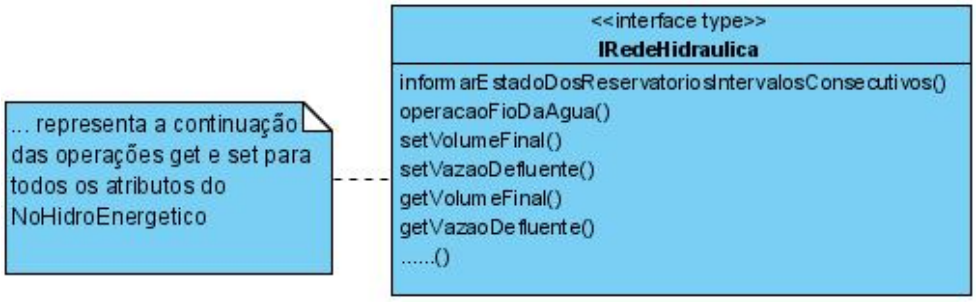

Figura 7.47: Interface de negócio *IRedeHidraulica*.

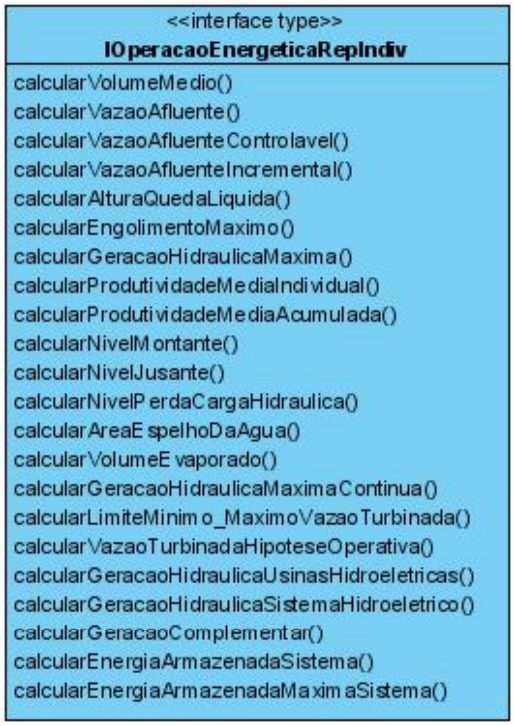

Figura 7.48: Interface de negócio *IOperacaoEnergeticaRepIndiv*.

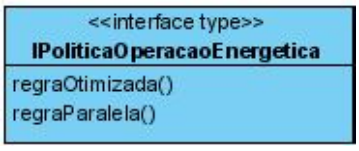

Figura 7.49: Interface de negócio *IPoliticaOperacaoEnergetica*.

Refinamento das Interfaces

A modelagem das interações concentrou-se principalmente na alocação de responsabilidades e na descoberta de operações. Portanto, as atividades desempenhadas até agora não preocuparam-se com a minimização de chamadas, as dependências cíclicas, a normalização de operações e interfaces, o uso de padrões de projeto existentes e assim por diante. Ressalta-se que todos esses detalhes devem ser levados em conta, mas, geralmente, é um bom princípio fazer uma coisa de cada vez. Assim, recomenda-se que, na fase inicial, o processo de descoberta e refinamento seja priorizado. Depois, pode-se utilizar todos esses outros detalhes para modificar as especificações.

Um dos principais refinamentos a ser considerado no estágio de interação dos componentes é a fatoração das interfaces e das operações. Fatorar uma interface envolve particionar suas responsabilidades em duas ou mais interfaces. O objetivo é muito similar ao da especialização: separar comportamento geral de comportamento mais especializado. Fatoração também aplica-se a operações no sentido de procurar generalidade e não-redundância nas operações da interface. Um exemplo bastante salutar de fatoração das interfaces aparece no componente *SistemaHidroeletrico*. Até o momento do estudo de caso, a única interface provida por ele é *ISistemaHidroeletrico*. Por esta interface, ele oferece operações que estão fortemente relacionadas à operação energética, considerando a representação individualizada das usinas hidroelétricas. Entretanto, em tempo de execução, este componente deve ser alimentado com informações do sistema hidroelétrico provenientes do meio de armazenamento escolhido, no caso, o banco de dados, a fim de poder ser utilizado na operação energética. Entretanto, ao se colocar essas operações na interface atual, perde-se uma boa parte da coesão e do gerenciamento das dependências. Isto porque essas operações de alimentação com os dados do banco de dados não são relacionadas funcionalmente com as operações para o cálculo da operação energética. Portanto, é desejável prover uma interface com essas operações de alimentação de informações provenientes do banco de dados. Para isto, particionou-se a interface *ISistemaHidroeletrico* nas interfaces *ISistHidroOperEnergRepIndiv* e *ISistHidroBaseDados*. Assim, a interface *ISistHidroOperEnergRepIndiv* fica responsável pelas operações relacionadas à operação energética do sistema hidroelétrico e a interface *ISistHidroBaseDados* responsabiliza-se por disponibilizar as operações necessárias para receber as informações do sistema hidroelétrico, proveniente do banco de dados do sistema. As Figuras 7.50, 7.51 e 7.52 ilustram esta importante decisão de projeto do fluxo de trabalho da especificação. Este particionamento da interface permitiu um melhor gerenciamento das dependências, pois os componentes *SimulacaoOperacaoEnergetica* e *OtimizacaoOperacaoEnergetica*, por exemplo, são

dependentes do componente *SistemaHidroeletrico* somente pela interface *ISistHidroOperEnergRepIndiv*, sem ser afetado por qualquer alteração na interface *ISistHidroBaseDados*. Frisa-se que esta decisão de projeto também implicou num refinamento da arquitetura de componentes, conforme ilustra a Figura 7.53.

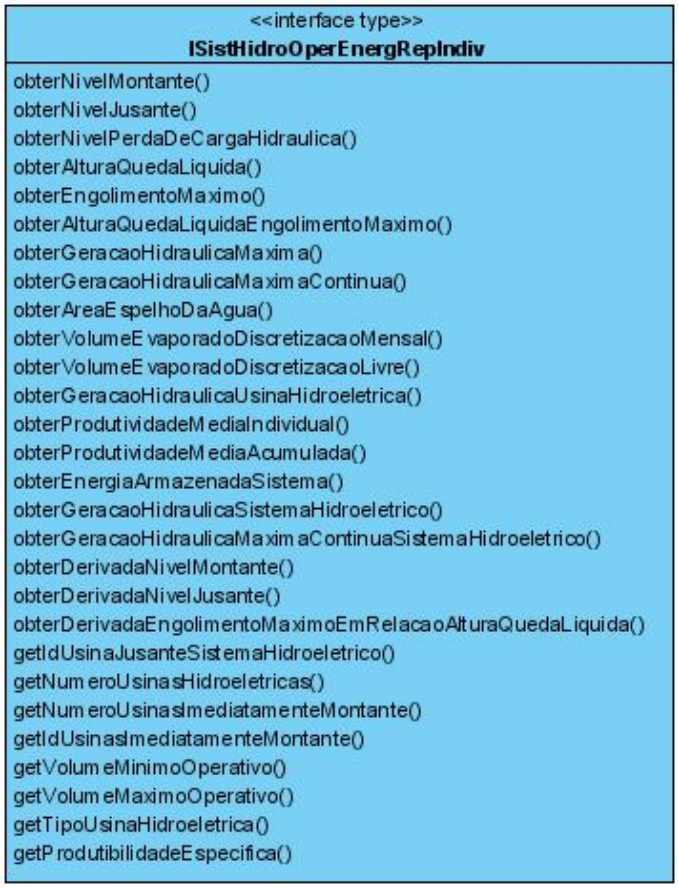

Figura 7.50: Interface de negócio *ISistHidroOperEnergRepIndiv*.

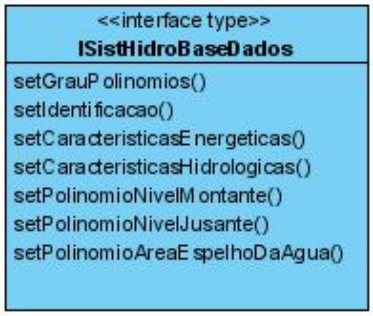

Figura 7.51: Interface de negócio *ISistHidroBaseDados*.

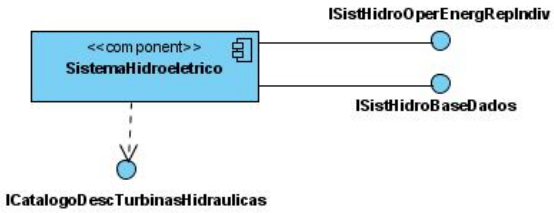

Figura 7.52: Especificação do componente de negócio do sistema hidroelétrico após a fatoração das interfaces.

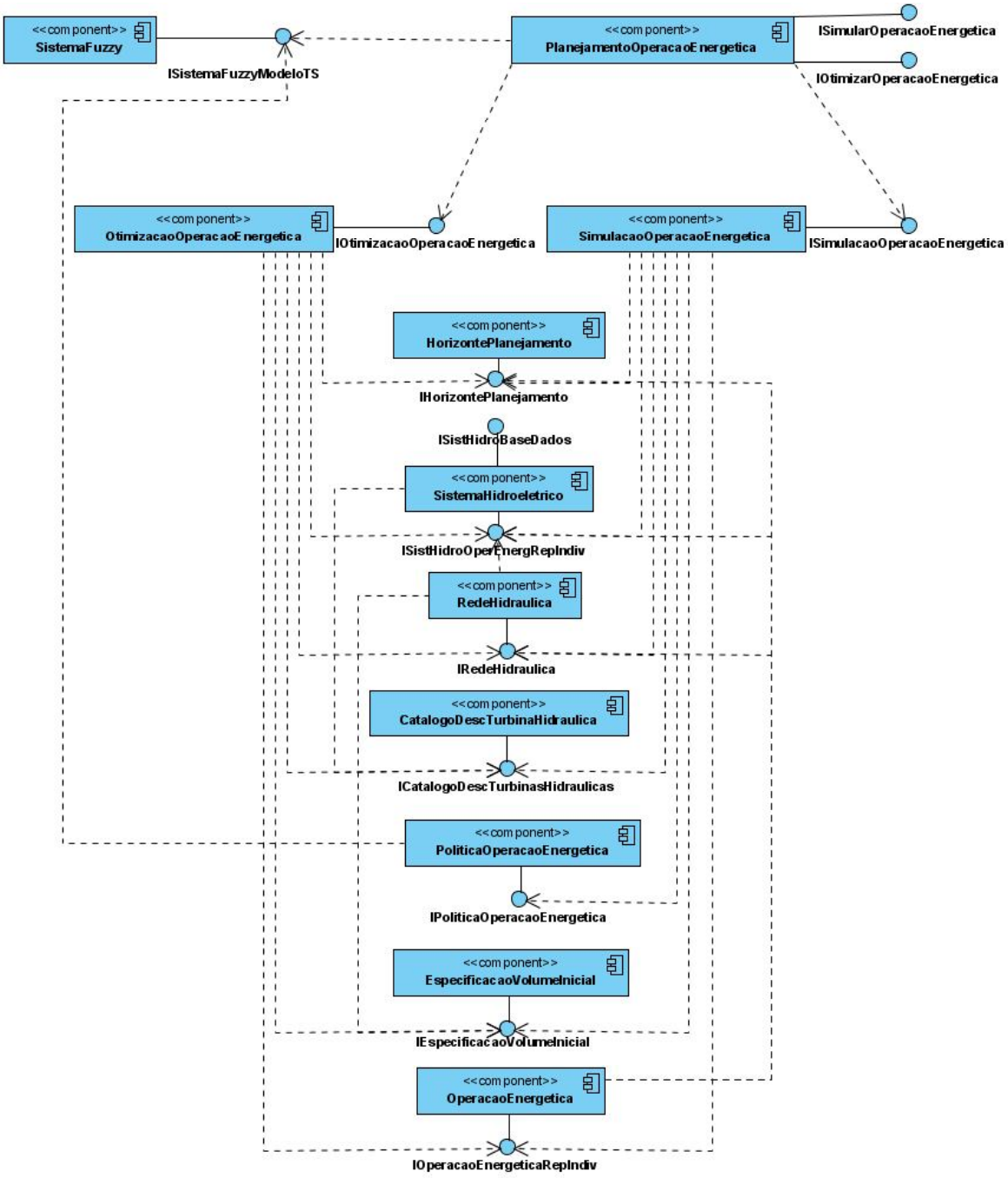

Figura 7.53: Arquitetura de especificação dos componentes após a fatoração das interfaces.

Resumo da Interação dos Componentes

No estágio da interação dos componentes explorou-se as operações das interfaces de sistema, desenvolveu-se algumas interações para elas, e descobriu-se as operações das interfaces de negócio. Além disso, consolidou-se o entendimento das responsabilidades de cada interface. Os temas chaves desse estágio seguem abaixo:

- Modelos de interação são desenvolvidos para cada operação da interface de sistema;
- Descoberta das operações das interfaces de negócio e suas assinaturas;
- Responsabilidades devem ser refinadas neste estágio;
- Interfaces e suas operações podem ser fatoradas quando necessário.

7.3.3 Especificação dos Componentes

O estágio final do fluxo de trabalho da especificação consiste em um detalhamento das especificações das interfaces e dos componentes, além da captura de regras de negócio como restrições. Isto envolve a análise das especificações de forma individual, com a inclusão de mais detalhes e rigor. Diferentemente dos outros dois estágios, a arquitetura dos componentes não deveria modificar-se substancialmente neste estágio. A especificação detalhada deveria ser empreendida uma vez que a arquitetura dos componentes esteja estável, e todas as operações das interfaces tenham sido identificadas. Adicionalmente, o ato de escrever regras precisas para cada operação pode ajudar o projetista a descobrir parâmetros ausentes, ou informação ausente, mas a ênfase deste estágio está no preenchimento dos detalhes sobre uma estrutura estável.

Especificação das Interfaces

Uma interface é um conjunto de operações coesas funcionalmente. Isto significa que se um cliente usa uma operação de uma interface, é bastante provável que ele usará alguma das outras operações também. Por isto, a divisão das funcionalidades de um componente em várias interfaces facilita a coesão dos serviços oferecidos pelo componente. Cada operação define algum serviço ou função que o componente irá executar para o cliente. Assim, uma especificação da interface define um contrato de uso entre um cliente e uma interface do componente. Portanto, a especificação precisa de um componente deve ser precedida por uma especificação também rigorosa das suas interfaces e das suas operações.

Uma operação especifica uma ação individual que um componente irá executar para um cliente. A especificação de uma operação pode abranger vários aspectos:

- Os parâmetros de entrada que especificam a informação fornecida ou passada ao componente;
- Os parâmetros de saída que especificam a informação atualizada ou retornada pelo componente;
- Qualquer mudança resultante no estado do componente;
- Quaisquer restrições aplicáveis.

Portanto, a especificação da operação deve apontar como as entradas, as saídas, e o estado do componente estão relacionados; e qual é o efeito da chamada da operação neste relacionamento[39]. Desta forma, torna-se necessário um modelo para descrever o estado de um componente, visto que as operações, por si só, não têm quaisquer aspectos estruturais relacionados a elas. Para isto, cada interface tem um modelo de informação. Este modelo de informação é um modelo desenhado no diagrama de especificação da interface, e que representa os estados possíveis do componente aos quais a especificação da operação pode referir-se. Desta forma, todas as mudanças relacionadas ao estado do componente causadas por uma dada operação podem ser descritas em termos do modelo de informação da interface que provê esta operação[40].

É possível desenvolver um modelo de informação da interface incrementalmente quando se cria as especificações das operações, adicionando tipos, atributos e associações quando necessário. Na Figura 7.45 apresenta-se as seis operações para a interface *ICatalogoDescTurbinasHidraulicas*. Com as operações já identificadas, deve-se analisá-las para verificar o que é necessário no modelo de informação desta interface.

Claramente, qualquer componente oferecendo a interface *ICatalogoDescTurbinasHidraulicas* deve manter informações sobre as descrições das turbinas hidráulicas. Para cada descrição de turbina hidráulica, há vários pedaços de informação necessários, como indicado pelo tipo *DescTurbinaHidraulica*. Por esta evidência, pode-se deduzir a necessidade do modelo de informação mostrado na Figura 7.54.

[39]Entretanto, a especificação da operação nas interfaces não inclui informação sobre interações entre componentes. Isto porque, o cliente da operação não precisa estar ciente dessas interações.

[40]Portanto, o modelo de informação da interface precisa conter o bastante para permitir as operações serem especificadas.

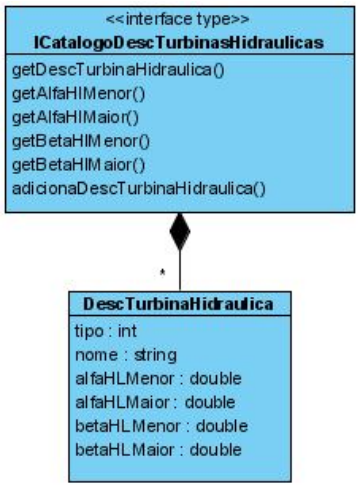

Figura 7.54: Diagrama de especificação da interface *ICatalogoDescTurbinasHidraulicas.*

Deve ser frisado que o modelo de informação especifica o conjunto de estados que o componente pode assumir. Assim, ele não descreve a maneira no qual este estado é implementado ou armazenado (persistência). Este modelo é a visão externa que deve ser fornecida ao cliente da interface do componente de software, e existe unicamente para suportar a definição das restrições e dos efeitos das operações no estado do componente.

Apesar de se ter criado o modelo de informação da interface, como um produto da especificação das operações, esta não é uma abordagem efetiva [30]. Isto porque o modelo de informação da interface pode ser derivado de maneira direta do modelo de tipos de negócio. O diagrama de responsabilidade da interface para o modelo de tipos do negócio do sistema hidroelétrico de geração (Figura 7.30) indica que a interface *ISistemaHidroeletrico*[41] é responsável pela informação sobre usinas hidroelétricas e seus tipos que as detalham [42], enquanto a interface *ICatalogoDescTurbinasHidraulicas* é responsável por informações relativas às descrições das turbinas hidráulicas. Adicionalmente, decidiu-se que *ISistHidroOperEnergRepIndiv* é responsável por armazenar o relacionamento entre conjuntos de unidades geradoras e a descrição da turbina hidráulica. Portanto, o modelo de informação da interface deve conter informações sobre a descrição das turbinas hidráulicas.

Usando-se o diagrama de responsabilidade da interface (Figura 7.30) pode-se deduzir um

[41]No caso, o mais correto seria a interface *ISistHidroOperEnergRepIndiv.* A interface *ISistHidroBaseDados* ainda não está sendo considerada na iteração atual do processo de desenvolvimento.
[42]Casa de máquinas, polinômios, conjuntos de unidades geradoras, etc.

modelo de informação para a interface *ISistHidroOperEnergRepIndiv*. Assim, o modelo de informação, claramente, deverá conter informações sobre casa de máquinas, conjuntos de unidades geradoras e os polinômios[43]. Entretanto, resta a consideração da associação entre os conjuntos de unidades geradoras e a descrição da turbina hidráulica do conjunto. A regra proposta em [30] e adotada aqui é a seguinte: quando um tipo (*ConjUnidadesGeradoras*) pertencente a uma interface (*ISistHidroOperEnergRepIndiv*) refere-se a um tipo (*DescTurbinaHidraulica*) pertencente a outra interface (*ICatalogoDescTurbinasHidraulicas*), o tipo referenciado (*DescTurbinaHidraulica*) aparece no modelo de informação de ambas as interfaces. Portanto, haverá um tipo *DescTurbinaHidraulica* no modelo de informação da interface *ISistHidroOperEnergRepIndiv*. Entretanto, ele não será o mesmo tipo *DescTurbinaHidraulica* da interface *ICatalogoDescTurbinasHidraulicas*, pois a interface *ISistHidroOperEnergRepIndiv* não se preocupa com os detalhes da descrição das turbinas hidráulicas. Portanto, o tipo *DescTurbinaHidraulica* na *ISistHidroOperEnergRepIndiv* terá um simples atributo: o tipo da turbina (*tipoTurbina*)[44] utilizada no conjunto de unidades geradoras. O modelo de informação da interface para a interface *ISistHidroOperEnergRepIndiv* está ilustrado na Figura 7.55.

[43] As informações sobre o histórico mensal das vazões afluentes naturais está mais fortemente acoplado à base de dados do sistema hidroelétrico, por isso não foi considerado no modelo de informação da interface *ISistHidroOperEnergRepIndiv*.

[44] Observa-se que a única informação disponível sobre as turbinas hidráulicas é o seu identificador (o seu tipo), os detalhes aparecem somente no modelo de informação da interface *ICatalogoDescTurbinasHidraulicas*.

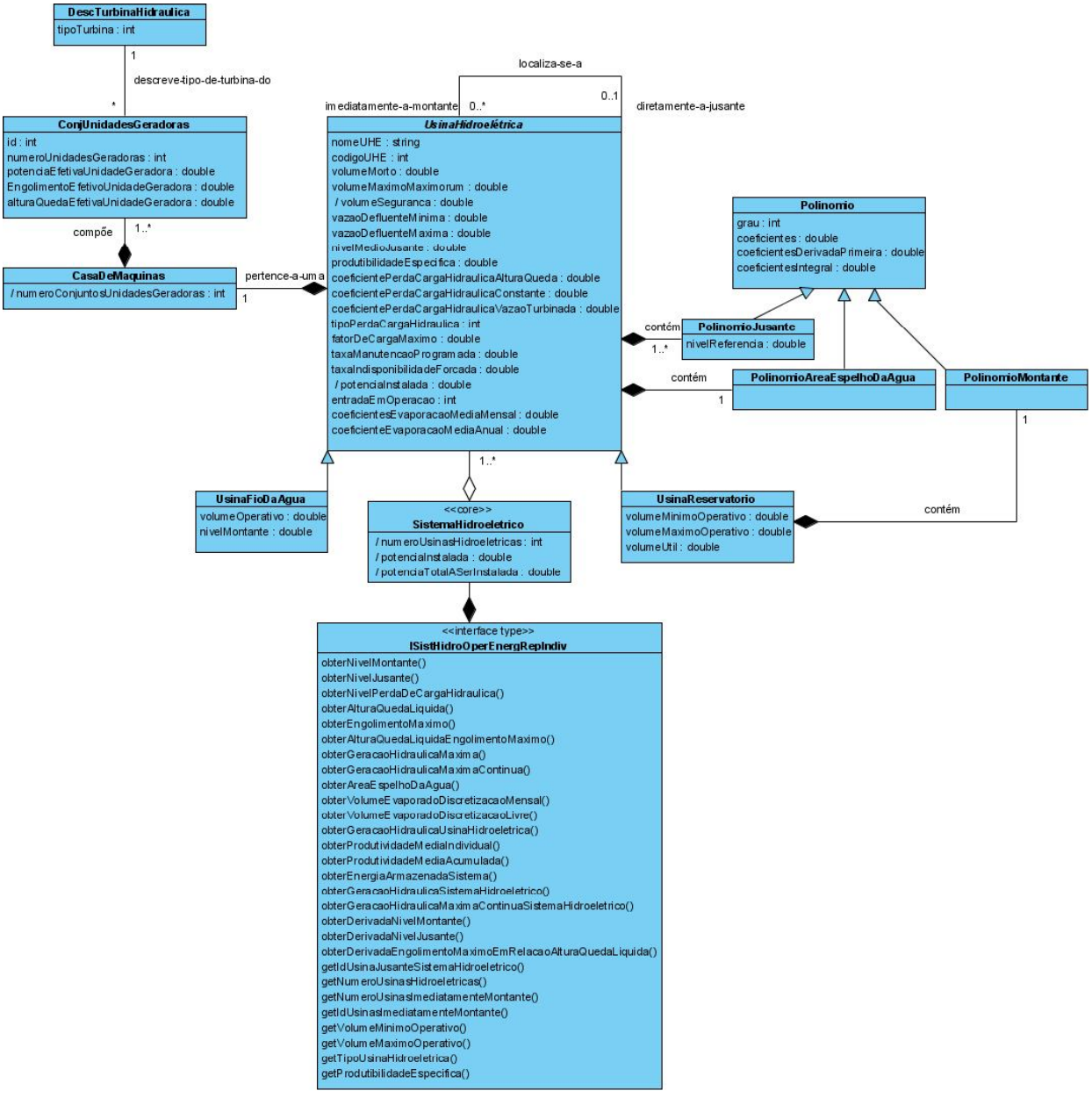

Figura 7.55: Diagrama de especificação da interface *ISistHidroOperEnergRepIndiv*.

Assim, um modo prático de criar o modelo de informação para uma interface de negócio envolve a utilização do modelo de tipos do negócio. As interfaces de sistema também precisam ser especificadas embora, em muitos casos, as suas operações simplesmente transmitem a chamada para a interface de negócio apropriada. Como com qualquer outra interface, o modelo de informação de uma interface de sistema precisa conter informação suficiente para permitir a especificação precisa das suas operações. Ressalta-se, entretanto, que a existência de um modelo de informação não implica que uma implementação da interface deve armazenar a informação de forma persistente. Pelo contrário, as interfaces de sistema raramente têm armazenamento persistente. As implementações das interfaces de sistema obtêm a informação de que precisam por meio dos componentes de negócio[45].

Da mesma forma que as interfaces de negócio, para a especificação das interfaces de sistema utiliza-se, como inspiração, o modelo de tipos de negócio. Entretanto, diferentemente das interfaces de negócio, nas quais o diagrama de responsabilidade da interface fornece uma clara indicação de quais tipos são necessários por uma interface e quais tipos não são, pode não ser óbvio determinar quais tipos de informação serão necessários até que se tenham especificadas as operações. Isto porque a inspiração do modelo de informação das interfaces de sistema provém das operações fornecidas por elas. Baseado nisto, ilustra-se o modelo de informação das interfaces de sistema *ISimularOperacaoEnergetica* e *IOtimizarOperacaoEnergetica* (Figuras 7.56 e 7.57).

[45]Frisa-se que a forma exata que as implementações obtêm esta informação não é importante para o cliente da interface de sistema.

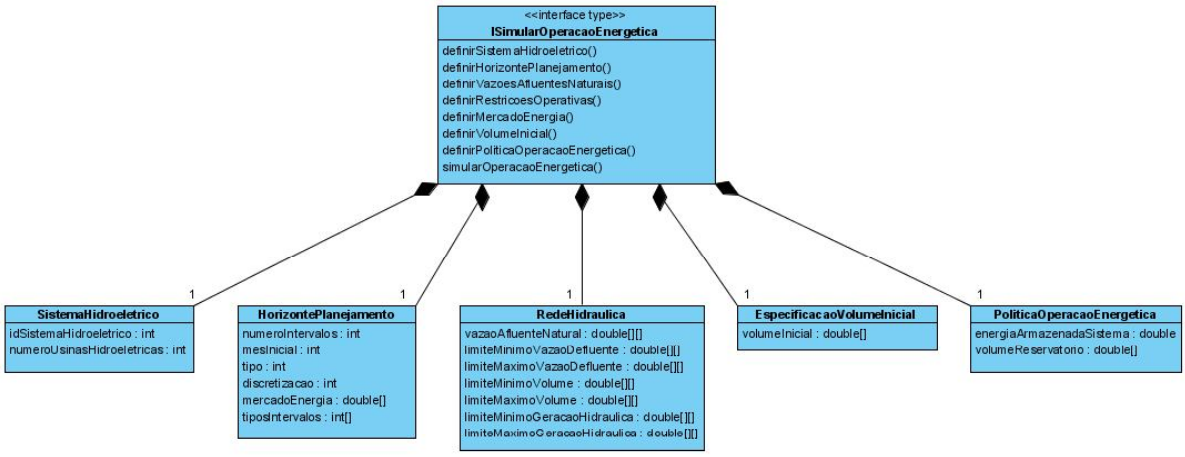

Figura 7.56: Diagrama de especificação da interface *ISimularOperacaoEnergetica*.

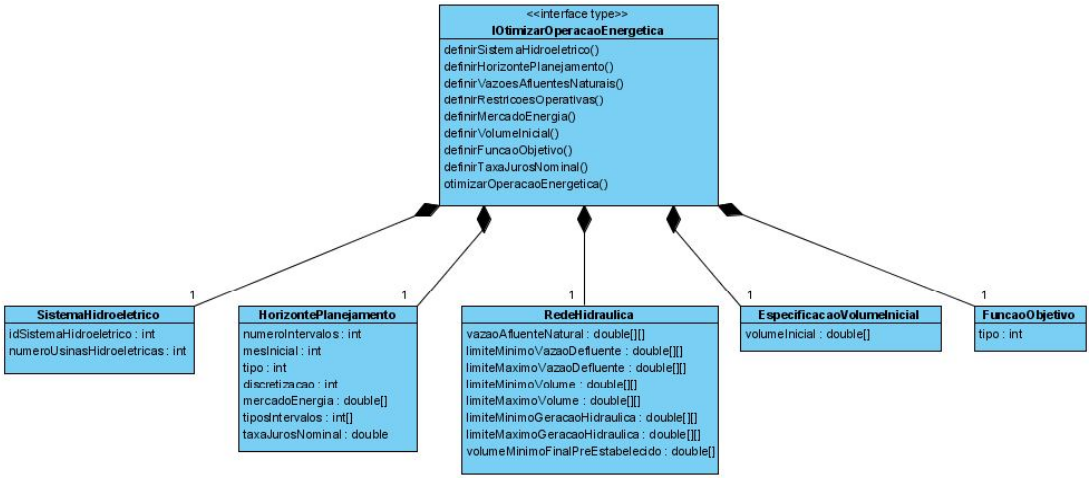

Figura 7.57: Diagrama de especificação da interface *IOtimizarOperacaoEnergetica*.

Além do modelo de informação, a especificação da interface envolve a especificação de pré e pós-condições para suas operações. Pré e pós-condições especificam o efeito da operação, sem prescrever um algoritmo ou implementação. O significado da pré-condição necessita ser enfatizado visto que, frequentemente, ele é mal interpretado, especialmente por aqueles acostumados com sistemas baseados em regras. A pré-condição não é a condição sob a qual a operação será chamada. A invocação da operação é totalmente independente do valor desta condição. A pré-condição é a condição sob a qual a operação garante que a pós-condição será obtida. Se a pré-condição for falsa quando a operação é invocada, o resultado não pode ser especificado, ou

seja, nenhuma hipótese sobre os efeitos da operação pode ser feita. Já a pós-condição especifica qual será o efeito da operação, desde que a pré-condição seja verdadeira.

Outro modo de descrever pré e pós-condições é como hipóteses e garantias da operação. A pré-condição representa as hipóteses das quais a operação depende para seu funcionamento correto. A pós-condição representa a garantia contratual que a operação assume, caso as hipóteses sejam obedecidas. Uma implicação importante de visualizar a especificação da operação de forma contratual é considerar que as hipóteses são da responsabilidade do cliente da operação, ao passo que as garantias são da responsabilidade do fornecedor da operação[46]. Assim, as hipóteses são consideradas verdadeiras pelo fornecedor, não fazendo parte da lógica da aplicação testá-las. A Figura 7.58 ilustra um exemplo da aplicação de pré e pós-condições para uma operação da interface *IPoliticaOperacaoEnergetica.*

```
IPoliticaOperacaoEnergetica::politicaOtimizada(in paramNumeroUsinasHidroeletricas: int, in paramVolume:double, in
paramFatorDeAcoplamentoOperacaoEnergetica:double, in paramLimiteMinimoVolume:double, in paramLimiteMaximoVolume:double, out
paramVolumeCalculado:double)

pré-condições:
-- paramNumeroUsinasHidroeletricas > 0
-- paramVolume >= paramLimiteMinimoVolume
-- paramVolume <= paramLimiteMaximoVolume
-- paramFatorDeAcoplamentoOperacaoEnergetica >= 0
-- paramFatorDeAcoplamentoOperacaoEnergetica <= 1

pós-condições:
-- paramVolumeCalculado >= paramLimiteMinimoVolume
-- paramVolumeCalculado <= paramLimiteMaximoVolume
-- paramVolumeCalculado representa o volume operativo calculado pela política de operação energética otimizada
```

Figura 7.58: Pré e pós-condições para a operação *regraOtimizada* da interface *IPoliticaOperacaoEnergetica.*

Deve ser frisado que essas condições contratuais poderiam ter sido especificadas, de forma precisa, usando OCL (*Object Constraint Language*) [175]. OCL é uma linguagem declarativa que permite a construção formal de expressões lógicas. Entretanto, no processo de desenvolvimento, adotou-se a escrita de pré e pós-condições na linguagem natural.

