

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
ÁREA DE ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E SANITÁRIA

**REGRAS DE OPERAÇÃO PARA SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA COM
BAIXO NÍVEL DE AUTOMAÇÃO E SUJEITOS A INCERTEZAS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

IVONALDO DE SOUSA LACERDA

Campina Grande – PB
Abril/ 2009

IVONALDO DE SOUSA LACERDA

**REGRAS DE OPERAÇÃO PARA SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA COM
BAIXO NÍVEL DE AUTOMAÇÃO E SUJEITOS A INCERTEZAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para a obtenção do Título de Mestre.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E SANITÁRIA

ORIENTADORES: CARLOS DE OLIVEIRA GALVÃO

KENNEDY FLÁVIO MEIRA DE LUCENA

Campina Grande – PB
Abril/ 2009

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA
CENTRAL DA UFCG**

L131r

2009 Lacerda, Ivonaldo de Sousa.

Regras de operação para sistemas de abastecimento de água com baixo nível de automação e sujeitos a incertezas / Ivonaldo de Sousa Lacerda. — Campina Grande, 2009.

150 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Referências.

Orientadores: Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão, Prof. Dr. Kennedy Flávio Meira de Lucena.

1. Abastecimento de Água. 2. Incertezas. 3. Regras de Operação Multi-objetivo. 4. Eficiência Hidráulica e Energética. I. Título.

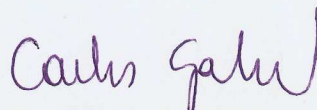
CDU – 628.1(043)

IVONALDO DE SOUSA LACERDA

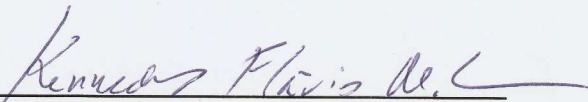
**REGRAS DE OPERAÇÃO PARA SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA
COM BAIXO NÍVEL DE AUTOMAÇÃO E SUJEITOS A INCERTEZAS**

Dissertação aprovada em 23 de abril de 2009

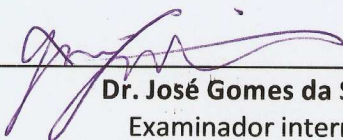
COMISSÃO EXAMINADORA:



Dr. Carlos de Oliveira Galvão
Orientador
Unidade Acadêmica de Engenharia Civil – UFCG



Dr. Kennedy Flávio Meira de Lucena
Orientador
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – IF-PB



Dr. José Gomes da Silva
Examinador interno
Unidade Acadêmica de Engenharia Civil – UFCG



Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga
Examinador externo
Universidade Federal de Goiás – UFG

PEGADAS NA AREIA

Uma noite eu tive um sonho...

Sonhei que estava andando na praia com o Senhor e através do céu, passavam cenas da minha vida.

Para cada cena que passava, percebi que eram deixados dois pares de pegadas na areia: um era meu e o outro era do Senhor.

Quando a última cena passou diante de nós, olhei para trás, para as pegadas na areia e notei que muitas vezes, no caminho da minha vida, havia apenas um par de pegadas na areia.

Notei também que isso aconteceu nos momentos mais difíceis e angustiosos do meu viver. Isso me aborreceu deveras e perguntei então ao Senhor:

- Senhor, Tu me disseste que, uma vez que resolvi te seguir, Tu andarias sempre comigo, em todo o caminho. Contudo, notei que durante as maiores atribulações do meu viver, havia apenas um par de pegadas na areia. Não compreendo porque nas horas em que eu mais necessitava de Ti, Tu me deixaste sozinho.

O Senhor me respondeu:

- Meu querido filho. Jamais eu te deixaria nas horas de provas e de sofrimento. Quando viste, na areia, apenas um par de pegadas, eram as minhas. Foi exatamente aí que eu te carreguei nos braços.

Do livro "Pegadas na areia" - Margareth Fishback Powers - Ed. Fundamento

DEDICATÓRIA

À minha mãe **Antônia Virgolino** (Toinha).
Ao meu pai **Manoel Lacerda** (Neco), *in memoriam*.
Aos **meus irmãos**.

AGRADECIMENTOS

A **Deus**, por caminhar na minha sombra em todos os momentos, concedendo-me força para superar os obstáculos, coragem para seguir em frente, perseverança para acreditar sempre e sabedoria para alcançar meus objetivos.

Ao meu estimado orientador e amigo **Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão**, por ter sempre acreditado em mim e, através de seu inestimável saber, transmitido tantos conhecimentos e experiência de vida.

Ao meu co-orientador e amigo **Prof. Dr. Kennedy Flávio Meira de Lucena**, pela imensa contribuição que deu a esta pesquisa, por meio de tantas discussões tão ricas e proveitosas.

Ao **Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)** e ao **Fundo Setorial de Recursos Hídricos (CT-HIDRO)**, do governo brasileiro, pela bolsa de estudo e apoios financeiros concedidos.

À **CAGEPA**, pelo fornecimento das informações.

A todos os **professores e funcionários do PPGECA** que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho;

À toda **minha família**, especialmente aos **meus pais e irmãos** que sempre foram uma inesgotável fonte de incentivo e apoio incondicional e a quem atribuo a responsabilidade de me fazer alcançar mais esta conquista.

À minha namorada **Cirlene Santos**, pela paciência, compreensão e companheirismo em todos os momentos.

Aos meus estimados colegas de turma: **Daniela, Eduardo, Emanuel, Maria Josicleide, Mery, Mirella, Nilton César, Sandra, e Thiago**, que compartilharam de todo o caminho até esta conquista.

A todos os funcionários, alunos e professores dos Laboratórios de Hidráulica I e II, especialmente a **Marília, Valdomiro, Renato, Rodolfo, Iara, Ester, Diana Deyse, Denny, Thompson, Jonh, Pedro e Zezineto**, pela contínua colaboração, incentivo e apoio.

Aos meus amigos **Érica Cristine, Joseilda Soares, Thiago Almeida, Francinaldo Júnior (Polegar), Antônio Leite e Manfrim**, pelo expressivo incentivo, apoio, colaboração e amizade.

Agradecimento especial ao meu sobrinho **Daniel Faustino Lacerda**, pela fundamental ajuda no desenvolvimento do código, presteza e incentivos em todos os momentos.

E, por fim, agradeço a **todos** que de alguma forma contribuíram tecnicamente e emocionalmente para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

O aumento da complexidade operacional dos sistemas de abastecimento de água, promovido principalmente pelo envelhecimento dos sistemas, crescimento urbano desordenado, alterações e expansões na sua topologia, além das incertezas associadas, têm impedido que esses sistemas cumpram satisfatoriamente sua principal função: suprir a demanda de água em quantidade e qualidade, com pressões adequadas, com segurança operacional e eficiência energética. Como alternativa para melhoria deste quadro, neste trabalho apresenta-se uma metodologia genérica para construção de regras para operação multi-objetivo de sistemas de abastecimento de água. Os objetivos da operação são: atender à demanda de abastecimento, reduzir o custo operacional energético, reduzir o número de acionamentos/desligamentos das bombas e válvulas, reduzir as perdas de água e recuperar as condições iniciais do sistema ao final de um ciclo de operação. As regras construídas sugerem rotinas operacionais estabelecidas de acordo com as características topológicas dos sistemas, seus limites físicos e hidráulicos, a demanda de abastecimento e os objetivos de operação envolvidos. A metodologia foi aplicada ao Sistema Adutor do Cariri, no Estado da Paraíba, e os resultados obtidos mostram que as regras construídas fornecem alternativas de operação consistentes e eficientes, contemplando os objetivos desejados e pode ser usada como uma ferramenta de apoio à gestão operacional desse tipo de sistema. Uma comparação entre a operação real executada no sistema e a operação sugerida pelas regras mostra que é possível reduzir em até 100% o bombeamento no horário de ponta, permitindo uma redução significativa no custo da operação.

Palavras-chave: sistema de abastecimento; incertezas; regras de operação multi-objetivo.

ABSTRACT

The increase of the operational complexity of water supply systems, caused by aging of the systems, urban growth, modifications and expansions in their topology, and associated uncertainties, has prevented those systems of performing their main role: deliver water in appropriate quantity, quality and pressure, with operational safety and energy efficiency. As an alternative for coping with this problem, this dissertation presents a generic methodology for construction of rules of multi-objective operation of water supply systems. The operational objectives are: supply of water demands, reduction of electrical operational costs, reduction of the number of on/off switches of pumps and valves, reduction of water losses and recover of the initial conditions of the systems at the end of the operational cycle. The rules made suggest operational routines which are established according to the topologic characteristics of the systems, its operational limits, supplying demand and the related operational objectives. The methodology was applied to the Cariri Water Supply System, in the State of Paraíba, Brazil. The results show that the rules provide consistent and efficient operational alternatives, attending the objectives, being a tool for supporting the operational management of such systems. Comparison between the actual operation of the system and the one suggested by the proposed methodology showed that it is possible to reduce up to 100% the pumping operation in the high energy cost period, thus minimizing the operational costs.

Keywords: supply system; uncertain; multi-objective operation rules.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 2.1: (a) à esquerda, o comportamento padrão da curva de consumo médio diário de abastecimento nos centros urbanos; (b) à direita, comportamento da curva de consumo típico de 22 setores de abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Fonte: TSUTIYA & SOBRINHO (sd).	9
Figura 2.2: (a) à esquerda as curvas de consumo média, mínima e máxima do setor Jaçanã – RMSP; (b) à direita as curvas de consumo médias diárias adimensionais para cada dia da semana do setor Itaquera – RMSP (VICENTE, 2005).....	10
Figura 4.1: Etapas de construção e avaliação das regras.....	32
Figura 4.2: Representação esquemática de um sistema de abastecimento de água discretizado em subsistemas de acordo com as configurações de trabalho de cada elemento de controle.....	35
Figura 4.3: Discretização do reservatório em faixas de controle.	37
Figura 4.4: Estrutura básica de um sistema difuso de regras.....	48
Figura 4.5: Níveis numéricos e difusos de um reservatório.....	49
Figura 4.6: (a) fuzificação da variável “nível do reservatório”; (b) representação desta variável sem a aplicação do conceito da Lógica Difusa.	49
Figura 4.7: Método de desfuzificação pelo Centro-de-Área.....	51
Figura 4.8: Dinâmica da simulação hidráulica.....	55
Figura 4.9: Dinâmica da simulação dos cenários gerados pelo método de Monte Carlo.....	57
Figura 5.1: Sistema Adutor do Cariri e municípios abastecidos, adaptado de Pimentel (2004).	60
Figura 5.2: Sistema Adutor do Cariri representado no EPANET2.	63
Figura 5.3: Divisão do Sistema Adutor do Cariri em subsistemas.	66
Figura 5.4: Variação da demanda ao longo do dia.....	68
Figura 5.5: Posicionamento da faixa de controle ótima ao longo do ciclo operacional.	71
Figura 5.6: Entradas e saídas dos controladores difusos.....	78
Figura 5.7: Funções de pertinência da variável linguística de entrada “Instante do Dia”.	79

Figura 5.8: Funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível”.....	82
Figura 5.9: Funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-Boqueirão para os quatro intervalos de tempo.....	83
Figura 5.10: Funções de pertinência da variável linguística de entrada “Estado de VC2 ou VC3” para os quatro intervalos de tempo.....	85
Figura 5.11: Funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-EE6 para os quatro intervalos de tempo.....	85
Figura 5.12: Funções de pertinência da variável linguística de entrada “Estado de Bomba” para os quatro intervalos de tempo.....	86
Figura 5.13: Funções de pertinência da variável linguística de entrada “Estado de Válvula” para os quatro intervalos de tempo.....	87
Figura 5.14: Cenários de demanda gerados para a cidade de Boqueirão.....	93
Figura 6.1: Comportamento do nível de alguns reservatórios para as estratégias de operação sugeridas perante diferentes cenários de demanda.....	97
Figura 6.2: Perfil da operação de bombas e válvulas para a curva de demanda média adotada.....	99
Figura 6.3: Comportamento do nível e operação sugerida pelas regras simples e difusas para o reservatório de Boqueirão para dois cenários de demanda.....	103
Figura 6.4: Cenários de demandas simulados para os Reservatórios de Boqueirão e Juazeirinho.....	103
Figura 6.5: Comportamento do nível e operação sugerida pelas regras simples e difusas para o reservatório de Juazeirinho para dois cenários de demanda.....	104
Figura 6.6: Instante de bombeamento de E3-01A/E3-02A para a operação real e a sugerida pelas regras difusas e simples.....	108
Figura 6.7: Instante de bombeamento de E4-01A/E4-02A para a operação real e a sugerida pelas regras difusas e simples.....	108
Figura 6.8: Instante de bombeamento de E4-01B/E4-02B para a operação real e a sugerida pelas regras difusas e simples.....	108
Figura 6.9: Instante de bombeamento de E4-01C/E4-02C para a operação real e a sugerida pelas regras difusas e simples.....	109
Figura 6.10: Instante de bombeamento de E5-01A/E5-02A para a operação real e a sugerida pelas regras difusas e simples.....	109
Figura 6.11: Instante de bombeamento de E6-01A/E6-02A para a operação real e a sugerida pelas regras difusas e simples.....	109

Figura 6.12: Instante de bombeamento de E6-01B/E6-02B para a operação real e a sugerida pelas regras difusas e simples. 110

ÍNDICE DE QUADROS E TABELAS

QUADROS

Quadro 4.1: Principais características, vantagens e desvantagens da Lógica Difusa (CAMARGOS, 2002).....	47
--	----

TABELAS

Tabela 5.1: Projeção do crescimento de população e demanda para o ano de 2008. Fonte: PROÁGUA/AESA (2006).	59
Tabela 5.2: Características das bombas. Fontes: catálogo de bombas KSB e PROÁGUA/AESA (2006).	61
Tabela 5.3: Características das tubulações principais. Fonte: PROÁGUA/AESA (2006).	61
Tabela 5.4: Características dos reservatórios. (Fontes: PROÁGUA/AESA (2006) e informações fornecidas pela CAGEPA).	62
Tabela 5.5: Coeficientes de perda de carga calibrados para as válvulas sustentadores de pressão.....	65
Tabela 5.6: Níveis máximos e mínimos de operação e controle dos reservatórios.....	69
Tabela 5.7: Faixas de controle ótimas e níveis iniciais estabelecidos para os reservatórios..	70
Tabela 5.8: Valores dos vértices das funções de pertinência da variável linguística de entrada “Instante do Dia”.	79
Tabela 5.9: Valores dos vértices das funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-Boqueirão para os quatro intervalos de tempo.....	83
Tabela 5.10: Valores dos vértices das funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-EE6 para os quatro intervalos de tempo.	84
Tabela 5.11: Regras difusas para todos os reservatórios, exceto R-EE6.	87
Tabela 5.12: Regras para o reservatório R-EE6.....	89