[46]O componente que implementa a interface e suas operações.

Especificação dos Componentes

As especificações das interfaces, discutidas até aqui, lidam com o contrato de uso: o contrato entre o componente e os seus clientes. Após a especificação das interfaces[47], parte-se para a informação de especificação adicional que o implementador, o montador e o testador dos componentes precisam estar cientes. Esta informação engloba principalmente as dependências de um componente em relação a outras interfaces, de forma a definir o contrato de realização. Esta informação completa a especificação do componente. Adicionalmente, se restrições na realização (e montagem) precisarem ser especificadas, elas devem ser especificadas neste ponto.

Para toda especificação de componente, é necessário indicar quais interfaces sua realização deve suportar. Para o estudo de caso, isto já foi feito no diagrama de arquitetura de especificação dos componentes (Figura 7.53), mas deve-se analisar este diagrama em pedaços específicos para cada especificação de componente. Além do mais, é necessário confirmar quaisquer restrições relativas à utilização de outras interfaces pela realização[48]. A especificação das interfaces requeridas é essencial para o processo de desenvolvimento, pois caso a realização do componente não contemple esta restrição, o componente provavelmente não funcionará.

O diagrama de especificação do componente *CatalogoDescTurbinaHidraulica* (Figura 7.59) ilustra que este componente deve oferecer a interface *ICatalogoDescTurbinasHidraulicas* e não está restrito ao uso de quaisquer outras interfaces. Por outro lado, o diagrama de especificação do componente *SistemaHidroeletrico* (Figura 7.60) mostra que este componente deve oferecer as interfaces *ISistHidroOperEnergRepIndiv* e *ISistHidroBaseDados* e deve usar a interface *ICatalogoDescTurbinasHidraulicas*. Já o diagrama de especificação do componente de sistema *PlanejamentoOperacaoEnergetica* (Figura 7.61) ilustra que este componente deve oferecer as duas interfaces de sistema, *ISimularOperacaoEnergetica* e *IOtimizarOperacaoEnergetica*, e deve utilizar as interfaces *IOtimizacaoOperacaoEnergetica*, *ISimulacaoOperacaoEnergetica* e *ISistemaFuzzyModeloTS*. Deve ser frisado que, como a aplicação de componentes de software e do UML *Components* está voltada para a especificação, não enfoca-se como a implementação dos componentes de software deve utilizar os serviços oferecidos pelas interfaces.

Além de ilustrar a dependência de uso das interfaces, um diagrama de especificação do componente pode mostrar, de forma precisa, quantos componentes, que oferecem as interfaces uti-

[47] A especificação das interfaces inclui a especificação das suas operações, do seu modelo de informação e das pré e pós-condições das suas operações

[48] Novamente, estas restrições apareceram no diagrama de arquitetura dos componentes, como flechas de dependência.

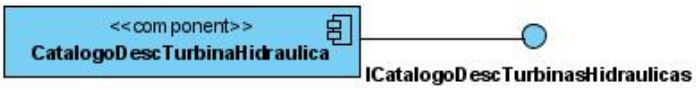

Figura 7.59: Diagrama de especificação do componente *CatalogoDescTurbinaHidraulica.*

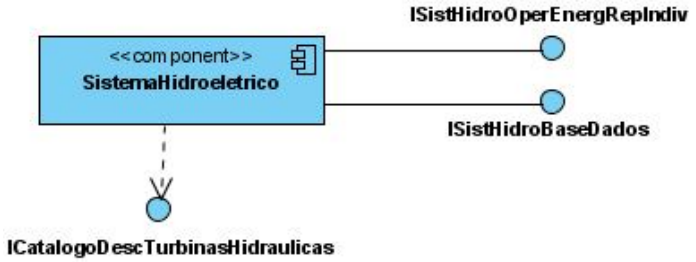

Figura 7.60: Diagrama de especificação do componente *SistemaHidroeletrico.*

lizadas, são utilizados pelo componente que está sendo especificado. O diagrama de especificação adicional da Figura 7.62 mostra que todas as realizações do componente *PlanejamentoOperacaoEnergetica* devem usar exatamente um componente que oferece cada uma das três interfaces.

Restrições na forma como uma operação particular deve ser implementada são definidas nas interações. Ao contrário das interações tradicionais no nível de implementação, as interações de componentes definem restrições no nível de especificação. Assim, todas as realizações do componente devem respeitá-las. As interações, as quais completam as restrições nas especificações dos componentes, tipicamente, são fragmentos das interações desenhadas durante a descoberta das operações, no estágio de interação dos componentes. Elas são os fragmentos que começam com o

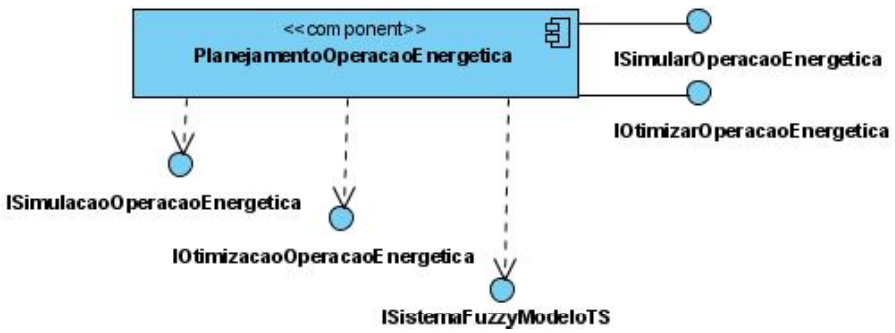

Figura 7.61: Diagrama de especificação do componente de sistema *PlanejamentoOperacaoEnergetica.*

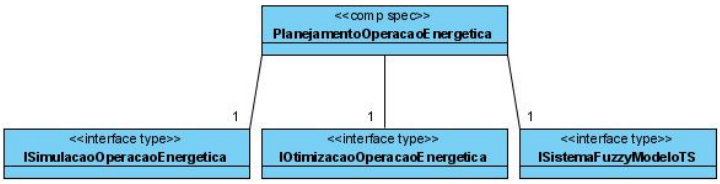

Figura 7.62: Diagrama de especificação adicional do componente de sistema *PlanejamentoOperacaoEnergetica*.

componente sendo especificado, recebendo uma mensagem, e mostram somente as interações diretas deste componente. A Figura 7.43 ilustra as interações necessárias para o cálculo do volume evaporado. A interação completa foi desenhada para ajudar na descoberta de operações, mas agora ela será utilizada para complementar a especificação do componente *OperacaoEnergetica*. Neste contexto, o projetista não preocupa-se com o cliente que invocou a operação *calcularVolumeEvaporado()* pela interface *IOperacaoEnergeticaRepIndiv*, nem com o fato que a interface *IRedeHidraulica* esteja sendo oferecida pelo componente *RedeHidraulica*. A única preocupação do projetista refere-se ao fragmento que especifica o que um componente que implementa a interface *IOperacaoEnergeticaRepIndiv* deve fazer ao receber a mensagem *calcularVolumeEvaporado()*. Durante a fase de especificação do componente, inclui-se um fragmento ou o diagrama de interação completo[49] para cada operação cuja implementação deseja-se restringir. Entretanto, não é necessário restringir a implementação de toda operação.

Fatoração das Interfaces

Criar todos os modelos de informação das interfaces pode ser um processo bastante trabalhoso. Cada interface precisa de seu próprio modelo de informação, o qual, frequentemente, é apenas ligeiramente diferente do modelo de uma outra interface, especialmente no caso das interfaces de sistema. Felizmente, algumas vezes, é possível simplificar as coisas, ao refatorar as interfaces, especialmente ao introduzir-se novas interfaces abstratas que atuam como super-tipos de outras interfaces, mantendo os elementos comuns do modelo de informação da interface, e, algumas vezes, definindo operações comuns. Por exemplo, seria possível, no estudo de caso, fatorar os elementos comuns dos modelos de informação das interfaces *ISimularOperacaoEnergetica* e *IOtimizarOperacaoEnergetica* (Figuras 7.56 e 7.57), e colocá-los em uma nova interface, chamada *IPlanejarOperacaoEnergetica*, da qual ambas herdariam (Figura 7.63). Desta forma,

[49]No caso, utilizou-se o diagrama completo.

a interface *IPlanejarOperacaoEnergetica* teria um modelo de informação da interface conforme ilustrado na Figura 7.64.

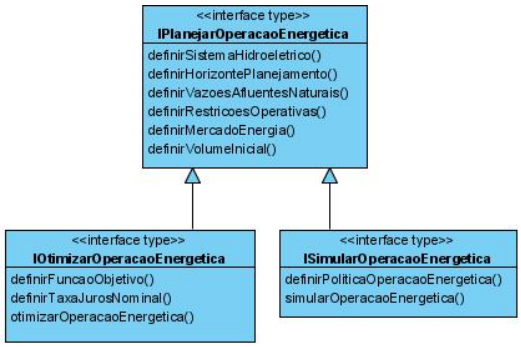

Figura 7.63: *IPlanejarOperacaoEnergetica* como interface base para as interfaces *IOtimizarOperacaoEnergetica* e *ISimularOperacaoEnergetica*.

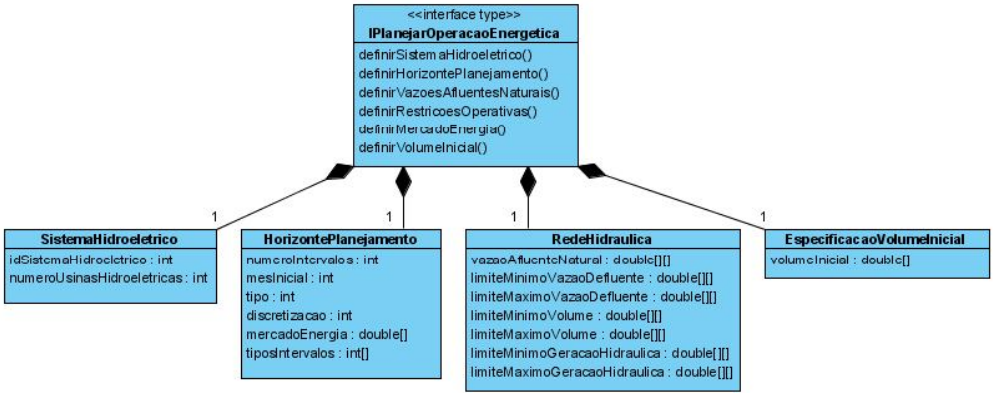

Figura 7.64: Diagrama de especificação da interface de sistema *IPlanejarOperacaoEnergetica após a fatoração.*

Resumo da Especificação dos Componentes

Neste ponto, resume-se os temas essenciais no estágio da especificação dos componentes.

- As especificações das interfaces definem os contratos de uso;
- As especificações dos componentes definem os contratos de realização[50];

[50]De fato, as especificações das interfaces encontram-se no "coração" de ambos os contratos, visto que as especificações de componentes são, principalmente, agrupamentos de interfaces. Entretanto, as especificações dos componentes podem conter restrições no modo como as interfaces serão implementadas.

- Uma interface é especificada por um conjunto de especificações das operações que operam em um modelo de informação da interface;
- O modelo de informação da interface deve conter informação suficiente para permitir as operações serem especificadas. O modelo não pode referir-se a nada do lado de fora da interface;
- Modelos de informação da interface podem ser derivados sistematicamente do modelo de tipos do negócio;
- Cada operação é especificada usando pré e pós-condições. A pós-condição define os efeitos da operação, enquanto a pré-condição define as condições de modo que os efeitos da pós-condição sejam garantidos;
- Especificações dos componentes incluem especificações das interfaces oferecidas e das interfaces usadas (requeridas). Elas também podem incluir detalhes sobre o número de componentes esperados;
- Para restringir as implementações das operações, pode-se anexar fragmentos da interação para a especificação dos componentes;
- Restrições para especificações de componentes podem ser adicionadas para definir como os elementos de um modelo de informação da interface relacionam-se a elementos em outro modelo;
- Pode-se fatorar ou fundir interfaces de sistema para manter as coisas mais simples.

Este estágio completa o fluxo de trabalho da especificação, o qual é o principal interesse deste trabalho. A seguir, apresenta-se, de forma resumida, a sequência dos fluxos de trabalho do UML *Components*, e suas correspondentes ligações com o fluxo de trabalho da especificação, de forma a ilustrar a importância deste fluxo de trabalho na construção de uma aplicação baseada em componentes de software:

- O fluxo de trabalho do provisionamento é responsável por fornecer as implementações dos componentes de software, seja por implementação direta das especificações produzidas no fluxo de trabalho da especificação, ou pela aquisição de algum componente existente que ajusta-se à especificação produzida. É importante ressaltar que a especificação, quando bem realizada, conduz a um código fácil de ser implementado pelos desenvolvedores, pois a

transição entre os fluxos de trabalho dos requisitos, da especificação e do provisionamento torna mais suave a implementação dos componentes de software, fazendo com que eles tenham mais qualidade, pois minimiza-se a chance de serem introduzidos erros entre um fluxo de trabalho e outro. Desta forma, pode-se visualizar a relevância do fluxo de trabalho da especificação e dos seus artefatos para a construção (implementação) dos componentes de software;

- O fluxo de trabalho da montagem consiste em integrar os componentes e recursos de software existentes para formar uma aplicação. Uma especificação clara e precisa dos componentes é necessária neste ponto, pois todo o desenvolvimento por meio da montagem é baseado unicamente na especificação dos componentes e de suas interfaces, sem a necessidade de conhecer detalhes de sua implementação. A arquitetura de especificação dos componentes também pode ser utilizada neste fluxo de trabalho para ilustrar a estrutura e a dependência entre os componentes de software, de forma a permitir sua integração correta;

- Após a montagem da aplicação, no fluxo de trabalho dos testes, a aplicação é testada, utilizando os artefatos do fluxo de trabalho da especificação como entradas para os *scripts* dos testes. Ao considerar-se, de forma específica o DBC, pode-se perceber duas perspectivas relacionadas ao testes dos componentes: a do implementador e a do cliente. Os implementadores devem testar seus componentes de software de forma independente de quem venha a utilizá-los, ou seja, sem o conhecimento das aplicações clientes. Os clientes, por sua vez, devem analisar e testar suas aplicações sem necessariamente ter conhecimento dos detalhes da implementação dos componentes de software utilizados. Entretanto, independentemente da perspectiva, é necessário garantir que os componentes desenvolvidos sejam testados em um ambiente compatível com os seus requisitos e com sua especificação. Adicionalmente, uma documentação que inclua conjuntos de testes realizados pode ser fornecida.

7.4 Aspectos da Implementação dos Modelos Computacionais

Conforme já mencionado, o UML *Components* é um processo de desenvolvimento para sistemas computacionais baseados em componentes de software, enfatizando a especificação dos componentes, os quais são vistos como elementos de modelagem, e não apenas como elementos de implementação. Desta forma, pretende-se apresentar, de forma complementar, os principais

aspectos relacionados à implementação dos componentes de software especificados nesta tese.

Componentes de software podem ser vistos como uma abstração para o desenvolvimento de sistemas computacionais que pode ser adaptada sobre diversos paradigmas de programação diferentes, como a orientação a objetos ou o paradigma funcional, entre outros. Entretanto, o modelo de componentes incorpora muitas das características do paradigma da orientação a objetos, como encapsulamento e identidade. Desta forma, a proposta de componentes de software desponta, não apenas para substituir, mas também para complementar o modelo orientado a objetos, bem como outros paradigmas de programação. Como a implementação orientada a objetos tem maior aceitação na implementação de componentes, bem como na tentativa de fornecer mecanismos para tornar mais eficiente o desenvolvimento do software, adotou-se o paradigma da programação orientada a objetos para o provisionamento dos componentes. Apesar de uma aplicação baseada em componentes de software poder ser construída a partir de componentes de software desenvolvidos em diferentes linguagens de programação, os modelos computacionais foram implementados por meio do ambiente de desenvolvimento integrado Borland C++ Builder 6.0 (ambiente Windows), e a linguagem de programação utilizada foi C++.

C++ tornou-se rapidamente uma linguagem muito popular e continua a sê-lo [154]. Um fator que contribui para essa popularidade é a disponibilidade de compiladores bons e baratos. Outro fator em favor da popularidade de C++ é que ela é uma linguagem quase completamente compatível com a linguagem C, muito utilizada em aplicações no âmbito das engenharias e ciências exatas. Além do mais, é possível vincular código C++ com código C na maioria das implementações. Portanto, C++ tem tanto os tipos das linguagens imperativas tradicionais como a estrutura de classes de uma linguagem orientada a objeto. Isso torna a linguagem C++ híbrida, capaz de suportar tanto programação procedural como programação orientada a objetos.

7.4.1 Objetos

No contexto da programação, há quem considere a orientação a objetos uma evolução do paradigma da programação procedural [118], onde objetos, que são representações de entidades do mundo real, encapsulam tanto atributos dessas entidades, quanto seus aspectos comportamentais [176]. Dessa forma, um objeto é uma entidade que possui um estado e um conjunto definido de operações que operam nesse estado. O estado é representado por um conjunto de atributos de objeto. Os atributos, simplesmente, identificam um tipo de característica do objeto. As operações associadas com o objeto fornecem serviços para outros objetos, que requisitam esses

serviços quando alguma computação é necessária.

Exemplos de Classes Implementadas

Nesta seção, são apresentadas algumas classes implementadas nos modelos computacionais desenvolvidos.

- Classe *CasaDeMaquinas*: classe que faz a abstração da casa de máquinas de uma usina hidroelétrica. Esta classe organiza os atributos (por exemplo: o número de conjuntos de unidades geradoras) e operações (por exemplo: o cálculo do engolimento máximo) relacionados a uma casa de máquinas, em especial aos conjuntos de unidades geradoras (turbina-gerador). Ela é necessária, por exemplo, no cálculo do engolimento máximo e da geração hidráulica máxima, associados a uma usina hidroelétrica (Figura 7.65);

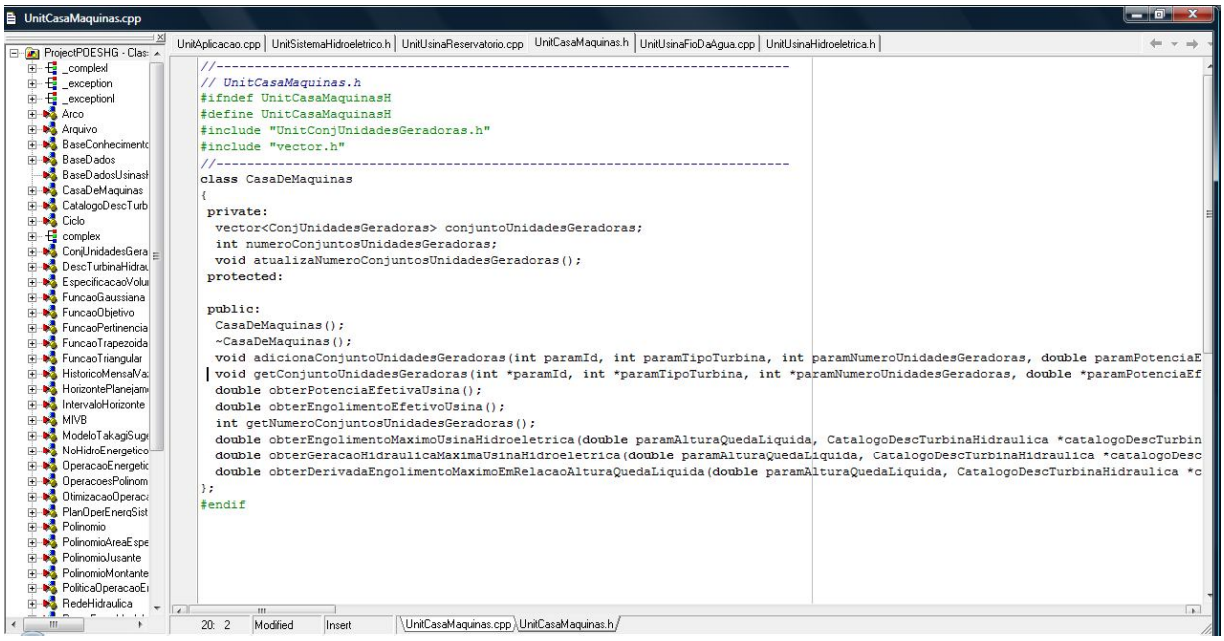

Figura 7.65: Código-fonte do cabeçalho (*header*) da classe *CasaDeMaquinas.*

- Classe *NoHidroEnergetico*: classe que faz a abstração das variáveis energéticas associadas a um nó da rede hidráulica. Esta classe encapsula os atributos e operações das variáveis energéticas do planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos. Dentre as variáveis associadas ao nó da rede, pode-se citar o volume armazenado e a vazão defluente de cada usina para cada intervalo do horizonte de planejamento;

- Classe *Polinomio*: classe que faz abstração de um polinômio. Apesar da sua simplicidade aparente, a utilização de um encapsulamento dos coeficientes e das operações de um polinômio como uma classe traz determinados benefícios à implementação dos modelos, como a proteção fornecida aos coeficientes, os quais são específicos para cada usina, como por exemplo, ao se considerar o polinômio nível de montante. Outro fator importante é que esta classe incluiu métodos para determinar a derivada e integral de um polinômio, aumentando sua funcionalidade para o programa;

- Classe *UsinaHidroeletrica*: classe que faz a abstração de uma usina hidroelétrica. Esta classe encapsula os atributos e operações relacionadas a usinas hidroelétricas sob uma mesma "estrutura", oferecendo, assim, uma proteção aos atributos e operações. O foco no objeto usinas hidroelétricas facilita a compreensão da própria usina. Os objetos permitem o foco nos detalhes relevantes, ignorando outros detalhes que são irrelevantes para o domínio de aplicação considerado. Assim, um objeto do mundo real, como uma usina hidroelétrica consiste, simplesmente, em atributos e comportamentos. Atributos são os dados associados a um objeto como, para o caso da usina hidroelétrica, a sua potência instalada, a sua produtibilidade específica, etc. Um comportamento é algo que o objeto "realiza". Um exemplo de comportamento para uma usina hidroelétrica seria o cálculo de sua altura de queda líquida, de sua perda de carga, etc. A implementação dos modelos computacionais relativos ao planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos foi, apenas, traduzir os atributos e os comportamentos de um objeto do mundo real (como uma usina hidroelétrica), utilizando uma linguagem de programação orientada a objetos.

Neste ponto, vale ressaltar que várias outras classes, também relevantes na implementação dos modelos computacionais do planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos, foram omitidas. Entretanto, deve ser frisado que a implementação computacional dos modelos consiste, de fato, em uma coleção de objetos.

O tamanho (granularidade) do componente de software, medido pela quantidade de recursos e/ou funcionalidades (tarefas, serviços, funções) implementados, tem papel relevante na reutilização. Um componente deve fornecer um número suficiente de funcionalidades, portanto, deve ser grande o bastante (ou seja, englobar várias classes) para que valha a pena reutilizá-lo, entretanto, para que o componente possa ter uma aplicabilidade facilitada, essas funcionalidades devem ser logicamente relacionadas de forma a compor um conjunto coeso de funcionalidades. Como exemplo, pode-se citar o componente de software *SistemaHidroeletrico*, o qual

é composto de várias classes como: *UsinaHidroeletrica*, *UsinaFioDaAgua*, *UsinaReservatorio*, *CasaDeMaquinas*, *ConjUnidadesGeradoras*, *Polinomio*, etc. Para aplicações computacionais cujo domínio está relacionado com a operação das usinas hidroelétricas, ter um número excessivo de "pequenos" componentes pode resultar em uma reutilização pobre de cada componente[51]. Desde que as funcionalidades estejam relacionadas, como é o caso das interfaces fornecidas pelo componente *SistemaHidroeletrico* (Figura 7.60), *ISistHidroOperEnergRepIndiv* e *ISistHidroBaseDados*, há um número suficiente de recursos no componente implementado de forma que é viável reutilizá-lo. A incorporação das várias classes constituintes do componente de software *SistemaHidroeletrico* é feita pela inclusão de suas definições[52] (*#include "UnitUsinaHidroeletrica.h" #include "UnitUsinaFioDaAgua.h" #include "UnitUsinaReservatorio.h"*) em seu código C++ (Figura 7.66).

```
// UnitSistemaHidroeletrico.h
#ifndef UnitSistemaHidroeletricoH
#define UnitSistemaHidroeletricoH
#include "UnitUsinaHidroeletrica.h"
#include "UnitUsinaFioDaAgua.h"
#include "UnitUsinaReservatorio.h"
#include "stddef.h"
//---------------------------------------------------------------------------
class SistemaHidroeletrico
{
 private:
  vector<UsinaHidroeletrica*> conjUsinasHidroeletricas;
  int numeroUsinasHidroeletricas;
  double potenciaInstalada;
  double potenciaTotalASerInstalada;
  void atualizaNumeroUsinasHidroeletricas();
  void atualizaPotenciaInstalada(UsinaHidroeletrica *paramUsinaHidroeletrica);
 protected:

 public:
  SistemaHidroeletrico();
  ~SistemaHidroeletrico();
  void adicionaUsinaHidroeletrica(UsinaHidroeletrica *paramUsinaHidroeletrica);
  void setGrauPolinomios(int paramIdUsinaNoSistemaHidroeletrico, int paramGrau);
  void setIdentificacao(int paramIdUsinaNoSistemaHidroeletrico, String paramIdSubSistemaSIN, String paramIdAgente, String paramIdMa
  void getParamIdentificacao(int paramIdUsinaNoSistemaHidroeletrico, String *paramIdSubSistemaSIN, String *paramIdAgente, String *p
  void setCaracteristicasEnergeticas(int paramIdUsinaNoSistemaHidroeletrico, double paramEnergiaFirme, double paramEnergiaMedia, do
  void setInformacoesCascataSistemaHidroeletrico(int paramIdUsinaNoSistemaHidroeletrico, int paramId, boolean paramUsinaComEfeitoRe
  void setCaracteristicasHidrologicas(int paramIdUsinaNoSistemaHidroeletrico, double *paramCoeficientesMensaisEvaporacao);
  void setPolinomioNivelJusante(int paramIdUsinaNoSistemaHidroeletrico, double paramNivelReferencia, double *paramCoeficientesPolin
  void setPolinomioAreaEspelhoDaAgua(int paramIdUsinaNoSistemaHidroeletrico, double *paramCoeficientesPolinomioAreaEspelhoDaAgua);
  double obterNivelMontante(int paramIdUsinaNoSistemaHidroeletrico, double paramVolume);
  double obterNivelJusante(int paramIdUsinaNoSistemaHidroeletrico, double paramVazaoDefluente, double paramVolumeReservatorioImedia
```

Figura 7.66: Código-fonte do cabeçalho (*header*) da classe *SistemaHidroeletrico*.

7.4.2 Herança

A herança é um aspecto fundamental da programação orientada a objetos, porque permite que os objetos herdem atributos e comportamentos de outros objetos (por algo que os programadores

[51] Além do mais, pode-se ressaltar que quanto mais funcionalidades forem delegadas a outros componentes, maiores serão as dependências (acoplamentos), dificultando a utilização.

[52] Ou especificações.

chamam de relacionamento "é um"), reduzindo assim o volume de código novo que deve ser projetado, escrito e testado cada vez que um novo programa é desenvolvido. Considere, por exemplo, o caso das usinas hidroelétricas a reservatório. Uma usina a reservatório tem comportamento distinto das usinas a fio d'água, com relação ao cálculo do nível de montante. Baseado nisso, pode-se admitir que o objeto referente a usinas hidroelétricas a reservatório (*UsinaReservatorio*) herde os atributos e os comportamentos do objeto usina hidroelétrica (*UsinaHidroeletrica*), que são comuns a todos os tipos de usinas hidroelétricas. A Figura 7.67 ilustra a definição do cabeçalho da classe *UsinaHidroeletrica*, enquanto a Figura 7.68 ilustra a implementação da herança da classe *UsinaHidroeletrica* pela classe *UsinaReservatorio* [53].

```
// UnitUsinaHidroeletrica.h
#ifndef UnitUsinaHidroeletricaH
#define UnitUsinaHidroeletricaH
#include "vector.h"
#include "UnitPolinomioJusante.h"
#include "UnitPolinomioAreaEspelhoDaAgua.h"
#include "UnitCasaMaquinas.h"
#include "UnitCatalogoDescTurbinaHidraulica.h"
#include "UnitOperacoesPolinomios.h"
#include "UnitHistoricoMensalVazoesAfluentesNaturais.h"
//---------------------------------------------------------------------------
class UsinaHidroeletrica
{
 private:

 protected:
  /* Atributo para Guardar o valor do ID da Usina Hidroelétrica em um Sistema
     Hidroelétrico de Geração Específico*/
  int idNoSistemaHidroeletrico;
  // Atributos Meramente Informativos
  String nomeUHE;
  String codigoUHE;
  String idSubSistemaSIN;
  String idAgente;
  String idManancialHidrico;
  String idUsinaJusanteCascataNatural;
  String latitude;
  String longitude;
  String inicioOperacao;
  String inicioEnchimentoReservatorio;
  String terminoEnchimentoReservatorio;
  double energiaFirme;
  double energiaMedia;
```

Figura 7.67: Código-fonte do cabeçalho (*header*) da classe *UsinaHidroeletrica*.

Dessa forma, durante a implementação do objeto usina hidroelétrica a reservatório precisou-se apenas concentração na definição dos atributos e dos comportamentos referentes a esse objeto específico, sem ter que redefinir as características do objeto usina hidroelétrica. A herança permite que o controle sobre o desenvolvimento e a manutenção dos objetos seja distribuído. Por exemplo, um programador poderia ter sido responsável pela criação e pela manutenção do objeto usina hidroelétrica. Outro programador poderia ter sido responsável pelo desenvolvimento e pela

[53] A sintaxe da herança em C++ requer o operador ":" (dois pontos) como elo entre as duas classes. Este operador promove o "parentesco" entre as duas classes quando é usado na declaração de uma classe derivada.

```
//---------------------------------------------------------------------------
// UnitUsinaReservatorio.h
#ifndef UnitUsinaReservatorioH
#define UnitUsinaReservatorioH
#include "UnitUsinaHidroeletrica.h"
#include "UnitPolinomioMontante.h"
//---------------------------------------------------------------------------
class UsinaReservatorio : public UsinaHidroeletrica
{
 private:
  double volumeMinimoOperativo;
  double volumeMaximoOperativo;
  double volumeUtil;
  PolinomioMontante *polinomioMontante;
 protected:

 public:
  UsinaReservatorio();
  ~UsinaReservatorio();
  void setCaracteristicasFisicas(double paramVolumeMorto, double paramVolumeMinimoOperativo, double paramVolumeMaximoOperativo, do
  void getCaracteristicasFisicas(double *paramVolumeMorto, double *paramVolumeMinimoOperativo, double *paramVolumeMaximoOperativo,
  void calcularVolumeSeguranca();
  void calcularVolumeUtil();
  void setPolinomioNivelMontante(double *paramCoeficientesPolinomioMontante);
  void getPolinomioNivelMontante(double *paramCoeficientesPolinomioMontante);
  double obterNivelMontante(double paramVolume);
  double obterProdutividadeMediaIndividual(double paramVolume, double paramVolumeMinimoOperativo);
  double obterDerivadaNivelMontante(double paramVolume);
  double getVolumeMinimoOperativo();
  double getVolumeMaximoOperativo();
};
#endif
```

Figura 7.68: Código-fonte do cabeçalho (*header*) da classe *UsinaReservatorio*.

manutenção do objeto usina hidroelétrica a reservatório. Sempre que ocorresse alguma mudança afetando todas as usinas hidroelétricas, a modificação correspondente seria feita no objeto usina hidroelétrica e subsequentemente herdada pelo objeto usina hidroelétrica a reservatório e usina hidroelétrica a fio d' água. Somente o programador, responsável pelo objeto usina hidroelétrica, teria que lidar com essas alterações, porque o objeto usina hidroelétrica a reservatório herda todas as mudanças introduzidas no objeto usina hidroelétrica.

7.4.3 Encapsulamento

No mundo real, os objetos, os seus comportamentos e os seus atributos são agrupados. Por exemplo, não se pode calcular o nível de montante ou a altura de queda líquida se o objeto for uma usina termoelétrica. Certos cuidados são adotados para impedir que um objeto que não seja uma usina hidroelétrica receba um polinômio nível de jusante, ou chame um procedimento (método ou função) para o cálculo do engolimento máximo. Isso decorre porque os atributos de uma usina hidroelétrica e seus comportamentos são agrupados e associados à própria usina. Se o objeto não for uma usina hidroelétrica, não terá como executar os comportamentos (operações) de uma usina hidroelétrica.

Numa linguagem procedural de programação, não existe nenhuma maneira de forçar uma associação entre atributos e operações, o que pode levar à utilização inadequada da operação pela equipe de desenvolvimento. Já as linguagens de programação orientadas a objetos permitem que o programador encapsule os atributos e os comportamentos e os associe a um objeto. Isso ajudou a reduzir significativamente a possibilidade de uso equivocado dos atributos e das operações no programa computacional do planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos.

O encapsulamento é, então, uma técnica para integração de atributos e operações para compor um objeto. A única maneira de acessar esses atributos e operações é criar uma instância do objeto em questão. Além do mais, o encapsulamento permite ao programador implementar um sistema de restrições e verificações colocando os atributos e os procedimentos dentro de uma classe e definindo regras dentro da própria classe para controlar o acesso a eles.

7.4.4 Polimorfismo

Polimorfismo é a habilidade pela qual uma única operação ou nome de atributo pode ser definido em mais de uma classe e assumir implementações diferentes em cada uma dessas classes [154]. Assim sendo, polimorfismo pode ser entendido como a competência que alguma coisa tem para assumir diferentes formas. Em termos de programação, a "coisa" é, principalmente, o nome do método (operação) e a "forma" é o comportamento executado pelo método.

Um exemplo relevante de polimorfismo nos modelos computacionais relativos ao planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos é o método para calcular o nível de montante (*obterNivelMontante()*) presente nas classes usina hidroelétrica a reservatório (Figura 7.69) e usina hidroelétrica a fio d'água (Figura 7.70)[54].

O polimorfismo, nesse caso, refere-se à existência de dois itens com o mesmo nome que realizam a mesma tarefa (determinar o nível de montante do reservatório da usina) embora apresentem diferenças internas no tocante à implementação (corpo da função/método[55]). Para evidenciar um pouco mais a utilidade do polimorfismo na implementação computacional, supõe-se que nomes diferentes tivessem sido utilizados para designar o método relativo à obtenção do nível de montante em cada classe - por exemplo, *obterNivelMontanteReservatorio()* e *obterNivel-*

[54]Uma usina a reservatório tem seu nível de montante obtido pelo cálculo do polinômio nível de montante, já que o nível de montante é função do volume armazenado em seu reservatório. Já a usina a fio d'água, como não passa por variações significativas do seu volume armazenado, pode simplesmente armazenar o seu nível de montante e retorná-lo quando necessário.

[55]O corpo de um método/função contém uma ou mais instruções que são executadas quando o método é acionado (invocado).

```
//---------------------------------------------------------------------------
void UsinaReservatorio::setPolinomioNivelMontante(double *paramCoeficientesPolinomioMontante)
{
 polinomioMontante = new PolinomioMontante(grauPolinomios,paramCoeficientesPolinomioMontante);
}
//---------------------------------------------------------------------------
void UsinaReservatorio::getPolinomioNivelMontante(double *paramCoeficientesPolinomioMontante)
{
 polinomioMontante->getCoeficientes(paramCoeficientesPolinomioMontante);
}
//---------------------------------------------------------------------------
double UsinaReservatorio::obterNivelMontante(double paramVolume)
{
 return (polinomioMontante->obterValorPolinomio(paramVolume));
}
//---------------------------------------------------------------------------
```

Figura 7.69: Código-fonte da implementação do método (*obterNivelMontante*) na classe *UsinaReservatorio*.

```
//---------------------------------------------------------------------------
void UsinaFioDaAgua::getCaracteristicasFisicas(double *paramVolumeMorto, double *paramVolumeOperativo, double *paramNivelMontante,
{
 *paramVolumeMorto = volumeMorto;
 *paramVolumeOperativo = volumeOperativo;
 *paramNivelMontante = nivelMontante;
 *paramVolumeMaximoMaximorum = volumeMaximoMaximorum;
 *paramVazaoDefluenteMinima = vazaoDefluenteMinima;
 *paramNivelMedioJusante = nivelMedioJusante;
 *paramTipoPerdaDeCarga = tipoPerdaCargaHidraulica;
 *paramCoeficientePerdaCargaAlturaQueda = coeficientePerdaCargaAlturaQueda;
 *paramCoeficientePerdaCargaConstante = coeficientePerdaCargaConstante;
 *paramCoeficientePerdaCargaVazaoTurbinada = coeficientePerdaCargaVazaoTurbinada;
}
//---------------------------------------------------------------------------
double UsinaFioDaAgua::obterNivelMontante(double paramVolume)
{
 return nivelMontante;
}
//---------------------------------------------------------------------------
void UsinaFioDaAgua::calcularVolumeSeguranca()
{
 volumeSeguranca = (volumeMaximoMaximorum - volumeOperativo);
}
//---------------------------------------------------------------------------
```

Figura 7.70: Código-fonte da implementação do método (*obterNivelMontante*) na classe *UsinaFioDaAgua*.

MontanteFioDaAgua(). O programador que quisesse usar essas classes teria que memorizar o nome de cada método para cada objeto. Deduz-se, rapidamente, que isso poderia se tornar um grande desafio na programação, particularmente se cada classe tiver muitos métodos. Dessa forma, para evitar problemas com a profusão de métodos, utilizou-se, na implementação dos modelos computacionais o polimorfismo. Para as classes supracitadas, por exemplo, foi definido um método em cada uma, sempre com o mesmo nome, para executar comportamentos semelhantes. Com isso, durante a programação, só houve a necessidade de recordar um nome associado a cada comportamento.

7.5 Desenvolvimento Baseado em Componentes *versus* Desenvolvimento Orientado a Objetos

Conforme apresentado no Capítulo 1, o autor deste trabalho aplicou inicialmente o desenvolvimento orientado a objetos para o desenvolvimento dos modelos computacionais do planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração, especificamente, o modelo de otimização [134, 135, 136]. Esta seção visa apresentar algumas comparações entre o desenvolvimento orientado a objetos e o desenvolvimento baseado em componentes quando aplicados aos modelos computacionais desenvolvidos neste trabalho. Para isto, foram selecionados alguns tópicos para nortear a comparação entre o desenvolvimento O.O. e o D.B.C.

- Gerenciamento de complexidade: componentes de software são significativamente maiores do que objetos, com mais funcionalidade [170]. Um componente de software como *SistemaHidroeletrico* empacota várias classes de objetos (*CasaDeMaquinas*, *ConjUnidadesGeradoras*, *UsinaHidroeletrica*, *PolinomioJusante*, etc.). Isso é relevante no processo de desenvolvimento, devido aos componentes serem entidades "independentes", assim eles precisam ser empacotados com qualquer elemento de software que não é fornecido pelo ambiente da aplicação. Desta forma, os componentes podem ser implantados como entidades executáveis independentes. Adicionalmente, componentes são unidades de software auto-contidas, dessa forma não interferem na operação uns dos outros. Detalhes da implementação são ocultados, de maneira que a implementação do componente pode ser mudada sem afetar o restante do sistema. Com isso, o usuário e até mesmo o montador da aplicação não precisa se preocupar com a implementação do componente, nem em conhecer a linguagem de programação utilizada no seu desenvolvimento. Objetos geralmente são pequenos e especializados demais para uma aplicação. No desenvolvimento O.O. foi necessário o fornecimento do código-fonte de todas as classes que compõem os componentes de software da aplicação, de forma a serem compilados e ligados para formar a aplicação resultante. Portanto, o desenvolvimento O.O. pôde ser considerado mais complexo, pois todas as dependências entre as classes constituintes dos componentes de software tiveram de ser explicitamente consideradas. Ao lidar com um número reduzido de elementos de software de cada vez (os componentes), o número de dependências entre esses elementos é mais reduzido, e com isso o D.B.C permitiu um melhor gerenciamento da complexidade do sistema, de forma a reduzir os riscos de desenvolvimento. Além do mais, as classes de objetos precisam seguir as regras de uma linguagem de programação orientada a objetos

específica (no caso, foi utilizada a linguagem C++ [171]) e, geralmente, podem somente operar com outras classes da mesma linguagem. Já os componentes poderiam ser implementados em qualquer linguagem de programação e poderiam ser utilizados em qualquer aplicação, independentemente da linguagem utilizada;

- Custo e tempo de desenvolvimento: como os componentes de software são maiores do que objetos ou procedimentos individuais, o desenvolvimento da aplicação por meio de componentes de software só precisou considerar um número menor de elementos de software e de dependências entre esses elementos, resultando em uma redução do custo e tempo de desenvolvimento. Como exemplo, ao se expandir a aplicação O.O. para incluir o modelo de simulação da operação energética, inicialmente composta somente pelo modelo de otimização da operação energética, foi necessária a disponibilização do código-fonte de todas as 24 classes, além da informação de dependência entre todas elas para assim realizar-se a compilação e ligação da aplicação. Com o D.B.C., foram necessários menos elementos de software (no caso 5 componentes, os quais empacotam um grande número de classes), o que facilitou a compreensão, o uso e a integração (montagem) da aplicação final. Assim, os benefícios da reutilização de software podem ser melhor obtidos por meio de artefatos reutilizáveis de maior granularidade. Deve-se observar que o fato de um componente ser reutilizável depende do seu domínio de aplicação e funcionalidade. Se o componente implementa uma ou mais abstrações estáveis de domínio, como sistema hidroelétrico, horizonte de planejamento e política de operação energética, ele provavelmente pode ser reutilizado várias vezes, pois ele representa conceitos fundamentais no domínio da aplicação. Isso aconteceu com o componente de software *SistemaHidroeletrico*, por exemplo, que pôde ser utilizado tanto nos modelos de otimização quanto nos de simulação. Além do mais, quando um componente de software torna-se mais genérico, sua reusabilidade é aumentada. Entretanto, isso implica que o componente de software tem mais operações que uma classe de objeto, e dessa forma, pode-se tornar mais complexo para compreensão e uso. Entretanto, com a divisão das operações em interfaces altamente coesas, obteve-se um compromisso entre a generalidade e a facilidade de compreensão e uso;

- Desenvolvimento paralelo: com a decomposição do domínio e da aplicação em elementos de maior granularidade, permitiu-se a definição de componentes de software que podem ser especificados, implementados e testados de forma independente e paralela. Com o desenvolvimento O.O. as classes *PolinomioJusante*, *PolinomioMontante* e *PolinomioAreaEspel-*

hoDaAgua só puderam ser implementadas e testadas após o desenvolvimento da classe-base *Polinomio.* O mesmo fato ocorreu para as classes *UsinaFioDaAgua* e *UsinaReservatorio* que só puderam ser implementadas após a implementação da classe *UsinaHidroeletrica.* Como os componentes implementados empacotam essas classes, após o provisionamento dos componentes, eles puderam ser integrados simultaneamente na aplicação, implicando em um desenvolvimento paralelo;

- Aumento da qualidade: a reutilização leva ao aumento da qualidade dos componentes, uma vez que eles possuem uma granularidade relevante para o domínio da aplicação e devem ter sido previamente utilizados e testados em outras aplicações. Como exemplo, tem-se o componente de software *SistemaFuzzy* que, antes de ser utilizado nos modelos computacionais de otimização e de simulação, foi aplicado em vários outros trabalhos do autor. Assim, este elemento de software foi se tornando mais confiável do que se fosse construída uma nova unidade de software para implementar os modelos de inferência *fuzzy.* A maior confiabilidade resulta do fato de que os problemas e defeitos do software reutilizado foram sendo encontrados e corrigidos durante sua utilização em outros sistemas;

- Evolução de software: a manutenção de sistemas é um processo inevitável [78, 79, 80, 81]. Após o software ser colocado em uso, novos requisitos surgem e os requisitos existentes mudam. Partes do software podem ser modificadas para corrigir erros descobertos durante sua operação, para adaptá-lo a uma nova plataforma e para aprimorar seu desempenho e outras características não funcionais. Portanto, o desenvolvimento de software não pára quando um sistema é entregue para operação, mas prossegue ao longo do ciclo de vida do sistema [170]. O fato dos modelos de otimização e de simulação terem sido construídos a partir de componentes de software facilitou a localização de modificações e atualizações. Em razão do menor número de elementos de software, a evolução do software vem sendo feita de forma mais amigável e simples, pois menos questões de dependência (associações, relacionamentos) entre os elementos precisam ser inspecionadas. Para exemplificar a facilidade de evolução do software, durante as aplicações do modelo de simulação (Capítulo 8) foi necessária a incorporação de uma política de operação baseada em aproximações funcionais, utilizando funções polinomiais e exponenciais. Entretanto, este requisito foi implementado de uma forma suave, pois somente modificou-se a interface *IPoliticaOperacaoEnergetica*, inserindo-lhe a operação *regraBFPE().* Nenhuma outra interface ou componente de software precisou ser modificado para englobar este novo requisito. Adicionalmente, um

componente de software tem dois tipos de contrato: uso e realização. Esses dois tipos de contrato correspondem à separação entre a especificação para um usuário do componente e para o implementador. Assim, com essa separação, a manutenção do software vem sendo facilitada, visto que as modificações na implementação não afetam os usuários dos componentes fornecidos. Além do mais, com a adoção das camadas arquiteturais (Figura 6.3), os componentes da aplicação estão organizados em camadas hierárquicas. Cada camada provê serviços para a camada acima, e solicita serviços da camada abaixo. Com essa estruturação, torna-se mais fácil localizar, adaptar, evoluir e corrigir os serviços providos pela aplicação. Assim, a adoção das camadas arquiteturais favorece a manutenção e facilita a escalabilidade.

Como vantagem adicional do D.B.C., é possível integrar e implantar os componentes de software sem precisar usar componentes específicos. Caso o componente solicite serviços fornecidos externamente, esses serviços devem ser explicitamente definidos por uma especificação de interface requerida. Entretanto, esse fato não compromete a independência ou a facilidade de implantação do componente, porque não é necessário que um componente específico seja usado para fornecer os serviços. Qualquer componente de software que forneça a interface requerida pode ser utilizado. Com o desenvolvimento O.O., tal facilidade não pôde ser obtida. Um conhecimento detalhado das classes é exigido, assim, não é qualquer classe que pode ser utilizada para fornecer os serviços requeridos.

7.6 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada a aplicação do UML *Components* no desenvolvimento dos modelos computacionais para a otimização e simulação da operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração. Os fluxos de trabalho dos requisitos e da especificação foram apresentados, e mostrou-se como eles guiaram o processo de desenvolvimento como um todo. Os artefatos produzidos também foram ilustrados, seguindo a notação da UML. A evolução dos artefatos, nos vários estágios dos fluxos de trabalho, foi realçada, de modo a ilustrar o aprimoramento resultante provido em cada estágio dos fluxos de trabalho. Com a especificação concluída, alguns comentários sobre a implementação dos componentes são apresentados. O capítulo foi finalizado enfatizando uma comparação entre a modelagem orientada a objetos e a modelagem baseada em componentes aplicada ao desenvolvimento dos modelos computacionais relativos ao planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração. Com isso, o leitor

pode evidenciar as vantagens do desenvolvimento baseado em componentes quando comparado ao desenvolvimento orientado a objetos.

O próximo capítulo ilustra a aplicação dos modelos computacionais de otimização e de simulação da operação energética, de forma a apresentar os resultados obtidos e avaliar os modelos propostos.

Capítulo 8

Aplicações dos Modelos de Otimização e Simulação da Operação Energética

8.1 Considerações Iniciais

O fornecimento confiável e econômico da energia elétrica leva à necessidade de estudos cuidadosos para o funcionamento adequado dos sistemas elétricos de potência. Entre os vários tipos de estudos necessários para o atendimento dos requisitos de energia do sistema, pode-se citar a otimização e a simulação da operação energética do sistema de geração. Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados obtidos pela aplicação (estudos) dos modelos de otimização e de simulação da operação energética especificados e implementados neste trabalho.

O modelo de otimização do MCSOOESH é inicialmente analisado, de forma comparativa, com alguns importantes resultados já mencionados na literatura ([20, 21, 22, 151, 161, 167, 168]), no tocante ao comportamento otimizado do sistema hidroelétrico para a geração de energia elétrica. Desta forma, pretende-se avaliar o modelo de otimização por meio de características relevantes da operação otimizada dos reservatórios. Paralelamente, alguns resultados adicionais são encontrados e comentados, o que vem a fortalecer a importância do desenvolvimento do modelo, a fim de permitir que vários estudos possam ser executados. Em seguida, o modelo de otimização do MCSOOESH é avaliado comparativamente com o módulo de otimização HydroMax do programa de suporte à decisão HydroLab [32] de forma a verificar a qualidade das soluções do modelo quando confrontadas com uma ferramenta que segue a mesma abordagem de representação individualizada das usinas hidroelétricas e que encontra-se com seu uso bem estabelecido por

algumas empresas e institutos de pesquisa do setor elétrico brasileiro. O programa Hydrolab é definido como um sistema de suporte à decisão para o planejamento e programação da operação de sistemas hidrotérmicos. O termo suporte à decisão é devido à característica que o sistema tem em gerenciar um conjunto de modelos de otimização, previsão e simulação. O programa possui recursos computacionais avançados, integrados a uma interface amigável, robusta e eficiente, que permite atingir um alto nível de produtividade nos estudos de planejamento e programação. O projeto e implementação do Hydrolab seguem o paradigma de programação orientada a objetos. O Hydrolab resume em um sistema computacional a experiência de duas décadas do grupo de pesquisas em planejamento de sistemas elétricos da Faculdade de Engenharia e Computação da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

O modelo de simulação do MCSOOESH é avaliado por meio de estudos para comparar o desempenho da política de operação energética, baseada em um sistema de inferência *fuzzy*[1], com a política de operação em paralelo. Em alguns estudos realizados pelo modelo de simulação, emprega-se também a política de operação implementada por [17, 72], aqui denominada política baseada em funções polinomiais e exponenciais (PBFPE), além da política de operação em paralelo, para comparar com a política proposta. Para finalizar a ilustração das aplicações dos modelos, apresenta-se o tempo computacional envolvido na execução de algumas otimizações e simulações da operação energética.

Portanto, por meio dos vários estudos executados, pretende-se avaliar os modelos especificados e implementados segundo a abordagem de componentes de software, de modo que estes modelos possam ser testados e potencialmente aplicados para o planejamento da operação energética do sistema hidrotérmico brasileiro.

8.2 Condições de Operação Energética

Apresenta-se a seguir, as condições de operação energética envolvidas nos estudos de caso da otimização e da simulação[2].

[1] PBSIF - Política Baseada em Sistema de Inferência *Fuzzy*.

[2] As condições citadas a seguir referem-se a maioria dos estudos realizados. Quando as condições divergirem das especificadas, serão explicitadas.

Sistema Hidroelétrico

O sistema hidroelétrico considerado nos estudos de caso é composto pelas usinas hidroelétricas do sistema sudeste brasileiro. Este conjunto de usinas pode ser considerado um sistema complexo, com usinas de grande porte, interligadas em paralelo e em cascata (Figura 8.1). Ressalta-se que, todos os estudos de caso que incluem as usinas de São Simão e Ilha Solteira levam em consideração o afogamento do canal de fuga de São Simão pelo reservatório de Ilha Solteira. Desta forma, o nível de jusante de São Simão é função da sua vazão defluente e do nível de montante do reservatório de Ilha Solteira.

Figura 8.1: Sistema hidroelétrico composto pelas usinas do sistema sudeste brasileiro.

Horizonte de Planejamento

Nos estudos de caso, adotou-se o horizonte de planejamento de cinco anos, com discretização mensal de seus intervalos. Ressalta-se que, salvo menção em contrário, em todas as otimizações e simulações da operação energética realizadas, adotou-se o mês de maio (início do período seco para a bacia hidrográfica do sistema sudeste) como o mês de início de todos os horizontes de

planejamento. Nos estudos de otimização, a taxa de juros nominal a ser utilizada no cálculo do coeficiente de valor presente foi considerada de 10% ao ano.

Vazões Afluentes Naturais

A fim de ilustrar a forte variabilidade das vazões afluentes naturais, as Figuras 8.2 e 8.3 ilustram as trajetórias obtidas do histórico (1931-2005) de vazões afluentes naturais com discretização mensal relativas às usinas de São Simão e Ilha Solteira. Ressalta-se que a apresentação das trajetórias enfatiza a disponibilidade irregular dos recursos hidroelétricos de geração na sua forma natural.

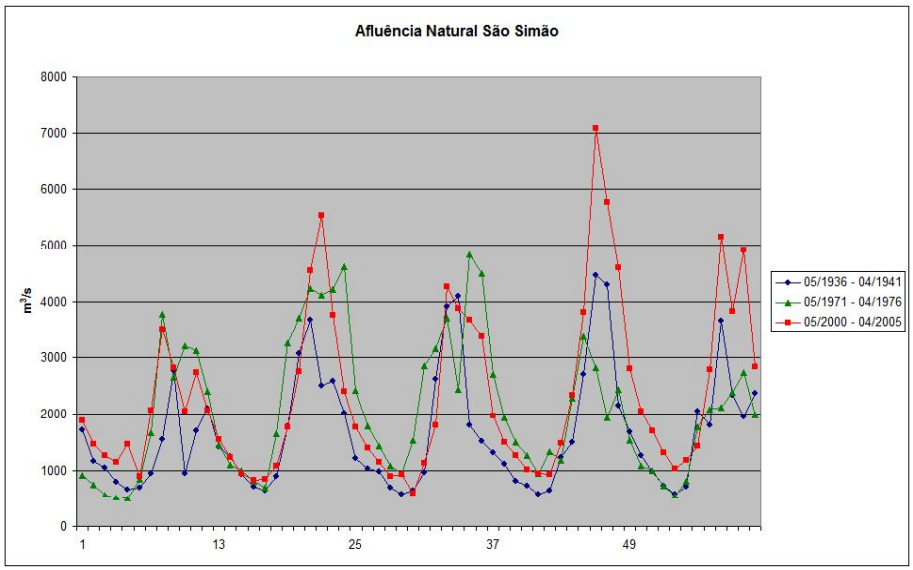

Figura 8.2: Algumas trajetórias de vazões afluentes naturais relativas a usina de São Simão.

Mercado de Energia Elétrica

Em alguns estudos de caso, considerou-se o mercado de energia elétrica constante e igual a capacidade instalada do sistema hidroelétrico. Nos outros, especialmente nos estudos relativos à simulação da operação energética, adotou-se um valor de mercado igual à geração hidráulica fornecida pelo modelo de otimização da operação energética (Figura 8.4), a fim de comparar-se a eficácia da política de operação paralela com a política de operação baseada em sistemas de inferência *fuzzy* e com relação à solução obtida pelo modelo de otimização da operação energética também (solução otimizada).

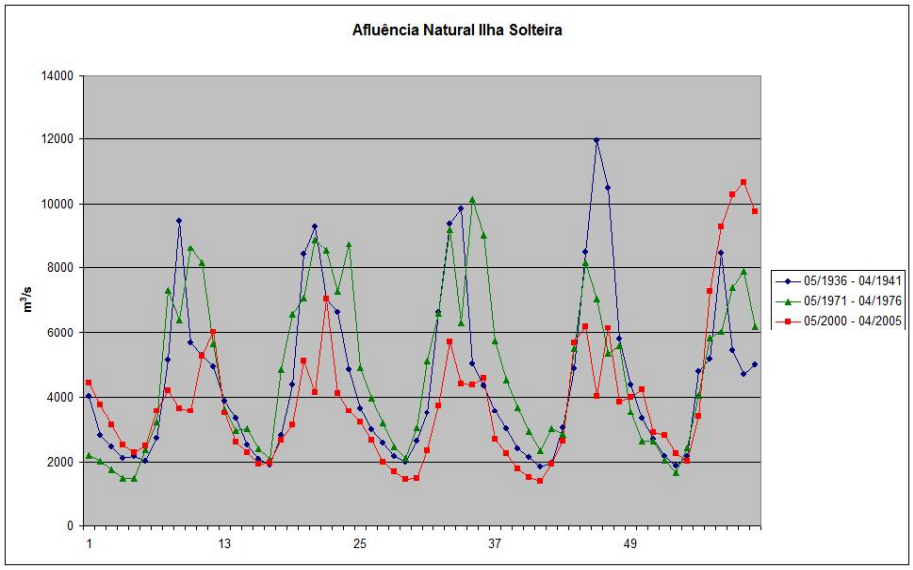

Figura 8.3: Algumas trajetórias de vazões afluentes naturais relativas a usina de Ilha Solteira.

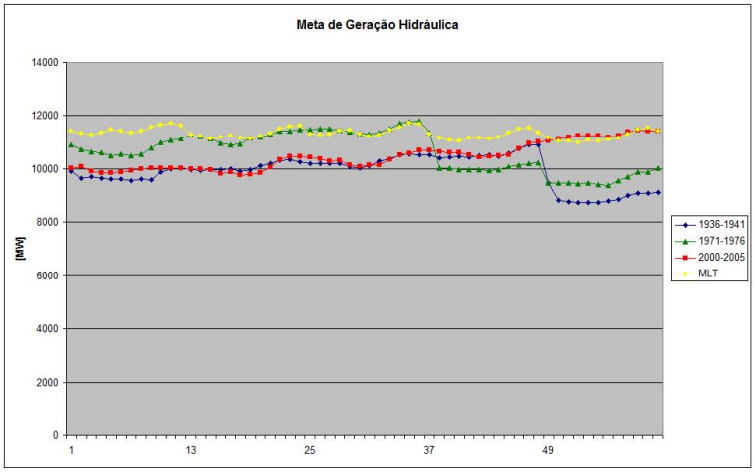

Figura 8.4: Metas de geração hidráulica fornecidas pelo modelo de otimização da operação energética para o sistema hidroelétrico do sistema sudeste brasileiro composto pelas dezoito usinas a reservatório.

Restrições Operativas

As restrições operativas correspondem aos volumes mínimo e máximo operativos dos reservatórios, às vazões defluentes mínima e máxima[3] e à geração hidráulica mínima e máxima das usinas[4].

Volume Inicial

Considera-se, normalmente, o volume inicial nos reservatórios igual ao volume máximo operativo.

8.3 Otimização da Operação Energética

Para a avaliação do modelo de otimização da operação energética, foram realizados alguns estudos de caso, de forma a evidenciar alguns fatores que afetam o comportamento operativo otimizado dos reservatórios para a geração de energia elétrica [16, 22, 85, 139, 151, 167]. Os principais fatores considerados para a operação energética otimizada dos reservatórios são:

- Efeito cota: o efeito cota é muito importante na quase totalidade das usinas hidroelétricas brasileiras, e é um dos principais fatores que influenciam o comportamento otimizado dos reservatórios. Ele considera a influência do armazenamento dos reservatórios sobre a produtividade das usinas, procurando fazer com que os reservatórios elevem seu nível máximo de armazenamento nos intervalos iniciais, retendo água às custas de uma maior geração complementar. Com um nível elevado de armazenamento e como consequência uma elevada produtividade das usinas hidroelétricas, vai ser necessário uma menor participação da geração complementar no restante do horizonte de planejamento;

- Coeficiente de valor presente (taxa de desconto): a taxa de desconto implica em uma diminuição no custo da operação do sistema hidrotérmico dos intervalos futuros. Assim, quanto mais longe do início do horizonte de planejamento se localiza o custo futuro, menor é o seu valor presente. Isto resulta do fato de que o capital que seria gasto na geração

[3] O valor da vazão defluente mínima foi considerado como o menor valor encontrado no histórico das vazões afluentes naturais. O valor da vazão defluente máxima foi considerado igual a 1E20.

[4] O valor adotado para a geração hidráulica mínima foi considerado zero. O valor adotado para a geração hidráulica máxima foi considerado como o menor valor entre a potência instalada da usina e a sua geração hidráulica máxima contínua.

complementar, pode ser aplicado no mercado financeiro para render juros que irão reduzir o custo da operacão do sistema hidrotérmico. Portanto, torna-se mais interessante adiar a utilização da geração complementar, de forma a utilizá-la nos intervalos finais do horizonte de planejamento;

- Sazonalidade das vazões afluentes aos reservatórios: a existência de intervalos com baixos valores de vazões afluentes e intervalos com altos valores de vazões afluentes torna necessário a utilização de reservatórios para armazenar e regularizar as vazões afluentes dos intervalos úmidos para os intervalos secos. Desta forma, os reservatórios podem ser empregados para compensar e regularizar a variação sazonal das vazões afluentes, de forma a adequar o seu armazenamento às variações nos valores de vazões afluentes, para evitar vertimentos e escassez de recursos hidráulicos, durante todo o horizonte de planejamento;

- Posicionamento na cascata: as usinas hidroelétricas situadas em um sistema em cascata sofrem a influência da sua localização na cascata. Isto ocorre porque a energia obtida pela água armazenada no reservatório de uma usina depende não apenas das condições deste reservatório, mas também do volume armazenado nos reservatórios das usinas localizadas a sua jusante, porque esta água será valorizada em todas as usinas rio abaixo. Desta forma, a maneira de operar as usinas pode alterar substancialmente a geração hidráulica obtida de um sistema hidroelétrico, pois dependendo de como a água dos seus reservatórios for utilizada, obtém-se uma certa quantidade de energia elétrica gerada;

- Magnitude das vazões afluentes: dependendo dos valores das vazões afluentes, o sistema hidroelétrico poderá utilizar mais ou menos água na geração hidráulica, entretanto para isso, ele deve continuar a considerar a importância do efeito cota, dos vertimentos, da regularização das vazões para as usinas a sua jusante, do volume mínimo final especificado, etc.;

8.3.1 Sistema Teste de Uma Usina Hidroelétrica

As usinas de Emborcação e Itumbiara são empregadas para ilustrar os principais fatores que influenciam a operação energética otimizada dos reservatórios, de forma isolada.

O primeiro estudo de caso considera a importância relativa do efeito cota e da taxa de desconto. Para isto, o volume inicial dos reservatórios é estabelecido em 0%, e o volume final é fixado em 100%. Os valores das vazões afluentes correspondem à MMLT (média da MLT).

A partir da consideração do efeito cota e da taxa de desconto, quatro situações podem ser encontradas:

- Sem fatores: não considera-se a influência dos dois fatores;
- Taxa de desconto: considera-se somente a taxa de desconto;
- Efeito cota: considera-se exclusivamente o efeito cota;
- Efeito cota e taxa de desconto: considera-se os dois efeitos simultaneamente, de forma a verificar a importância relativa deles na operação energética otimizada dos reservatórios.

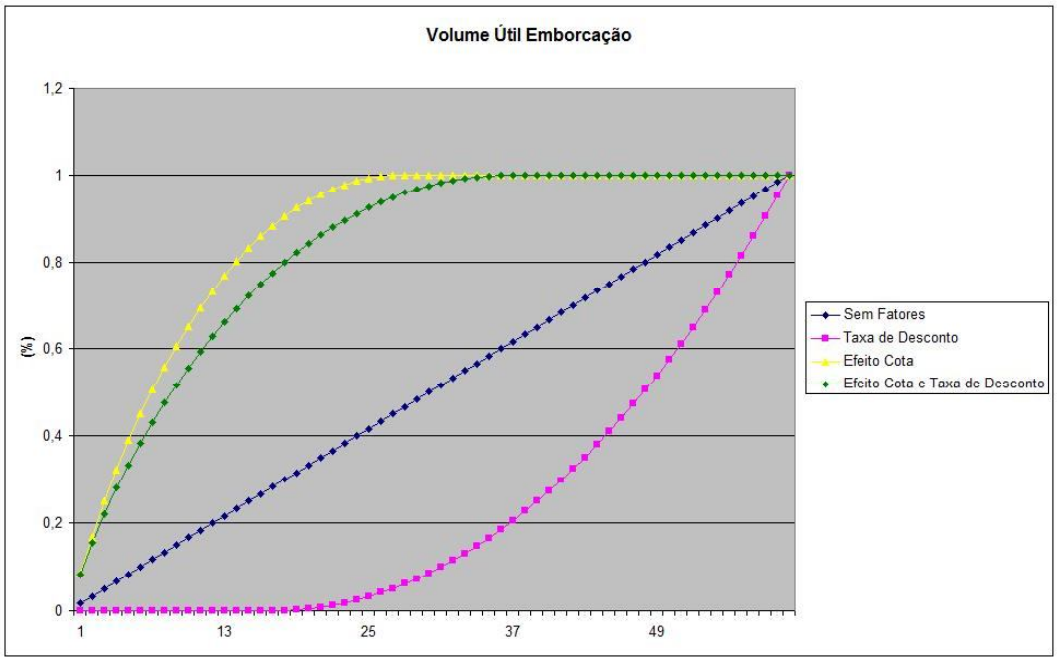

Figura 8.5: Trajetórias de volume para a usina de Emborcação (Enchimento).