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	i
AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES	vi
ÍNDICE DE QUADROS E TABELAS	ix
SUMÁRIO.....	x
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2	4
SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	4
2.1 – <i>Definição e descrição</i>	4
2.2 – <i>A operação</i>	5
2.3 – <i>Comportamento da demanda de água</i>	8
2.4 – <i>Ampliações versus incertezas</i>	11
2.5 – <i>Consumo de energia</i>	12
2.6 – <i>Modelagem hidráulica</i>	13
CAPÍTULO 3	16
ESTADO DA ARTE	16
3.1 – <i>Modelos matemáticos de otimização</i>	16
3.1.1 – <i>Programação Linear</i>	17
3.1.2 – <i>Programação Não Linear</i>	19
3.1.3 – <i>Programação Dinâmica</i>	20
3.2 – <i>Modelos heurísticos de otimização</i>	21
3.2.1 – <i>Algoritmos Genéticos</i>	22
3.2.2 – <i>Regras Heurísticas</i>	25

3.2.3 – <i>Lógica Difusa</i>	27
3.3 Outras metodologias	28
3.4 Síntese	30
CAPÍTULO 4	31
METODOLOGIA	31
4.1 – Estrutura metodológica	31
4.2 – Avaliação do sistema	33
4.3 – Extração das regras	36
4.4 – Sistema difuso de regras	43
4.4.1 – <i>Motivação para o uso da Lógica Difusa</i>	43
4.4.2 – <i>A Lógica Difusa</i>	44
4.4.3 – <i>Controle difuso</i>	47
4.5 – Refinamento das regras	52
4.5.1 – <i>O modelo de simulação hidráulica</i>	53
4.5.2 – <i>Integração EPANET2 – MATLAB</i>	54
4.6 – Avaliação de desempenho das regras	56
4.6.1 – <i>Metodologia de avaliação</i>	56
4.6.2 – <i>Método de simulação Monte Carlo</i>	57
CAPÍTULO 5	59
ESTUDO DE CASO	59
5.1 – Descrição do sistema	59
5.2 – Modelagem e simulação hidráulica	64
5.3 – Aplicação da metodologia proposta	65
5.3.1 – <i>Elaboração das regras de operação</i>	65
5.3.2 – <i>Desenvolvimento do controle difuso</i>	77
5.3.3 – <i>Refinamento e validação das regras</i>	91
5.3.4 – <i>Geração e simulação de cenários</i>	91
CAPÍTULO 6	94
RESULTADOS E DICUSSÃO	94
6.1 – Metodologia para construção de regras	94
6.2 – Regras simples	95
6.2.1 – <i>Atendimento à demanda</i>	96
6.2.2 – <i>Chaveamento de bombas e válvulas</i>	98
6.2.3 – <i>Redução do custo energético</i>	99
6.2.4 – <i>Recuperação das condições iniciais do sistema</i>	100
6.3 – Regras difusas	100
6.4 – Regras simples versus regras difusas	101

<i>6.5 – Avaliação das regras</i>	105
<i>6.6 – Operação real versus operação sugerida pelas regras</i>	105
CAPÍTULO 7	111
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
ANEXO A	122
ANEXO B	133
ANEXO C	147

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os sistemas de abastecimento público de água têm como principais objetivos o fornecimento de água à sociedade garantindo disponibilidade contínua, atendimento às demandas em quantidade e qualidade, confiabilidade, segurança operacional e ambiental. No entanto, o intenso processo de urbanização das últimas décadas associado à expansão não planejada dos sistemas de abastecimento de água têm ocasionado uma sobrecarga substancial nas demandas de água, não previstas nos projetos originais, causando a saturação dos sistemas e comprometendo a qualidade do serviço de abastecimento de água à população. A necessidade de ampliação sucessiva, devido ao rápido crescimento das zonas urbanas, o envelhecimento e a falta de manutenção adequada têm tornado os sistemas de abastecimento de água cada vez mais extensos, complexos e dotados de incertezas das mais variadas naturezas. A demanda é uma das variáveis que incorpora mais incertezas, causadas principalmente pela imprecisão na estimativa do crescimento populacional, pelos altos índices de perdas e pela variabilidade e imprecisão na estimativa do consumo médio horário ao longo do dia.

A evolução dos sistemas de abastecimento a este cenário tem tornado sua operação cada vez mais complexa e problemática. CARRIJO (2004) afirma que a operação de um sistema de abastecimento de água não pode ser entendida apenas como uma mera sequência de comandos exercidos sobre os equipamentos, que têm como objetivo o atendimento da demanda. Na realidade o problema é muito mais amplo e complexo, envolvendo aspectos de planejamento, controle e supervisão, serviços de infra-estrutura de apoio e de atendimento ao usuário, todos considerados simultaneamente e interdependentes entre si. A saturação do sistema, a ampliação desordenada, a falta de manutenção adequada, o envelhecimento, o alto nível de incertezas e o mau gerenciamento operacional são os principais responsáveis pela criação de gargalos operacionais, tornando os serviços públicos de abastecimento de água pouco eficientes.

Nos últimos anos, a comunidade científica vem concentrando esforços na tentativa de solucionar os problemas existentes na operação dos sistemas de abastecimento de água, para tanto vários métodos de otimização da operação foram desenvolvidos. A literatura é bastante ampla e diversificada em trabalhos das mais variadas concepções,

como programação linear (VICENTE, 2005), programação não linear (ALMEIDA, 2001), programação dinâmica (LANSEY & AWUMAH, 1994) e algoritmos genéticos (CARRIJO, 2004; PEDROSA FILHO, 2006). Além de atender aos objetivos simples, como demanda requerida e restrições operacionais, esses métodos se propõem a encontrar soluções ótimas ou sub-ótimas, considerando também o custo da operação, o escalonamento das bombas, custos de manutenção, picos de potência e vazamentos.

No entanto, o que se observa é a ausência de políticas de apoio à gestão operacional em vários serviços de abastecimento de água do país, com monitoramento e procedimentos de controle inadequados ou insuficientes, mesmo com a disponibilidade de recursos técnico-científicos já desenvolvidos que poderiam auxiliar na operação. Apesar da comprovada eficácia das metodologias desenvolvidas, o que se constata é um distanciamento entre o desenvolvimento tecnológico e a prática. BARBOSA (2001) afirma que este fato pode ser atribuído, entre outros possíveis motivos, à falta de investimentos em tecnologias por parte das companhias de abastecimento; dificuldades do corpo técnico na absorção de novas tecnologias; além do temor, por parte dos técnicos, na implantação de automação. A autora acrescenta ainda que a disponibilidade de metodologias mais simples de operação poderia facilitar a implementação de políticas operacionais pelas companhias.

Os modelos matemáticos de otimização geralmente fornecem a operação ótima, porém são pouco flexíveis a alterações no sistema e requerem informações precisas de seus elementos e variáveis exigindo cadastro e monitoramento rigoroso da sua topologia. Entretanto, na realidade dos sistemas, o que se verifica é que a complexidade e diversidade de procedimentos de operação, a falta de informações sobre elas, a frequente mudança da topologia da malha, o envelhecimento dos seus elementos, o alto índice de crescimento urbano (aumento da demanda) e outras incertezas, trazem como consequência a construção de obras e incessantes adaptações para suprir as necessidades humanas, impedindo que os sistemas de abastecimento de água atinjam plenamente seus objetivos e aumentando as dificuldades de se obter soluções ótimas fundamentadas em modelos matemáticos que, por si só, já são complexos. Segundo CHEUNG (2004), recentemente pesquisadores vêm apontando desvantagens características dos métodos de programação matemática, as quais estão relacionadas às dificuldades de obtenção do ótimo, aplicações a problemas complexos, implementação de tais técnicas e, principalmente, no que se refere à necessidade de enquadrar objetivos reais e múltiplos.

Os modelos de otimização com fundamentação heurística fornecem soluções ótimas ou bem aproximadas; são de simples, fácil e rápida compreensão, manipulação, implementação; são flexíveis a adaptações para qualquer tipo de sistema, particularidades e as constantes alterações topológicas na malha; são mais adequados para sistemas com

baixo nível de monitoramento, não calibrados e sujeitos a altos níveis de incertezas; e capazes de incorporar a experiência do operador.

Diante da necessidade de se desenvolver ferramentas simples para que seu uso seja considerado viável pelas companhias de abastecimento de água, nesta pesquisa decidiu-se utilizar uma metodologia com fundamentação heurística para prover melhorias à operação de sistema de abastecimento de água. Portanto, este trabalho teve como objetivo principal propor um procedimento metodológico genérico para construção de regras multi-objetivo para a operação de sistemas de abastecimento de água baseadas no conhecimento funcional do sistema e de suas particularidades. A metodologia sugerida deve ser flexível à alteração, ampliação e adaptação das regras em função do sistema.

Os objetivos específicos do trabalho foram: propor diretrizes para extração de regras de operação multi-objetivo; estabelecer uma metodologia para consideração, na operação, das incertezas inerentes aos sistemas; aplicar um procedimento adequado para avaliação do desempenho da operação do sistema; aplicar e avaliar os procedimentos metodológicos desenvolvidos a um caso real.

As alternativas de operação propostas devem alcançar os seguintes objetivos: atender à demanda de abastecimento com fornecimento contínuo de água; reduzir o custo operacional energético fazendo o gerenciamento adequado do bombeamento nos horários de ponta e fora de ponta; prezar pela integridade física dos equipamentos, com menor número de acionamentos/desligamentos das bombas e válvulas; reduzir as perdas de água através do controle de pressão no sistema; atender aos limites operacionais de pressão e velocidade; e recuperar as condições iniciais do sistema ao final de um ciclo de operação.

CAPÍTULO 2

SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

2.1 – Definição e descrição

Um sistema de abastecimento público de água pode ser definido como o conjunto de obras, instalações, equipamentos e serviços, que constituem um complexo de sistemas hidráulicos destinado a produzir e distribuir água a uma comunidade, em quantidade e qualidade compatíveis com as necessidades da população, para fins de consumo doméstico, serviços públicos, consumo industrial e outros usos (FUNASA, 2006).

Os sistemas de abastecimento de água em geral são compostos pelas seguintes unidades:

- manancial: fonte de onde se retira a água;
- captação: conjunto de equipamentos e instalações utilizado para a tomada de água do manancial;
- adução: transporte da água do manancial ou da água tratada; pode ocorrer por gravidade ou por bombeamento;
- estações elevatórias ou de recalque: instalações de bombeamento destinadas a transportar água a pontos mais distantes ou mais elevados, aumentar a vazão de linhas adutoras e alimentação direta das redes de distribuição;
- Estação de Tratamento de Água (ETA): realiza melhoria das características qualitativas da água, dos pontos de vista físico, químico, bacteriológico e organoléptico (características da água que são percebidas pelos sentidos, como sabor e cheiro), a fim de que se torne própria para o consumo;
- reservação: armazenamento da água para atender a diversos propósitos, como a variação de consumo e a manutenção da pressão mínima na rede de distribuição;
- rede de distribuição: condução da água para os edifícios e pontos de consumo, por meio de tubulações instaladas nas vias públicas.

As diversas unidades de um sistema de abastecimento são interligadas por tubulações, conexões, bombas e válvulas de diversos tipos e finalidades.

O dimensionamento, a implantação do projeto, a operação e manutenção de um sistema de abastecimento envolvem custos bastante elevados, impactos ambientais, sociais e econômicos, e merecem análises hidrológica, hidráulica e operacional minuciosas e criteriosas. Mesmo na fase de projeto, já deve haver um planejamento considerando o crescimento futuro das zonas urbanas e como ocorrerá a expansão dos sistemas de abastecimento para atender à crescente demanda. Esse planejamento prévio seguramente diminui o custo e a complexidade da operação e inibe a incidência de investimentos ao longo da vida útil dos projetos.

A preocupação com a gestão operacional dos sistemas desde a fase de projeto e implantação é bastante pertinente, pois está diretamente relacionada com sua eficiência, manutenção, perdas de água e qualidade do serviço. A otimização da operação, além de melhorar a eficiência hidráulica e energética, diminui a necessidade de novos investimentos em manutenção e ampliação.

2.2 – A operação

GOMES (2004) define a operação de sistemas de abastecimento de água, compostos pelas obras de captação, adução, tratamento, estações de bombeamento, redes de distribuição, reservatórios e dispositivos de controle (válvulas), como um conjunto de ações necessárias à distribuição de água, aos pontos de consumo com boa qualidade e em quantidade suficiente, constituindo assim a principal ação de gestão das empresas de saneamento e influenciando diretamente na qualidade do sistema em termos sanitários, ambientais, econômicos e sociais. CARRIJO (2004) julga a operação uma tarefa bastante complexa, pois envolve vários aspectos distintos tais como a necessidade de garantia da confiabilidade no atendimento dos serviços, economia no uso de equipamentos (energia e manutenção) e o planejamento de investimento para expansões futuras.

A gestão operacional de um sistema engloba um conjunto de ações de planejamento, controle, supervisão, serviços de infra-estrutura e manutenção considerando os possíveis cenários de oferta e a demanda de água. Segundo CARRIJO (2004), as formas de se operar um sistema de abastecimento de água são muito variadas e, além da segurança, confiabilidade e custos operacionais, dependem de vários outros fatores, tais como a dimensão e complexidade do sistema, a experiência dos operadores, a disponibilidade de equipamentos apropriados para comunicação, para comando de estruturas de controle e a disponibilidade de modelos matemáticos para análises das informações.

O controle da operação são os comandos exercidos sobre os elementos hidráulicos de forma a alcançar os objetivos desejados. Quando não há automação do controle os sistemas são operados de forma manual. Os operadores tomam suas decisões baseados em suas próprias intuições e experiências, visando atender à demanda requerida e às restrições operacionais, com pouca ênfase à otimização da operação. Quando há automação, o operador passa a atuar como supervisor, corrigindo os desvios da situação real em relação àquela prevista pelos modelos e passando novamente a decidir sobre as manobras das operações quando ocorre um evento acidental não previsto na simulação.

Para que se obtenha êxito na operação, é essencial que se conheça bem o sistema, pois, através deste conhecimento e de posse de ferramentas como modelos de simulação hidráulica, otimização e definição de regras, é possível fornecer ao operador condições de operacionalidade das unidades do sistema de forma racional, não dependendo exclusivamente de sua experiência pessoal, mantendo a confiabilidade do mesmo (CARRIJO, 2004).

São muitos os benefícios proporcionados pela otimização da operação, entre eles a gestão adequada da demanda, que pode diminuir a vazão requerida e contribui para a preservação dos mananciais; atendimento contínuo à demanda em quantidade e qualidade; a regularização do comportamento das pressões nos sistemas, proporcionando a diminuição das perdas físicas por vazamento ou rompimento de tubulações, e evitando os transtornos provocados ao meio ambiente por escavações e interrupções de ruas; redução das perdas físicas, aumentando a oferta e diminuindo a demanda, que conseqüentemente reduz o consumo de substâncias químicas utilizadas no seu tratamento, a energia necessária para a sua adução e o preço final da água ao consumidor; diminuição dos custos com bombeamento, manutenção de equipamentos e tubulações.

CARRIJO (2004) afirma que a operação eficiente do sistema é uma ferramenta fundamental para que sua vida útil se prolongue o máximo possível, garantindo o perfeito atendimento aos consumidores, além de manter os custos com energia elétrica e manutenção dentro de padrões aceitáveis. Segundo VENTURINI (1997), a otimização do volume de água disponível, propicia o adiamento de obras de expansão, o que possibilita atender a um número maior de consumidores.