Pelas Figuras 8.5, 8.6 e 8.7, pode-se perceber a influência do efeito cota e da taxa de desconto no comportamento otimizado dos reservatórios para a geração de energia elétrica. O efeito cota prioriza o enchimento imediato dos reservatórios, de forma que eles possam ser operados com produtividade máxima durante os intervalos restantes do horizonte de planejamento. Já a taxa de desconto prioriza a utilização da geração hidráulica nos primeiros intervalos, de forma a utilizar a remuneração do capital para diminuir o custo da operação nos intervalos finais do horizonte de planejamento. Na ausência destes dois fatores, o sistema comporta-se da maneira mais regular possível, com um enchimento, uma geração complementar e um custo de operação

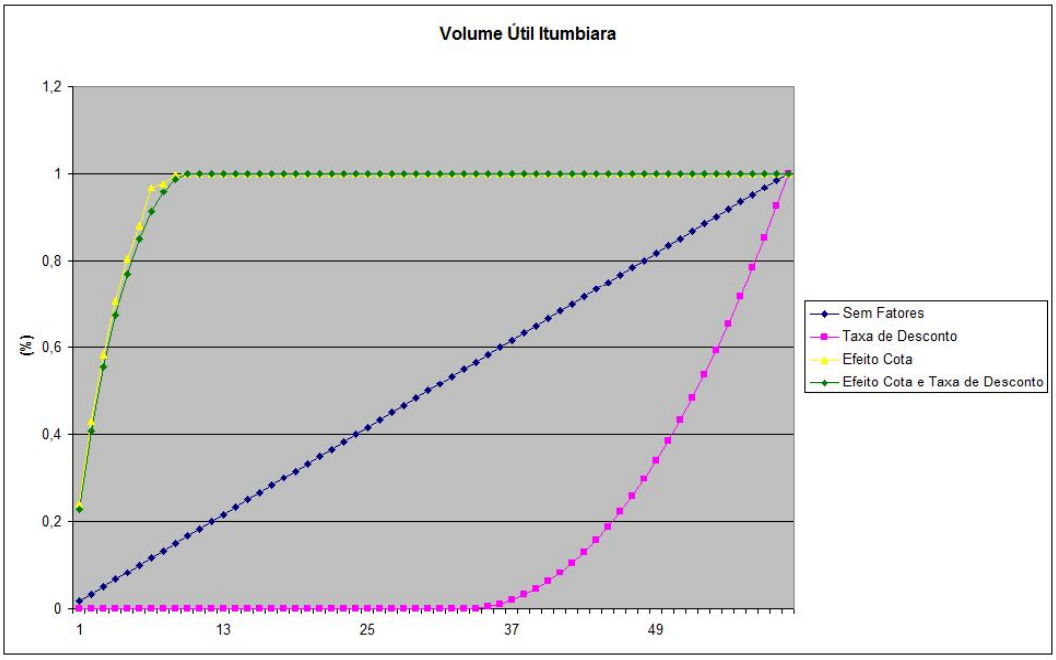

Figura 8.6: Trajetórias de volume para a usina de Itumbiara (Enchimento).

linear e constante. Quando colocados simultaneamente, percebe-se a maior influência do efeito cota em comparação à taxa de desconto. Outro resultado interessante a ser mencionado refere-se a magnitude das vazões afluentes para o enchimento das duas usinas hidroelétricas. Como os valores das vazões para a usina de Itumbiara são bem superiores aos valores das vazões para a usina de Emborcação, o enchimento do reservatório de Itumbiara, quando priorizado, foi realizado de forma bem mais rápida do que o enchimento do reservatório de Emborcação. Da mesma maneira, com o conhecimento dos altos valores de vazões afluentes para a usina de Itumbiara, a taxa de desconto pôde deixar para encher mais ao final do horizonte, quando comparado ao enchimento do reservatório de Emborcação. Ressalta-se que este estudo da magnitude das vazões afluentes só foi feito devido a algumas similaridades nas características físico-operativas das duas usinas. Estas características mencionadas podem ser também verificadas no processo de deplecionamento dos reservatórios (Figura 8.8).

O segundo estudo de caso considera a influência da sazonalidade das vazões afluentes aos reservatórios das usinas hidroelétricas. Para isto, considerou-se os volumes inicial e final do reservatório da usina de Itumbiara iguais a 100% de seu volume útil, com as vazões afluentes iguais a MLT e a MMLT. Desta forma, pode-se verificar a influência da disponibilidade irregular

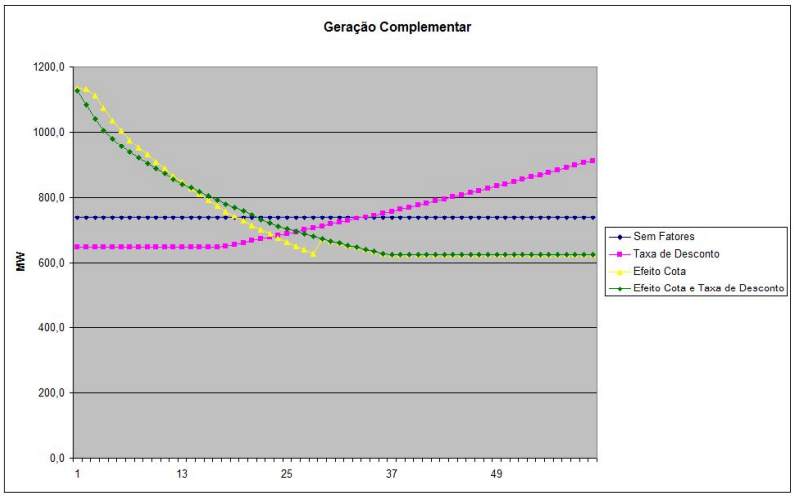

Figura 8.7: Trajetórias de geração complementar para a usina de Emborcação (Enchimento).

dos recursos hidroelétricos de geração (Figura 8.9).

Com a MMLT, o sistema pode ser operado com uma regularidade absoluta, visto que não há fatores que influenciariam sua saída deste modo de operação. Com a MLT, há um impacto da disponibilidade irregular das vazões afluentes no comportamento otimizado do reservatório, de forma que ele tenha que exercer o papel de regularizador de água do sistema. Para regularizar os altos valores das afluências, o reservatório diminui seu volume operativo antes do período cheio, de forma a receber estes valores, sem provocar vertimentos. Pode-se perceber, que ao fim do período hidrológico cheio, o reservatório encontra-se com seu nível máximo de armazenamento. Este nível máximo de armazenamento é responsável por uma alta produtividade a ser utilizada no período mais seco. Portanto, o deplecionamento do reservatório é feito na medida exata em que este esvaziamento possa ser recuperado no futuro e de forma a evitar vertimentos.

O último estudo de caso relativo ao comportamento das usinas isoladas ilustra a influência da sazonalidade das vazões afluentes, com a taxa de desconto e o efeito cota, além de uma liberdade de operação do reservatório, desde o início do horizonte de planejamento, para deplecionar ou encher. Para isto, considerou-se a vazão afluente igual a MLT, e os volumes inicial e final iguais a 60% do volume útil da usina de Itumbiara (Figura 8.10).

Este estudo de caso enfatiza novamente a relevância do efeito cota [167]. O efeito cota é responsável pela tendência conservativa da operação energética otimizada dos reservatórios, ou seja, ele procura maximizar o armazenamento dos reservatórios, de forma a conservar o

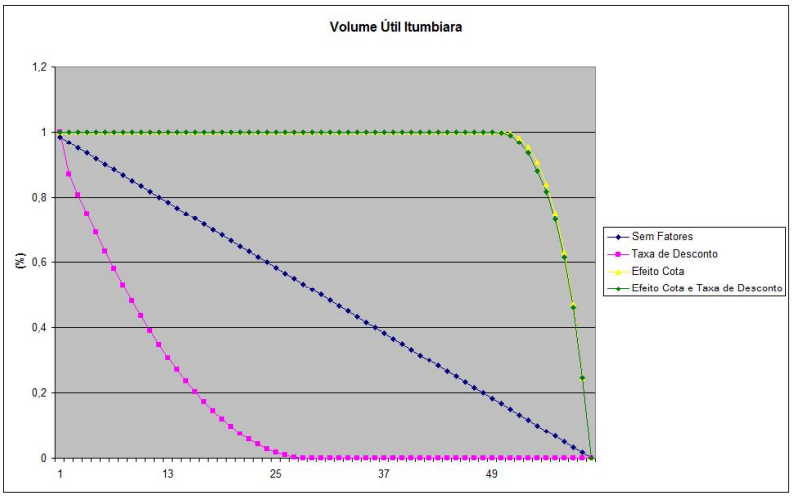

Figura 8.8: Trajetórias de volume para a usina de Itumbiara (Deplecionamento).

recurso hidroelétrico de geração, considerando a eliminação de vertimentos. Assim, em sistemas hidroelétricos com predominância do efeito cota, o objetivo da operação pode ser definido como a procura pelo volume máximo operativo dos reservatórios, o qual só é deixado parcialmente de lado, com a intenção de eliminar os vertimentos e com a certeza de recuperação do nível de armazenamento em função de um período hidrologicamente favorável no futuro.

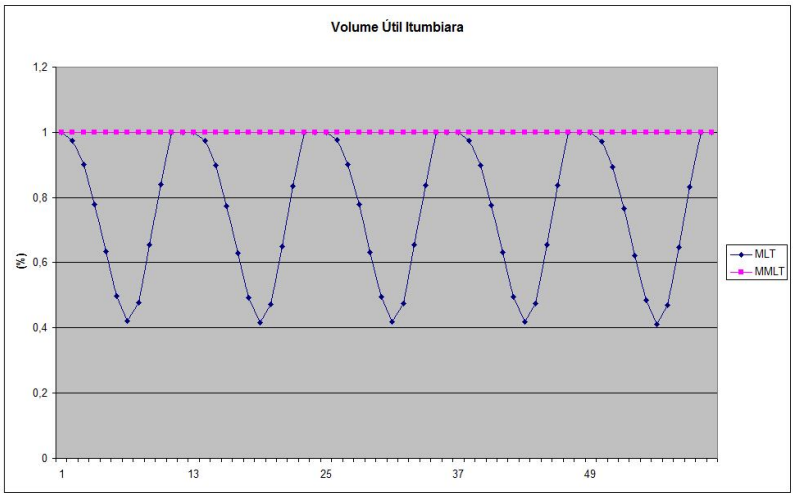

Figura 8.9: Trajetórias de volume para a usina de Itumbiara para diferentes valores de vazões afluentes (MLT e MMLT).

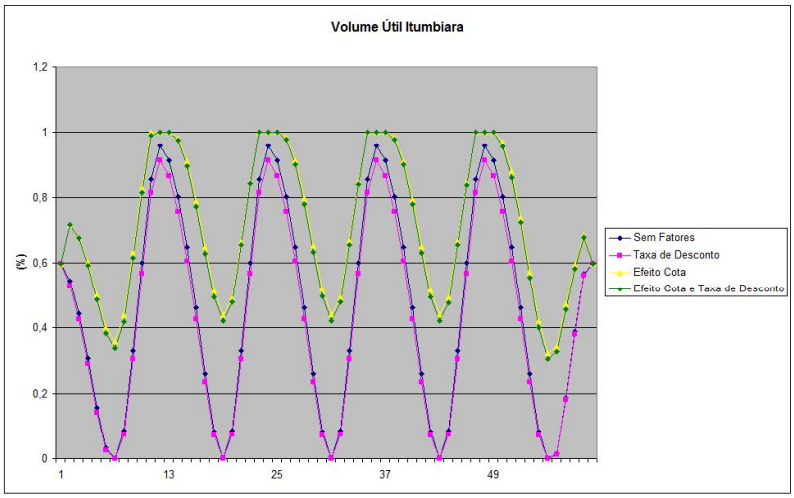

Figura 8.10: Trajetórias de volume para a usina de Itumbiara considerando taxa de desconto, sazonalidade das vazões, efeito cota e "liberdade de operação" inicial do volume armazenado no reservatório.

8.3.2 Sistema Teste de Duas Usinas Hidroelétricas

Os estudos de caso realizados com mais de uma usina hidroelétrica em cascata evidenciam a alteração no comportamento dos reservatórios, em função do seu posicionamento relativo na cascata, devido a operação das outras usinas.

O primeiro estudo de caso considera a operação das usinas de Emborcação e Itumbiara, com vazões afluentes iguais a MLT, e os volumes inicial e final iguais a 100% do volume útil (Figura 8.11).

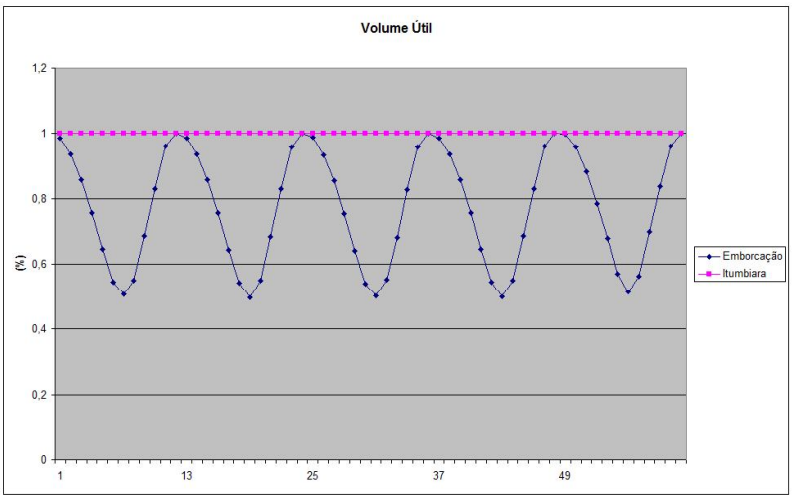

Figura 8.11: Trajetórias de volume das usinas de Emborcação e Itumbiara.

Pela Figura 8.11, pode-se perceber o comportamento diferenciado dos reservatórios na operação energética otimizada. A usina de montante (Emborcação) é responsável pela regularização das vazões afluentes, de forma a amortecer a sazonalidade das vazões, além de evitar vertimentos. Já a usina de jusante (Itumbiara) permanece cheia, mantendo uma alta produtividade, para valorizar toda a água do sistema, deixando a regularização para a usina de Emborcação. Portanto, a usina de Itumbiara é operada como se fosse uma usina a fio d'água, mantendo seu volume máximo operativo durante todo o horizonte de planejamento. Este comportamento confirma mais uma vez a influência do efeito cota, pois pode-se verificar que o deplecionamento no reservatório de Emborcação só é realizado para evitar vertimentos e regularizar as vazões afluentes, e que no final do período cheio, este reservatório recupera seu nível máximo de armazenamento.

Já a Figura 8.12, confirma tanto o comportamento diferenciado dos reservatórios em uma cascata, como o efeito cota. Este estudo de caso considerou a operação das usinas de Itumbiara

e São Simão, com vazões afluentes iguais a MLT, e os volumes inicial e final iguais a 100% do volume útil. Mais uma vez, a trajetória de volume da usina de montante foi diferente da trajetória de volume da usina de jusante. O reservatório de montante (Itumbiara) apresentou um esvaziamento mais severo em relação ao reservatório de jusante (São Simão). Entretanto, o reservatório da usina de jusante não foi operado como uma usina a fio d'água, o que parece contradizer o exemplo da Figura 8.11. O reservatório de jusante apresentou oscilação no seu volume operativo para evitar vertimentos durante o período cheio e para regularizar as vazões afluentes, pois conforme ilustrado pela Figura 8.13, o reservatório de São Simão recebe uma parcela muito alta de vazão afluente incremental quando comparado com a vazão incremental da usina de Itumbiara. Devido a incapacidade da usina de Itumbiara de regularizar toda a vazão afluente a usina de São Simão, esta precisou deplecionar seu reservatório, mas ambas as usinas apresentaram nível máximo de armazenamento ao final do período úmido. Assim, para evitar vertimentos e para regularizar as vazões afluentes, ambos os reservatórios foram deplecionados, o que caracterizou uma redução da energia armazenada no sistema. Adicionalmente, a baixa capacidade de engolimento efetivo da usina de São Simão comparada a valores de vazões afluentes da MLT que chegam ao seu reservatório indica uma submotorização da sua casa de máquinas (Figuras 8.14, 8.15 e 8.16). Ou seja, a menor capacidade de engolimento efetivo da usina de São Simão implica em um vertimento da parcela de vazão afluente que chega ao seu reservatório. Para atenuar este vertimento "obrigatório", o nível de armazenamento da usina de São Simão é significativamente reduzido, pois a única usina a sua montante, Itumbiara, não é capaz de regularizar suficientemente a vazão afluente de São Simão.

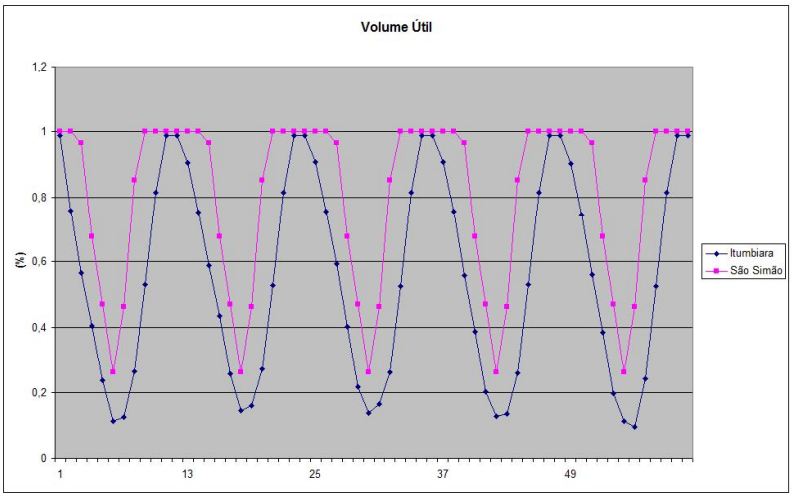

Figura 8.12: Trajetórias de volume das usinas de Itumbiara e São Simão.

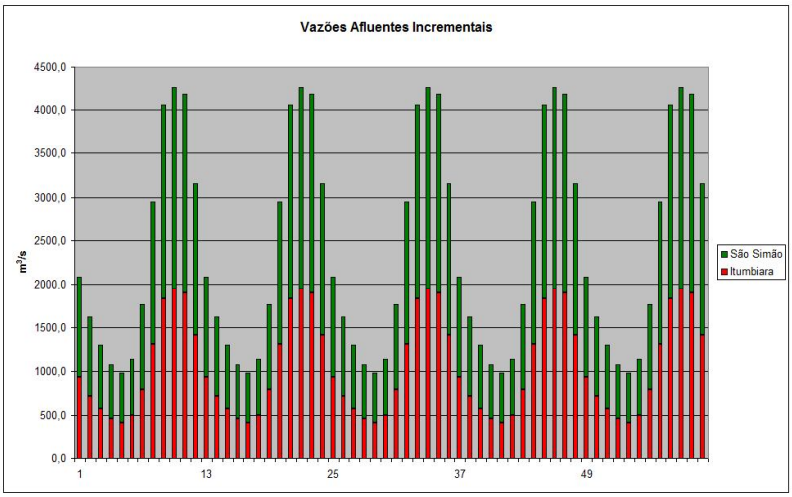

Figura 8.13: Comparativo das vazões afluentes incrementais à usina de Itumbiara e São Simão.

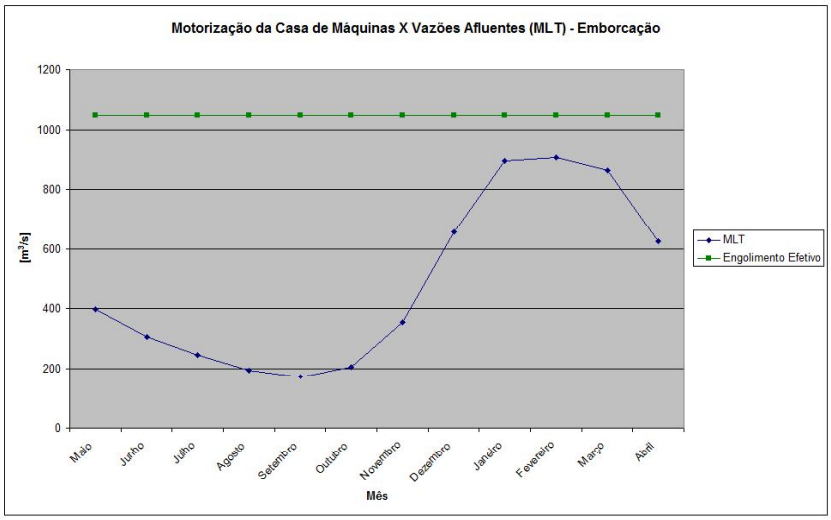

Figura 8.14: Motorização da casa de máquinas da usina de Emborcação em relação ao seu engolimento efetivo.

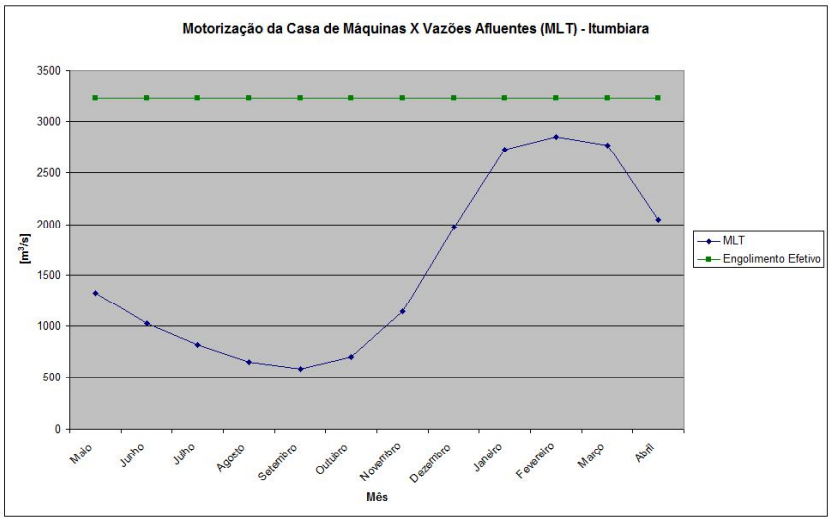

Figura 8.15: Motorização da casa de máquinas da usina de Itumbiara em relação ao seu engolimento efetivo.

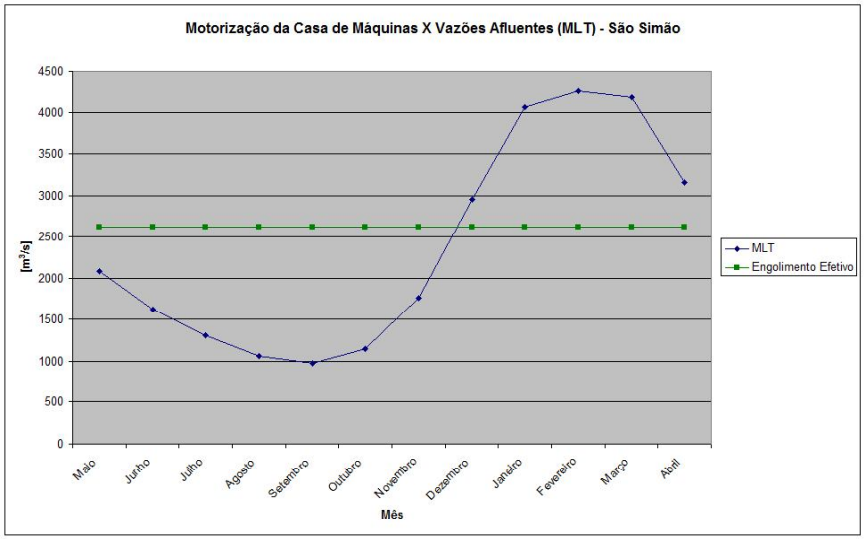

Figura 8.16: Motorização da casa de máquinas da usina de São Simão em relação ao seu engolimento efetivo.

8.3.3 Sistema Teste de Sete Usinas Hidroelétricas

O primeiro estudo de caso para o sistema de sete usinas hidroelétricas (Figura 5.1) considera a operação energética do sistema com vazões afluentes iguais a 80% da MLT e com volumes inicial e final iguais a 100%. A Figura 8.17 ilustra os comportamentos distintos assumidos pelos reservatórios na operação energética otimizada.

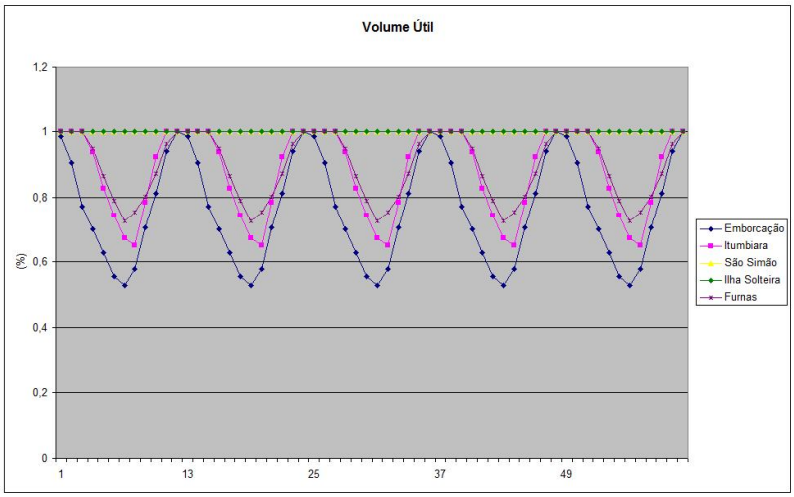

Figura 8.17: Trajetórias de volume das usinas de Emborcação, Itumbiara, São Simão, Furnas e Ilha Solteira.

Mais uma vez percebe-se a influência do efeito cota e do posicionamento do reservatório na cascata. A usina de Emborcação atuou na regularização das vazões afluentes, ao utilizar seu reservatório de acumulação. A usina de Itumbiara também apresentou uma oscilação de volume no seu reservatório, mas bem menos acentuada que a oscilação para a usina de Emborcação, visto que a usina de Emborcação consegue regularizar parte da vazão afluente ao reservatório de Itumbiara. Mesmo sendo o primeiro reservatório do rio Grande, a usina de Furnas não apresentou um esvaziamento tão severo quanto o reservatório da usina de Emborcação. Este fato pode ser explicado, pelo menos parcialmente, devido a ordem de grandeza das vazões afluentes com a capacidade de armazenamento do reservatório da usina. A usina de Furnas possui uma posição privilegiada em relação à usina de Emborcação, no que se refere à capacidade de regularização da vazão afluente que chega a seu reservatório, sendo essa capacidade evidenciada pela ampla capacidade de volume útil (17027hm^3) e a reduzida faixa de operação normal do seu reservatório (18m) quando comparado à capacidade de volume útil de Emborcação (12521hm^3) e sua faixa de operação normal (45m). A relação entre a capacidade de volume útil e a faixa de operação

normal do reservatório permite visualizar o volume de água necessário para operar o reservatório em um determinado nível. Tal relação pode ser expressa também pela comparação da curva dos polinômios do nível de montante dos reservatórios. Desta forma, os altos valores da MLT de Furnas podem ser amortecidos devido a Furnas possuir um dos maiores reservatórios brasileiros, caracterizando o reservatório de Furnas como um reservatório "pesado". Já as usinas de São Simão, Ilha Solteira, Marimbondo e Água Vermelha permaneceram com seus reservatórios cheios durante todo o horizonte de planejamento, a fim de manter uma alta produtividade, para valorizar a água descarregada pelas usinas a montante.

A influência do efeito cota pode ser confirmada no segundo estudo de caso realizado. Este estudo de caso considera a operação energética do sistema com vazões afluentes iguais a 80% da MLT e com volumes inicial e final iguais a 100% e 0% respectivamente. A Figura 8.18 ilustra os comportamentos distintos assumidos pelos reservatórios na operação energética otimizada.

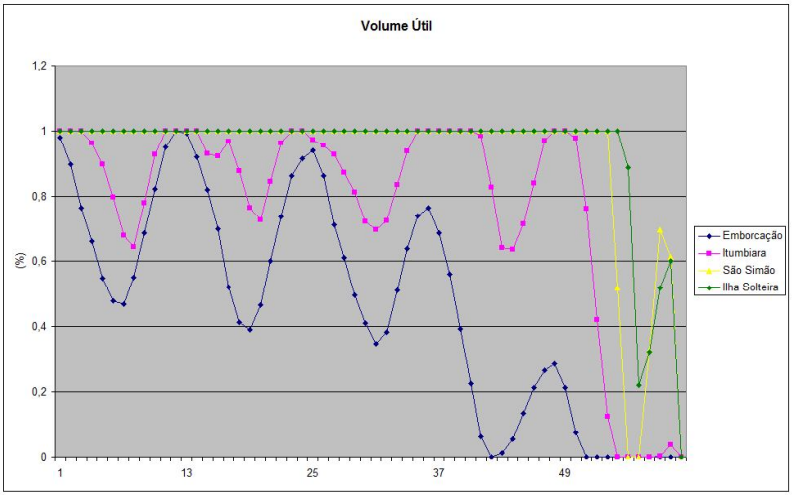

Figura 8.18: Trajetórias de volume das usinas de Emborcação, Itumbiara e São Simão, e Ilha Solteira.

Pela Figura 8.18, pode-se confirmar novamente as oscilações dos volumes operativos dos reservatórios de acordo com suas posições na cascata. Adicionalmente, pode-se verificar que, mesmo com a liberação do volume final[5], a operação energética otimizada buscou realizar um enchimento periódico dos reservatórios em torno do final do período cheio. Este comportamento pode ser explicado pelo efeito cota que atua de forma a reforçar a natureza conservativa da

[5]Ou seja, os reservatório foram operados sem ter que atingir nenhum volume final estipulado ao final do horizonte de planejamento.

operação energética dos reservatórios. Mesmo com a liberdade dos reservatórios para assumir quaisquer valores finais, a operação energética otimizada continua a tentativa de nivelar o custo marginal de operação do sistema hidrotérmico[6], de forma a reduzí-lo em média (Figura 8.19). O comportamento periódico do custo marginal de operação do sistema hidrotérmico só não foi obtido graças ao esvaziamento completo dos reservatórios no último intervalo do horizonte de planejamento, de forma a reduzir ainda mais a necessidade de geração complementar (Figura 8.20). Entretanto, este esvaziamento caracteriza a operação energética como otimizada, pois todo o recurso hidroelétrico disponível para a geração de energia elétrica foi utilizado, na medida em que os reservatórios ficaram livres para assumirem quaisquer valores finais.

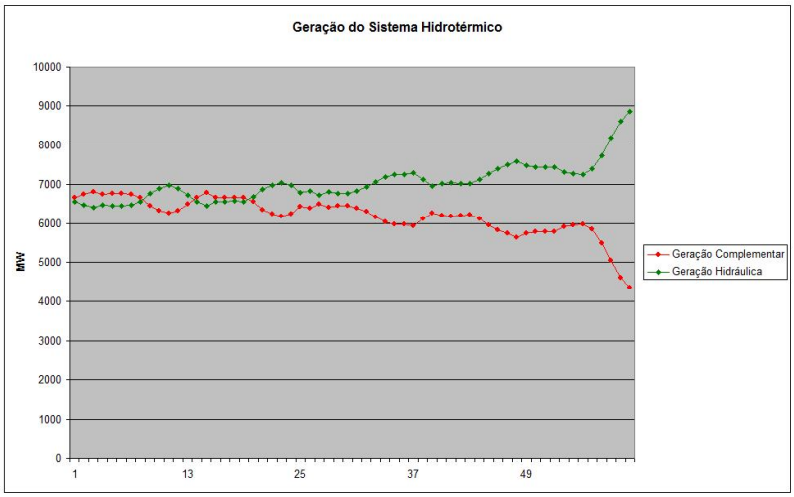

Figura 8.19: Comparativo das gerações hidráulica e complementar.

Para finalizar os estudos de caso concernentes à otimização da operação energética, realizou-se uma comparação da influência de diferentes magnitudes de vazões afluentes ao sistema de sete usinas hidroelétricas. Este estudo de caso considera a operação energética do sistema com vazões afluentes iguais a 80%, 60% e 50% da MLT, e com volumes inicial e final iguais a 100%. Pela Figura 8.21, percebe-se que, quanto maiores os valores das vazões afluentes, maiores são os deplecionamentos no conjunto de reservatórios do sistema, caracterizado por uma menor energia armazenada no sistema. De forma inversa, quanto menores os valores de vazões afluentes, menores os deplecionamentos nos reservatórios, e como consequência uma maior energia armazenada no sistema. Este fator pode ser justificado pelo efeito cota, que segue uma tendência conservativa no

[6]Com a função ojetivo adotada, a geração complementar fornece diretamente o custo marginal de operação do sistema hidrotérmico, a menos de unidades. Desta forma, os resultados gráficos que ilustram a geração complementar, ilustram também o custo marginal de operação do sistema.

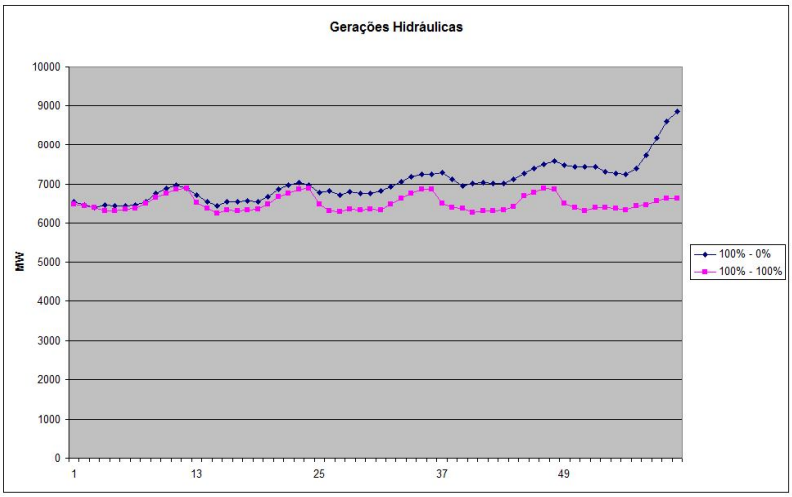

Figura 8.20: Comparativo das gerações hidráulicas com e sem a fixação de volumes mínimos finais aos reservatórios.

armazenamento dos reservatórios, de forma a maximizar a produtividade das usinas, eliminando desperdícios com vertimentos. Portanto, quanto maiores os valores das vazões afluentes, mais o sistema de reservatórios deve ser deplecionado, de forma a evitar desperdícios com vertimentos nos períodos cheios. Assim, durante a otimização da operação energética, o efeito cota, ao perceber valores reduzidos para as vazões afluentes, é responsável por uma maior utilização da geração complementar, ao invés de deplecionar um volume de água que não conseguirá ser recuperado, porque neste caso, ter-se-ia uma perda de produtividade para o sistema hidroelétrico. Visto de outra forma, a geração hidráulica de um sistema hidroelétrico na operação energética otimizada é função da quantidade de água afluente ao conjunto dos reservatórios. Quanto maior a disponibilidade de água, maiores os níveis de geração hidráulica (Figura 8.22) obtidos, e menores os níveis requeridos de geração complementar (Figura 8.23).

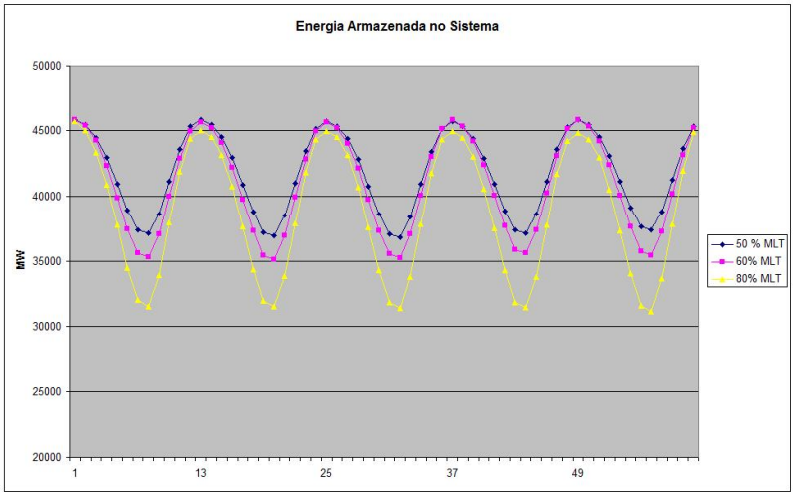

Figura 8.21: Comparativo das trajetórias de energia armazenada no sistema para diferentes magnitudes das vazões afluentes.

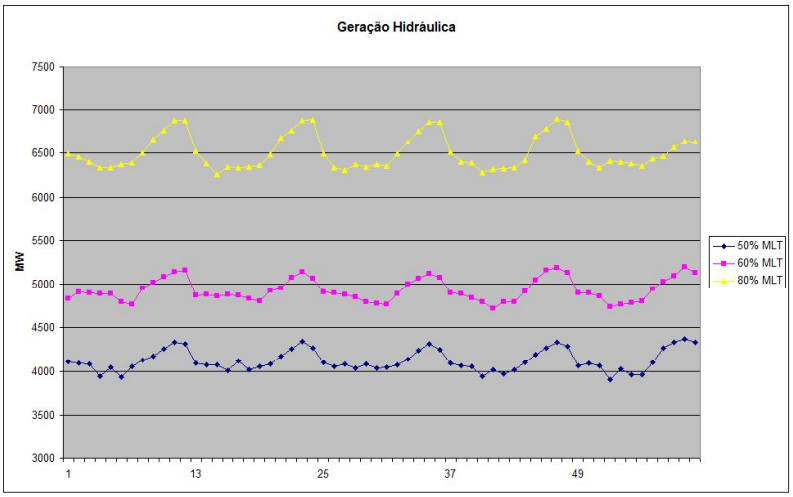

Figura 8.22: Comparativo das gerações hidráulicas para diferentes magnitudes das vazões afluentes.

A tendência conservativa da operação energética otimizada implica que o sistema hidroelétrico deve ser operado não como um sistema produtor de energia, mas sim como um sistema regularizador de energia, e que os recursos hidroelétricos de geração armazenados nos reservatórios devem ser utilizados na quantidade em que haja uma expectativa segura da sua reposição pelas vazões afluentes futuras [16, 22]. A natureza conservativa da operação energética otimizada, por meio da predominância do efeito cota, é comprovada pelos níveis mais elevados de armazenamento nos reservatórios, justamente nos horizontes de maior escassez das vazões afluentes, de forma a manter uma produtividade elevada. Portanto, a tendência conservativa evita o esvaziamento do sistema hidroelétrico, mesmo nos períodos mais hidrologicamente desfavoráveis.

Pelos resultados encontrados, a operação energética otimizada procura estabelecer um comportamento distinto para o conjunto de reservatórios, de forma a manter a máxima energia armazenada possível no sistema hidroelétrico. Esse comportamento é obtido pelas operações específicas para cada reservatório, de acordo com sua posição na cascata. Com a influência predominante do efeito cota, as usinas cujo volume do reservatório não têm grande influência na energia armazenada no sistema hidroelétrico possuem prioridade de deplecionamento. Já as usinas cujo volume operativo do reservatório têm grande influência na energia armazenada do sistema apresentam prioridade de enchimento. Como a energia armazenada em um sistema hidroelétrico é valorizada pela produtividade das usinas mais a jusante, a operação energética otimizada enfatiza o enchimento de jusante para montante, e o deplecionamento de montante

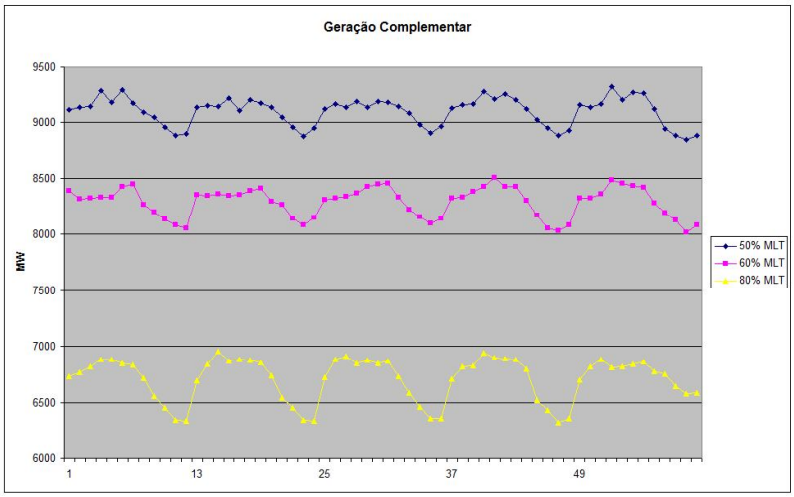

Figura 8.23: Comparativo das gerações complementares para diferentes magnitudes das vazões afluentes.

para jusante. Portanto, os reservatórios de montante, com a função adicional de amortecer a sazonalidade das vazões afluentes, são os que apresentam maiores oscilações no seu nível de armazenamento. Já os reservatórios de jusante, com a função de manter a máxima produtividade, geralmente não apresentam grandes oscilações, de forma a serem operados como usinas a fio d'água. Entretanto, em função da magnitude das vazões afluentes, os reservatórios de jusante podem apresentar um comportamento intermediário, de forma a atuar na complementação, quando necessária, da regularização das vazões, inclusive para evitar vertimentos. Todavia, a tendência indica que os reservatórios do sistema hidroelétrico somente são deplecionados em condições favoráveis, ou seja, quando há uma expectativa real de recuperação do volume descarregado.

8.3.4 Sistema Teste de Sete Usinas Hidroelétricas a Reservatório - MCSOOESH *versus* Hydrolab

Esta subseção visa apresentar uma comparação entre o modelo de otimização do MCSOOESH e o modelo de otimização do Hydrolab [32], de forma a verificar a qualidade e a consistência das soluções obtidas pelo MCSOOESH quando confrontadas com um modelo amplamente fundamentado e utilizado como é o caso do programa Hydrolab. O sistema hidroelétrico para realizar esta comparação é composto por sete usinas a reservatório, e está ilustrado na Figura 5.1.

Pelos gráficos evidenciados nas Figuras 8.24 a 8.33, pode-se observar que os resultados obtidos com o MCSOOESH seguiram os resultados obtidos com o Hydrolab. Desta forma, o MCSOOESH

reproduziu a tendência da operação otimizada dos reservatórios, tanto quando compara-se as trajetórias de energia armazenada no sistema, quanto as trajetórias de geração hidráulica. Adicionalmente, verifica-se um desempenho consistente do MCSOOESH quando comparado ao Hydrolab.

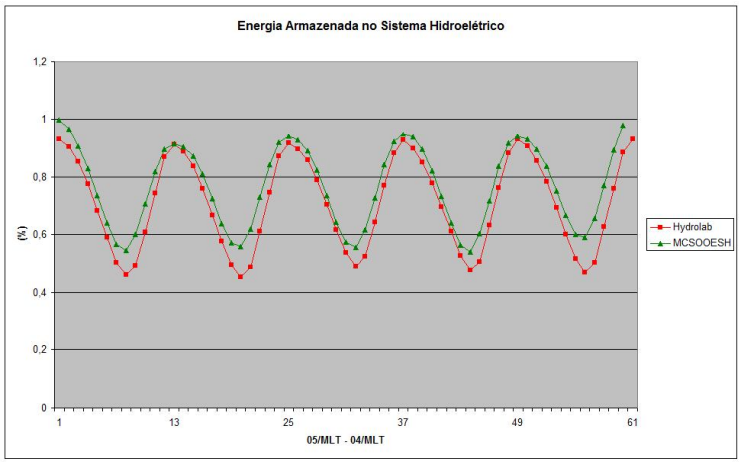

Figura 8.24: Trajetórias de energia armazenada no sistema para a MLT (MCSOOESH e Hydrolab).

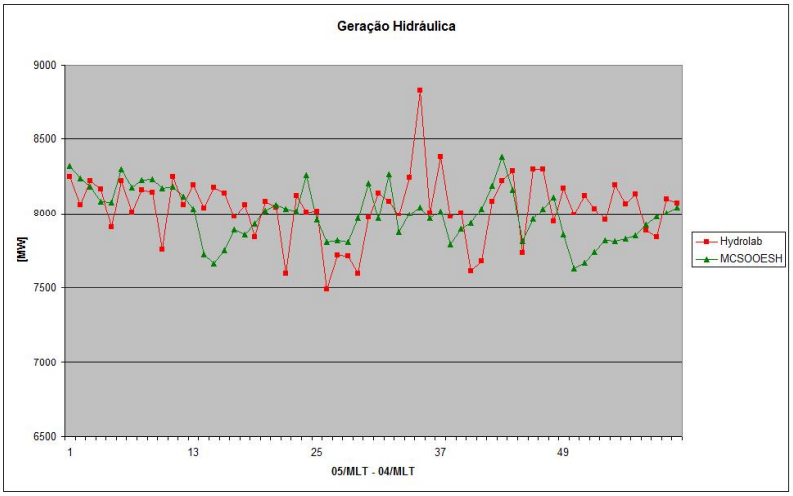

Figura 8.25: Trajetórias de geração hidráulica do sistema para a MLT (MCSOOESH e Hydrolab).

Em relação à energia armazenada no sistema, ao utilizar-se o MCSOOESH, foram obtidos valores mais elevados de armazenamento no conjunto de reservatórios do sistema hidroelétrico, na maior parte das aplicações realizadas. Esta superioridade nos valores pode ser evidenciada numericamente pela Tabela 8.1, a qual ilustra a média da energia armazenada no sistema nos

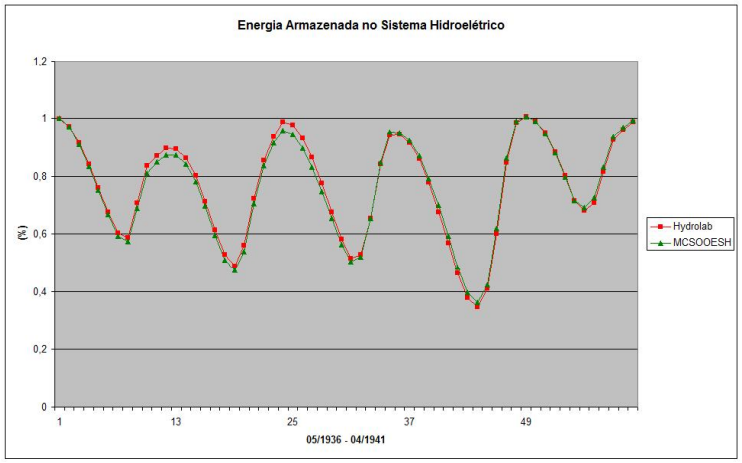

Figura 8.26: Trajetórias de energia armazenada no sistema para o período de 1936 a 1941 (MCSOOESH e Hydrolab).

Tabela 8.1: Média da Energia Armazenada no Sistema Hidroelétrico [MW].

Hor. de Planejamento	**MCSOOESH**	**Hydrolab**
1936-1941	34824,86	35052,94
1951-1956	38375,47	35368,57
1971-1976	33282,28	30629,89
2000-2005	29761,31	26655,97
MLT	34991,9	32152,5

horizontes de planejamento estipulados.

A tendência da otimização hidrotérmica consiste em distribuir a produção hidroelétrica ao longo do horizonte de planejamento, de forma a igualar o custo marginal de operação, ou seja, a otimização visa transferir energia hidroelétrica de intervalos com custo marginal baixo para intervalos com custo marginal alto. Para a solução otimizada nivelar o custo marginal de operação ao longo do horizonte de planejamento, reduzindo-o em média, ela deve distribuir a geração hidroelétrica de forma mais regular possível, o que implica em diminuir tanto quanto possível o desvio padrão dos valores da geração hidroelétrica [95]. Desta forma, para avaliar-se a qualidade das soluções obtidas com o MCSOOESH e com o Hydrolab, com relação à geração hidráulica, pode-se utilizar os gráficos das Figuras 8.25, 8.27, 8.29, 8.31, e 8.33, além da Tabela 8.2. Pelos resultados obtidos, pode-se constatar, na maioria dos casos, uma distribuição mais uniforme no fornecimento de geração hidroelétrica, por meio do MCSOOESH quando comparado ao Hydrolab.

Da comparação realizada entre o MCSOOESH e o Hydrolab, pode-se concluir que o MC-

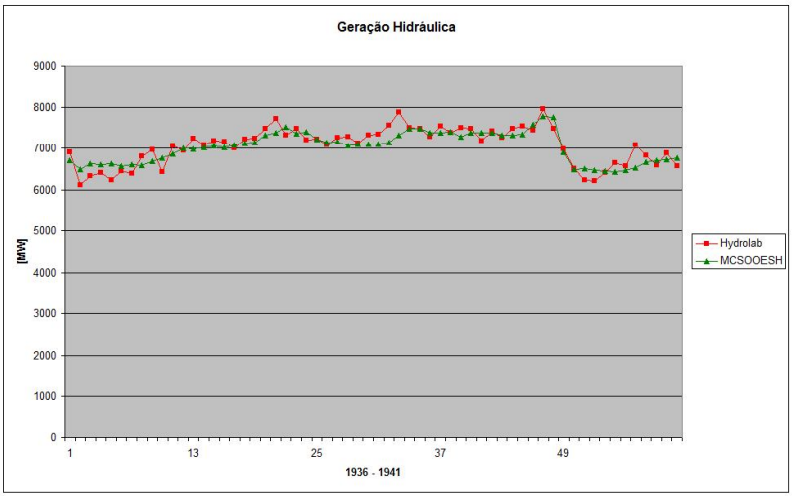

Figura 8.27: Trajetórias de geração hidráulica do sistema para o período de 1936 a 1941 (MCSOOESH e Hydrolab).

Tabela 8.2: Desvio Padrão da Geração Hidráulica [MW].

Hor. de Planejamento	**MCSOOESH**	**Hydrolab**
1936-1941	369,9305	451,0664
1951-1956	1071,991	1116,832
1971-1976	634,0045	668,9315
2000-2005	518,8437	437,5911
MLT	180,1461	221,56

SOOESH foi responsável por um fornecimento de energia elétrica tão confiável e econômico quanto o Hydrolab. Confiável porque permitiu a operação do sistema hidroelétrico com níveis elevados de energia armazenada, o que resulta em maior confiabilidade no atendimento ao mercado de energia elétrica. Econômico porque permitiu uma distribuição uniforme (regular) da geração hidroelétrica, e por conseguinte, uma distribuição mais regular do déficit hidráulico e do custo marginal de operação do sistema, o que implica em uma operação mais barata. Ressalta-se que as comparações realizadas foram feitas no sentido de "validar" (credenciar) o modelo computacional de otimização proposto, por uma comparação com um sistema de suporte a decisão amplamente utilizado por empresas e institutos de pesquisa (Hydrolab). Com isto, pretende-se mostrar a eficácia e a aplicabilidade do modelo de otimização da operação energética implementado, de forma a credenciá-lo como uma ferramenta a ser agregada e potencialmente empregada nos estudos relativos ao planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração.

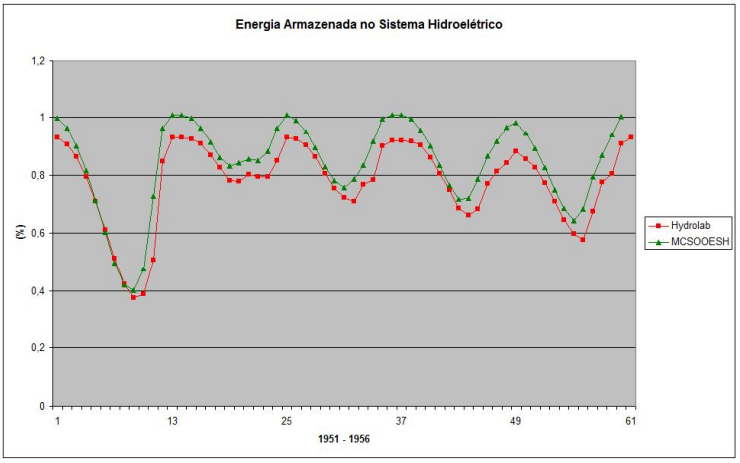

Figura 8.28: Trajetórias de energia armazenada no sistema para o período de 1951 a 1956 (MCSOOESH e Hydrolab).

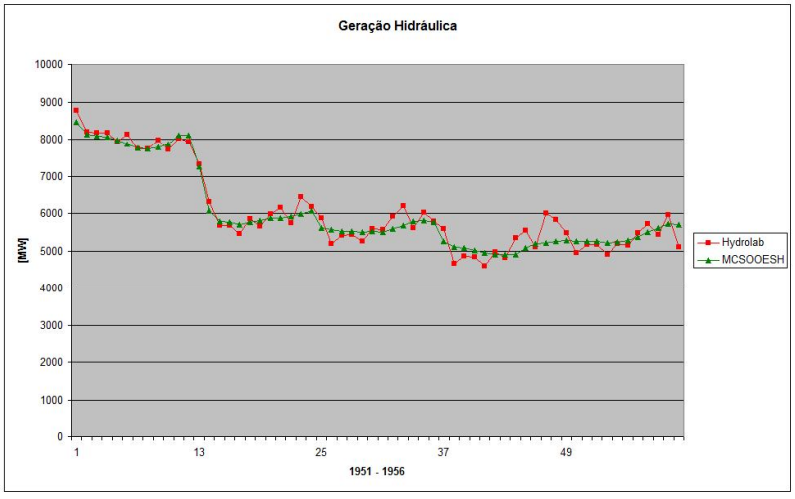

Figura 8.29: Trajetórias de geração hidráulica do sistema para o período de 1951 a 1956 (MCSOOESH e Hydrolab).

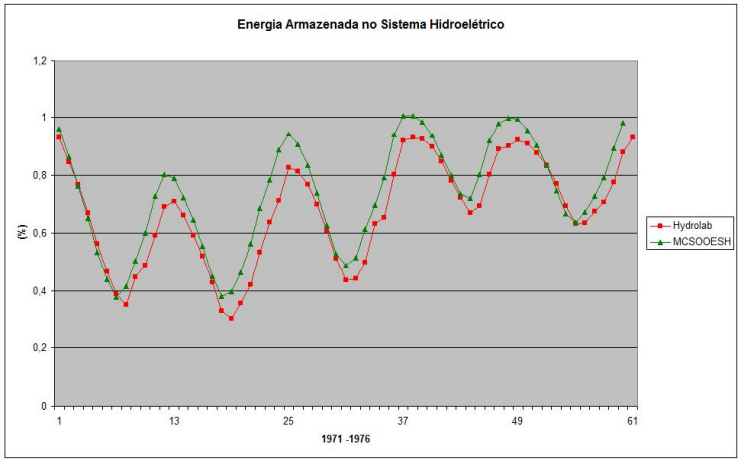

Figura 8.30: Trajetórias de energia armazenada no sistema para o período de 1971 a 1976 (MCSOOESH e Hydrolab).

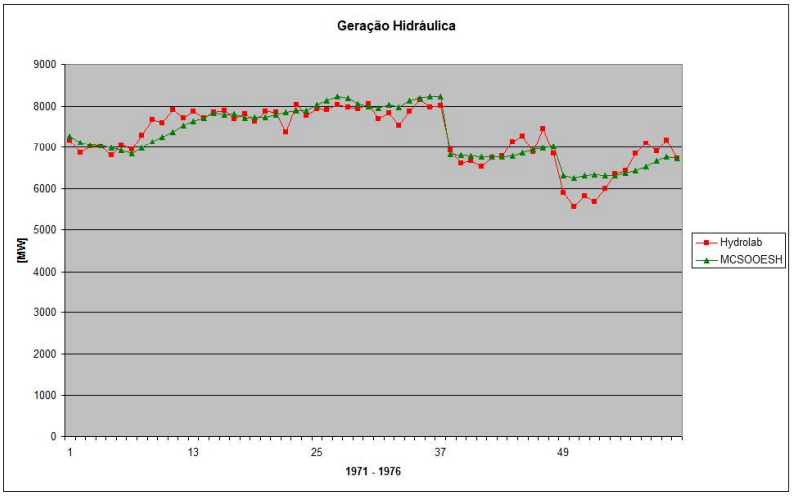

Figura 8.31: Trajetórias de geração hidráulica do sistema para o período de 1971 a 1976 (MCSOOESH e Hydrolab).

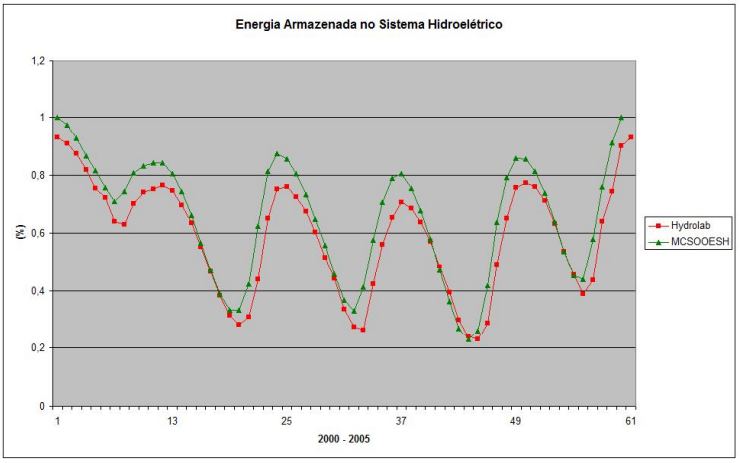

Figura 8.32: Trajetórias de energia armazenada no sistema para o período de 2000 a 2005 (MCSOOESH e Hydrolab).

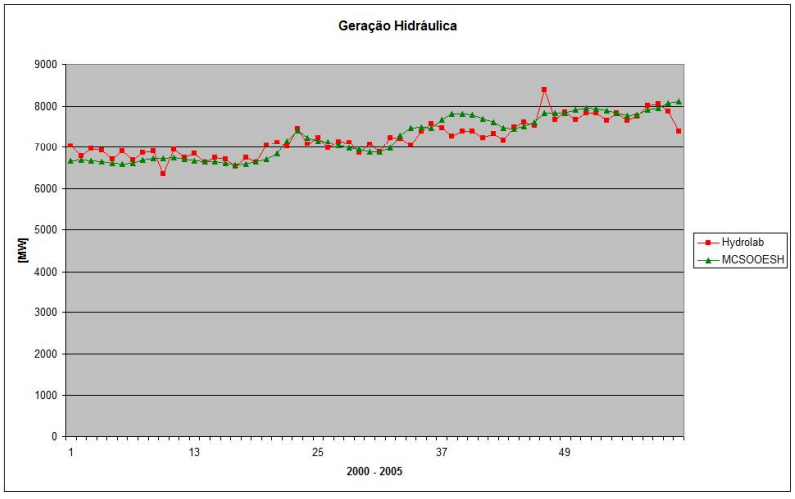

Figura 8.33: Trajetórias de geração hidráulica do sistema para o período de 2000 a 2005 (MCSOOESH e Hydrolab).

8.4 Simulação da Operação Energética

Para verificar o desempenho da política de operação energética proposta (PBSIF: Política Baseada em Sistema de Inferência *Fuzzy*), utiliza-se o modelo computacional de simulação da operação energética desenvolvido neste trabalho, o qual permite uma avaliação energética da operação de sistemas hidroelétricos de geração. A simulação da operação energética de um sistema hidroelétrico visa identificar como este sistema se comportaria caso fosse submetido a determinadas condições de operação energética (mercado de energia elétrica, política de operação energética, vazões afluentes naturais, restrições operativas, etc.). Assim, para efetuar a comparação entre as políticas de operação energética, as simulações da operação são realizadas sob as mesmas condições de operação energética, com exceção para a política de operação. Portanto, as diferenças de comportamento na operação do sistema hidroelétrico resultarão unicamente das políticas utilizadas.

8.4.1 Sistema Teste de Uma Usina Hidroelétrica

A operação energética de um hipotético sistema isolado com apenas um reservatório é simples, pois o operador desse sistema não necessita de nenhuma política de operação: deve apenas atender ao mercado de energia elétrica. Desta forma, se as vazões afluentes naturais forem menores que a vazão turbinada necessária para atender ao mercado, deve-se esvaziar o reservatório; se forem maiores, deve-se estocar o excedente desta vazão afluente até o volume máximo operativo do reservatório. Existindo usinas a fio d'água, o operador tentará turbinar toda água nelas disponível, limitado à capacidade das máquinas ou à carga, mantendo o excesso ou complementando o requisito com a usina de reservatório. Quando, porém, há um sistema de usinas em cascata e em paralelo, a situação muda por completo, pois existem várias maneiras de armazenar ou de esvaziar os reservatórios, cada uma com resultados potencialmente diferentes[7] [51].

8.4.2 Sistema Teste de Sete Usinas Hidroelétricas a Reservatório

De forma a ilustrar a eficácia da PBSIF, ela foi avaliada por meio da comparação do seu desempenho com a política de operação em paralelo; com a política de operação baseada em aproximações funcionais [17, 72], que utiliza funções polinomiais e exponenciais (política baseada

[7] As regras de operação adotadas para cada reservatório de um sistema hidroelétrico podem alterar, de forma relevante, a quantidade total de energia elétrica produzida.

em funções polinomiais e exponenciais - PBFPE)[8], obtidas pelo método dos mínimos quadrados; e também com o resultado obtido pela operação otimizada a usinas individualizadas. Com isto, procura-se demonstrar a viabilidade da obtenção e aplicação da PBSIF, bem como os ganhos energéticos advindos.

Considerando-se o horizonte de planejamento envolvendo os anos MLT, 1936 - 1941, 1951 - 1956, 1971 - 1976 e 2000 - 2005, pode-se confirmar a maior eficiência fornecida pela política proposta quando comparada à política paralela, na utilização dos recursos hidroelétricos de geração. Ressalta-se que quando comparada à PBFPE, a PBSIF só apresenta níveis mais reduzidos de energia armazenada no horizonte de 1971 a 1976. Pelas Figuras 8.34, 8.35, 8.36, 8.37 e 8.38, pode-se perceber as trajetórias da energia armazenada no sistema quando se aplica as políticas implementadas no modelo de simulação da operação. A Tabela 8.3 permite ao leitor uma comparação adicional, de forma a verificar numericamente a eficiência de cada política de operação com a solução otimizada.

Tabela 8.3: Média da Energia Armazenada no Sistema Hidroelétrico [MW].

Hor. de Planejamento	**Pol. Paralela**	**PBFPE**	**PBSIF**	**Sol. Otimizada**
1936-1941	27865,83	29773,74	32299,55	34824,86
1951-1956	24232,82	26817,27	28851,86	38375,47
1971-1976	14329,13	27517,44	26544,69	33470,54
2000-2005	18151,44	21761,86	25847,11	29761,31
MLT	17171,52	25950,09	27437,61	34991,9

[8] A comparação com a política baseada em funções polinomiais e exponenciais só foi possível devido ao fornecimento de todos os parâmetros (coeficientes) pelos autores nos seus trabalhos. Desta forma, foi possível incorporar a PBFPE no modelo de simulação utilizado.