Os elementos hidráulicos de um sistema de abastecimento que estão sujeitos a comandos de operação, sejam automáticos ou efetuados por operadores, são as bombas e válvulas, que neste trabalho são denominadas de *elementos de controle*. Isso incide diretamente nas pressões, vazões, velocidades e nos níveis dos reservatórios de

distribuição do sistema que compõem o conjunto de variáveis relacionadas às restrições operacionais e são denominadas de *variáveis operacionais*.

As ações operacionais incidentes sobre as bombas são ligar e desligar. Caso a bomba seja dotada de um conversor de frequência, existirá um número de possibilidades de estágios tão granular quanto o conversor de frequência permitir o ajuste da rotação da bomba. Os conversores de frequência, também conhecidos como inversores de frequência, são equipamentos eletrônicos acoplados aos conjuntos motores-bombas, cuja função é o controle da velocidade de rotação dos motores. O conversor de frequência possibilita a variação da vazão da bomba ajustando-se a velocidade do motor. Isso permite regular melhor a vazão e pressões excessivas em pontos do sistema que provoquem rupturas de redes e vazamentos, diminuindo as perdas e o consumo de água e energia elétrica (TSUTIYA, 2007; VENTURINI, 1997). Segundo VENTURINI (1997) a redução do consumo de energia elétrica proporcionada pela implantação de conversores de frequência está em torno de 10 a 20%. A utilização do conversor de frequência também traz outras vantagens como a suavização da partida, tanto elétrica como mecânica, reduzindo a manutenção do conjunto motor-bomba.

Nos sistemas de abastecimento de água existem diversos tipos de válvulas com diferentes funções. São usadas para regular pressão e vazão em pontos estratégicos, protegendo e aliviando elementos hidráulicos dos sistemas de abastecimento. As válvulas mais frequentemente encontradas são: válvulas de altitude, válvulas controladoras de pressão, válvulas controladoras de vazão, válvulas de manobra, válvulas de descarga, válvulas redutoras de pressão, válvulas sustentadoras de pressão, válvula de controle de perda de carga, válvulas de alívio, entre outras.

As válvulas de altitude operam como reguladoras de vazão e de fechamento (fechando-se automaticamente quando o reservatório está cheio) e são utilizadas na entrada dos reservatórios. São operadas de forma automática de acordo com a posição do nível da água. São mais apropriadas para sistemas adutores de recalque, pois provoca menor perda de carga quando comparada com registros controlados por bóias.

As válvulas de controle de pressão são utilizadas para manutenção do nível de pressão na tubulação a jusante do ponto onde a mesma está instalada e funcionam introduzindo uma perda de carga que é proporcional à pressão a montante (TSUTYA, 2004).

As válvulas de controle de vazão destinam-se a regular a vazão no ponto em que se encontra instalada e depende de seu grau de abertura e coeficiente de perda de carga (TSUTYA, 2004)

As válvulas de manobra são utilizadas para garantir a qualidade e continuidade de serviços através do isolamento de setores no caso de ocorrer acidentes ou demanda de emergência, de forma a minimizar a área de desabastecimento.

As válvulas redutoras de pressão são utilizadas para reduzir a pressão de montante a uma pressão de jusante, independente da variação de vazão e pressão do sistema. Também são frequentemente empregadas para regular diferentes zonas de pressão do sistema. Essas válvulas apresentam três possibilidades operacionais do controle da pressão de saída: pressão de saída fixa; controlador eletrônico modulado pela vazão, neste caso a pressão de saída é variável e depende da vazão que passa pela válvula, onde no horário de maior demanda a válvula encontra-se totalmente aberta e na madrugada, quando cai o consumo, a válvula encontra-se com máximo grau de fechamento; e controlador modulado pelo tempo, onde a pressão de saída também é variável, porém programada no controlador eletrônico em função de intervalos de tempo ao longo do dia. Segundo TSUTYA (2004), essas válvulas são equipamentos de alto nível de flexibilidade operacional e de regulação, indicado para locais com elevadas perdas de carga.

As válvulas sustentadoras de pressão são projetadas para sustentar pressões mínimas a montante independente da variação de vazão e pressão no sistema. Esse tipo de válvulas pode ser utilizado em situações nas quais, uma demanda não prevista, poderia resultar em pressões inadequadas em pontos do sistema (TSUTYA, 2004).

As principais ações de controle incidentes sobre as válvulas são abrir ou fechar. Dependendo do tipo e função da válvula, poderá haver vários estágios de aberturas.

As diferentes possibilidades de manobras nos elementos de controle, como ligar e desligar bombas ou ajustar a rotação, fechar e abrir válvulas ou diferentes graus de abertura constituem os *graus de liberdade* da operação.

2.3 – Comportamento da demanda de água

VICENTE (2005) define demanda de água tratada como o volume de água consumido pelos clientes abastecidos, o volume de perdas físicas, o volume previsto para apagar incêndios e os volumes operacionais (lavagem de reservatórios, drenagem de adutoras, usos públicos).

Em geral, o consumo de água nos centros urbanos é bastante variável ao longo do dia, tendo ascensão acentuada a partir das seis horas da manhã, atingindo seu máximo em torno do meio dia, quando o consumo é quase o dobro do valor médio diário, declinando progressivamente até as vinte horas, a partir de onde apresenta valores abaixo da média até

a manhã do dia seguinte, repetindo-se aproximadamente o mesmo comportamento, como mostra a Figura 2.1(a). A variação dos perfis de consumo depende muito dos costumes e da situação sócio-econômica da população, do tipo de ocupação do setor, do dia da semana, da presença ou não de reservatório domiciliar, do clima, sendo variável de uma região ou de uma cidade para outra e também sazonalmente. As cidades pequenas, por exemplo, com pouca ou sem nenhuma atividade industrial, apresentam uma variação do consumo um pouco diferenciado, onde no período noturno atinge valores proporcionalmente menores que nas grandes cidades; todavia, a curva de demanda apresenta forma semelhante. A Figura 2.1(b) mostra as curvas de consumo médio diário para 22 setores de abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). O perfil de cada curva depende das características sócio-econômicas de cada setor.

HASSEGAWA et al. (1999) utilizaram uma série histórica de 3,5 anos de dados de consumos horários de cerca de 120 setores pertencentes ao Sistema Adutor Metropolitano (SAM) de São Paulo, com o objetivo de determinar os valores dos parâmetros K1 (dia de maior consumo), K2 (hora de maior consumo) e K3 (hora de menor consumo). O trabalho também apresenta o perfil das curvas de demanda de alguns setores do sistema, mostrando as variações do consumo. VICENTE (2005) reproduziu alguns desses perfis, onde fica evidente a variação horária da demanda ao longo do dia (Figura 2.2 (a)) e para diferentes dias da semana (Figura 2.2 (b)).

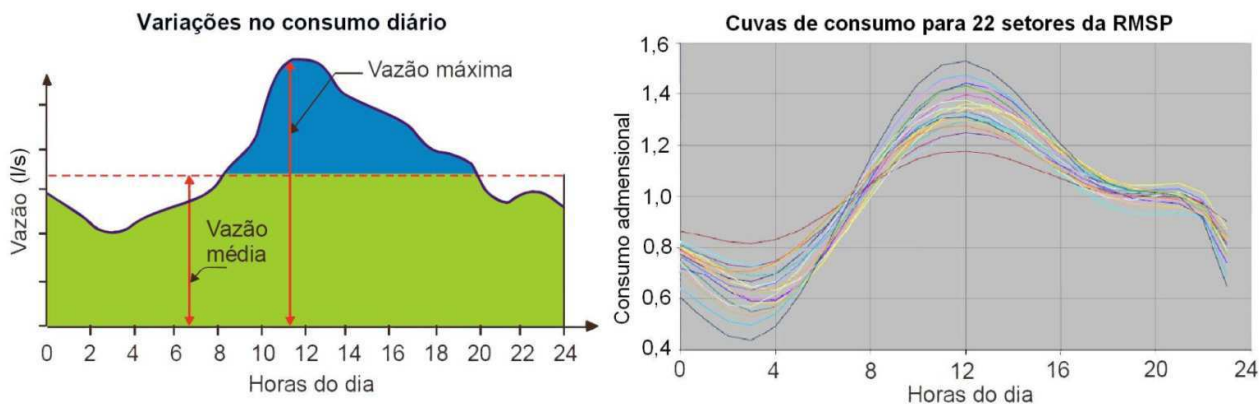


Figura 2.1: (a) à esquerda, o comportamento padrão da curva de consumo médio diário de abastecimento nos centros urbanos; (b) à direita, comportamento da curva de consumo típico de 22 setores de abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Fonte: TSUTIYA & SOBRINHO (sd).

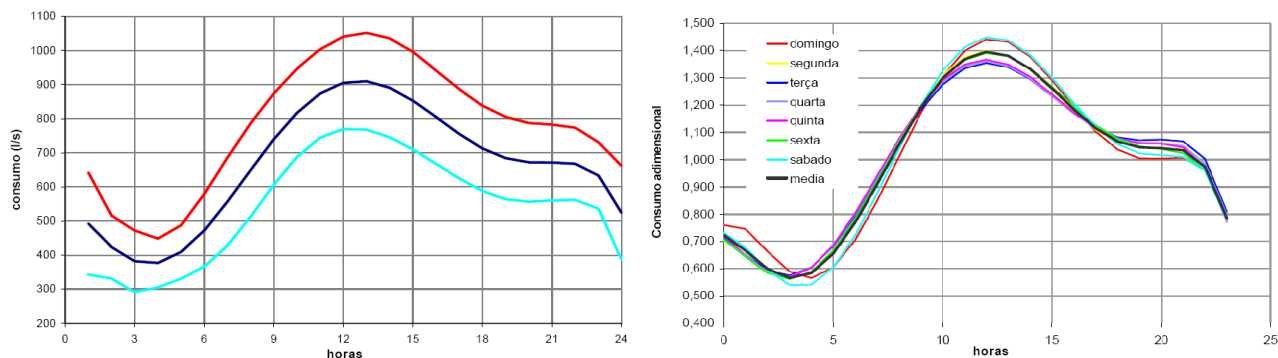


Figura 2.2: (a) à esquerda, as curvas de consumo média, mínima e máxima do setor Jaçanã – RMSP; (b) à direita, as curvas médias de consumo diário adimensionais para cada dia da semana do setor Itaquera – RMSP (VICENTE, 2005).

O conhecimento da demanda é de fundamental importância para se atingir a excelência da operação do serviço de abastecimento, mas o elevado grau de incertezas presente nesta variável e a sua natureza oscilatória não permite sua determinação de forma exata. Uma alternativa para contornar esse problema é desenvolver (SILVA, 2003) ou utilizar (BORGES, 2001) modelos de previsão de demandas que consigam representar satisfatoriamente o perfil de consumo desejado. No entanto, os modelos de previsão de demanda geralmente requerem um histórico de medições de vazões que muitas vezes não estão disponíveis nos sistemas de abastecimento de água devido à ausência de automação. Nestas condições, a alternativa mais prática é fazer simulações intensivas através de geração de cenários que consigam representar as incertezas presentes na demanda e em outras variáveis do sistema.

Na geração de cenários é importante que se conheça o comportamento da variável investigada, para que se possa reproduzir situações prováveis de ocorrer. A distribuição probabilística que ocorre entre os valores máximos e mínimos da variação horária da demanda, mostrada na Figura 2.2 (a), e suas características estatísticas são parâmetros que contribuem para a geração de cenários representativos desta variável. Para realizar uma análise estatística desse tipo é necessário dispor de séries de dados com valores de demanda medidos no sistema de abastecimento de água no qual deseja-se reproduzir cenários.

SILVA (2003) apresenta medições da demanda horária aos sábados para os meses de janeiro e julho, do reservatório Penha, pertencente ao Sistema Adutor Metropolitano de São Paulo. O número de medições (9 medições para cada hora do dia) apresentado é muito pequeno para uma análise estatística confiável. Além do mais são para apenas um reservatório, que teoricamente não é representativo, pois esses valores são muito dependentes das características econômicas e costumes da população. No mesmo trabalho, a autora apresenta valores médios do consumo horário e os correspondentes

desvios padrões de diversos reservatórios para as quatro estações do ano. Observa-se que os desvios padrões são em torno de 10% da média, com oscilações para mais e para menos de acordo com a estação do ano.

2.4 – Ampliações versus incertezas

Ao longo dos anos, com a aceleração do processo de urbanização, houve uma grande preocupação no dimensionamento econômico de sistemas de abastecimento de água. Para tanto, diversas técnicas de otimização foram desenvolvidas, aprimoradas e consolidadas, principalmente com as inovações tecnológicas e a evolução computacional, que permitiu a evolução de técnicas existentes, o surgimento de outras mais fundamentadas e sofisticação dos algoritmos. Porém, aparentemente menos se investiu no desenvolvimento de políticas operacionais adequadas e no planejamento da ampliação futura a que esses sistemas seriam submetidos devido à expansão das zonas urbanas e o conseqüente crescimento da demanda. Como consequência, houve a construção desordenada de obras e incessantes adaptações para suprir as necessidades humanas tornando os sistemas cada vez maiores, com alto índice de incertezas, alto grau de complexidade.

As incertezas existentes nos sistemas de abastecimento de água são das mais variadas naturezas. Entre as principais fontes geradoras, podem-se citar:

- demanda total: causada principalmente pela imprecisão na estimativa do crescimento populacional e do consumo médio horário, que é variável em função da estação do ano, tipo de ocupação do setor, presença ou não de reservatório domiciliar, dia da semana, horário do dia, clima, costumes e renda média familiar;

- demandas nos nós: falta de controle de novos usuários que passam a utilizar o sistema através de novos ramais de abastecimento;

- tubos: devido à modificação da malha (expansão) e o desconhecimento do tipo de material componente dos tubos;

- rugosidade: conhecimento ineficiente da variação da rugosidade ao longo da vida útil do projeto;

- válvulas: desconhecimento da existência de válvulas ou do funcionamento das mesmas, alterado principalmente pelas modificações sofridas pelo sistema ao longo da vida útil do projeto;

- bombas: desconhecimento das curvas das bombas do sistema, alteradas principalmente pelo desgaste e manutenção durante sua vida útil;

- perdas de água: desconhecimento da localização e quantidade de vazamentos e ligações clandestinas que incidem diretamente nas incertezas da demanda; segundo VENTURINI (1997), na maioria das cidades brasileiras, cerca de 40% da água tratada não é faturada, sendo que em algumas cidades esse valor chega a alcançar 70%;

- Reabilitação e expansão: desconhecimento das alterações causadas pela manutenção e expansão dos sistemas.

As incertezas constituem um fator influente na operação dos sistemas de abastecimento tornando a gestão operacional complexa, dificultando a tomada de decisão dos operadores e impossibilitando que os modelos de otimização forneçam operações ótimas para o sistema. Entre as variáveis susceptíveis à presença de incertezas, a demanda se destaca tanto por incorporar maiores índices de incertezas quanto por se tratar de uma variável muito importante na tomada de decisão da operação. A variabilidade horária do consumo ao longo do dia e os altos índices de perdas das mais variadas naturezas presentes nos sistemas de abastecimento são as principais fontes geradores de incertezas na demanda.

Os modelos de otimização da operação de sistemas de abastecimento de água, especialmente os determinísticos, são diretamente afetados pelas incertezas presentes nos sistemas, pois requerem precisão na descrição rigorosa dos elementos, variáveis e processos, comprometendo assim a busca pela solução ótima.

2.5 – Consumo de energia

Segundo a Aliança para Conservação e Energia – ALIANCE (2002), em torno de dois a três por cento do consumo de energia do mundo é usado no bombeamento e tratamento de água para residências urbanas e industriais, sendo que na maioria dos sistemas de água em todo mundo ações de efficientização poderiam reduzir este consumo em pelo menos 25% e ainda prover melhoria do desempenho.

O consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água corresponde, na maioria das empresas de saneamento, à principal parcela dos custos de energia (OTERO et al, 2007). GOMES (2004) afirma que o custo com bombeamento, na grande maioria das vezes, chega a ultrapassar, ao longo da vida útil dos projetos de sistemas de abastecimento de água, os custos de investimento das instalações e de sua implantação.

O poder público, juntamente com as companhias de abastecimento, deveriam visualizar o consumo de água e energia como variáveis interligadas, pois cada litro de água potável disponibilizado para o consumidor final representa um significativo custo de energia

e de tratamento. As perdas de água através de vazamentos, furtos, desperdício do consumidor e distribuição ineficiente afetam diretamente a quantidade de energia necessária para fazer a água chegar ao consumidor, além de aumentar os custos com o tratamento (ALIANCE, 2002).

TSUTIYA (1997) apresentou um estudo visando a redução do custo de energia elétrica em estações elevatórias de água e de esgotos onde cita diversos fatores a serem considerados na diminuição das despesas com energia elétrica. Entre os fatores citados podem-se destacar: a adequação do contrato de demanda ao sistema tarifário e melhorias nas instalações elétricas do sistema, o que pode resultar em grandes reduções dos custos sem necessariamente diminuir o consumo de energia elétrica; redução das perdas de carga do sistema através da limpeza ou revestimento das tubulações, eliminação de ar, etc.; redução do volume de água bombeado principalmente através da redução das perdas; alteração da operação através da utilização de conversores de frequência nos conjuntos motor-bomba e alteração na rotina operacional em conjunto com adequação do sistema. A realização do estudo em alguns setores do sistema de abastecimento de água da Região Metropolitana de São Paulo mostrou que o conhecimento da estrutura tarifária e que medidas operacionais simples, como o não acionamento de bombas no horário de ponta e utilização de conversores de frequência, reduzem consideravelmente os custos de energia elétrica, de 10 a 50%.

2.6 – Modelagem hidráulica

Um modelo é uma representação ou interpretação simplificada da realidade, segundo uma estrutura de conceitos que reproduz virtualmente uma situação real ou que poderia ser real, apresentando uma visão ou cenário de um sistema físico ou de parte dele. Os modelos de simulação hidráulica de sistemas de abastecimento são ferramentas computacionais que buscam reproduzir o comportamento real do sistema através de equações matemáticas que representam os processos físicos ocorrentes com maior exatidão possível.

Os modelos são eficientes para a avaliação de alternativas e estudos de possíveis configurações do funcionamento operacional de sistemas, estudo de cenários futuros, avaliação de risco de falhas em elementos ou manobras operacionais, avaliação de custos energéticos, análise hidráulica de novos projetos ou expansão de sistemas existentes. Podem ser utilizados na operação em tempo real, associados ou não a modelos otimizadores, tanto para avaliar respostas do sistema submetido a um grande número de condições, cenários e restrições, como na otimização do sistema, para melhoria da

eficiência hidráulica e operacional e minimização dos custos energéticos. CARRIJO (2004) destaca que os modelos de simulação são ferramentas eficazes e necessárias, recomendando seu uso na fase de planejamento e projetos e principalmente na fase de operação dos sistemas de distribuição de água, onde a maioria das cidades já conta com sistemas em operação e com tendência de expansão devido ao aumento da demanda.

Apesar da grande utilidade dos modelos de simulação hidráulica, é necessário que se tenha cautela e bom senso no seu uso. VICENTE (2005) alerta que, mesmo que todos os dados requeridos tenham sido coletados e inseridos no software de simulação hidráulica, não se pode presumir que o modelo é uma representação realística do sistema. Um cuidado importante a se tomar é quanto à calibração dos modelos. Mesmo utilizando dados coletados o modelador não deve assumir que o modelo seja uma representação matemática fiel do sistema, pois ele simplesmente resolve as equações matemáticas que descrevem as leis físicas da continuidade e conservação da energia usando os dados coletados. Por mais robusto e consistente que seja, um modelo não dispensa a necessidade da avaliação humana de sua performance. Antes de utilizar os resultados obtidos pelo modelo na tomada de decisões para operação de um sistema, é fundamental a sua adequada calibração.

Segundo VENTURINI (1997), a tendência de se procurar modelos computacionais para resolver o problema de operação e distribuição são justificados por: complexidade dos sistemas devido à crescente demanda, tornando difícil atendê-la com confiabilidade, exigindo assim uma abordagem sistêmica na definição dos planos de operação; altos custos operacionais; investimento em pesquisa nos últimos anos, especialmente no desenvolvimento de modelos matemáticos de otimização e simulação, colocando à disposição novos recursos de análise e apoio à decisão; risco de falhas no sistema, induzindo os operadores a tomar decisões operacionais sob tensão; e a perda de conhecimento causado principalmente pela perda de operadores experientes.

VICENTE (2005) afirma que a implantação de um modelo hidráulico para controle operacional de um sistema adutor proporciona, entre outros benefícios: melhor compreensão do funcionamento do sistema; calibração da rede existente; previsão de operação do sistema para atender às necessidades normais e emergenciais; modelagem de bombas de velocidade constante ou variável; cálculo da energia de bombeamento e do respectivo custo; modelagem dos principais tipos de válvulas; modelagem de reservatórios de armazenamento de nível variável; configuração das condições de operação do sistema com controles simples ou controles com condições múltiplas.

As principais diferenças existentes entre os simuladores hidráulicos são as técnicas de cálculo, eficiência computacional, facilidades de apresentação dos resultados e a

capacidade de interagir com outros softwares e linguagens de programação. Atualmente encontram-se disponíveis no mercado vários softwares de simulação hidráulica, dentre eles (SILVA & KISHI, 2003): H2Onet – H2OMap - Montgomery Watson Inc. (MW Soft); SynerGEE – Stoner Workstation Service; EPANET2 – Environmental Protection Agency (EPA); WaterCad - WaterGems – Haestad Methods Inc.; Pipe2000 - KYPipe (University of Kentucky); MikeNet - Boss International; Finesse – Water Software Systems (WSS); InfoWorks WS (Wallingford Software); Derceto (Derceto Inc.). O EPANET2 (ROSSMAN, 2000), foi desenvolvido com interesse em relação à proteção ao meio ambiente, por isso é um programa de domínio público bastante conhecido e amplamente difundido e utilizado com sucesso em muitos países e de qualidade atestada em muitos trabalhos.

CAPÍTULO 3

ESTADO DA ARTE

Nas últimas décadas, a evolução dos sistemas de abastecimento de água, motivada principalmente pelo crescimento substancial da demanda, devido ao acelerado processo de urbanização, tem provocado alterações e expansões constantes na sua topologia que, associadas ao alto índice de incertezas, tem tornado a sua operação muito complexa e problemática. A redução dos gastos com energia elétrica nas companhias de saneamento de todo o mundo é uma preocupação real nos últimos anos. Grande parte dos custos operacionais destas empresas está associada aos custos de bombeamento. Existe também uma grande preocupação com a eficiência hidráulica dos sistemas, onde o atendimento à demanda e a redução das perdas através do controle de pressão são desafios para a operação. Isto motivou muitos pesquisadores a desenvolverem diversas metodologias que propõem um melhor gerenciamento da operação desses sistemas, otimizando o atendimento à demanda e sua eficiência hidráulica e energética.

O desenvolvimento e evolução dos modelos de simulação hidráulica, que são usados para a determinação das principais características hidráulicas do sistema (pressões, vazões, níveis de água nos reservatórios, etc.), também proporcionaram uma grande contribuição para a gestão operacional dos sistemas de abastecimento de água, porém não são capazes de otimizar a operação, sendo muito usados de forma associada a modelos de otimização.

Vários métodos para otimização da operação de sistemas de abastecimento de água têm sido apresentados na literatura. As metodologias mais utilizadas para a modelagem do problema de otimização têm fundamentação em programação matemática ou em métodos heurísticos. São amplamente utilizados, associados ou não a modelos de simulação hidráulica, para solucionar os mais diversos problemas de operação existentes nos sistemas de abastecimento com variados graus de sucesso.

3.1 – Modelos matemáticos de otimização

Os modelos de otimização matemática se caracterizam principalmente pela sua capacidade de fornecer a solução ótima do problema. No entanto, quando aplicados a sistemas de abastecimento de água, exigem uma modelagem hidráulica rigorosa, com informações precisas sobre seus elementos e variáveis envolvidas na operação e são pouco

flexíveis a alterações e expansões. O alto nível de incertezas presentes nos sistemas pode inibir sua aplicação e desempenho na otimização da operação.

Segundo CHEUNG (2004), nos últimos anos, vários pesquisadores vêm fazendo críticas em relação ao desenvolvimento e aplicação das técnicas de programação matemática. O argumento principal levantado é que essas técnicas são formuladas utilizando critério único, ao contrário dos problemas reais em engenharia, principalmente na área de saneamento, nos quais os objetivos são múltiplos e conflitantes. O autor afirma que técnicas de otimização matemática convencionais são de difícil aplicação ao caso multi-objetivo, porque não trabalham com soluções múltiplas, existindo uma tendência em substituí-los por técnicas de otimização multi-objetivo não convencionais baseadas na programação evolucionária.

Na literatura facilmente encontram-se inúmeros trabalhos com propostas que objetivam aperfeiçoar a operação de sistemas de abastecimento de água usando diversos modelos de programação matemática. Mais frequentemente encontram-se trabalhos que usam técnicas de programação linear, programação não linear e programação dinâmica para desenvolverem modelos de otimização.

3.1.1 – Programação Linear

A programação linear é uma técnica utilizada para resolução de problemas, onde as relações entre as variáveis das restrições e das funções objetivo são lineares. É muito utilizada no desenvolvimento de metodologias para otimização da operação de sistemas de abastecimento de água. Apesar da relação entre as variáveis envolvidas na operação desses sistemas terem comportamento não linear, sob certas condições, problemas não lineares podem ser linearizados e resolvidos por iteração ou procedimentos de aproximação usando programação linear. Existem diversos trabalhos com aplicações bem sucedidas desta técnica para otimização dos mais diferentes problemas e objetivos que envolvem a operação de sistemas de abastecimento de água. Os objetivos mais comumente otimizados são o atendimento à demanda e a redução do custo da operação, respeitando os limites operacionais e hidráulicos do sistema.

VENTURINI (1997) apresenta uma metodologia, baseada em programação linear, para subsidiar a operação de sistemas de abastecimento urbano de água, que permite otimizar diferentes objetivos, como minimização da vazão bombeada associada às despesas com energia elétrica. A metodologia foi avaliada a partir da aplicação em redes que contêm todos os elementos característicos de um sistema de distribuição, concluindo-se

que o modelo proposto é uma alternativa promissora para otimização da operação de redes hidráulicas.

Com o objetivo de minimizar o custo da operação num intervalo de 24 horas, levando em consideração a estrutura tarifária e o atendimento à demanda de abastecimento a eficiência das bombas, o perfil da curva de demanda, as restrições e características operacionais do sistema, JOWITT (1992) apresenta um método de escalonamento ótimo de bombas usando programação linear. O método foi aplicado a um sistema real no Reino Unido, onde mostrou consideráveis reduções no custo operacional e atendimento aos objetivos almejados. Ainda segundo o autor, o método é robusto e eficaz, com baixo requerimento computacional e pode ser implementado para a operação de sistemas em tempo real.

ALMEIDA et al. (2000) utilizaram modelos de otimização de programação linear iterativa e de programação não linear, aplicados à operação de uma rede hipotética de distribuição de água, visando redução dos gastos com energia através da minimização das vazões bombeadas. Ambos os modelos se apresentaram viáveis, fornecendo subsídios necessários para as tomadas de decisões operacionais ao longo do horizonte de operação, indicando também a possibilidade de implementação para redes de maior porte e aplicações para operações em tempo real.

FRANCATO & BARBOSA (1999) apresentam um modelo de otimização para operação de sistemas de abastecimento de água, o qual faz uso da programação linear com procedimentos iterativos para contornar problemas de não linearidade. Para demonstrar sua aplicabilidade e funcionalidade o modelo multi-objetivo foi aplicado a uma rede hidráulica contendo reservatórios, *boosters*, válvulas controladoras de vazão e tubulações para controlar vazão e pressão de forma a mantê-las no nível de trabalho ótimo para o sistema. Os resultados fornecidos pelo modelo evidenciam o quanto é interessante a aplicação de uma abordagem multi-objetivo dentro dos problemas de operação de sistemas. O algoritmo matemático permitiu analisar as variações nas vazões nos trechos ao longo do horizonte de 24 horas, atreladas ao perfil de consumo utilizado no problema. Os autores concluem que a abordagem tradicional de seleção de alternativas para planejamento em sistemas de distribuição de água, baseada fundamentalmente na análise custo-benefício, tem cedido lugar a uma análise mais abrangente considerando múltiplos objetivos.

FRANCATO (2002) desenvolveu uma metodologia para aplicação de otimização multi-objetivo ao problema da operação de redes hidráulicas. Os objetivos de otimização considerados são: redução da oscilação da vazão na ETA; redução dos custos de bombeamento; redução das perdas físicas através do controle de pressão no sistema;

maximização do armazenamento nos reservatórios; e minimização das perdas de energia provocadas pelas válvulas. A metodologia utiliza um software de programação linear com recursos iterativos e a abordagem multi-objetivo do problema se faz com a aplicação do Método dos Pesos. Aplicou-se o estudo à alça leste do sistema adutor metropolitano de São Paulo. Os resultados foram expressos em termos de curvas de soluções não-dominadas para as funções objetivo aplicadas ao sistema objeto de estudo e atestam o bom desempenho da metodologia em relação aos objetivos estabelecidos.

VICENTE (2005) propôs um modelo de operação sustentado por um sistema de suporte à decisão, utilizando o software de simulação hidráulica WaterCad e otimizado a partir de programação linear para operar a distribuição de água em tempo real atendendo às restrições hidráulicas com o mínimo custo de energia elétrica do sistema. O estudo foi testado e aplicado ao Sistema Adutor Metropolitano de São Paulo. Através do modelo desenvolvido foi possível implantar um modelo de operação para o planejamento da operação diária do sistema urbano de abastecimento de água.

3.1.2 – Programação Não Linear

Segundo CARRIJO (2004), a programação não linear não tem sido utilizada com muita frequência em otimização de sistemas de abastecimento de água, devido particularmente ao fato de o processo de otimização ser usualmente lento e depender de um tempo computacional longo quando comparado com outros métodos. No entanto, essa técnica pode oferecer uma formulação matemática mais geral, fornecendo uma fundamentação para análise por outros métodos. A programação não linear inclui a programação quadrática, a programação geométrica e, num caso especial, a programação separável que pode ser usada iterativamente como um programa mestre ou como um subprograma na aplicação em grandes sistemas. Existem várias aplicações bem sucedidas desta técnica para sistemas de abastecimento de água.