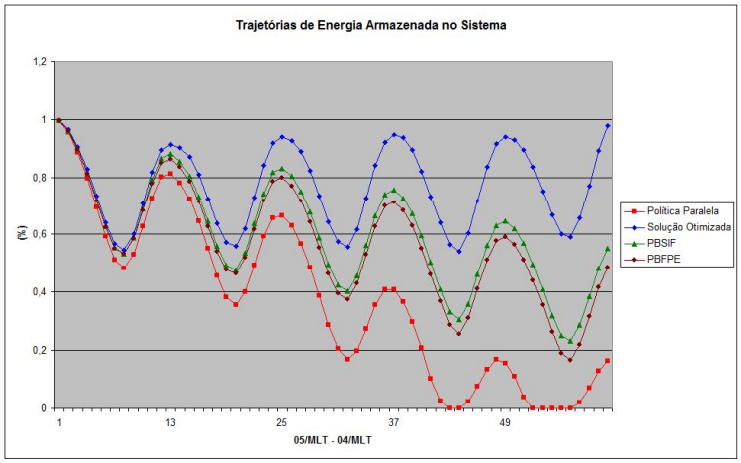

Figura 8.34: Trajetórias de energia armazenada no sistema para a MLT.

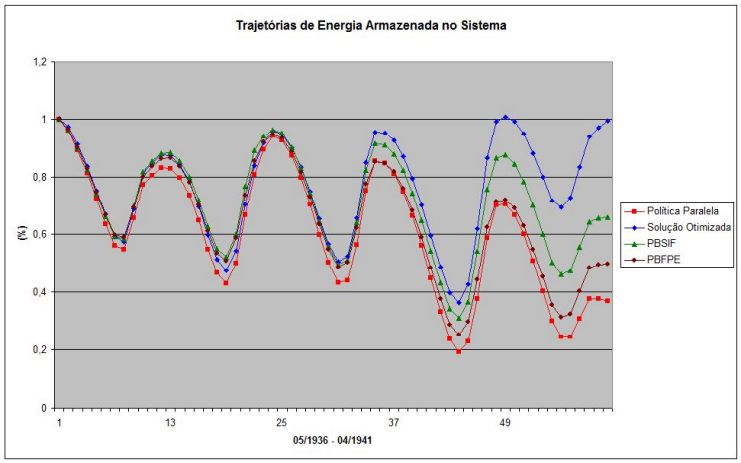

Figura 8.35: Trajetórias de energia armazenada no sistema para o período de 1936 a 1941.

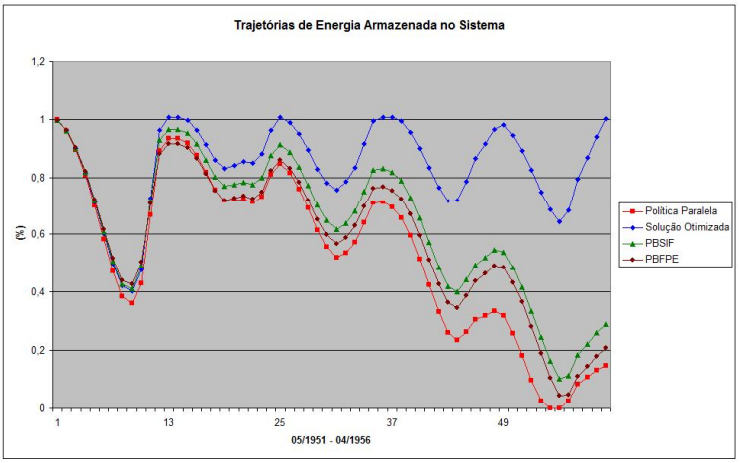

Figura 8.36: Trajetórias de energia armazenada no sistema para o período de 1951 a 1956.

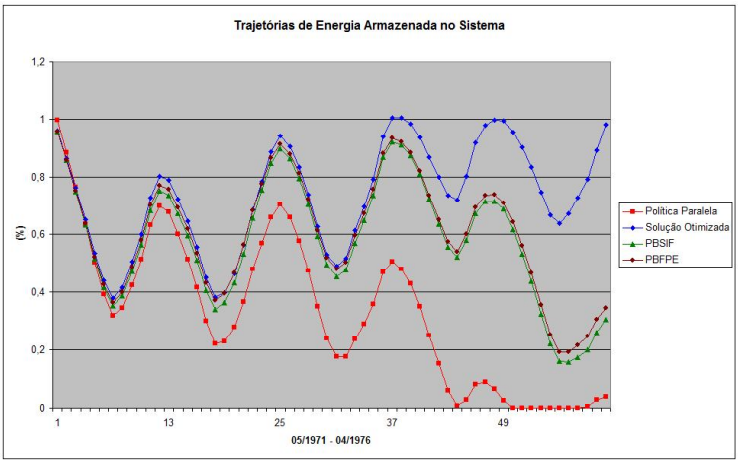

Figura 8.37: Trajetórias de energia armazenada no sistema para o período de 1971 a 1976.

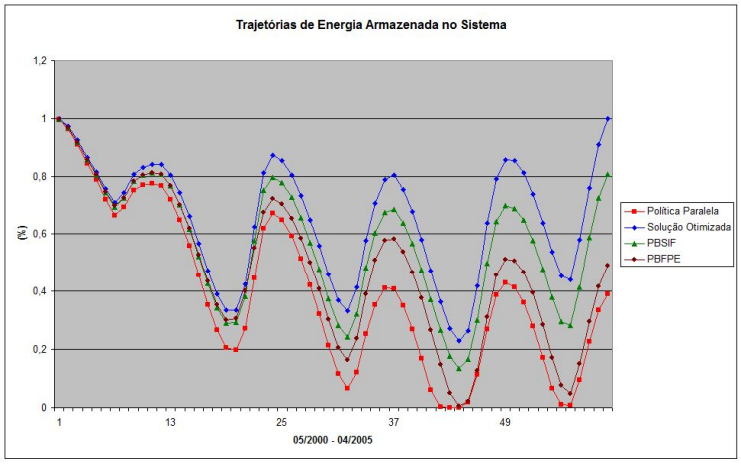

Figura 8.38: Trajetórias de energia armazenada no sistema para o período de 2000 a 2005.

8.4.3 Sistema Teste de Dezoito Usinas Hidroelétricas a Reservatório

O sistema hidroelétrico é composto pelas usinas hidroelétricas do sistema sudeste brasileiro e considera todas as 18 usinas a reservatório. Foram realizados quatro estudos de caso, com o intuito de realizar uma comparação entre as duas políticas de operação implementadas no modelo de simulação, sob diversas condições hidrológicas. A meta de geração hidráulica (ou mercado de energia elétrica) é considerada igual à geração hidráulica fornecida pelo modelo de otimização da operação energética, para os períodos de 1936 a 1941, 1971 a 1976, 2000 a 2005 e com dados da MLT. As vazões afluentes naturais correspondem às vazões verificadas para os mesmos períodos do histórico. Para efeito de comparações adicionais, foi realizada a otimização da operação energética do sistema hidroelétrico com as vazões afluentes realmente ocorridas nos períodos, de forma a obter-se a solução com o perfeito conhecimento das vazões afluentes para todo o horizonte de planejamento[9].

Energia Armazenada no Sistema

A Figura 8.39 ilustra a trajetória da energia armazenada no sistema para as simulações da operação realizadas com as duas políticas implementadas, bem como a trajetória resultante pela solução otimizada, utilizando as vazões afluentes da MLT. Pode-se perceber um esvaziamento mais severo do conjunto dos reservatórios ao se utilizar a política de operação paralela, o que implica uma maior eficiência na utilização dos recursos hidroelétricos de geração, pela política proposta (PBSIF).

Considerando-se o horizonte de planejamento envolvendo os anos 1936 - 1941, 1971 - 1976 e 2000 - 2005, pode-se confirmar a maior eficiência fornecida pela política proposta quando comparada à política paralela, na utilização dos recursos hidroelétricos de geração. Pelas Figuras 8.40, 8.41 e 8.42, pode-se perceber uma maior redução da energia armazenada no sistema quando se aplica a política paralela na simulação da operação.

Na Figura 8.40, pode-se verificar a melhor utilização dos benefícios hidroelétricos de geração, pela política proposta, onde nota-se que o deplecionamento dos reservatórios é bem mais intenso quando se emprega a política paralela. Pode-se frisar ainda que, durante todo o horizonte de planejamento, a política proposta sempre apresentou valores mais altos de energia armazenada no sistema, confirmando que esta política necessita utilizar menos água para atender ao mesmo

[9]Nas otimizações realizadas, visando a comparação com as políticas de operação energética implementadas, o volume mínimo final pré-estabelecido foi considerado igual ao volume máximo operativo.

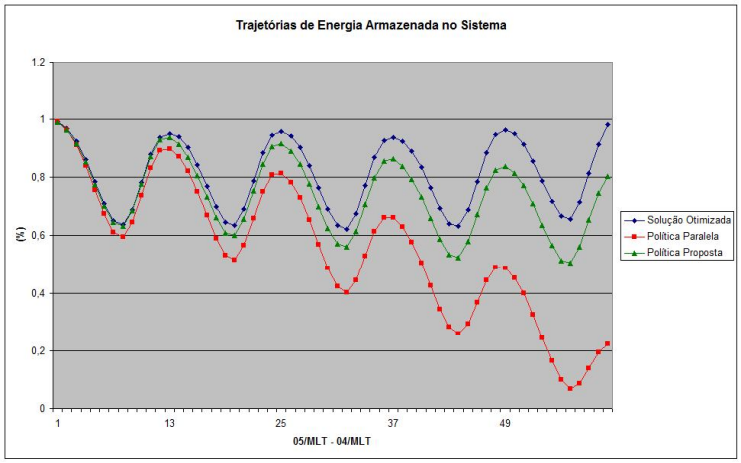

Figura 8.39: Trajetória de energia armazenada no sistema para a MLT.

mercado de energia elétrica. Adicionalmente, ao final do horizonte de planejamento, pode-se visualizar que a política de operação paralela não consegue alcançar os níveis de armazenamento obtidos pela política proposta.

A fim de evidenciar a maximização dos benefícios hidroelétricos pela política proposta, as Figuras 8.41 e 8.42 ilustram as trajetórias de energia armazenada no sistema para as simulações da operação utilizando as duas políticas de operação e a solução otimizada. Pode-se afirmar que a simulação da operação utilizando a política proposta busca maximizar os benefícios hidroelétricos do sistema hidrotérmico de geração, pois atende ao mesmo mercado de energia elétrica, utilizando menos recursos hidroelétricos. Novamente, ao final do horizonte de planejamento, observa-se que a política de operação paralela não consegue manter os níveis de armazenamento próximos dos níveis de armazenamento estabelecidos pela política de operação proposta. Pelo contrário, a política paralela chega ao final da simulação com o conjunto dos reservatórios quase vazio, fazendo com que a confiabilidade e o custo da operação estejam extremamente comprometidos na operação contínua do sistema. Portanto, a política proposta permite que a simulação da operação do sistema hidroelétrico seja consistente com a operação contínua do sistema, já que o mesmo não deixa de operar com o final do horizonte de planejamento.

A escassez de um produto, ou o seu elevado custo de produção, elevam seu preço de mercado. Com base nesse princípio econômico, o preço da energia elétrica no Brasil depende da energia armazenada nos reservatórios das usinas hidroelétricas, que por sua vez, em cada instante de tempo, depende das decisões operativas (política de operação) e das vazões afluentes aos reser-

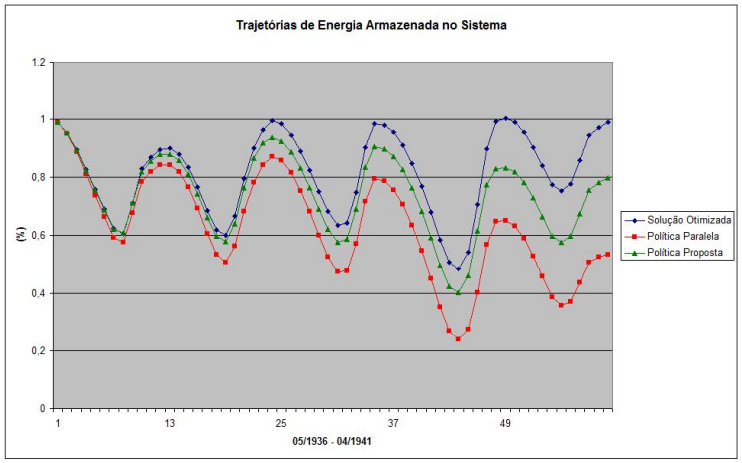

Figura 8.40: Trajetória de energia armazenada no sistema 1936 a 1941.

vatórios nos intervalos anteriores [29]. Pelos resultados até aqui encontrados, pode-se verificar que com a política de operação proposta, o mercado de energia elétrica consegue ser atendido, com níveis mais elevados de energia armazenada no sistema hidroelétrico, o que favorece de forma potencial a um preço mais reduzido da energia elétrica além de uma maior confiabilidade na operação do sistema hidroelétrico.

Deve-se levar em conta que as comparações efetuadas com a solução otimizada tomaram como padrão a otimização com o conhecimento prévio das afluências (ótimo absoluto), caracterizando-a como um padrão extremamente rigoroso. Qualquer solução, por qualquer metodologia, terá necessariamente um grau maior ou menor de sub-otimalidade.

Volume Armazenado nos Reservatórios

As Figuras 8.43, 8.44 e 8.45 exibem as trajetórias de volume útil dos reservatórios de algumas usinas do sistema hidroelétrico considerado para teste. Pode-se observar um comportamento diferenciado para cada reservatório das usinas, no qual a oscilação dos volumes dos reservatórios é feita em função do seu posicionamento na cascata. Na Figura 8.43, verifica-se que o reservatório mais a montante (Emborcação) foi o primeiro a esvaziar, apresentando um menor nível de armazenamento durante o horizonte de planejamento. A usina de Itumbiara, em posição intermediária, apresentou um esvaziamento médio, enquanto as usinas de São Simão e especialmente Ilha Solteira, mais a jusante, apresentaram menores níveis de esvaziamento, de forma a serem operadas como usinas a fio d'água, esvaziando por último e enchendo antes que as outras

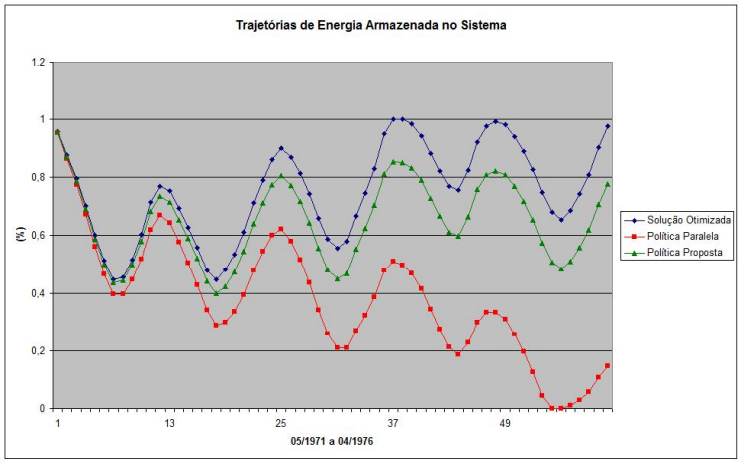

Figura 8.41: Trajetória de energia armazenada no sistema 1971 a 1976.

usinas situadas acima na cascata. As Figuras 8.44 e 8.45 confirmam a oscilação dos reservatórios em função do seu posicionamento na cascata do sistema hidroelétrico. Ressalta-se que, como a política de operação paralela determina que todos os reservatórios do sistema hidroelétrico devem ser operados com a mesma porcentagem de seus volumes úteis, não é necessário ilustrar a trajetória das 18 usinas a reservatório individualmente, bastando apresentar a trajetória de uma delas.

O estado do reservatório afeta a produtividade da usina e, portanto, a trajetória de volume das usinas irá afetar significativamente a energia total gerada pelo sistema. Em sistemas em cascata, este efeito torna-se mais acentuado nas usinas mais a jusante, por onde passa toda a água e, onde uma pequena perda de produtividade pode significar uma grande perda de energia, pois seriam aproveitadas as vazões defluentes das demais usinas a montante sem que seu volume útil esteja com uma condição favorável. Isto se deve, principalmente, ao fato da água localizada no reservatório da usina a montante gerar energia elétrica, tanto quando passa pelas turbinas da mesma, como quando passa pelas turbinas da usina a jusante. Com a política de operação proposta, as usinas de jusante, sempre que possível, permaneceram cheias, de forma a manter alta produtividade e, desta forma, estas valorizam os volumes de água que fluem pelas mesmas. Como a energia armazenada em uma usina é valorizada pela produtividade de todas as usinas a sua jusante, a altura de queda da usina mais a jusante, por exemplo, afeta a energia armazenada de todas as usinas da cascata [22]. Desse modo, os parâmetros dos consequentes dos sistemas de inferência *fuzzy* priorizam níveis cada vez mais elevados de armazenamento nos reservatórios de

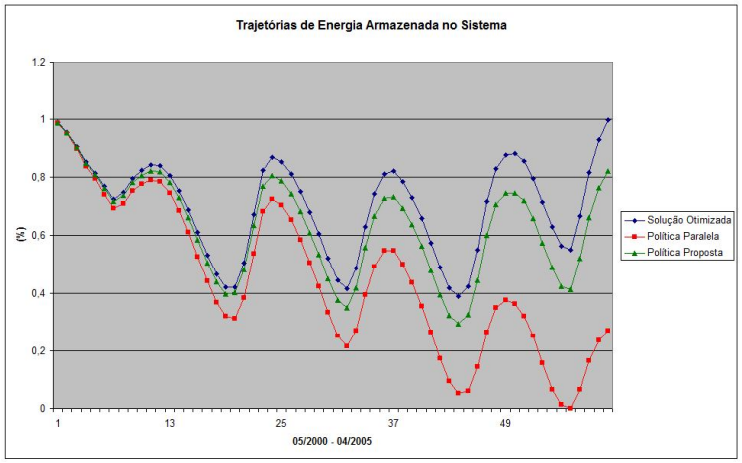

Figura 8.42: Trajetória de energia armazenada no sistema 2000 a 2005.

montante para jusante na cascata de usinas. Com a especialização de um sistema de inferência *fuzzy* para cada usina a reservatório, a operação de cada usina reflete o papel que ela possui no sistema hidroelétrico, de acordo com sua localização na cascata. Por isto, o sistema hidroelétrico é capaz de manter níveis mais elevados de energia armazenada (Figuras 8.39, 8.40, 8.41 e 8.42).

Geração Complementar

Uma observação que merece destaque é que em alguns intervalos dos horizontes de planejamento, a simulação da operação, ao utilizar a política paralela, não conseguiu suprir completamente a meta de geração hidráulica (mercado de energia), devido ao severo esvaziamento dos reservatórios das usinas do sistema hidroelétrico. Neste caso, a decisão tomada pelo simulador consiste em fornecer a maior quantidade de energia hidráulica possível, e sinalizar um déficit de energia hidráulica para o intervalo sendo simulado. Para suprir os déficits hidráulicos, emprega-se geração complementar. Assim, esta situação de déficit hidráulico pode ser observada pelos gráficos da geração complementar do sistema hidrotérmico de geração (Figuras 8.46 e 8.47). Ressalta-se que a convergência do algoritmo de simulação da operação já permite um déficit hidráulico de no máximo 0,5%.

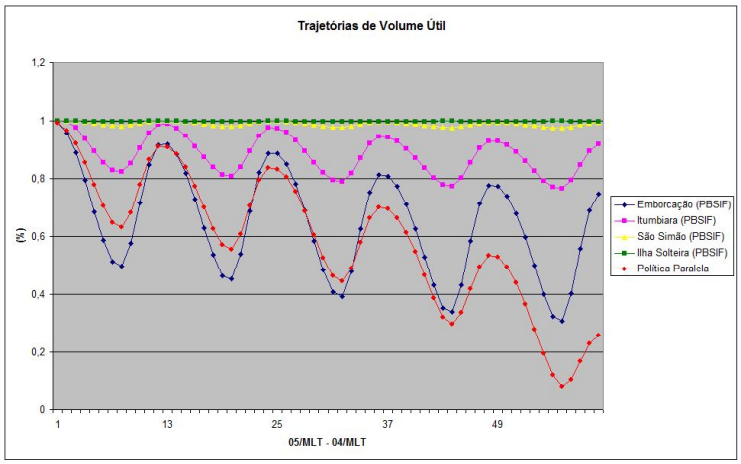

Figura 8.43: Trajetória de volume útil em alguns reservatórios do sistema hidroelétrico para a MLT.

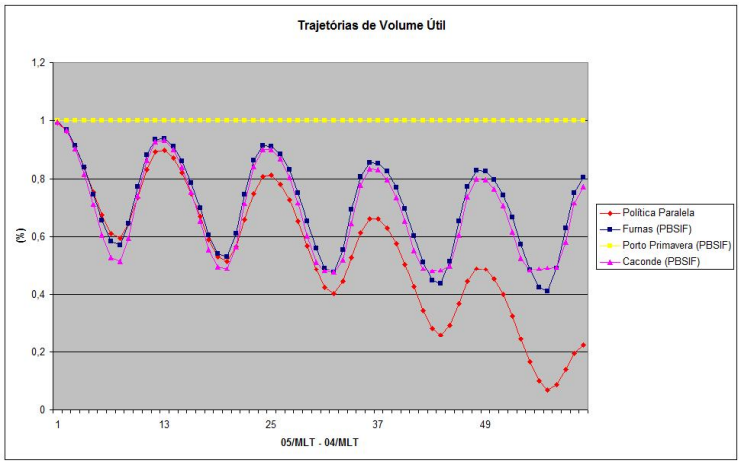

Figura 8.44: Trajetória de volume útil em alguns reservatórios do sistema hidroelétrico para a MLT.

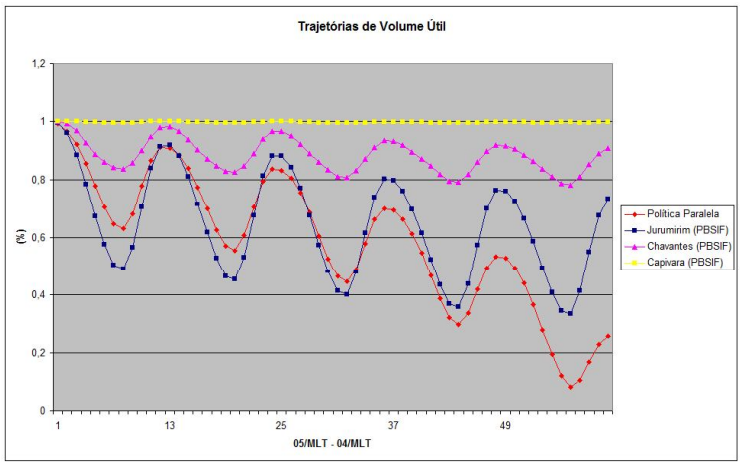

Figura 8.45: Trajetória de volume útil em alguns reservatórios do sistema hidroelétrico para a MLT.

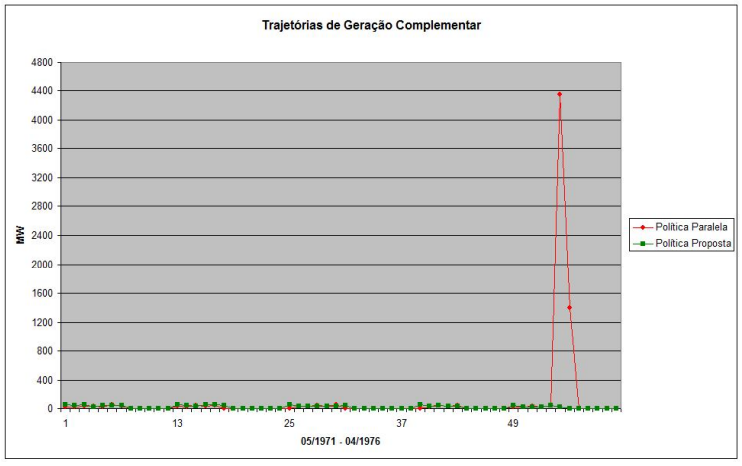

Figura 8.46: Trajetória de geração complementar 1971 a 1976.

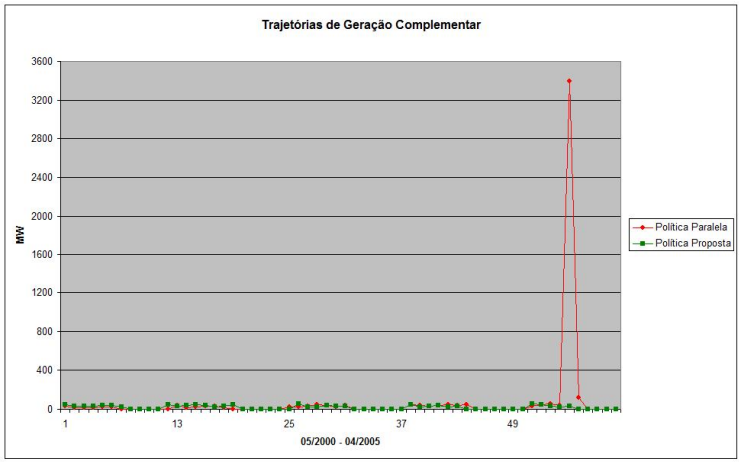

Figura 8.47: Trajetória de geração complementar 2000 a 2005.

8.5 Tempo Computacional

Esta seção visa apresentar o tempo computacional gasto nas otimizações e simulações da operação energética, ao utilizar-se sistemas hidroelétricos de diferentes dimensões. Os casos foram executados em um computador pessoal (PC) de 2.8 GHz de freqüência, com 2 GB de memória. A Tabela 8.4 apresenta os dados obtidos com o modelo de otimização da operação energética. Ressalta-se que o tempo para simulação não foi apresentado, pois independentemente da política de operação energética utilizada e da dimensão do sistema hidroelétrico empregado, a simulação da operação levou menos de 2 segundos para fornecer o resultado. Desta forma, pode-se verificar que o tempo computacional não é fator impeditivo/proibitivo para a aplicação dos modelos de otimização e de simulação da operação energética.

Tabela 8.4: Tempo Computacional Gasto.

Hor. de Planejamento	**Sist. Hidro. de 3 UHEs**	**Sist. Hidro. de 7 UHEs**	**Sist. Hidro. de 18 UHEs**
1936-1941	11 segundos	58 segundos	3 mins. e 10 segs.
1951-1956	20 segundos	26 segundos	6 mins e 20 segs.
1971-1976	24 segundos	54 segundos	6 mins e 36 segs.
2000-2005	14 segundos	57 segundos	5 mins e 27 segs.
MLT	14 segundos	47 segundos	6 mins. e 18 segs.

8.6 Considerações Finais

O presente capítulo apresentou os resultados obtidos pela aplicação dos modelos computacionais de otimização e de simulação da operação energética especificados e implementados neste trabalho.

O modelo de otimização da operação energética foi analisado inicialmente, de forma comparativa, com alguns importantes resultados já mencionados na literatura. Durante a apresentação dos resultados obtidos com o modelo de otimização da operação energética, alguns resultados adicionais foram ilustrados e discutidos, o que vem a fortalecer a importância do desenvolvimento do modelo, a fim de permitir que vários estudos possam ser executados. Em seguida, o modelo de otimização foi avaliado comparativamente com o Hydrolab, de forma a verificar a qualidade das soluções do modelo quando confrontadas com uma ferramenta que segue a mesma abordagem de representação individualizada das usinas hidroelétricas e que encontra-se com seu uso bem

estabelecido por algumas empresas e insititutos de pesquisa do setor elétrico brasileiro.

Já o modelo de simulação foi analisado por meio de estudos para comparar o desempenho da política de operação energética, baseada em um sistema de inferência *fuzzy*, com a política de operação em paralelo, e em alguns estudos realizados com a política de operação baseada em funções polinomiais e exponenciais (PBFPE). Considerando-se os vários horizontes de planejamento, pôde-se confirmar a maior eficiência fornecida pela política proposta quando comparada à política paralela, na utilização dos recursos hidroelétricos de geração. Ressalta-se que quando comparada à PBFPE, a PBSIF só apresentou níveis mais reduzidos de energia armazenada em somente um horizonte, o que a caracteriza como uma política tão eficiente quanto a PBFPE.

Com a apresentação do tempo computacional envolvido na execução de algumas otimizações e simulações da operação energética, é possível verificar a factibilidade do uso dos modelos computacionais na maioria dos dispositivos computacionais atuais.

Capítulo 9

Discussões, Contribuições e Trabalhos Futuros

9.1 Resumo do Trabalho Realizado

9.1.1 Sobre a Aplicação dos Componentes de Software e do UML *Components*

O desenvolvimento baseado em componentes de software foi utilizado para a construção de modelos computacionais pertencentes ao domínio do planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração. O processo de desenvolvimento UML *Components* foi aplicado de forma a nortear o desenvolvimento do software, para englobar as diferentes atividades realizadas nos fluxos de trabalho, além de incluir os vários artefatos produzidos. Dentre os fluxos de trabalho considerados, priorizou-se os fluxos de trabalho dos requisitos e da especificação.

O fluxo de trabalho dos requisitos envolveu a concepção do modelo de casos de uso e do modelo de domínio. Verificou-se que casos de uso são uma boa maneira de definir os requisitos funcionais e de tornar possível a especialistas do domínio revelar e redigir cenários de utilização do programa, além de auxiliarem na identificação de possíveis falhas de especificação. Casos de uso auxiliaram na organização do conjunto de requisitos em um contexto de cenários típicos de uso de um sistema e possibilitaram a compreensão do comportamento externo do sistema, sem exigir conhecimento do que é realizado internamente pelas funções requisitadas, além de oferecerem um diagrama de contexto para o sistema, de forma a ilustrar a fronteira do sistema, os atores e a forma com que esses autores fazem uso dos serviços oferecidos pelo sistema.

No fluxo de trabalho dos requisitos, foi produzido também o artefato modelo de domínio, que permitiu abstrair um domínio, tal como o do planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração, de maneira natural, por meio da identificação de conceitos, atributos e associações desse domínio. As classes conceituais do modelo de domínio foram usadas como inspiração para as informações que devem ser gerenciadas pelo sistema, pelo modelo de tipos do negócio, o qual foi utilizado para identificação das interfaces de negócio e para a definição dos modelos de informação das interfaces, no fluxo de trabalho da especificação.

No fluxo de trabalho da especificação, os casos de uso foram utilizados para a identificação das interfaces de sistema e das suas operações, no estágio de identificação dos componentes. Já os modelos de domínio foram utilizados para a construção do artefato modelo de tipos do negócio, o qual é a ferramenta base para a identificação das interfaces de negócio. Com a identificação das interfaces realizadas, pôde-se realizar a identificação dos componentes, além da definição de uma arquitetura inicial de especificação dos componentes para ilustrar a estrutura e as dependências entre os componentes de software. O fluxo de trabalho da interação dos componentes utilizou as especificações inicialmente produzidas no estágio da identificação, para realizar as primeiras modelagens de interações entre os componentes, de forma a definir como esses componentes devem colaborar para a satistafação dos requisitos. Essas interações resultaram em uma pormenorização nas especificações das interfaces, dos componentes e das arquiteturas de componentes, pelo preenchimento de detalhes não considerados no estágio de identificação. Com as interfaces e os componentes já identificados, partiu-se para o último estágio da especificação, o qual trata da construção de uma especificação rigorosa e coerente para as interfaces e para os componentes de software, além de um refinamento na arquitetura de especificação dos componentes. Desta forma, o processo de construção do software permitiu um rastreamento da aplicação dos artefatos produzidos, de forma a facilitar quaisquer alterações futuras. Os artefatos produzidos com a notação UML refletiram importantes tomadas de decisões sobre o projeto dos componentes de software e sobre a aplicação como um todo. Portanto, toda a modelagem realizada pôde ser utilizada para facilitar o entendimento e a comunicação no projeto de desenvolvimento do software, ao invés de servir exclusivamente para documentação.

Portanto, a interconexão entre os fluxos de trabalho e os artefatos levou em consideração as várias atividades possíveis desde a análise de requisitos até a implantação da aplicação de software, o que permitiu fornecer um roteiro abrangente desde as solicitações dos usuários (identificação e escrita dos requisitos) até o código final (a aplicação de interesse). Importante frisar que os fluxos de trabalho abasteceram os fluxos de trabalho subsequentes, pela entrega de artefatos,

de forma a permitir a compreensão, o gerenciamento, a construção e a manutenção dos componentes de software e das suas especificações, além da aplicação como um todo. Uma das vantagens do roteiro fornecido pelo processo de desenvolvimento pode ser vista na influência de um artefato em relação a outros artefatos ou até mesmo em relação a outros fluxos de trabalho.