Tendo como preocupação a redução do consumo de energia nas operações de bombeamento de água, que representa o item mais significativo nos orçamentos das empresas de saneamento, ALMEIDA & BARBOSA (2001) apresentaram um modelo de programação não linear para a operação ótima dos elementos de um sistema de distribuição de água, que minimiza o custo mensal associado à potência de eixo da bomba do sistema. O modelo apresentado é submetido a uma análise de sensibilidade quanto à aplicação das tarifas diferenciadas de energia elétrica e a variações em sua formulação. Como resultado, o modelo proposto se apresentou como ferramenta viável, capaz de fornecer suporte para as

tomadas de decisões operacionais, permitindo um melhor entendimento sobre as interações dos elementos do sistema e a possibilidade de aplicações para operações em tempo real.

ALMEIDA & BARBOSA (2001) desenvolveram um modelo hidráulico de otimização, formulado como um problema de programação não linear inteira mista de grande escala, cuja solução é obtida pela associação de um algoritmo de programação não linear com um algoritmo de programação inteira. O modelo é capaz de subsidiar as decisões operacionais de sistemas de distribuição de água em período extensivo. Quando aplicado ao Subsistema Adutor Metropolitano Alça Leste da cidade de São Paulo, apresentou-se como viável e capaz de ser implementado para operações em tempo real.

ALMEIDA & BARBOSA (2002) apresentaram um modelo hidráulico de otimização para a definição das políticas operacionais ótimas em sistemas de distribuição de água, estruturado na forma clássica dos problemas de otimização determinística restrita, possuindo uma função objetivo e um conjunto de restrições. A validade e a consistência dos resultados fornecidos pelo modelo foram atestadas pela comparação com dois métodos clássicos de resolução de sistemas hidráulicos: o método de Hardy-Cross e o método da Teoria Linear. O modelo proposto é capaz de fornecer uma solução operacional ótima para sistemas de distribuição de água e apresenta grande flexibilidade e possibilidades de adaptação a diferentes topologias, cenários de demanda e análise em período estendido.

SANTANA (1999) desenvolveu um modelo de otimização para a operação de sistemas de distribuição de água abastecidos por múltiplas estações de bombeamento e múltiplos reservatórios de regularização. O mesmo se baseia em um modelo de programação não linear misto, cujo objetivo de otimização é a minimização do custo da operação respeitando os limites hidráulicos e operacionais do sistema. As variáveis de operação consideradas são: o número de bombas em operação e o nível de água nos reservatórios de regularização, sendo a operação dos reservatórios garantida através das válvulas de controle. O modelo foi aplicado a duas redes de distribuição, sendo uma delas hipotética. O autor concluiu que o objetivo de modelagem da operação de redes que contemple seus principais componentes, gerando respostas sobre o seu comportamento e das decisões a serem tomadas de forma a reduzir o custo operacional foi plenamente alcançado.

3.1.3 – Programação Dinâmica

Segundo CARRIJO (2004), a programação dinâmica é uma técnica apropriada para otimização de problemas cuja ocorrência se configura em estágios subsequentes. É bastante aplicada em sistemas de abastecimento de água, onde o

problema a ser otimizado pode ser decomposto em um determinado número de estágios e analisado, de um estágio para o próximo, para todos os estados operacionais possíveis. Na finalização dos resultados, aquele que apresentar o valor mais econômico é selecionado como solução do problema. As características não lineares e estatísticas do comportamento dos sistemas de abastecimento de água são responsáveis pela popularidade e o sucesso desta técnica. Algumas aplicações bem sucedidas são apresentadas a seguir.

LANSEY & AWUMAH (1994) apresentam uma metodologia para determinação dos horários de funcionamento ótimo das bombas, usando programação dinâmica, através da minimização do custo de energia elétrica, usando a quantidade de bombas ligadas durante a operação como uma restrição. Segundo os autores, também podem ser incluídas restrições para níveis dos reservatórios, taxa de variação dos níveis, número de chaveamento de bombas por intervalo de tempo e consumo máximo de energia. A aplicação em um pequeno sistema mostra que a metodologia pode ser usada para determinar em tempo real a melhor estratégia de operação para as bombas. No entanto os autores ressaltam a limitação do modelo para sistemas com um número grande de bombas.

Com o objetivo de melhorar a eficiência do bombeamento em sistemas de distribuição, diminuindo os custos com energia elétrica, ORMSBEE et al. (1989) desenvolveram uma metodologia para determinação da melhor trajetória do nível do reservatório associado ao escalonamento ideal para as bombas. Para atingir o primeiro objetivo utilizaram programação dinâmica e no segundo, enumeração explícita. A metodologia foi aplicada a uma parte do sistema de distribuição de água da cidade de Washington, proporcionando uma redução de 6,7% no consumo anual de energia em relação ao consumo previsto no projeto.

ERTIN et al. (2001) desenvolveram um método híbrido utilizando programação dinâmica e regras para o controle inteligente de sistemas de distribuição de água, tendo como objetivo reduzir o consumo de energia ao longo do horizonte de operação. A aplicação da metodologia mostrou uma redução de 12,5% no consumo de energia elétrica. Os autores afirmam que a metodologia é bastante flexível, sendo facilmente adaptada às circunstâncias da operação e alterações no sistema e pode ser usada em larga escala para esse tipo de problema.

3.2 – Modelos heurísticos de otimização

Os modelos heurísticos de otimização se caracterizam principalmente por sua capacidade de otimizar sistemas com altos índices de incertezas e elevada complexidade operacional, agregando múltiplos objetivos, sem necessidade de precisão na sua descrição

física, e incorporar vários objetivos de otimização sem aumento considerável da complexidade de sua estrutura. Fornecem soluções ótimas ou bem aproximadas, sendo geralmente de fácil compreensão, manipulação, implementação, flexíveis a alterações topológicas e podem incorporar a experiência do operador e o comportamento característico do sistema. A eficiência e robustez desses modelos não estão vinculadas à modelagem hidráulica rigorosa do sistema. Entre as aplicações de métodos heurísticos, são mais frequentemente encontrados os algoritmos genéticos.

3.2.1 – Algoritmos Genéticos

Os algoritmos genéticos constituem uma técnica de otimização onde a busca pela melhor solução é inspirada na teoria da evolução de Darwin e permitem encontrar várias soluções ótimas ou sub-ótimas em relação a cada objetivo otimizado. Entre as diversas vantagens dos algoritmos genéticos podem-se citar a simplificação que eles permitem na formulação e solução de problemas de otimização e a capacidade de otimizar múltiplos objetivos sem alterar a complexidade do modelo. Têm larga aplicação na otimização da operação de sistemas de abastecimento de água devido a sua facilidade de entendimento e aplicação. Na literatura encontra-se um grande número de trabalhos que fazem aplicação dessa técnica para resolver diversos problemas de operação.

LÓPEZ-IBÁÑEZ et al. (2005) apresentaram uma metodologia baseada no algoritmo evolucionário multi-objetivo SPEA2 associado ao modelo hidráulico EPANET2 para otimizar a operação de sistemas de distribuição de água. O algoritmo apresenta novos critérios de dominância e operadores genéticos adaptados e considera uma nova representação dos indivíduos baseado num dispositivo disparador do tempo de funcionamento de uma bomba que restringe o número de acionamentos. A otimização incluiu dois objetivos de operação: minimizar o custo com energia elétrica e maximizar o tempo que as bombas permanecem desligadas, considerando as restrições hidráulicas do sistema e o atendimento à demanda. A metodologia foi aplicada a uma rede hipotética e os resultados mostraram uma considerável melhora no cumprimento dos objetivos quando comparado às soluções fornecidas por um algoritmo genético simples onde o estado da bomba tem representação binária.

Com o objetivo de superar a complexidade existente na operação de um sistema de abastecimento de água, imposta principalmente pelas restrições envolvidas e os objetivos conflitantes, MACHADO et al. (2008) utilizaram um algoritmo genético multi-objetivo para otimizar o custo de energia elétrica referente ao bombeamento, o custo de manutenção das bombas e minimizar a variação do nível do reservatório, sem infringir as restrições

operacionais. O algoritmo, entre outras adaptações, inclui a utilização da técnica de *seeding*, para introduzir na população inicial uma solução de alta aptidão. Os resultados mostram que a metodologia proposta é capaz de fornecer boas soluções para o problema, em ambas as situações em que é utilizada para melhorar uma solução ótima previamente conhecida ou no caso em que é utilizada para encontrar boas soluções para o problema sem qualquer conhecimento prévio de soluções.

SJOBOM JUNIOR & OLIVEIRA (2000) propuseram um modelo computacional, usando algoritmos genéticos, cujo objetivo é otimizar bombeamentos de sistemas de distribuição de água, minimizando custos com energia elétrica e aumentando a confiabilidade operacional. Para tanto utilizaram um previsor de níveis de água em reservatórios das próximas 24 h, por redes neurais artificiais. Na aplicação do modelo ao sistema de distribuição João Leite, que faz parte do sistema de abastecimento de água de Goiânia, obteve-se uma redução de 9% no custo de energia elétrica. Os autores concluíram que o resultado é muito expressivo, sendo que o investimento para se consegui-lo relativamente baixo, compreendendo somente o desenvolvimento de software e treinamento dos operadores.

RIGHETTO (2002) propôs a utilização de algoritmos genéticos associados a um modelo hidráulico para otimizar a operação de sistemas de distribuição de água, envolvendo parâmetros relacionados com o consumo de energia, confiabilidade operacional, satisfação quanto ao atendimento da demanda e controle das pressões nodais. Para avaliar a performance das regras em uma operação de 24 horas o autor usou cinco parâmetros ou índices: índice de consumo de energia, índice de nível d'água de reservatório, índice de atendimento de demanda, índice de adequação da pressão média e índice de mudanças operacionais. O modelo foi aplicado a um sistema fictício simples a fim de ilustrar o procedimento proposto para a determinação das regras operacionais desejadas, demonstrando sua eficácia. O autor concluiu que o modelo é bastante flexível para incorporar as diversas características desejáveis à operação do sistema, o que o torna de muita utilidade para se determinar as regras operacionais desejáveis para um sistema de abastecimento real de distribuição de água.

BARDALES et al. (2007) apresentam uma metodologia, baseada em algoritmos evolucionários multi-objetivo, para a elaboração de estratégias de operação ótima das bombas que busca minimizar custos energéticos e maximizar a confiabilidade hidráulica, simultaneamente, considerando um horizonte de operação determinado e atendendo às restrições operacionais do sistema. A metodologia foi aplicada no sistema adutor de Campo Grande (MS) para fornecer estratégias operacionais de programação do funcionamento das bombas. Os resultados apresentam soluções mais econômicas e operacionalmente

melhores quando comparadas com a operação real do sistema, evitando desperdícios de energia elétrica e de água, e garante reduções nos custos energéticos, operacionais e de manutenção.

CARRIJO (2004) desenvolveu um modelo computacional com o objetivo de encontrar um controle operacional ótimo de sistemas de macro distribuição de água potável, utilizando um simulador hidráulico (EPANET2), um algoritmo de otimização, considerando dois objetivos (custos de energia elétrica e benefícios hidráulicos) e um algoritmo de aprendizado para extração de regras operacionais para o sistema. Os estudos foram aplicados no sistema de macro distribuição da cidade de Goiânia. Os resultados demonstraram que podem ser produzidas estratégias operacionais satisfatórias para o sistema em substituição ao julgamento pessoal do operador.

BOULOS et al. (2001) e YU et al. (2005) também utilizaram com sucesso algoritmos genéticos para desenvolver modelos visando otimizar a operação de sistemas de abastecimento de água, considerando o atendimento à demanda como principal objetivo e a pressão nos nós, velocidades nas tubulações e nível máximo e mínimo dos reservatórios como restrições a serem respeitadas. Ressaltam também as dificuldades encontradas na aplicação dos métodos de otimização tradicionais para sistemas de grande porte, onde a operação é complexa, com muitas restrições, sendo necessárias muitas simplificações para a representação matemática do problema.

RIBEIRO (2002) desenvolveu um modelo computacional híbrido para simulação, em período extensivo, de sistemas de abastecimento de água contendo bombas de rotação variável, para o estabelecimento de velocidades ótimas de rotação que satisfaçam três objetivos pré-estabelecidos: a manutenção de pressões mínimas de serviço, a redução do consumo de energia elétrica da operação e o retorno do nível ao final do período às condições iniciais desejadas. O modelo utiliza a técnica de otimização baseada em algoritmos genéticos, sendo usado em conjunto com um simulador hidráulico. Os diferentes cenários avaliados mostram o potencial da técnica proposta para as diversas condições operacionais avaliadas, mostrando que a ferramenta é flexível a possíveis alterações topológicas no sistema. Mais tarde, RIBEIRO (2007) aprimorou este modelo, implementando a ferramenta e desenvolvendo um modelo híbrido multi-objetivo, através de utilização de técnicas atuais de otimização evolutiva. O aperfeiçoamento do modelo teve como finalidade obter uma maior redução do consumo de energia elétrica nas estações de bombeamento com inversores de frequência, estabelecendo roteiros operacionais otimizados para as rotações da bomba de rotação variável, garantindo condições operacionais previamente estabelecidas para o atendimento das necessidades de consumo, tais como flutuação dos níveis dos reservatórios, pressões extremas, etc. Para tanto utilizaram-se técnicas de

simulação hidráulica baseada no *Time Marching Approach* –TMA e de otimização multi-objetivo baseada na técnica de implementação dos Algoritmos Genéticos Multi-Objetivos.

3.2.2 – Regras Heurísticas

O desenvolvimento de regras para operação de sistemas de abastecimento de água consiste na determinação de procedimentos/rotinas operacionais que atuam sobre o estado dos elementos do sistema (bombas, válvulas, registros, etc.), obedecendo limites de operação e buscando otimizar objetivos estabelecidos. As regras heurísticas constituem uma das metodologias mais simples para aperfeiçoamento da operação de sistemas de abastecimento de água, pois consiste em reproduzir a forma de trabalho dos operadores de modo bem estruturado. Permitem incorporar objetivos múltiplos e se comportam de forma consistente na presença de incertezas e alterações na topologia dos sistemas. Algumas aplicações bem sucedidas desta técnica são mostradas a seguir.

WALENDA et al. (2006) desenvolveram uma metodologia, baseada em regras, onde buscaram determinar trajetórias ótimas de níveis dos reservatórios, para a operação das bombas e válvulas do sistema, levando em consideração as restrições operacionais e a tarifa de energia elétrica. A metodologia consiste numa tentativa de generalizar o processo de extração de regras para sistemas de abastecimento. As regras determinam as manobras a serem executadas nas bombas (ligar/desligar) e válvulas (abrir/fechar) a partir da observação dos níveis dos reservatórios e o instante da operação. A metodologia foi aplicada inicialmente a um sistema simples, com apenas um reservatório alimentado por uma estação de bombeamento e depois a um sistema mais complexo, de tamanho médio e em ambos os casos considerando as incertezas presentes na demanda. Os resultados mostram que a metodologia baseada em regras de controle é capaz de fornecer soluções robustas, mesmo com as incertezas presentes na demanda. Devido ao seu caráter genérico, o método permite sua extensão a situações em que as bombas contenham inversores de frequência.