Deve ser ressaltado que as especificações das interfaces não ilustram detalhes da implementação de suas operações. Ao invés disso, as interfaces especificadas representam meramente o conjunto de operações fornecidas por elas, a qual inclui a especificação das operações, o modelo de informação da interface e as pré e pós condições de cada operação. A ausência de detalhes da implementação na especificação da interface faz com que seja possível substituir a implementação de qualquer operação, sem alterar a especificação da interface e, consequentemente, sem alterar o contrato de uso com o cliente. Do mesmo modo, novas interfaces (e implementações) podem ser adicionadas sem implicar em alterações nas implementações existentes, resultando em uma melhoria na adaptabilidade dos componentes de software. Por exemplo, se fosse necessário estender o modelo computacional para considerar a representação equivalente dos reservatórios, o projetista deveria somente se preocupar em desenvolver uma nova interface *ISistHidroOperEnergRepEquiv* no componente *SistemaHidroeletrico* (Figura 9.1), de forma a prover as operações necessárias à esta representação do sistema hidroelétrico, sem preocupar-se com as outras interfaces fornecidas pelo componente em questão. Para o exemplo da representação equivalente do sistema hidroelétrico, a interface *ISistHidroOperEnergRepEquiv* deverá concentrar apenas operações relacionadas com o modelo equivalente, o que irá facilitar sua utilização (pois o cliente desta interface não precisa conhecer detalhes das outras duas interfaces implementadas), sua atualização (pois o implementador somente deve preocupar-se com a interface em questão) e sua especificação (pois a especificação da interface só agrega detalhes das suas operações, do seu modelo de informação e das pré e pós condições de suas operações, sem levar em conta os detalhes das outras interfaces fornecidas pelo componente de software que a fornece).

9.1.2 Sobre a Aplicação dos Modelos Computacionais de Otimização e Simulação da Operação Energética

Com relação à eficácia dos modelos computacionais desenvolvidos, o modelo de otimização da operação energética aplicou alguns estratagemas encontrados na literatura, de forma a aproveitar a estrutura particular da rede hidráulica, ao fazer uso da MIVB, além de ter aplicado algumas heurísticas (transferência de energia na cascata, transferência de energia na usina, etc.) para fazer

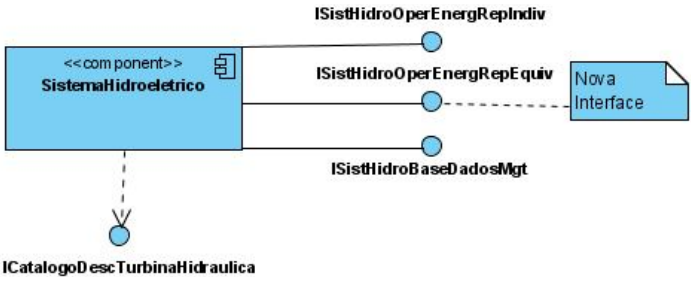

Figura 9.1: Diagrama de especificação do componente *SistemaHidroeletrico* com a interface *ISistHidroOperEnergRepEquiv*.

uso de uma melhor estratégia na partição dos arcos no problema. Com a aplicação do modelo de otimização a algumas usinas hidroelétricas do sistema brasileiro, pôde-se confirmar alguns importantes princípios da operação otimizada dos reservatórios. Portanto, um dos proveitos deste modelo está no fato de permitir o estudo de trajetórias otimizadas para as variáveis de decisão, por um amplo espectro de variáveis de saída (Figura 3.8), resultantes da otimização da operação energética. Um exemplo dos potenciais estudos que podem ser realizados consiste em testar o sistema hidroelétrico brasileiro em condições hidrológicas críticas ou mesmo com séries sintéticas de vazões, a fim de prever futuros problemas. Adicionalmente, evidenciou-se a eficácia e a aplicabilidade do modelo de otimização da operação energética implementado, de forma a credenciá-lo como uma ferramenta a ser agregada e potencialmente empregada nos estudos relativos ao planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração. Para este fim, realizou-se uma comparação entre os resultados obtidos pelo modelo de otimização implementado nesta tese (MCSOOESH), com os resultados obtidos pelo modelo de otimização do Hydrolab. Frisa-se que todos os resultados evidenciaram a coerência e a qualidade da solução obtida pelo modelo implementado.

Com a obtenção dos pontos representativos da operação otimizada dos reservatórios, pôde-se empregá-los para a obtenção de uma política de operação energética baseada em um sistema de inferência *fuzzy* paramétrico, a ser utilizada no modelo de simulação. Com relação ao modelo de simulação, sua principal vantagem consiste na possibilidade de realizar estudos concernentes ao planejamento da operação, utilizando-se as políticas de operação implementadas, a fim de realizar análises energéticas de sistemas hidroelétricos ou uma desagregação das metas de geração hidráulica entre cada usina do sistema hidroelétrico. Outras aplicações do modelo de simulação envolvem a sua utilização para o cálculo da energia firme ou garantida de sistemas hidroelétri-

cos, para o dimensionamento energético de um aproveitamento hidroelétrico (planejamento da expansão) e para a avaliação de novas políticas de operação energética.

Com a política proposta baseada em um sistema de inferência *fuzzy* Takagi-Sugeno, a operação energética das usinas hidroelétricas foi capaz de valorizar a água armazenada nos reservatórios, de tal forma que o processo de enchimento foi feito de jusante a montante, e o processo de esvaziamento foi feito de montante a jusante. Este importante princípio da operação otimizada de reservatórios para geração de energia elétrica é baseado no fato que a energia armazenada em uma usina é valorizada pela produtividade de todas as usinas a sua jusante. Como exemplo, a altura de queda líquida da usina mais a jusante influencia o valor da energia armazenada em todas as usinas a sua montante no sistema hidroelétrico.

A política de operação energética proposta foi aplicada e comparada, por meio de alguns estudos de caso, com a política de operação paralela, em sistemas hidroelétricos do sistema brasileiro. Os resultados evidenciaram a eficiência da política proposta, tomando-se como parâmetros tanto a energia armazenada no sistema, como a trajetória individual de armazenamento dos reservatórios das usinas, obtidos das simulações. Com relação à energia armazenada no sistema, os testes ilustraram que a política de operação proposta necessita de menos recursos hidráulicos sob as mesmas condições de operação que a política paralela. Com relação à trajetória de armazenamento dos reservatórios, com a política de operação energética proposta, as usinas de jusante seguiram a tendência de permanecerem cheias, mantendo alta produtividade, e por consequência, valorizando os volumes de água que fluem por elas. Já as usinas de montante foram responsáveis pela regularização das vazões afluentes, amortecendo a disponibilidade irregular e aleatória dos recursos hídricos. Desta forma, pode-se verificar que a política de operação energética proposta pode assegurar um fornecimento mais confiável e econômico da energia elétrica. Econômico porque a política proposta necessita de menos recursos hidráulicos de geração que a política paralela. Confiável porque a política proposta permite a operação do sistema hidroelétrico com níveis superiores de armazenamento nos reservatórios, diminuindo a possibilidade de déficits hidráulicos do sistema hidrotérmico de geração. Portanto, pode-se evidenciar a potencialidade da política proposta na otimização da utilização dos recursos hidráulicos, voltados para a geração de energia elétrica. Além do mais, a política proposta é bastante condizente com os objetivos do planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração, pois a otimização dos recursos hidráulicos busca minimizar a geração complementar. Dessa forma, quanto maior for o desempenho da política de operação energética na utilização dos recursos hidroelétricos de geração, menor será a complementação necessária para atender ao mercado de energia elétrica.

Adicionalmente, ao final de todos os horizontes de planejamento, observou-se que a política de operação paralela não consegue equiparar os níveis de armazenamento do sistema hidroelétrico com os níveis de armazenamento estabelecidos pela política de operação proposta. Portanto, a política proposta, além de maximizar os benefícios dos recursos hidroelétricos de geração durante o horizonte de planejamento, ainda garante uma maior confiabilidade e um menor custo de geração na continuidade da operação do sistema, ao chegar ao final do horizonte de planejamento com níveis mais elevados de água nos reservatórios. Diferentemente, a política de operação energética paralela chega ao final do horizonte de planejamento de algumas simulações com todos os reservatórios quase vazios, fazendo com que a confiabilidade e o custo da operação estejam extremamente comprometidos na operação contínua do sistema.

Ressalta-se que os resultados alcançados com a aplicação dos modelos computacionais de simulação e otimização propostos, indicam que eles podem ser considerados como ferramentas alternativas ou complementares para o planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos. Deve-se mencionar também que os tempos computacionais envolvidos na execução dos modelos de otimização e de simulação não representam um obstáculo para sua aplicação real.

9.2 Contribuições

Um domínio do mundo real, o domínio do planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos, foi decomposto em componentes de software potencialmente reutilizáveis. Com uma especificação precisa, clara e rigorosa dos componentes de software, estes puderam ser utilizados nos diversos modelos propostos, sem a necessidade do conhecimento de detalhes da sua implementação. Isto porque a definição e a utilização dos serviços oferecidos por um componente foi feita com base apenas nas especificações de suas interfaces. Com relação ao processo de desenvolvimento UML *Components*, pode-se concluir que ele guiou de maneira sistemática a construção da aplicação e dos seus componentes de software, de forma a torná-los bem organizados, com a possibilidade de incluir novos requisitos, ou modificar os requisitos existentes de uma maneira ordenada, mesmo quando a aplicação já se encontra em operação. Desta forma, com a abordagem baseada em componentes de software, o projetista/especificador não é forçado a antecipar possíveis requisitos futuros construindo interfaces mais gerais com capacidade extra.

Desta forma, com a abordagem baseada em componentes de software, o projetista/especificador não é forçado a antecipar possíveis requisitos futuros construindo interfaces mais gerais com ca-

pacidade extra. Com o particionamento das suas funcionalidades em várias interfaces, componentes de software tendem a apresentar uma alta coesão e um baixo acoplamento, resultando em um maior potencial de reutilização, atualização e substituição, pois as interfaces agregam apenas serviços (operações) relacionados entre si. Assim, fica mais fácil realizar a substituição de um componente de software, seja por uma implementação completamente diferente dos mesmos serviços ou por uma versão atualizada da implementação corrente. Para obter este benefício, o processo de desenvolvimento enfatizou a arquitetura do sistema, a qual ilustra a estrutura e a dependência dos componentes de software. Com a construção da arquitetura dos componentes, pôde-se gerenciar o sistema completo, seus vários componentes envolvidos e as mudanças de requisitos, ao invés de somente garantir que os componentes de software sejam reutilizáveis em várias aplicações. Outro aspecto interessante da modelagem é o fornecimento de regras e mecanismos para garantir que os componentes de software não interfiram, de forma inapropriada, em um outro componente depois que eles encontram-se instalados em uma aplicação computacional.

Além do mais, com a divisão da aplicação em camadas hierárquicas, e a consequente alocação dos componentes de software nessas camadas, as manutenções e substituições dos componentes de software dentro de uma aplicação tornam-se mais fáceis de serem gerenciadas, porque qualquer alteração em um componente de software de uma determinada camada só deverá considerar o impacto dessa mudança nos componentes de software das camadas adjacentes, em vez de potencialmente afetarem todos os componentes de software presentes na aplicação. Portanto, a substituição dos componentes pode ser feita mais facilmente, sujeita apenas às restrições arquiteturais (estrutura e dependências) da sua camada.

Paralelamente ao uso dos componentes de software, este trabalho apresentou uma política de operação energética baseada em sistemas de inferência *fuzzy* Takagi-Sugeno. A política proposta é baseada na otimização da operação energética das usinas hidroelétricas, empregando o modelo de otimização desenvolvido. Com a operação energética otimizada, obtém-se as relações entre a energia armazenada do sistema e o volume operativo de cada usina a reservatório. A partir dessas relações são ajustados os parâmetros do modelo Takagi-Sugeno de ordem um.

Ao optar-se por um sistema de inferência *fuzzy* para determinar a política de operação energética do sistema hidroelétrico, ou seja, para calcular o volume operativo de cada usina, obtém-se uma estratégia de ação/controle que pode ser monitorada e interpretada, inclusive do ponto de vista linguístico. Outra vantagem encontrada na utilização dos sistemas de inferência *fuzzy*, durante o desenvolvimento deste trabalho, refere-se à inclusão da experiência do grupo de pesquisa

da USP - EESC - SEL - LSEE no estudo do comportamento otimizado dos reservatórios para geração de energia elétrica, na definição dos parâmetros dos sistemas *fuzzy* implementados. Pôde-se utilizar esta experiência, de forma direta, para definir os termos primários (conjuntos *fuzzy*) da variável linguística e na construção da base de regras.

9.3 Publicações Realizadas e Submetidas

Esta seção traz uma listagem completa das publicações do autor durante o doutoramento, incluindo as decorrentes deste trabalho. Foram publicados 6 artigos em conferências internacionais, 7 em conferências nacionais, 2 submetidos a periódicos, sendo que um deles já encontra-se em sua segunda revisão.

9.3.1 Publicações Realizadas

- RABÊLO, Ricardo de Andrade Lira; CARNEIRO, Adriano Alber de França Mendes; BRAGA, R. T. V. *Component-Based Development Applied to Energetic Operation Planning of Hydrothermal Power Systems.* In: 2009 IEEE Bucharest Power Tech, 2009, Bucharest. 2009 IEEE Bucharest Power Tech, 2009;

- RABÊLO, Ricardo de Andrade Lira; CARNEIRO, Adriano Alber de França Mendes; BRAGA, R. T. V. *An Energetic Operation Policy Using Fuzzy Controllers for Maximization of Benefits in the Brazilian Hydrothermal Power System.* In: 2009 IEEE Bucharest Power Tech, 2009, Bucharest. 2009 IEEE Bucharest Power Tech, 2009;

- RABÊLO, Ricardo de Andrade Lira; CARNEIRO, Adriano Alber de França Mendes; BRAGA, R. T. V. Uma Política de Operação Energética Baseada em Sistemas de Inferência Fuzzy Takagi-Sugeno. In: ENIA - Encontro Nacional de Inteligência Artificial, 2009, Bento Gonçalves. ENIA, 2009;

- Sousa, A. S.; RABÊLO, Ricardo de Andrade Lira; Asada, E. N. Aplicação do Algoritmo *Branch and Bound* para solução do Problema de Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica. In: XLI SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2009, Porto Seguro. XLI SBPO, 2009;

- Fernandes, R. A. S.; RABÊLO, Ricardo de Andrade Lira; SILVA, B. C.; OLESKOVICZ, M.; CARNEIRO, Adriano Alber de França Mendes; Silva, I. N. Técnicas Alternativas

para Processamento de Sinais no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica.. In: VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2009, Blumenau - SC. VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2009;

- Fernandes, R. A. S.; RABÊLO, Ricardo de Andrade Lira; SILVA, B. C.; OLESKOVICZ, M.; CARNEIRO, Adriano Alber de França Mendes; Silva, I. N. Uma Abordagem Baseada em Sistemas Inteligentes Híbridos Aplicados ao Processo de Identificação dos Distúrbios Relacionados à Qualidade da Energia Elétrica. In: IX SBAI - Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2009, Brasília. ANAIS DO IX Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2009. v. 9;

- RABÊLO, Ricardo de Andrade Lira; CARNEIRO, Adriano Alber de França Mendes; BRAGA, R. T. V. Um Sistema de Inferência Fuzzy Paramétrico Aplicado ao Planejamento da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos de Geração. In: IX Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2009, Brasília. ANAIS DO IX Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2009. v. 9;

- Fernandes, R. A. S.; RABÊLO, Ricardo de Andrade Lira; SILVA, B. C.; OLESKOVICZ, M.; CARNEIRO, Adriano Alber de França Mendes; Silva, I. N. *An Alternative Preprocessing Technique Applied to Power Quality Disturbances Identification.* In: 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, 2009, Curitiba. 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, 2009;

- RABÊLO, Ricardo de Andrade Lira; LOPES, Weyler Nunes Martins; BRAGA, R. T. V.; CARNEIRO, Adriano Alber de França Mendes. Análise, Projeto e Implementação Orientados a Objetos Aplicados ao Planejamento da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos de PotênciaA. In: XVII Congresso Brasileiro de Automática, 2008, Juiz de Fora. XVII Congresso Brasileiro de Automática, 2008, 2008;

- RABÊLO, Ricardo de Andrade Lira; SILVA, B. C.; BARBOSA, D.; OLESKOVICZ, M.; CARNEIRO, Adriano Alber de França Mendes; COURY, D. V. Um Estudo Comparativo entre os Modelos de Redes Neurais Artificiais MLP e RBF para a Classificação de Distúrbios Associados à Qualidade da Energia Elétrica. In: XVII Congresso Brasileiro de Automática, 2008, Juiz de Fora. XVII Congresso Brasileiro de Automática, 2008, 2008;

- RABÊLO, Ricardo de Andrade Lira; LOPES, Weyler Nunes Martins; CARNEIRO, Adriano Alber de França Mendes. Aplicação de Orientação a Objetos no Planejamento da

Operação de Sistemas Hidrotérmicos de Potência. In: Congresso Ibero Latino-Americano sobre Métodos Computacionais em Engenharia, 2007, Porto, 2007;

- RABÊLO, Ricardo de Andrade Lira; LOPES, Weyler Nunes Martins; CARNEIRO, Adriano Alber de França Mendes. Uma Abordagem Computacional para o Planejamento da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos de Potência. In: Seventh CLAGTEE - Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission, 2007, Viña del Mar. Seventh CLAGTEE - Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission, 2007, 2007, Viña del Mar. VII Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission, 2007;

- RABÊLO, Ricardo de Andrade Lira; SACCHI, Rodrigo; CARNEIRO, Adriano Alber de França Mendes. Um Programa Para Operação de Sistemas de Usinas Hidroelétricas. In: XXVII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, 2006, Belém. Proceedings of the XXVII Iberian Latin American Congress On Computational Methods in Engineering, 2006.

9.3.2 Publicações Submetidas

- RABÊLO, Ricardo de Andrade Lira; Fernandes, R. A. S.; CARNEIRO, Adriano Alber de França Mendes; BRAGA, R. T. V. Uma Abordagem Baseada em Sistemas de Inferência *Fuzzy* Takagi-Sugeno Aplicada ao Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos de Geração. Controle e Automação - Sociedade Brasileira de Automática;

- RABÊLO, Ricardo de Andrade Lira; CARNEIRO, Adriano Alber de França Mendes; BRAGA, R. T. V. Uma Aplicação de Componentes de Software para o Planejamento da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos de Geração. Controle e Automação - Sociedade Brasileira de Automática.

9.4 Trabalhos Futuros

Este trabalho focou o desenvolvimento de modelos computacionais aplicáveis ao planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração, usando um processo de desenvolvimento baseado em componentes de software. Os modelos computacionais de otimização, de simulação e da política de operação energética foram desenvolvidos (analisados, especificados

e implementados) seguindo o processo de desenvolvimento UML *Components*. Porém, diversos trabalhos podem ser feitos para tirar ainda mais proveito da utilização dos componentes de software, bem como do emprego de sistemas inteligentes[1], visando a obtenção de soluções mais aprimoradas para a operação energética do sistema hidrotérmico, bem como a descoberta de novos princípios para a operação otimizada, de forma a contribuir para o planejamento da operação do sistema brasileiro de geração de energia elétrica.

Desta forma, a pesquisa apresentada nesta tese inspira perspectivas imediatas de aplicação para novas pesquisas concernentes:

- À aplicação de técnicas que permitem a aplicação da usabilidade no desenvolvimento de Interfaces Humano-Computador, de forma a adequar este sistema às estratégias dos usuários, proporcionando-lhes a realização de tarefas de modo mais eficaz, eficiente e agradável [41]. Com isto, os modelos computacionais devem propiciar uma melhor interação entre o usuário (operador) e suas várias funcionalidades. Pode-se incluir aqui, a extensão dos modelos propostos para ferramentas que sejam disponibilizadas via *web* [45];

- À modelagem e implementação de um sistema para armazenar em um banco de dados [42, 52] as informações do sistema hidrotérmico brasileiro;

- Ao estudo da influência da variação da demanda de energia elétrica no comportamento otimizado dos reservatórios. Este tipo de estudo é importante para verificar como o sistema hidroelétrico vai suprir uma demanda sazonal, a fim de acompanhar suas variações, o que é agravado pelo fato de que, geralmente as variações da demanda não estão sintonizadas com as variações das vazões afluentes aos reservatórios do sistema hidroelétrico;

- Ao aperfeiçoamento do modelo de otimização, por meio de métodos de segunda ordem [114] que utilizem a informação da matriz Hessiana para a determinação da direção de caminhada dos arcos super-básicos, a fim de melhorar a convergência do algoritmo, especialmente no final do processo iterativo de otimização;

- À representação equivalente do sistema hidroelétrico. Para agregar o sistema hidroelétrico em um modelo equivalente de energia, é necessária a adoção de uma política de operação energética para os reservatórios do sistema [39, 40, 72]. Portanto, uma das aplicações adicionais do componente de software *PoliticaOperacaoEnergetica*, proposto neste trabalho,

[1]Sistemas inteligentes são sistemas que utilizam técnicas da Inteligência Aritificial (Sistemas *Fuzzy*, Redes Neurais Artificiais, Computação Evolutiva, Agentes Inteligentes dentre outros) para apoiar o seu desenvolvimento.

consiste na avaliação comparativa do modelo equivalente de energia, utilizando a política proposta, baseada em um sistema de inferência *fuzzy*, com o modelo equivalente de energia utilizando a política paralela;

- Ao desenvolvimento de componentes de software que implementem os Algoritmos Genéticos desenvolvidos em [84, 85], a fim de permitir que os estudos de otimização da operação energética sejam realizados com mais de uma ferramenta. Para isto, inicialmente, tornaria-se necessário apenas a especificação e implementação dos componentes de software relativos aos Algoritmos Genéticos, pois toda a estrutura necessária relativa ao planejamento da operação (horizonte de planejamento, rede hidráulica, etc.) já encontra-se disponibilizada pelos outros componentes de software já implementados nesta tese. Adicionalmente, pode-se investigar a aplicação dos Algoritmos Genéticos durante o final do processo iterativo de otimização, a fim de melhorar a convergência do algoritmo do Gradiente Reduzido ou mesmo melhorar a solução produzida. Isto porque, Algoritmos Genéticos são capazes de identificar e explorar aspectos do ambiente no qual o problema está inserido e convergir de forma global para soluções ótimas [141];

- Ao desenvolvimento de algumas melhorias nos parâmetros do sistema de inferência *fuzzy* proposto, principalmente no ajuste das funções de pertinência, por meio de técnicas como Redes Neurais Artificiais [70] ou Algoritmos Genéticos [64, 69];

- À implementação de um sistema de inferência *fuzzy* de Mamdani [91, 92], a fim de permitir um sistema de inferência alternativo ao modelo implementado neste trabalho. As regras de produção em um modelo de inferência de Mamdani possuem variáveis linguísticas tanto em seus antecedentes como em seus consequentes. Portanto, a base de regras nestes sistemas de inferência pode ser definida exclusivamente de forma linguística, sem a necessidade de dados numéricos de entrada/saída. Entretanto, a necessidade de ajustes nas funções de pertinência das variáveis linguísticas de saída requer um esforço adicional por parte do projetista no desenvolvimento do sistema.

Adicionalmente, para dar continuidade ao trabalho exposto e como trabalho futuro latente, sugere-se o desenvolvimento de um sistema computacional de suporte à decisão, baseado em componentes de software, para o planejamento e programação do sistema hidrotérmico brasileiro, o qual poderá ainda aplicar as técnicas e os resultados das várias pesquisas realizadas pelo LSEE, no âmbito do planejamento da expansão [160], do planejamento da operação [16, 25, 26, 72, 82, 83, 108, 147, 159, 182, 183] e da programação da operação [142, 143].

Referências Bibliográficas

[1] Abadie, J. e J. Carpentier (1969). Generalization of the Wolfe Reduced Gradient Method to the case of Nonlinear Constraints. *New York*, 37–47.

[2] Abdel-Akher, M., K. M. Nor, H. Mokhlis, e A. H. A. Rashid (2004). Development of Three Phase Load Flow by Reusing Object Oriented Single Phase Load Flow. In *Universities Power Engineering Conference, 2004. UPEC 2004. 39th International*, Volume 3.

[3] Abdel-Akher, M., K. M. Nor, e A. H. A. Rashid (2004). Use case approach for developing object oriented power system studies: Object oriented three phase load flow. In *ICEEC '04. International Conference on Electrical, Electronic and Computer Engineering.*

[4] Agostini, M. N., I. C. Decker, e A. S. Silva (2002a). Desenvolvimento e Implementação de uma Base Computacional Orientada a Objetos Para Aplicações em Sistemas de Energia Elétrica. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica 13.*

[5] Agostini, M. N., I. C. Decker, e A. S. Silva (2002b). Nova filosofia para o projeto de softwares na Área de sistemas de energia elétrica utilizando modelagem orientada a objetos. In *XIV Congresso Brasileiro de Automática*, pp. 1555–1561.

[6] ANEEL (2002). *Atlas de Energia Elétrica do Brasil.* ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica.

[7] Arvanitidis, N. V. e J. Rosing (1970a). Composite Representation of a Multireservoir Hydroelectric Power System. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-89*(2), 319–326.

[8] Arvanitidis, N. V. e J. Rosing (1970b). Optimal Operation of Multireservoir Systems Using a Composite Representation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-89*(2), 327–335.

[9] Atkinson, C., J. Bayer, e D. Muthig (2000). Component-Based Product Line Development: The KobrA Approach. In *Software Product Lines: Experience and Research Directions: Proceedings of the First Software Product Lines Conference (SPLC1), August 28-31, 2000, Denver, Colorado.* Kluwer Academic Publishers.

[10] Atkinson, C., D. Muthig, J. Bayer, C. Bunse, E. Kamsties, O. Laitenberger, R. Laqua, B. Raech, J. Wust, e J. Zettel (2002). *Component-based Product Line Engineering with UML.* Springer.

[11] Bazaraa, M. S., J. J. Jarvis, e H. D. Sherali (2004). *Linear Programming and Network Flows.* Wiley-Interscience.

[12] Bazaraa, M. S., C. M. Shetty, e H. D. Sherali (1993). *Nonlinear programming: theory and algorithms.* Wiley New York.

[13] Booch, G., J. Rumbaugh, e I. Jacobson (1999). *The Unified Modeling Language User Guide, 1999.* Addison-Wesley Longman.

[14] Britton, J. (1992). An Open, Object-Based Model as the Basis of an Architecture for Distribution Control Centers. *IEEE Transactions on Power Systems 7*(4), 1500–1508.

[15] Bussab, W. O. e P. A. Morettin (2006). *Estatística Básica.* Editora Saraiva.

[16] Carneiro, A. A. F. M. (1991). *Contribuição ao Planejamento da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos de Potência.* Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas.

[17] Carneiro, A. A. F. M. e M. Kadowaki (1996). Regras de operação para grandes sistemas hidroelétricos em cascata. In *Anais do 11o Congresso Brasileiro de Automática.*

[18] Carneiro, A. A. F. M., P. T. Leite, D. Silva Filho, e A. C. P. L. F. Carvalho (1998). Genetic Algorithms Applied to Hydrothermal System Scheduling. In *Power System Technology, 1998. Proceedings. POWERCON'98. 1998 International Conference on*, Volume 1.

[19] Carneiro, A. A. F. M. e J. Montanha (1997). Estudo da operação Ótima de usinas hidroelétricas através de autovalores da matriz hessiana. *XVIII CILAMCE - Iberian Latin American Congress On Computational Methods in Engineering.*

[20] Carneiro, A. A. F. M. e S. Soares (1990). Comportamento Ótimo de reservatórios na operação de sistemas hidroelétricos. In *Anais do 8o Congresso Brasileiro de Automática.*

[21] Carneiro, A. A. F. M., S. Soares, e P. S. Bond (1990). A Large Scale of an Optimal Deterministic Hydrothermal Scheduling Algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems 5*(1), 204–211.

[22] Carneiro, A. A. F. M., S. Soares, e M. F. H. Carvalho (1988). Um modelo adaptativo para o planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos de potência. In *Anais do 7o Congresso Brasileiro de Automática*, pp. 823–829.

[23] Carvalho, M. F. e S. Soares (1987). An Efficient Hydrothermal Scheduling Algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems 2*(3), 537–542.

[24] Carvalho, M. F. H. (1987). *Modelos de Fluxo em Redes Aplicados a Sistemas de Energia Elétrica.* Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas.

[25] Castro, M. A. A. (2003). Estudo das técnicas de controle de cheias em usinas hidroelétricas com aplicação de novas abordagens. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

[26] Castro, M. A. A. (2006). *O Planejamento Energético Ótimo de Médio Prazo com Representação Individualizada das Usinas Hidroelétricas.* Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

[27] Castro, M. A. A., M. G. Andrade, e A. A. F. M. Carneiro (2006). O planejamento energético Ótimo de médio prazo com representação individualizada das usinas hidrelétricas. In *Anais do 16o Congresso Brasileiro de Automática.*

[28] Castro, M. A. A., R. Sacchi, J. S. Nazareno, e A. A. F. M. Carneiro (2004). Estudo da influência da função de custo futuro na operação Ótima de sistemas hidrotérmicos a usinas individualizadas. In *IEEE T&D 2004 Latin América.*

[29] Castro, R. (2004). *Análise de Decisões sob Incertezas para Investimentos e Comercialização de Energia Elétrica no Brasil.* Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas.

[30] Cheesman, J. e J. Daniels (2001). *UML components.* Addison-Wesley Boston.

[31] Cicogna, M. A. (1999). Modelo de Planejamento da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos a Usinas Individualizadas Orientado por Objetos. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia e Computação, UNICAMP.

[32] Cicogna, M. A. (2003). *Sistema de Suporte a Decisão para o Planejamento e a Programação da Operação de Sistemas de Energia Elétrica.* Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

[33] Cicogna, M. A. e S. Soares (2003). Um Sistema de Suporte à Decisão para o Planejamento e a Programação da Operação de Sistemas Hidrotérmicos de Potência. In *XVII SNPTEE-Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica.*

[34] Cockburn, A. (2001). *Writing effective use cases.* Addison-Wesley Boston.

[35] Cockburn, A. (2008). http://alistair.cockburn.us.

[36] Cruz Jr, G. e S. Soares (1995). Non-parallel composite representation of hydroelectric systems for long-term hydrothermal scheduling. In *IEEE Power Industry Computer Applications Conference*, pp. 566–571.

[37] Cruz Jr, G. C. (1994). Planejamento da Operação Energética a Longo Prazo de Sistemas Hidrotérmicos de Potência. Dissertação de Mestrado, FEE/UNICAMP.

[38] Cruz Jr, G. C. (1998). *Modelo Equivalente Não Linear para o Planejamento da Operação a Longo Prazo de Sistemas de Energia Elétrica.* Tese de Doutorado, FEE/UNICAMP.

[39] Cruz Jr, G. C. e S. Soares (1996). Non-Uniform Composite Representation Hydroelectric Systems for Long-Term Hydrothermal Scheduling. *IEEE Transactions on Power Systems 11*(2), 702–707.

[40] Cruz Jr, G. C. e S. Soares (1999). General Composite Representation of Hydroelectric Systems. In *Power Industry Computer Applications, 1999. PICA'99. Proceedings of the 21st 1999 IEEE International Conference*, pp. 177–182.

[41] Cybis, W., A. H. Betiol, e R. Faust (2007). *Ergonomia e Usabilidade - Conhecimentos, Métodos e Aplicações.* Novatec Editora.

[42] Date, C. J. (2004). *Introdução a Sistemas de Bancos de Dados.* Campus.

[43] Deitel, P. e H. Deitel (2006). *Java How to Program.* Prentice Hall Press Upper Saddle River, NJ, USA.