Com o objetivo de melhorar a operação de um sistema de abastecimento de água, perante o alto grau de complexidade imposto pelas as restrições envolvidas e os objetivos conflitantes, LACERDA et al. (2008) desenvolveram um conjunto de regras operacionais simples, baseadas no conhecimento funcional do sistema, para dar suporte à operação do Sistema Adutor de Marés, que é responsável pelo abastecimento de água de grande parte da região central da cidade brasileira de João Pessoa – PB. O conjunto de regras foi desenvolvido de forma a sugerir estratégias de operação sub-otimizadas as quais foram simuladas no EPANET2. Os resultados obtidos mostram que o conjunto de regras é capaz

de sugerir alternativas de operação eficientes para o sistema e pode ser usado tanto como ferramenta de apoio à gestão da operação atual quanto para análise de um possível aumento futuro da demanda.

LEON et al. (2000) desenvolveram um sistema especialista para controlar o sistema de abastecimento de água da cidade de Sevilha. O sistema é constituído por regras heurísticas associadas a algoritmos de cálculo, com três níveis diferentes de prioridades: a segurança do sistema, a otimização do custo de energia elétrica e o nível de qualidade da água. O sistema de regras atua principalmente sobre os tanques de armazenamento, bombas e reservatórios, buscando encontrar soluções em que as bombas não funcionem nos horários de tarifa energética elevada, considerando também outros aspectos importantes, como a demanda do sistema, dados históricos, a seleção de qual reservatório coletar água, manutenção de elementos do sistema e da qualidade da água armazenada nos tanques, buscando sempre reduzir o tempo de armazenamento. As principais dificuldades encontradas foram a falta de informações sobre os procedimentos de operação, a complexidade do sistema tarifário, a variabilidade da topologia da rede e a dependência das informações sobre a demanda de água que é a principal variável a ser considerada para obter um escalonamento otimizado da operação das bombas e sobre a qual incidem grandes incertezas. Este sistema também permite incorporar a experiência do operador além do refinamento dos processos de operação, simulando novas estratégias e com possibilidade do seu uso no treinamento de novos operadores. Foi aplicado na operação do sistema de abastecimento de água de Sevilha, obtendo-se uma redução de custos em torno de 25% em relação à operação anterior.

LACERDA et al. (2008) apresentam uma metodologia genérica para extração de regras para operação multi-objetivo de sistemas de abastecimento de água. A aplicação da metodologia ao Sistema Adutor do Cariri, no Estado da Paraíba, mostrou que as regras construídas são capazes de fornecer alternativas de operação consistentes e eficientes, melhorando sua eficiência hidráulica e energética, servindo como uma ferramenta de apoio à gestão operacional desse tipo de sistema.

BORGES (2003) propôs uma evolução metodológica na operação do Sistema Adutor Metropolitano de São Paulo, implantando um modelo matemático, em tempo real, de previsão de consumo de água horário associado a um modelo de simulação de redes hidráulicas com o objetivo de melhorar a performance operacional considerando os procedimentos de controle operacional manual e automático do sistema. O sistema de regras desenvolvido é bastante simples, e atua principalmente sobre as válvulas, bombas e reservatórios de armazenamento do sistema, buscando melhorar a eficiência do abastecimento e redução do custo operacional, considerando um modelo matemático de

previsão e sem nenhuma pretensão de se encontrar a operação ótima global do sistema. Concluiu-se que é possível estabelecer regras operacionais mais eficientes do que as usadas para se determinar uma operação sub-otimizada demonstrado pela redução do número de mudanças de posição de válvula e estado de bombas (redução de 50%), bem como a redução do custo de energia elétrica observada (reduzindo o bombeamento em horário de maior custo), que foi da ordem de 10 a 30%.

BARBOSA (2001) determinou estratégias simples para operação das bombas de parte do sistema de abastecimento da cidade de Campina Grande – PB, com o objetivo de minimizar os custos com o bombeamento, diminuir o número de acionamentos e desligamentos de bombas, atender às demandas de água e garantir o bom funcionamento do sistema, usando, para tanto, um modelo de simulação computacional como auxílio. Definiram-se estratégias de operação baseadas nos níveis dos reservatórios de distribuição, que determinam os momentos ligar e desligar cada bomba durante um período de 24 horas. Os resultados obtidos comprovaram que é possível reduzir os custos com o bombeamento de água através de estratégias simples de operação, atendendo às restrições de vazões e pressões mínimas e máximas, além das restrições operacionais das bombas.

GOMES & SILVA (2004) analisaram o custo da energia de bombeamento para uma pequena rede de abastecimento hipotética a partir de simulações por meio do programa EPANET, com o objetivo de planejar modificações na rede exemplo de maneira a permitir o funcionamento satisfatório do sistema com a interrupção do bombeamento no horário de ponta, implicando, dessa maneira, em um menor consumo de energia do sistema de bombeamento. Os resultados obtidos mostram que os investimentos com as modificações sugeridas para a rede seriam compensados de forma bastante satisfatória com a economia obtida a partir da redução do consumo de energia.

3.2.3 – Lógica Difusa

A Lógica Difusa é uma técnica que busca incorporar ao problema a forma humana de tomar decisões. É indicada para se trabalhar com multiplicidade de informações vagas e incertas, as quais podem ser expressas linguisticamente, onde se consideram graus de verdade entre decisões antagônicas. Os sistemas difusos são apropriados para modelar processos cujo comportamento é descrito de forma apenas aproximada ou cuja operação pode ser descrita através de regras heurísticas. Nos trabalhos sobre sistemas de abastecimento de água a Lógica Difusa é usada para as mais diversas finalidades: dimensionamento (FARMANI et al., 2005, SPILIOTIS, 2007, VAMVAKERIDOU-LYROUDIA et al., 2005, VAMVAKERIDOU-LYROUDIA et al., 2007), reabilitação (FARMANI et al., 2005),

avaliação de risco (LEE et al., 2007), calibração (SALAS et al., 2004) e avaliação de incertezas (REVELLI & RIDOLFI, 2002) nos sistemas.

BEZERRA (2008) desenvolveu um sistema de controle inteligente, aplicado a sistemas de bombeamento de água, utilizando a Lógica Difusa para controlar a pressão na saída da bomba, mantendo-a em um valor ou faixa pré-estabelecida pelo usuário, por meio da variação da velocidade de rotação do motor elétrico, onde a decisão da operação passa a ser orientada, em tempo real, a partir de uma lógica computacional baseada em regras linguísticas. Os resultados mostraram que o controlador é capaz de proporcionar ganhos para o controle de rotação, racionalização no consumo de água e energia e redução dos custos operacionais.

CAMBOIM (2008) apresentou um sistema difuso para manter a pressão na rede de abastecimento de água estável, de forma automática, por meio da variação de velocidade de rotação do conjunto motor-bomba, com o objetivo de tornar o sistema mais eficiente, racionalizando o consumo de água e energia e reduzindo, conseqüentemente os custos operacionais. O trabalho foi aplicado a uma bancada experimental de distribuição de água do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento, LENHS, da UFPB. Com a aplicação da modelagem desenvolvida, obteve-se uma redução de 27,4% no consumo de energia sem comprometer as características hidráulicas do sistema de abastecimento.

3.3 Outras metodologias

Além das tradicionais metodologias usadas na otimização da operação de sistemas de abastecimento de água citadas anteriormente, encontram-se na literatura diversas outras abordagens baseadas em rotinas de otimização ou melhoria da operação através da adequação das manobras executadas nos elementos e implementação de novos elementos de controle como conversores de frequência e válvulas reguladores de pressão e vazão.

PRASAD et al. (2006) aplicaram o método de otimização heurístico *Ant Colony Optimization Algorithm* (ACO) ou Otimização Colônia de Formigas, para determinar o escalonamento ótimo de bombas para sistemas de abastecimento de água. Os objetivos do método são minimizar os custos de energia da operação e o número de acionamentos de bombas, obedecendo às restrições operacionais do sistema. A metodologia foi aplicada a sistemas de tamanhos diferentes, onde constatou-se que, para sistemas de pequeno porte, a otimização ACO apresenta melhor desempenho quando comparada a algoritmos evolucionários. Já para aplicação em sistemas maiores, algoritmos genéticos híbridos apresentaram uma discreta melhora de performance. A metodologia ACO apresentada é

simplificada, podendo se obter melhor eficiência desta técnica com a sofisticação do algoritmo.

LÓPEZ-IBÁÑEZ et al. (2008) desenvolveram uma abordagem estruturada na adaptação do método de otimização Colônia de Formigas para otimizar a programação das bombas de redes de distribuição de água. Os objetivos considerados foram a minimização de custos de energia e o número de acionamentos de bombas, satisfazendo as restrições do sistema. Ao invés de usar a aproximação da função de penalidade para violação das restrições, tais violações foram ordenadas e ranqueadas de acordo com sua importância das soluções. A abordagem proposta foi avaliada em uma pequena rede de teste e em uma grande rede real. Resultados são comparados com aqueles obtidos usando um algoritmo genérico simples baseado em representação binária e um algoritmo genérico híbrido que usa uma chave de nível para definir o estado das bombas. A metodologia de otimização Colônia de Formigas obteve um menor número de acionamentos quando comparado com a abordagem binária via algoritmo genético e minimizou o custo de bombeamento, satisfazendo restrições de pressões e atendimento a demanda do sistema. Quando aplicada para a rede de teste pequena encontrou soluções melhores do algoritmo genético híbrido. Para o caso da rede real grande, obteve uma melhor performance do que o algoritmo genético simples, no que concerne custo de energia, número de acionamento de bombas e tempo computacional.

OPPINGER (2009) apresenta resultados do combate a perdas de água em um bairro de São Paulo em que a instalação de válvulas de regulação de pressão reduziu a quantidade de desperdício em 30%. O controle da pressão no sistema também proporcionou a redução de rupturas de tubulações em até 50%

LI (2007) propôs um controle adaptativo para regularizar a pressão nas extremidades das redes de distribuição através da determinação da melhor rotação para as bombas de forma a reduzir a potência requerida para as bombas e maximizar a eficiência do bombeamento, atendendo aos limites de pressão para abastecimento em todo o sistema. A prática mostra que quando as bombas têm a rotação ajustadas para funcionarem de acordo com a curva do sistema para a pressão mínima de abastecimento, é possível conseguir uma redução de até 22% da potência requerida para o bombeamento quando comparado com o controle de pressão constante adotado para a grande maioria desses sistemas.

McCORMICK (2003) propõe uma metodologia para escalonamento ótimo das bombas considerando a tarifa de energia mais cara no horário de maior demanda. O custo de bombeamento neste horário corresponde a 35% do custo da operação diária. Desenvolveu um programa dinâmico de fundamentação estocástica para derivação das

restrições ótimas ou penalização de custo, onde a variação da demanda é representada por um modelo de previsão de demanda formulado através de um processo de Markov. Para o caso hipotético de teste da metodologia, considerou que as unidades de bombeamento estão inseridas na mesma estrutura tarifária. Encontrou a função de custo e as restrições ótimas para o sistema, a partir das quais pode-se determinar o escalonamento ótimo para as bombas. O autor afirma que o método leva vantagens em relação aos métodos heurísticos porque considera todas as incertezas presentes na demanda.

3.4 Síntese

O estado da arte mostra que existem diversas metodologias que tratam a problemática da operação dos sistemas de abastecimento de água. A eficiência da operação pode ser obtida por diferentes técnicas de otimização das mais variadas concepções matemáticas e heurísticas. Estas técnicas se diferenciam principalmente pela sua natureza, estrutura, objetivos de otimização incorporados, restrições operacionais, limitações físicas e computacionais, necessidade de descrição física dos sistemas, flexibilidade a alterações, grau ou nível de otimização obtido e nível de complexidade de concepção e entendimento. Indiscutivelmente são técnicas que oferecem sólidos ganhos de eficiência operacional dos sistemas de abastecimento com comprovado sucesso nas aplicações demonstradas nos trabalhos.

No entanto, a aplicação dessas técnicas de otimização da operação pelas companhias de saneamento nos sistemas de abastecimento se depara com algumas barreiras muitas vezes intransponíveis: desinteresse da própria companhia em melhorar a eficiência hidráulica de operação; a necessidade de investimentos para sua implementação; dificuldade de entendimento das técnicas; pouca ou nenhuma flexibilidade para adequação às constantes expansões e alterações sofridas pelos sistemas e à realidade física e operacional de cada um; e a desconfiança e o medo dos operadores em absolverem essa tecnologia.

Essas barreiras expressam a necessidade de se desenvolver ferramentas mais simples para que seu uso seja considerado viável pelas concessionárias de água. Neste sentido, as metodologias com fundamentação heurística, como extração de regras baseadas nas características do sistema e da operação se apresentam como uma alternativa, pois fornecem soluções de operação eficientes, são de simples compreensão, manipulação e implementação e mais flexíveis a adaptações para qualquer tipo de sistema, particularidades e as constantes alterações topológicas na malha.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

4.1 – Estrutura metodológica

Neste trabalho foi elaborado um procedimento genérico para construção de regras para a operação de sistemas de abastecimento de água, visando principalmente os seguintes objetivos: atender satisfatoriamente à demanda de abastecimento; reduzir o custo operacional (energia elétrica); reduzir o número de acionamentos/desligamentos das bombas e válvulas; reduzir as perdas de água através da regularização da pressão e recuperar as condições iniciais do sistema ao final de um ciclo de operação. Outro fator relevante que este procedimento deve contemplar é a flexibilidade de alteração, ampliação e adaptação das regras em função do sistema.

De modo geral, o processo de desenvolvimento das regras consiste em quatro etapas metodológicas mostradas na Figura 4.1 e descritas de forma sucinta a seguir: avaliação do sistema; extração e “fuzificação” de regras simples; ajuste e parametrização; e avaliação do desempenho das regras perante as incertezas do sistema.

A avaliação do sistema consiste em analisar a sua configuração topológica identificando a existência de particularidades; analisar a operação de modo a identificar as principais dificuldades operacionais existentes e que se deseja solucionar, como por exemplo, excessos de pressão, ocorrência de colapso ou dificuldades de atendimento à demanda; identificar as características físicas dos elementos da malha, como por exemplo, bombas com ou sem conversores de frequência e válvulas que permitem ou não vários estágios de abertura; com base nas características do sistema, dos seus elementos e da operação, definir os limites operacionais do sistema a serem respeitados para garantir a segurança da operação e quais variáveis envolvidas na operação devem ser controladas para se obter uma melhor performance. Esta é a etapa de reconhecimento do sistema, para que o modelador tome conhecimento de seu funcionamento, problemas e particularidades existentes e adquira sensibilidade da operação e objetivos a serem alcançados.

Na etapa de extração das regras as variáveis envolvidas na operação devem ser tratadas, definindo-se faixas e limites de controle de acordo com suas características, os graus de liberdade da operação e os objetivos que se deseja alcançar, permitindo a obtenção de sugestões operacionais robustas. As regras simples extraídas determinam

manobras a serem executadas nas bombas e válvulas, observando o comportamento das demais variáveis, as faixas de trabalho e limites estabelecidos e os objetivos operacionais a serem alcançados. As regras difusas são obtidas a partir do processo de fuzificação das variáveis envolvidas na construção das regras simples. A Lógica Difusa é uma técnica que busca incorporar maior robustez às regras simples na presença das incertezas que são características dos sistemas de abastecimento de água.

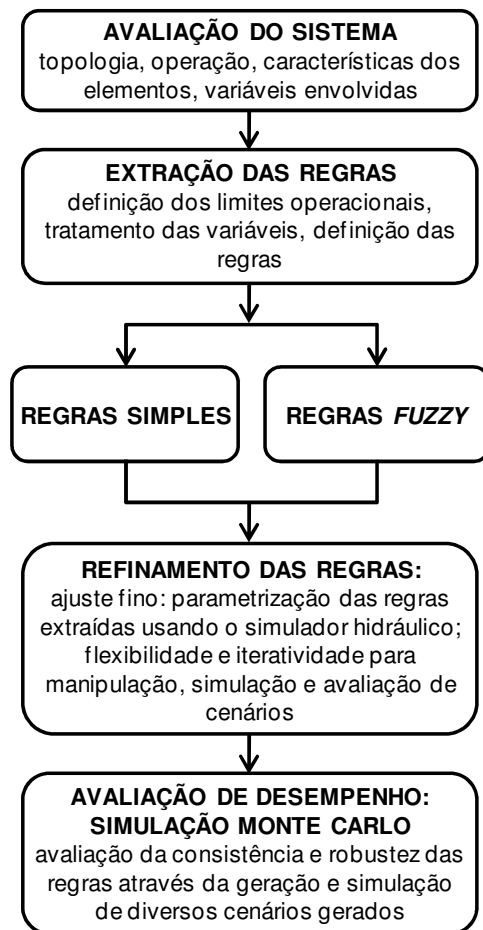


Figura 4.1: Etapas de construção e avaliação das regras

Uma vez construídas, é necessário submeter as regras simples e difusas a um processo de ajuste fino, fazendo uso de um simulador hidráulico. Esse processo permite sua parametrização, tornando-as capazes de, a cada instante, tomar a melhor decisão operacional para o sistema. Neste trabalho usou-se o simulador hidráulico EPANET versão 2.0 (Build 2.00.09a) que, através de sua biblioteca de funções, permite fácil integração com diversas linguagens de programação, sendo aqui utilizado o MATLAB. A integração EPANET2 – MATLAB permite uma maior agilidade, flexibilidade e iteratividade para manipulação e ajuste das regras, como também a simulação contínua de diversos cenários

que podem ser gerados para avaliação do desempenho das regras e robustez das operações por elas sugeridas.

Por fim, para avaliar os impactos que as incertezas presentes nos sistemas podem causar sobre o desempenho das regras e a robustez da operação sugerida para cada situação avaliada, diversos cenários devem ser gerados a partir da perturbação das variáveis e parâmetros do sistema que se julgue por elas afetados. Neste trabalho, optou-se por usar o método de simulação Monte Carlo, devido a sua fácil implementação, representatividade de cenários gerados e ser bastante conhecido e de qualidade atestada em muitos trabalhos dos mais variados campos da ciência. Nos tópicos seguintes deste capítulo serão discutidas, de forma mais detalhada, as técnicas e ferramentas utilizadas nas etapas de construção e avaliação das regras.

4.2 – Avaliação do sistema

O desenvolvimento de regras para operação de sistemas de abastecimento de água consiste na determinação de procedimentos/rotinas operacionais que atuam sobre o estado dos elementos do sistema (bombas, válvulas e registros), obedecendo a limites de operação e buscando atender os objetivos estabelecidos, como atendimento da demanda, custo operacional energético, eficiência hidráulica, redução de perdas, etc. Esses sistemas em geral são muito heterogêneos, com elevado nível de incertezas sobre a topologia, elementos e processos, e são dotados de particularidades (situações ou características exclusivas de um sistema ou de seus elementos) que necessitam de tratamento individual e soluções distintas para cada caso.

Alguns fatores são comuns na operação dos sistemas de abastecimento de água: a relação entre o controle de bombas e válvulas depende diretamente dos limites hidráulicos do escoamento (limites máximos e mínimos de pressão e velocidade) e dos níveis de operação dos reservatórios. Através da alteração do estado das bombas (ligada ou desligada) e das válvulas (aberta ou fechada) ou do ajuste da rotação de bombas que contenham inversores de frequência (possibilidade de diferentes estágios de rotação da bomba) e diferentes aberturas das válvulas (possibilidade de diferentes estágios de abertura para válvulas que assim permitam) é possível controlar os limites operacionais (vazão, pressão, velocidade e níveis de reservatórios) do sistema, desde que isso seja hidráulicamente possível e não conflitante com os objetivos pretendidos.

Para tanto é preciso harmonizar as ações de operação sobre bombas e válvulas, organizando-as de forma que os objetivos almejados pela operação sejam alcançados sem infringir os limites operacionais do sistema. Isso possibilita o desenvolvimento de um roteiro

padrão para elaboração de regras com caráter multi-objetivo, que contemple as configurações topológicas características dos sistemas de abastecimento de água e sejam facilmente adaptáveis as suas particularidades.

O procedimento para construção de regras aqui apresentado foi desenvolvido para aplicação em sistemas de abastecimento de água com configurações topológicas mais comuns, semelhantes à da Figura 4.2. A forma geográfica do crescimento urbano, a topografia da região e a intensidade do crescimento da demanda são os principais fatores que determinam a topologia desses sistemas. As configurações topológicas muito diferentes da ilustrada na Figura 4.2, ou que não puderem ser discretizadas de acordo com a descrição feita neste tópico, devem ser analisadas de forma a se obter regras consistentes para a situação.

É necessário planejar a operação dos sistemas de abastecimento pensando mais além do que no simples atendimento à demanda requerida e às restrições operacionais. As regras sugerem uma adequação da rotina operacional executada diariamente pelos operadores de forma a se obter ganhos de eficiência hidráulica e energética. A construção de regras busca estabelecer um roteiro genérico e robusto às variações hidráulicas no sistema.

As regras atuam ligando e desligando bombas ou ajustando sua rotação, abrindo e fechando válvulas do sistema ou ajustando seu ângulo de abertura, obedecendo aos limites de pressão e velocidade nas tubulações e níveis operacionais determinados para os reservatórios.

Na concepção das regras, sempre que possível, o sistema deve ser avaliado e subdividido em setores (subsistemas, Figura 4.2) de tal forma que as manobras sobre elementos de controle (bombas e válvulas) se atenham em operar eficientemente o subsistema que se encontra a jusante, obedecendo a seus limites operacionais, sem se preocupar com o restante do sistema. É como se cada subsistema fosse operado de forma individual e independente. Se as manobras operacionais das bombas e/ou válvulas forem organizadas de forma que a operação de cada subsistema seja bem sucedida, atendendo aos seus objetivos individuais desejados, então, da mesma forma, a operação do sistema completo também será bem sucedida, pois é constituída pela união da operação de todos os subsistemas considerados.

As regras consideram que a pressão, vazão e velocidade nas tubulações e o nível de água de cada reservatório são controlados apenas pela atuação nas bombas e válvulas, de forma que cada subsistema (estação elevatória, *boosters* e/ou válvulas – reservatórios e/ou redes de distribuição) localizado a jusante seja operado de forma independente.

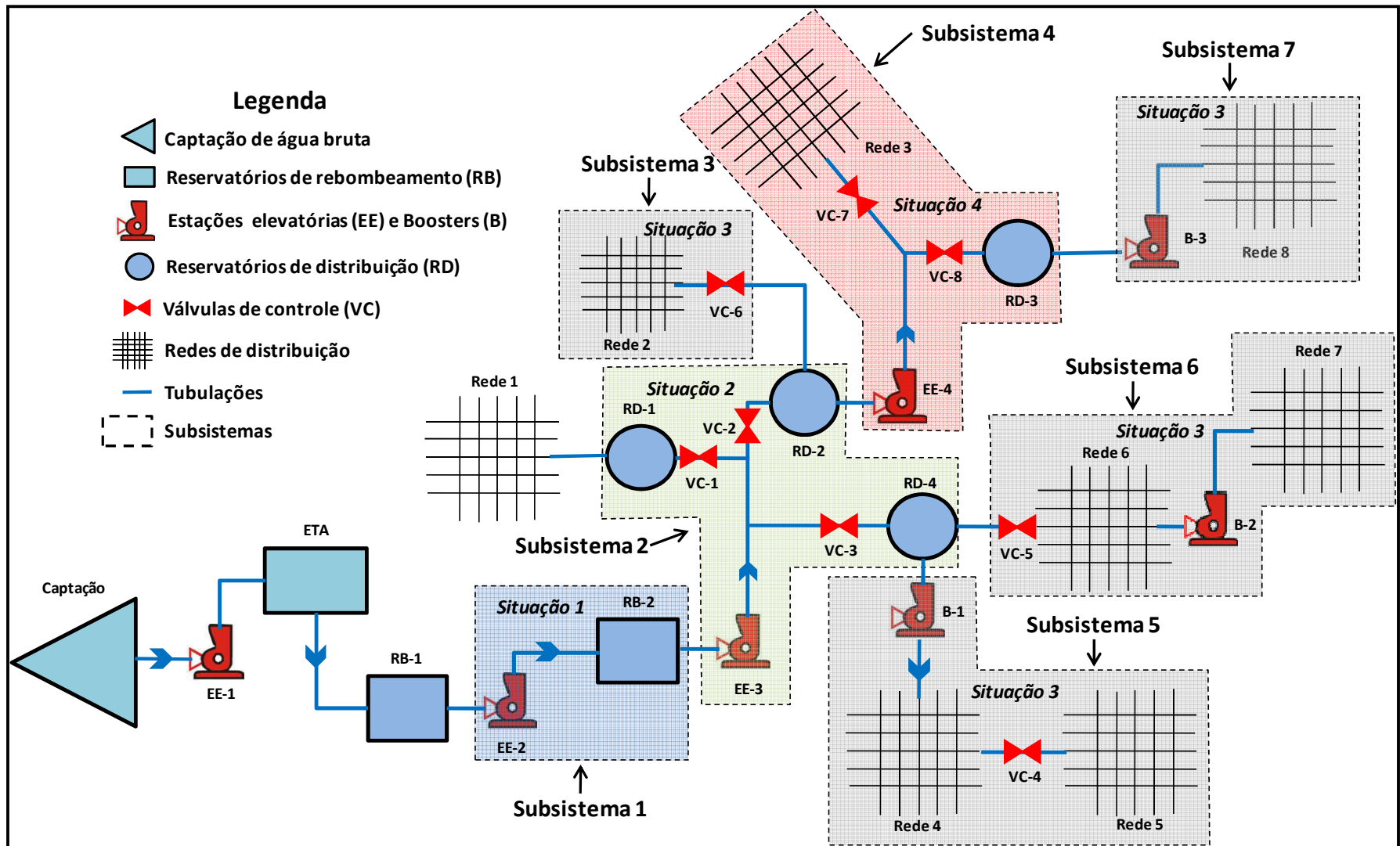


Figura 4.2: Representação esquemática de um sistema de abastecimento de água discretizado em subsistemas de acordo com as configurações de trabalho de cada elemento de controle.

Existe um grande número de possibilidades de configurações de trabalho de cada elemento de controle nos sistemas de abastecimento. A partir dessas configurações é que se definem os subsistemas que cada conjunto de elementos de controle vai regular. Podem-se citar algumas situações mais comumente encontradas, como ilustrado na Figura 4.2:

Configuração operacional 1 – Bombas regulam a operação do(s) reservatório(s) à jusante: subsistema 1;

Configuração operacional 2 – Bombas e/ou válvulas regulam a operação do(s) reservatório(s) a jusante: subsistema 2;

Configuração operacional 3 – Bombas e/ou válvulas regulam a operação da(s) rede(s) de distribuição a jusante: subsistemas 3, 5, 6 e 7;

Configuração operacional 4 – Bombas e/ou válvulas regulam a operação do(s) reservatório(s) e rede(s) de distribuição a jusante: subsistema 4;

Quando se verificam configurações em que o subsistema pode ser regulado tanto por bombas quanto por válvulas, como é o caso dos subsistemas 4, 5 e 6 (Figura 4.2), a regra a ser desenvolvida deve dar prioridade a operar o sistema através da manipulação da bomba e apenas quando isso não for possível, lançar mão do uso de válvulas. As manobras de válvulas geralmente provocam grandes perdas de carga no sistema, aumentando o consumo de energia e perdas de água por vazamentos, e por isso só devem ser usadas quando não houver outra alternativa.

As válvulas que têm a função de controlar os níveis de reservatórios, a exemplo das ilustradas no subsistema 2 (Figura 4.2), podem ser utilizadas com mais liberdade do que as válvulas que regulam vazão e pressão, pois não causam perdas de cargas propositalmente e seu chaveamento é necessário, sendo quase sempre a alternativa mais adequada de deter a subida/descida do nível dos reservatórios sem comprometer a operação do sistema.

4.3 – Extração das regras

Em geral, as regras propostas têm a seguinte estrutura:

REGRA R:

VERIFIQUE

INSTANTE DO DIA

NÍVEL

PRESSÃO

VELOCIDADE

VAZÃO (DEMANDA)

AÇÃO

BOMBA: LIGAR / DESLIGAR / ALTERAR ROTAÇÃO

VÁLVULA: ABRIR / FECHAR / ALTERAR ÂNGULO DE ABERTURA

Na construção das regras é necessário definir faixas de controle, indicando as consideradas ideais para operação dos reservatórios, que variam tanto na sua amplitude quanto na posição dentro da dimensão do reservatório ao longo do ciclo de operação, de acordo com o comportamento da demanda de abastecimento. As faixas de controle, estabelecidas de acordo com as características da demanda, dos reservatórios, da tarifa de energia elétrica e do grau de liberdade da operação, são regiões delimitadas por dois níveis, denominados *níveis de controle*, entre os quais o reservatório deve ser operado sem violar os níveis de operação, Figura 4.3.

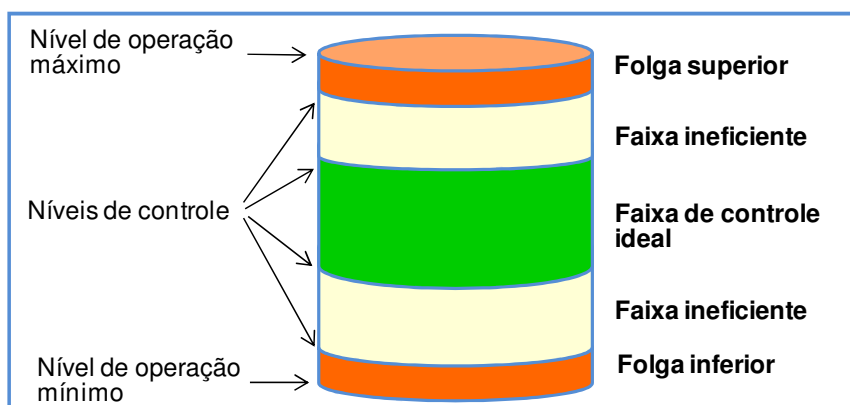


Figura 4.3: Discretização do reservatório em faixas de controle.