[44] Dembo, R. S. e J. G. Klincewicz (1981). A Scaled Reduced Gradient Algorithm For Network Flow Problems With Convex Separable Costs. *Network Models and Associated Applications.*

[45] Dias, C. (2002). *Usabilidade na Web: Criando Portais Mais Acessíveis.* Altabooks.

[46] Dias, J. A. S. e C. L. T. Borges (2009). Modelo orientado a objetos para avaliação da confiabilidade por simulação monte carlo com representação da geração eólica. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automática 20*(3), 359 – 372.

[47] do Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos, C. C. (2001). Relatório analítico - brasil, regiões e sistemas elétricos. Technical report, ELETROBRÁS.

[48] do Sistema Elétrico, O. O. N. (2004). *Evaporações Líquidas nas Usinas Hidrelétricas.*

[49] Donegan, P. M. (2008). Geração de família de produtos de software com arquitetura baseada em componentes. Dissertação de Mestrado, Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo.

[50] D'Souza, D. F. e A. C. Wills (1998). *Objects, Components, and Frameworks with UML: the Catalysis Approach.* Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston, MA, USA.

[51] ELETROBRÁS (1999). *INTERBASE - Manual do Usuário. Interface Gráfica e Gerenciamento da Base de Dados de Pequenas Centrais Elétricas para execução do modelo MSUI.*

[52] Elsmarsi, R. E. e S. Navathe (2005). *Sistemas de Banco de Dados.* Addison-Wesley.

[53] Ferreira, R. F. (1997). Contribuições ao planejamento da operação energética de sistemas de energia elétrica com Ênfase ao acoplamento entre os planejamentos de médio e longo prazo. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas.

[54] Finardi, E. C. (1999). Planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos utilizando computação de alto desempenho. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina.

[55] Flinn, D. J. e R. C. Dugan (1992). A database for diverse power system simulation applications. *IEEE Transactions on Power Systems 7*(2), 784–790.

[56] Foley, M. e A. Bose (1995). Object-Oriented On-Line Network Analysis. *IEEE Transactions on Power Systems 10*(1), 125–132.

[57] Foley, M., A. Bose, W. Mitchell, e A. Faustini (1993). An object based graphical user interface for power systems. *Power Systems, IEEE Transactions on 8*(1), 97–104.

[58] Fortunato, L. A. M., T. A. Araripe Neto, J. C. R. Albuquerque, e M. V. F. Pereira (1990). *Introdução ao Planejamento da Expansão e Operação de Sistemas de Produção de Energia Elétrica.* EDUFF Editora Universitária, Rio de Janeiro, RJ.

[59] Fowler, M. (1997). *Analysis Patterns: Reusable Object Models.* Addison-Wesley Professional.

[60] Fuerte-Esquivel, C. R., E. Acha, S. G. Tan, e J. J. Rico (1998). Efficient Object Oriented Power Systems Software for the Analysis of Large-Scale Networks Containing FACTS-Controlled Branches. *IEEE Transactions on Power Systems 13*(2), 464–472.

[61] Furlan, J. D. (1998). *Modelagem de Objetos através da UML–the Unified Modeling Language: Análise e desenho orientados a objeto.* São Paulo: Makron Books.

[62] Gamma, E., R. Helm, R. Johnson, e J. Vlissides (1995). *Design patterns: elements of reusable object-oriented software.* Addison-Wesley Reading, MA.

[63] Gimenes, I. M. S. e E. H. M. Huzita (2005). *Desenvolvimento Baseado em Componentes: Conceitos e Técnicas.* Rio de Janeiro: Ciência Moderna.

[64] Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning.* Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston, MA, USA.

[65] Guedes, G. T. A. (2006). *UML: Uma abordagem prática.* Novatec.

[66] Hakavik, B. e A. T. Holen (1994). Power System Modelling and Sparse Matrix Operations Using Object-Oriented Programming. *IEEE Transactions on Power Systems 9*(2), 1045–1051.

[67] Handschin, E., M. Heine, D. Konig, T. Nikodem, T. Seibt, e R. Palma (1998). Object-oriented software engineering for transmission planning in open access schemes. *IEEE Transactions on Power Systems 13*(1), 94–100.

[68] Hanscom, M. A., L. Lafond, L. Lasdon, e G. Pronovost (1980). Modeling and resolution of the mid-term generation planning problem for a large scale hydroeletric system. *Management Science.*

[69] Haupt, R. L. e S. E. Haupt (1998). *Practical Genetic Algorithms.* Wiley New York.

[70] Haykin, S. (2008). *Neural Networks and Learning Machines.* Prentice Hall.

[71] Heineman, G. T. e W. T. Councill (2001). *Component-based Software Engineering: putting the pieces together.* Addison Wesley.

[72] Kadowaki, M. (1995). Simulação da Operação de Sistemas Hidroelétricos de Potência a Usinas Individualizadas com Regras Otimizadas. Dissertação de Mestrado, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.

[73] Kagan, N., C. C. B. Oliveira, e E. J. Robba (2005). *Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.* Edgard Blücher.

[74] Keogh, J. e M. Giannini (2004). *OOP Demystified.* McGraw-Hill/Osborne New York.

[75] Kligerman, A. S., L. R. M. Ferreira, e V. Ferreira (1992). Análise comparativa entre "valor da Água" e "custo marginal de operação". Technical report, SGCRISE.

[76] Kruchten, P. (2000). *The Rational Unified Processing.* Addison-Wesley Publishing Company.

[77] Larman, C. (2005). *Applying UML and Patterns. An Introduction to Object-Oriented Analysis and Design and Iterative Development, 3. uppl.* Prentice Hall, ISBN 0-13-148906-2.

[78] Lehman, M. M. (1996). Laws of software evolution revisited. In *Proc. European Workshop on Software Process Technology.*

[79] Lehman, M. M. e L. Belady (1985). *Program Evolution: Processes of Software Change.* Londres: Academic Press.

[80] Lehman, M. M. e D. E. Perry (1998). On evidence supporting the feast hypothesis and the laws of software evolution. In *Proc. Metrics' 98, Berthesda. IEEE Computer Society Press.*

[81] Lehman, M. M. e J. F. Ramil (2001). An approach to modelling long-term growth trends in software systems. In *Proc. Int. Conf. on Software Maintenance, Florence, Italy.*

[82] Leite, P. T. (1999). Um algoritmo genético para o planejamento de sistemas hidroelétricos. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

[83] Leite, P. T. (2003). *Aplicação de Técnicas de Inteligência Artificial no Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos de Potência.* Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

[84] Leite, P. T., A. A. F. M. Carneiro, e A. C. P. L. F. Carvalho (2002). Energetic Operation Planning Using Genetic Algorithms. *IEEE Transactions on Power Systems 17*(1), 173–179.

[85] Leite, P. T., A. A. F. M. Carneiro, e A. C. P. L. F. Carvalho (2006). Aplicação de Algoritmos Genéticos na Determinação da Operação Ótima de Sistemas Hidrotérmicos de Potência. *SBA: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automática 17*, 81–88.

[86] Liu, Q. e S. Cheng (2000). Object-Oriented Methods Drive Protective Relay System. *IEEE Computer Applications in Power 13*(1), 33–37.

[87] Losi, A. e M. Russo (2000). An Object Oriented Approach to Load Flow in Distribution Systems. In *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000*, Volume 4.

[88] Losi, A. e M. Russo (2003). Object-Oriented Load Flow for Radial and Weakly Meshed Distribution Networks. *IEEE Transactions on Power Systems 18*(4), 1265–1274.

[89] Losi, A. e M. Russo (2005). Dispersed Generation Modeling for Object-Oriented Distribution Load Flow. *IEEE Transactions on Power Delivery 20*(2 Part 2), 1532–1540.

[90] Lyra, C. (1984). *Contribuição ao Planejamento da Produção de Energia em Sistemas de Potência*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas.

[91] Mamdani, E. H. (1974). Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant. *Proceedings of IEE Control and Science 121*(12), 1585–1588.

[92] Mamdani, E. H. (1977). Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis. *IEEE Transactions on Computers 26*(12), 1182–1191.

[93] Manzoni, A., A. S. Silva, e I. C. Decker (1999). Power systems dynamics simulation using object-oriented programming. *IEEE Trans. On Power Systems, 14*.

[94] Marques, T. C. (2006). *Uma Politica Operativa a Usinas Individualizadas para o Planejamento da Operação Energetica do Sistema Interligado Nacional*. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas.

[95] Marques, T. C., M. A. Cicogna, e S. Soares (2005). Assessment of energy availability of hydro system under different operation policies. *Proceedings of IEEE Power Tech.*

[96] Marques, T. C., M. A. Cicogna, e S. Soares (2006). Benefits of coordination in the operation of hydroelectric power systems: Brazilian case. In *2006 IEEE - PES GENERAL MEETING.*

[97] Martin, J. e J. Odell (1995). *Object-Oriented Methods: A Foundation*. Prentice-Hall.

[98] Martinez, L. (2001). *Política de Controle Malha Fechada e Malha Aberta no Planejamneto da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos*. Tese de Doutorado, PhD thesis, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

[99] Martinez, L., R. Ballini, e S. Soares Filho (2002). Influência da condição terminal no planejamento energético de sistemas hidrotérmicos. *XIV Congresso Brasileiro de Automática*, 1810–1815.

[100] Mathias, W. F. e J. M. Gomes (2004). *Matemática Financeira.* Editora Atlas.

[101] Melo, A. C. V. e F. S. C. Silva (2003). *Princípios de Linguagens de Programação.* Edgard Blucher Ltda.

[102] Meyer, B. (1997). *Object-oriented software construction.* Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.

[103] Mokhlis, H. e K. M. Nor (2003). Object Oriented Sparse Linear Solver Component for Power System Analysis. In *National Power and Energy Conference (PECon) 2003.*, pp. 22–26.

[104] Monticelli, A. (1983). *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica.* Editora Edgard Blücher Ltda.

[105] Moura, A. C., A. Vasconcelos, e C. Werner (2008). Uma estratégia de reestruturação de modelo baseada em métricas para apoiar a reengenharia de software orientado a objetos para componentes. *Infocomp - Journal of Computer Science, Special Edition.*

[106] Muller, A. C. (1995). *Hidrelétricas, meio ambiente e desenvolvimento.* Makron Books.

[107] Nakazawa, T. S., R. Sacchi, e A. A. F. M. Carneiro (2006). Regras de operação de reservatórios para sistemas hidrotérmicos de potência com base em indicadores econômicos. *XXVII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering.*

[108] Nazareno, J. S. (2005). Um algoritmo de otimização determinístico para o estudo e planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos de potência. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

[109] Neyer, A., F. Wu, e K. Imhof (1990). Object-oriented programming for flexible software: example of aload flow. *Power Systems, IEEE Transactions on 5*(3), 689–696.

[110] Nor, K. M., H. Mokhlis, e T. A. Gani (2004). Reusability Techniques in Load-Flow Analysis Computer Program. *IEEE Transactions on Power Systems 19*(4), 1754–1762.

[111] Oliveira, D. e F. D. Galiana (1996). A Model for the Planning of Electric Energy Systems Including Exergetic Considerations. *IEEE Transactions on Power Systems 11*(2), 675–682.

[112] Oliveira, E. J., A. L. M. Marcato, R. S. Rocha, L. W. Oliveira, I. C. S. Silva Jr., e J. L. R. Pereira (2009). Influência da variação da produtividade das usinas hidrelétricas no cálculo da energia firme. *SBA: Controle & Automação. 20*(2), 247–255.

[113] Oliveira, G. G. (1993). Otimização da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos com Representação Individualizada das Usinas e Afluências Determinísticas. Dissertação de Mestrado, FEEC/UNICAMP.

[114] Oliveira, G. G. e S. Soares (1995). A Second Order Network Flow Algorithm For Hydrothermal Scheduling. *IEEE Transactions on Power Systems 10*(3), 1635–1641.

[115] Oliveira Júnior, H. A., A. M. Caldeira, M. A. S. Machado, e R. Tanscheit (2007). *Inteligência Computacional Aplicada à Administração, Economia e Engenharia em Matlab.* Thomson Learning.

[116] ONS. *Avaliação de Curto Prazo da Operação – Séries Históricas de Vazões.* Data da visita: 29/08/2007.

[117] ONS (2010). Programa mensal de operação eletroenergética para o mês de abril - sumário executivo. metas e diretrizes para a semana operativa de 03/04/2010 a 09/04/2010. Technical report, Operador Nacional do Sistema Elétrico.

[118] Page-Jones, M. (2001). *Fundamentos do Desenho Orientado a Objeto com UML.* .

[119] Pandit, S., S. A. Soman, e S. A. Khaparde (2000). Object-oriented design for power system applications. *IEEE Computer Applications in Power 13*(4), 43–47.

[120] Pandit, S., S. A. Soman, e S. A. Khaparde (2001a). Design of Generic Direct Sparse Linear System Solver in C++ for Power System Analysis. *IEEE Transactions on Power Systems 16*(4), 647.

[121] Pandit, S., S. A. Soman, e S. A. Khaparde (2001b). Object-Oriented Network Topology Processor. *IEEE Computer Applications in Power 14*(2), 42–46.

[122] Pedrycz, W. (1993). *Fuzzy Control and Fuzzy Systems.* John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA.

[123] Pedrycz, W. e F. Gomide (1998). *An Introduction to Fuzzy Sets.* MIT Press Cambridge, MA.

[124] Peharda, D., Z. Hebel, e A. Barta (2007). Power System Topology Assessment and Pre-Estimation in an Object Oriented Environment. *AFRICON 2007*, 1–7.

[125] Peharda, D., Z. Hebel, e M. Delimar (2007). Teaching power system modeling in an object oriented environment. In *EUROCON, 2007. The International Conference on "Computer as a Tool"*, pp. 2468–2472.

[126] Pereira, M. V. F. (1985). Optimal scheduling of hydrothermal systems - an overview. In *IFAC Symposium on Planning and Operation of Electric Energy Systems.*

[127] Pereira, M. V. F., S. H. F. Cunha, L. A. Terry, e A. Mossé (1990). Modelos computacionais para planejamento e operação de sistemas hidrotérmicos de grande porte. *Revista SBA: Controle e Automação 1*(1), 31–41.

[128] Pressman, R. (2006). *Software Engineering: A Practioners Approach.* McGraw Hill.

[129] Prietro-Dias, R. (1994). *Software Reusability.* Ellis Horwood.

[130] Rabelo, R. A. L., A. A. F. M. Carneiro, e R. T. V. Braga (2009a). Component-based development applied to energetic operation planning of hydrothermal power systems. In *Proceedings of IEEE Bucharest PowerTech.*

[131] Rabelo, R. A. L., A. A. F. M. Carneiro, e R. T. V. Braga (2009b). An energetic operation policy using fuzzy controllers for maximization of benefits in the brazilian hydrothermal power system. In *Proceedings of IEEE Bucharest PowerTech.*

[132] Rabelo, R. A. L., A. A. F. M. Carneiro, e R. T. V. Braga (2009c). Um sistema de inferência fuzzy paramétrico aplicado ao planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração. In *IX Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2009, Brasília.*, Volume 09.

[133] Rabelo, R. A. L., A. A. F. M. Carneiro, e R. T. V. Braga (2009d). Uma política de operação energética baseada em sistemas de inferência fuzzy takagi-sugeno. In *VII ENIA - Encontro Nacional de Inteligência Artificial.*

[134] Rabelo, R. A. L., W. N. M. Lopes, e A. A. F. M. Carneiro (2007a). Aplicação de orientação a objetos no planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos de potência. In *XXVIII CILAMCE - Iberian Latin American Congress On Computational Methods in Engineering.*

[135] Rabelo, R. A. L., W. N. M. Lopes, e A. A. F. M. Carneiro (2007b). Uma abordagem computacional para o planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de potência. In *VII Latin-American Congress: Electricity Generation and Transmission.*

[136] Rabelo, R. A. L., W. N. M. Lopes, A. A. F. M. Carneiro, e R. T. V. Braga (2008). Análise, projeto e implementação orientado a objetos aplicados ao planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de potência. In *XVII Congresso Brasileiro de Automática.*

[137] Rabelo, R. A. L., R. Sacchi, e A. A. F. M. Carneiro (2006). Um programa para operação de sistemas de usinas hidroelétricas. In *XXVII CILAMCE - Iberian Latin American Congress On Computational Methods in Engineering.*

[138] Rabelo, R. A. L., B. C. Silva, D. Barbosa, M. Oleskovicz, A. A. F. M. Carneiro, e D. V. Coury (2008). Um estudo comparativo entre os modelos de redes neurais artificiais mlp e rbf para classificação de distúrbios associados à qualidade da energia elétrica. In *XVII Congresso Brasileiro de Automática.*

[139] Read, E. G. (1982). Economic Principles of Reservoir Operation I: Perfect Foresight. *CBER Working Paper, College of Business Administration, University of Tennessee.*

[140] Reis, L. B. (2003). *Geração de Energia Elétrica: Tecnologia, Inserção Ambiental, Planejamento, Operação e Análise de Viabilidade.* Manole.

[141] Rezende, S. O. (2003). *Sistemas Inteligentes: Fundamentos e Aplicações.* Ed. Manole.

[142] Rodrigues, L. G. L. (2003). O planejamento da operação de curto-médio prazo com acoplamento elétrico-energético utilizando fpoca. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

[143] Rodrigues, L. G. L., A. A. F. M. Carneiro, e G. R. M. Costa (2004). The study of electric-energetic interaction in the short-very-short-term operation planning using opfac. In *IEEE/PES T&D 2004 Latin America Convention and Exhibition.*

[144] Rosenblatt, J. (1985). Valor marginal da Água e custo marginal da energia na operação de sistemas hidrotérmicos por programação dinâmica estocástica. *Pesquisa Operacional 5*, 28–41.

[145] Rosenthal, R. E. (1981). A nonlinear network flow algorithm for maximization of benefits in a hydroeletric power system. *Operation Research 29.*

[146] Ross, T. J. (2004). *Fuzzy Logic with Engineering Applications.* Wiley.

[147] Sacchi, R. (2004). Regras de operação para sistemas hidroelétricos com previsão por redes neurais. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

[148] Sacchi, R., A. A. F. M. Carneiro, e A. F. R. Araújo (2004a). Operation policies for hydropower systems: Using the unsupervised sonarx neural network. *IEEE - Power Systems Conference & Exposition.*

[149] Sacchi, R., A. A. F. M. Carneiro, e A. F. R. Araújo (2004b). A rbf network trained by the sonarx model and applied to obtain the operation policies of the hydropower systems. In *8th Brazilian Symposium on Artificial Neural Networks.*

[150] Sacchi, R., T. S. Nakazawa, e A. A. F. M. Carneiro (2005). Estudo do planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos de potência e parâmetros econômicos utilizando um modelo de representação individualizada. *VI Latin-American Congress: Electricity Generation and Transmission.*

[151] Sacchi, R., J. S. Nazareno, M. A. A. Castro, D. Silva Filho, e A. A. F. M. Carneiro (2004). Economics principles of the hidrothermal power systems operation. In *IX Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning.*

[152] Sametinger, J. (1997). *Software Engineering With Reusable Components.* Spring-Verlag.

[153] Santos, M. L. L., E. L. Silva, M. N. Agostini, e E. C. Finardi (2004). Aplicação de Modelagem Orientada a Objetos ao Problema do Planejamento de Sistemas Hidrotérmicos. *IX SEPOPE Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica.*

[154] Sebesta, R. W. (2002). *Concepts of Programming Languages.* Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston, MA, USA.

[155] Selvan, M. P. e K. S. Swarup (2005). Object Methodology: Method and Design for Topological Processing. *IEEE Power and Energy Magazine 6*(1), 18–29.

[156] Selvan, M. P. e K. S. Swarup (2006). Development of Power Flow Software Using Design Patterns. *IEEE Transactions on Power Systems 21*(2), 611–618.

[157] Silva, E. L. (2001). *Formação de Preços em Mercados de Energia Elétrica.* Sagra Luzzatto.

[158] Silva, E. L. e E. C. Finardi (2001). Planning of Hydrothermal Systems Using a Power Plant Individualistic Representation. In *2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings*, Volume 3.

[159] Silva, R. M. (2003). Avaliação da Operação Otimizada de Usinas Hidrelétricas. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

[160] Silva Filho, D. (2003). *Dimensionamento de Usinas Hidroelétricas Através de Técnicas de Otimização Evolutiva.* Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

[161] Silva Filho, D., S. Ballini, R. Soares Filho, e A. A. F. M. Carneiro (2003). Interpretação linguística da operação Ótima de uma usina hidroelétrica através de redes neurais nebulosas adaptáveis. *SBA: Controle & Automação. 14*(3), 330–337.

[162] Silva Filho, D. e A. A. F. M. Carneiro (2004). Dimensionamento Evolutivo de Usinas Hidroelétricas. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automática 15*, 437–448.

[163] Silva Filho, D., A. A. F. M. Carneiro, e A. F. R. Araújo (1999). Redes RBF Aplicadas à Simulação da Operação de Usinas Hidroelétricas. In *IV Congresso Brasileiro de Redes Neurais*, pp. 275–280.

[164] Simões, M. G. e I. S. Shaw (1999). *Controle e modelagem fuzzy.* Edgard Blucher: FAPESP.

[165] Sjelvgren, S., S. Anderson, e T. S. Dillon (1983). Optimal operations planning in a large hydro-thermal power system. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 102*(11), 3644 – 3651.

[166] Soares, S. (1987). Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos. *Revista SBA: Controle e Automação 1*(2), 122–131.

[167] Soares, S. e A. A. F. M. Carneiro (1991). Optimal Operation of Reservoirs for Electric Generation. *IEEE Transactions on Power Delivery 6*(3), 1101–1107.

[168] Soares, S. e A. A. F. M. Carneiro (1993). Reservoir Operation Rules for Hydroelectric Power System Optimization. In *Athens Power Tech, 1993. APT 93. Proceedings. Joint International Power Conference*, Volume 2.

[169] Soares, S. e M. F. H. Carvalho (1986). Programa para otimização de sistemas hidrotérmicos. *6º Congresso Brasileiro de Automática*, 191–197.

[170] Sommerville, I. (2006). *Software Engineering.* Addison-Wesley.

[171] Stroustrup, B. (2000). *A Linguagem de Programação C++.* Bookman.

[172] Szyperski, C. (2002). *Component Software - Beyond Object Oriented Programming.* Addison-Wesley.

[173] Takagi, T. e M. Sugeno (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. 15*, 116–132.

[174] Vinhal, C. D. N. (1998). *Sistema de Apoio à Decisão Para o Planejamento da Operação Energética de Sistemas de Energia Elétrica.* Tese de Doutorado, FEEC/UNICAMP.

[175] Warmer, J. e A. Kleppe (1998). *The Object Constraint Language: Precise Modeling with UML.* Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston, MA, USA.

[176] Watt, D. A. (1990). *Programming language concepts and paradigms.* Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA.

[177] Wazlawick, R. S. (2004). *Análise e Projeto de Sistemas de Informação Orientados a Objetos.* Elsevier.

[178] Wirfs-Brock, R. J. e R. E. Johnson (1990). Surveying current research in object-oriented design. *Comm. ACM.*

[179] Wolfe, P. (1963). Methods of Nonlinear Programming. 6. The Reduced Gradient Method. *apud Bazaraa 1979.*

[180] Wood, A. J. e B. F. Wollenberg (1984). *Power Generation, Operation, and Control.* John Wiley and Sons.

[181] Yu, Z., F. T. Sparrow, e B. H. Bowen (1998). A new long-term hydro production scheduling method for maximizing the profit of hydroelectric systems. *IEEE Transactions on Power Systems 13*(1), 66 – 71.

[182] Zambon, K. L. (1997). Uma Eficiente Abordagem Linear na Operação de Reservatórios para Geração de Energia Elétrica. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

[183] Zambon, K. L. (2004). *Localização de Usinas Termoelétricas utilizando Sistemas de Informação Geográfica e Métodos de Decisão Multicritério.* Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

[184] Zhou, E. Z. (1996). Object-oriented programming, C++ and power system simulation. *IEEE Transactions on Power Systems 11*(1), 206–215.

[185] Zhu, J. e P. Jossman (1999). Application of Design Patterns for Object-Oriented Modeling of Power Systems. *IEEE Transactions on Power Systems 14*(2), 532–537.

[186] Zhu, J. e D. L. Lubkeman (1996). Object-Oriented Development of Software Systems for Power System Simulations. In *1996 IEEE Transmission and Distribution Conference, 1996. Proceedings.*, pp. 596–601.

[187] Zimmermann, H. J. (2001). *Fuzzy Set Theory – and its Applications.* Kluwer Academic Publishers.

[188] Ziviani, N. (2007). *Projeto de Algoritmos com implementações em Pascal e C.* Pioneira Thomson Learning.

Apêndice A

Política de Operação Baseada em Sistemas de Inferência *Fuzzy*

Ao utilizar os pontos de operação representativos da operação otimizada dos reservatórios para geração de energia elétrica, a política proposta (PBSIF) busca apresentar um comportamento diferenciado para cada reservatório das usinas do sistema hidroelétrico. Para isto, os parâmetros dos consequentes das regras de produção em cada sistema de inferência *fuzzy* Takagi-Sugeno foram calculados de forma a extrair o comportamento operativo específico para cada usina a reservatório. As Tabelas A.1, A.2, A.3, A.4, A.5, A.6, A.7, A.8, A.9, A.10, A.11, A.12, A.13, A.14, A.15, A.16, A.17 e A.18 apresentam os parâmetros dos consequentes das regras de produção *fuzzy* relativas à política proposta para as usinas a reservatório do sistema hidroelétrico utilizado [1].

[1] A descrição dos parâmetros dos consequentes das regras de produção *fuzzy* destina-se aos leitores interessados, principalmente, em reproduzir estudos da simulação da operação energética, com a política baseada em sistemas de inferência *fuzzy* Takagi-Sugeno, para o sistema hidroelétrico sudeste brasileiro, composto pelas 18 usinas a reservatório.

Usina de Emborcação		
Energia Armazenada no Sistema	a	b
Muito Baixa	$0,1026$	$-0,0044$
Baixa	$0,9093$	$-0,2129$
Média	$1,4882$	$-0,4469$
Alta	$1,3235$	$-0,3404$
Muito Alta	$1,4533$	$-0,4440$

Tabela A.1: Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Emborcação.

Usina de Itumbiara		
Energia Armazenada no Sistema	a	b
Muito Baixa	$1,1396$	$-0,0284$
Baixa	$2,3585$	$-0,2611$
Média	$0,4784$	$0,5234$
Alta	$0,5209$	$0,4924$
Muito Alta	$0,6147$	$0,4121$

Tabela A.2: Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Itumbiara.

Usina de São Simão		
Energia Armazenada no Sistema	a	b
Muito Baixa	$3,0730$	$0,1616$
Baixa	$0,4615$	$0,7775$
Média	$0,0522$	$0,9502$
Alta	$0,0692$	$0,9387$
Muito Alta	$0,0482$	$0,9546$

Tabela A.3: Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de São Simão.

Usina de Furnas		
Energia Armazenada no Sistema	a	b
Muito Baixa	$0,4914$	$-0,0195$
Baixa	$1,1772$	$-0,1857$
Média	$1,2926$	$-0,2447$
Alta	$1,2603$	$-0,2290$
Muito Alta	$1,1409$	$-0,1324$

Tabela A.4: Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Furnas.

Usina de Marimbondo		
Energia Armazenada no Sistema	a	b
Muito Baixa	$3,3491$	$0,0990$
Baixa	$0,2612$	$0,8331$
Média	$0,0036$	$0,9433$
Alta	$0,2111$	$0,8201$
Muito Alta	$-0,0959$	$1,0689$

Tabela A.5: Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Marimbondo.

Usina de Água Vermelha		
Energia Armazenada no Sistema	a	b
Muito Baixa	$3,3120$	$0,0739$
Baixa	$-1,3131$	$1,1471$
Média	$0,3597$	$0,4715$
Alta	$0,3883$	$0,4916$
Muito Alta	$-0,1851$	$0,9749$

Tabela A.6: Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Água Vermelha.

Usina de Ilha Solteira		
Energia Armazenada no Sistema	a	b
Muito Baixa	$4,1520$	$-0,0099$
Baixa	$0,1242$	$0,9482$
Média	$-0,0033$	$1,0009$
Alta	$0,0011$	$0,9969$
Muito Alta	$0,0190$	$0,9817$

Tabela A.7: Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Ilha Solteira.

Usina de Barra Bonita		
Energia Armazenada no Sistema	a	b
Muito Baixa	$0,8234$	$-0,0017$
Baixa	$1,8378$	$-0,1276$
Média	$0,3234$	$0,5156$
Alta	$0,5321$	$0,3666$
Muito Alta	$1,0701$	$-0,0704$

Tabela A.8: Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Barra Bonita.

Usina de Promissão		
Energia Armazenada no Sistema	a	b
Muito Baixa	$1,8263$	$-0,0972$
Baixa	$1,9345$	$-0,1283$
Média	$0,1751$	$0,5701$
Alta	$1,0977$	$-0,0540$
Muito Alta	$1,4810$	$-0,3929$

Tabela A.9: Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Promissão.

Usina de Três Irmãos		
Energia Armazenada no Sistema	a	b
Muito Baixa	$3,2211$	$-0,1073$
Baixa	$0,7416$	$0,4492$
Média	$0,2137$	$0,6545$
Alta	$0,7743$	$0,2927$
Muito Alta	$0,2718$	$0,7815$

Tabela A.10: Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Três Irmãos.

Usina de Porto Primavera		
Energia Armazenada no Sistema	a	b
Muito Baixa	$0,4716$	$0,8925$
Baixa	$3,4694E-18$	$1,00000$
Média	$-3,4694E-18$	$1,0000$
Alta	$-6,9388E-18$	$1,0000$
Muito Alta	$0,0000$	$1,0000$

Tabela A.11: Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Porto Primavera.

Usina de Jurumirim		
Energia Armazenada no Sistema	a	b
Muito Baixa	$0,1996$	$-0,0101$
Baixa	$1,0688$	$-0,2295$
Média	$1,2930$	$-0,3214$
Alta	$1,3258$	$-0,3506$
Muito Alta	$1,5806$	$-0,5649$

Tabela A.12: Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Jurumirim.

Usina de Chavantes		
Energia Armazenada no Sistema	a	b
Muito Baixa	$1,9352$	$-0,0943$
Baixa	$2,2474$	$-0,1885$
Média	$0,5106$	$0,5224$
Alta	$0,4123$	$0,5727$
Muito Alta	$0,6512$	$0,3702$

Tabela A.13: Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Chavantes.

Usina de Capivara		
Energia Armazenada no Sistema	a	b
Muito Baixa	$3,0005$	$0,2470$
Baixa	$0,2353$	$0,9013$
Média	$-0,0183$	$1,0057$
Alta	$0,0216$	$0,9801$
Muito Alta	$1,0115$	$0,9884$

Tabela A.14: Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Capivara.

Usina de Nova Ponte		
Energia Armazenada no Sistema	a	b
Muito Baixa	$0,0270$	$-0,0013$
Baixa	$0,7472$	$-0,1974$
Média	$1,7015$	$-0,5916$
Alta	$1,3907$	$-0,3932$
Muito Alta	$1,3247$	$-0,3384$

Tabela A.15: Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Nova Ponte.

Usina de Camargos		
Energia Armazenada no Sistema	a	b
Muito Baixa	$1,0393$	$0,0350$
Baixa	$1,8097$	$-0,0132$
Média	$0,4337$	$0,5931$
Alta	$0,4881$	$0,5679$
Muito Alta	$0,1858$	$0,8159$

Tabela A.16: Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Camargos.

Usina de Mascarenhas de Moraes		
Energia Armazenada no Sistema	a	b
Muito Baixa	$3,9331$	$-0,0822$
Baixa	$0,6623$	$0,6935$
Média	$0,0488$	$0,9511$
Alta	$0,0478$	$0,9540$
Muito Alta	$-0,0351$	$1,0207$

Tabela A.17: Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Mascarenhas de Moraes.

Usina de Caconde		
Energia Armazenada no Sistema	a	b
Muito Baixa	$1,8913$	$-0,0703$
Baixa	$0,7838$	$0,1772$
Média	$0,0205$	$0,4871$
Alta	$1,3111$	$-0,3086$
Muito Alta	$1,2983$	$-0,2876$

Tabela A.18: Parâmetros dos consequentes das regras de inferência *fuzzy* para a usina de Caconde.