Os *níveis de operação* são os níveis máximo e mínimo entre os quais o reservatório pode trabalhar sem causar qualquer dano (acima do máximo: causa extravasamentos; abaixo do mínimo: compromete o funcionamento de bombas e atendimento da demanda).

A *faixa de controle Ideal ou ótima* é o intervalo onde o nível do reservatório deve ser mantido durante determinado período de tempo do ciclo operacional, para que os objetivos

operacionais expressos pelas regras sejam atendidos satisfatoriamente. As faixas de controle consideradas *ineficientes* são os intervalos de nível onde a operação pode não contemplar os objetivos das regras e com possibilidades de haver colapso do abastecimento da demanda.

É necessário estabelecer uma folga mínima entre os níveis máximo e mínimo de controle e de operação para que as regras atuem com segurança (sem violar os níveis de operação), de acordo com o intervalo de cálculo hidráulico a ser adotado na simulação do sistema.

É importante manter o nível dos reservatórios elevado durante o período em que o consumo está abaixo da média, evitando que eles esvaziem no período de alto consumo. O bombeamento deve, se possível, ocorrer ao máximo no período de tarifa de energia elétrica reduzida. No início do horário de tarifa de energia elétrica elevada o ideal é que os reservatórios estejam cheios ou com nível suficientemente elevado, permitindo que nesse período as bombas permaneçam desligadas pelo maior tempo possível. Ao final do ciclo de operação as condições iniciais do sistema devem ser restabelecidas, com as bombas, válvulas e níveis de reservatórios recuperando seus estados primitivos de modo que o procedimento adotado possa ser reproduzido nos ciclos subsequentes. Esse é um aspecto importante, haja vista que permite a automação do sistema com maior segurança operacional e reduz, ou elimina, a intervenção manual dos operadores, que atuam apenas com base em sua experiência, mas sem ênfase à melhoria da operação. É com o propósito de manter o nível do reservatório sempre em uma posição vantajosa para a operação, que se divide os reservatórios em faixas, mantendo a faixa de controle ótima em diferentes posições ao longo da operação.

São mais comuns situações onde o abastecimento de reservatórios ou redes de distribuição é controlado por apenas uma bomba ou válvula, tendo a operação apenas um grau de liberdade: ligar ou desligar a bomba, abrir ou fechar a válvula. Em situações que a operação tem mais de um grau de liberdade, como por exemplo, várias bombas abastecendo um reservatório, ou uma bomba que tenha conversor de frequência abastecendo uma rede de distribuição, pode-se dividir o reservatório em várias faixas de controle e definir quantos graus de liberdade devem ser manobrados (número de bombas ligadas/desligadas, rotação de bombas ou ângulo de abertura de válvulas), para que o nível atinja a faixa desejada. No entanto, quando existe apenas um grau de liberdade, ao se dividir o nível do reservatório em mais de três faixas, as regras se tornam redundantes, pois determinam a mesma ação para faixas diferentes.

Para consolidar o que foi discutido, definiu-se um procedimento metodológico para obter regras para operação multi-objetivo de sistemas de abastecimento de água, atendendo às configurações, restrições, condições e objetivos, discriminado nos seguintes passos:

Passo 1: subdivisão do sistema em subsistemas independentes

O sistema de abastecimento de água deve ser avaliado e subdividido em partes como exemplificado na Figura 4.2, considerando-os independentes no desenvolvimento das regras, de forma que as manobras a serem executadas sobre elementos de controle possam operar eficientemente o subsistema ao qual pertence, obedecendo a seus limites operacionais, sem se preocupar com a operação do restante do sistema. A atuação integrada das regras geradas para todos os subsistemas também produzirá uma operação eficiente para o sistema completo.

Passo 2: divisão do ciclo de operação em intervalos de tempo

Baseado na variação do consumo ao longo do dia, divide-se o ciclo operacional em intervalos de tempo estrategicamente delimitados por horários com características especiais. O número de intervalos de tempo deve ser criteriosamente determinado considerando o comportamento do consumo e do custo da tarifa de energia elétrica e os objetivos que se deseja alcançar. Quanto maior for esse número, mais facilidade se tem de gerenciar a operação; no entanto, proporcionalmente aumenta-se o número de chaveamentos (bombas: ligar/desligar, ajuste da rotação; válvulas: abrir/fechar, ajuste do ângulo de abertura) de bombas e válvulas do sistema bem como a quantidade de regras (para cada intervalo de tempo um novo conjunto de regras é criado). Em contrapartida, quanto menor o número de intervalos de tempo maiores dificuldades são encontradas para gerenciar a operação, porém menor será a quantidade de regras e o número de chaveamentos de bombas e válvulas. Horários com características especiais são intervalos de tempo coincidentes com expressiva variação da demanda de abastecimento e tarifa de energia elétrica como, por exemplo: o período noturno (quando na maior parte do tempo o consumo é reduzido) e o horário de ponta (quando a tarifa de energia elétrica é mais alta). O horário de tarifa de energia elétrica elevada merece atenção especial, pois desligar bombas neste intervalo significa diminuir o custo da operação e, portanto, considerá-lo como um dos intervalos já seria uma escolha prudente.

Passo 3: determinação das faixas de controle para as variáveis

Como já definidos anteriormente, os níveis de operação são os limites máximo e mínimo com que os reservatórios podem ser operados com segurança, e os níveis de

controle são limites que determinam as faixas de controle nas quais os reservatórios são divididos.

O número de faixas de controle deve ser determinado de acordo com os graus de liberdade da operação. Quando existir apenas um grau de liberdade, o nível do reservatório deve ser dividido em apenas três faixas, pois um número maior tornaria as regras redundantes, já que recomendariam a mesma ação para faixas diferentes. Para graus de liberdade maiores que um, o número de faixas é de livre escolha, mas nunca sendo maior que o grau de liberdade, para evitar redundâncias de ações sugeridas pelas regras. Quando um reservatório é controlado por uma bomba com inversor de frequência ou uma válvula com várias possibilidades de ângulos de abertura, o grau de liberdade é igual ao número de estágios diferentes que esses elementos podem operar.

Existe um valor limite a ser obedecido para os níveis de controle, de forma que haja uma folga para que a operação sugerida pelas regras ocorra com segurança, sem riscos de que limites de operação sejam violados. A folga (Figura 4.3) dependerá da magnitude do intervalo de cálculo hidráulico utilizado no simulador hidráulico. O intervalo de cálculo hidráulico representa a frequência com que o simulador repete o cálculo hidráulico no sistema, atualizando o valor de todas as variáveis envolvidas. É uma variável de entrada do simulador hidráulico e deve ser definida de acordo com a precisão que se deseja obter na simulação. O intervalo de cálculo hidráulico, que é uma variável do modelo hidráulico, não tem nenhuma relação com os intervalos de tempo em que o ciclo operacional foi dividido no passo 2, que são variáveis da operação do sistema.

Os níveis de controle extremos podem ser obtidos pelas seguintes equações:

$$N_{\text{máxC}} = N_{\text{máxO}} - \Delta H_C \quad (4.1)$$

$$N_{\text{mínC}} = N_{\text{mínO}} + \Delta H_C \quad (4.2)$$

$$\Delta H_C = \frac{Q_{\text{máx}} \cdot \Delta t}{A} \quad (4.3)$$

onde:

$N_{\text{máxC}}$ e $N_{\text{mínC}}$: níveis máximo e mínimo de controle permitidos para o correspondente intervalo de cálculo hidráulico [m];

$N_{\text{máxO}}$ e $N_{\text{mínO}}$: níveis máximos e mínimos de operação [m];

ΔH_C : folga existente entre os níveis limites de controle e operação para a atuação segura das regras [m];

$Q_{\text{máx}}$: máxima vazão de entrada (quando da definição dos níveis máximos de controle) ou máxima vazão de saída (quando da definição dos níveis mínimos de controle) [m^3/s];

Δt : intervalo de cálculo hidráulico [min];

A: área da base do reservatório [m^2].

Quaisquer outros níveis de controles intermediários para delimitação das faixas de operação dos reservatórios serão determinados de acordo com as características da demanda no correspondente intervalo de tempo e ajustados através da simulação hidráulica do sistema.

Além do nível do reservatório e o ciclo operacional, outras variáveis podem ser divididas em faixas, grupos ou conjuntos, a critério do usuário. Por exemplo, quando existirem várias bombas por estação de bombeamento, pode-se definir a quantidade de bombas a serem ligadas para cada situação do sistema; nas bombas que tiverem conversores de frequência podem-se estabelecer faixas de rotação para diferentes situações hidráulicas do sistema; para as válvulas que permitirem diferentes ângulos de abertura podem-se definir faixas de ângulos de abertura para diferentes situações hidráulicas do sistema; outras variáveis como vazão, pressão e velocidade também podem ser fragmentadas em faixas de acordo com as necessidades exigidas pela operação. As faixas estabelecidas para os reservatórios e os intervalos de tempo em que o ciclo operacional é dividido são muito importantes, pois o posicionamento adequado do nível ao longo do dia pode trazer vantagens relevantes para a operação, como por exemplo, permitir que as bombas sejam desligadas no horário de ponta e manter atendimento à demanda sem risco de colapso.

Passo 4: elaboração das regras para cada intervalo de tempo e subsistemas

Para cada um dos intervalos de tempo e subsistemas obtidos nos passos 1 e 2, sugerem-se três regras que determinam o acionamento e desligamento das bombas e válvulas ou ajuste de suas respectivas rotações e ângulo de abertura em cada subsistema:

- **Regra 1:** se o(s) nível(is) do(s) reservatório(s) estiver(em) abaixo do nível mínimo de controle desejado e/ou se a pressão/vazão/velocidade nas tubulações estiver(em) abaixo do limite permitido ligue bombas (ou ajuste sua rotação) e/ou abra válvulas (ou ajuste seu ângulo de abertura); se as ações forem conflitantes, deve ser dada prioridade aos limites de pressão/velocidade máximas nas tubulações, caso representem riscos reais à operação;

- **Regra 2:** se o(s) nível(is) do(s) reservatório(s) estiver(em) acima do nível máximo de controle desejado e/ou se a pressão/vazão/velocidade nas tubulações estiver(em) acima

do limite permitido, desligue bombas (ou ajuste sua rotação) e/ou feche válvulas (ou ajuste seu ângulo de abertura); caso as ações sejam conflitantes, novamente deve ser dada prioridade aos limites de pressão/velocidade máximas, caso representem riscos reais à operação.

- **Regra 3:** se o(s) nível(is) do(s) reservatório(s) estiver(em) entre os níveis máximo e mínimo de controle desejado e/ou se a pressão/vazão/velocidade nas tubulações estiver(em) dentro da faixa de tolerância permitida, a operação não deve ser alterada.

As regras 1 e 2 podem ser repetidas de acordo com o grau de liberdade da operação e números de faixas que o nível do reservatório foi dividido. Por exemplo, se a operação de um reservatório tem quatro graus de liberdade e seu nível foi dividido em quatro faixas de controle, sendo uma delas considerada a faixa ideal em certo intervalo de tempo, podem-se definir manobras com graus de liberdade diferentes para cada faixa, de forma que se possa conduzir o nível à faixa de operação ideal.

É importante ressaltar que nas situações em que existe possibilidade de a operação ocorrer através de chaveamento tanto de bombas quanto de válvulas, o ideal é que as regras busquem dar prioridade à operação somente através das bombas e só usar válvulas quando isso não for possível. Como ressaltado na seção anterior, o uso de válvulas provoca altas perdas de carga no sistema, aumentando o consumo de energia e perdas de água por vazamentos.

Passo 5: elaboração das regras para configurações específicas

Todo sistema tem particularidades topológicas que necessitam de uma análise especial, onde as regras são concebidas de acordo com cada situação específica. Essas particularidades são mais comuns em redes de distribuição setorizadas de acordo com a topografia, onde ocorrem configurações em que vários reservatórios e bombas podem abastecer uma mesma ou várias redes de distribuição interligadas e dotadas de válvulas de controle. Essas situações e diversas outras exigem o manejo de válvulas e bombas de forma específica, dificultando a confecção de regras genéricas. Recomenda-se criar regras individuais para essas situações buscando seguir os mesmos procedimentos e recomendações já discutidos, além dos objetivos específicos de cada situação.

Cada passo acima descrito, de alguma forma, relaciona-se com os objetivos que as regras buscam contemplar.

O passo 1 recomenda o desmembramento imaginário do sistema em partes menores, que caracterizem subsistemas independentes, provendo a criação de regras para situações mais simples e que, quando consideradas para o sistema completo, atuam de forma integrada, melhorando o desempenho hidráulico e energético da operação.

O passo 2 sugere que as ações recomendadas pelas regras possam ser mutáveis ao longo do dia, através da fragmentação do ciclo operacional, tornando a operação mais flexível e possibilitando sua adequação de acordo com o comportamento da curva de consumo e do sistema tarifário. Isso permite acomodar as manobras operacionais ao longo do dia, tornando o atendimento à demanda mais eficiente, favorecendo o desligamento de bombas no horário de ponta e flexibiliza o ajuste das variáveis de controle.

O passo 3 sugere a divisão do nível de reservatório, e outras variáveis do sistema que se deseje incluir na operação (vazão, pressão, etc.), em várias faixas de controle, definindo uma faixa de nível (ou de outra variável) considerada ideal para o reservatório operar, ou patamar em que as demais variáveis consideradas devem se manter. A posição e a amplitude da faixa de controle ideal dentro da dimensão do reservatório é variável ao longo do dia, considerando o perfil da curva de demanda e horário de ponta. Isso permite que o nível do reservatório esteja sempre em posição estratégica no decorrer da operação, garantindo o atendimento à demanda, permitindo a elevação do nível antes do horário de ponta, para que neste as bombas possam ser desligadas por mais tempo, e recuperando seu valor inicial ao final da operação. A amplitude da faixa de controle ideal também permite regular o número de chaveamentos dos elementos de modo que, quanto menor for a sua amplitude maior será esse número, e vice-versa. De maneira análoga pode-se definir faixas de controle consideradas ideais para as demais variáveis que se deseje incluir na operação.

Os passos 4 e 5 produzem regras que devem ser aplicadas aos subsistemas para diferentes horários do dia. As regras sugerem que o sistema seja operado obedecendo seus limites operacionais e mantendo o nível dentro da faixa de controle ótima estabelecida ao longo do ciclo operacional. Assim, os objetivos de atendimento à demanda, controle de pressão com redução de perdas por vazamento, reduções do número de chaveamentos e de bombeamento no horário de ponta são satisfeitos.

4.4 – Sistema difuso de regras

4.4.1 – Motivação para o uso da Lógica Difusa

Na construção das regras de operação, podem-se observar duas classes de variáveis bem definidas: as variáveis de controle, compostas por “instante do dia”, “nível”, “pressão”, “velocidade” e “vazão”; e as variáveis de operação, compostas por “estado da bomba (ligada/desligada)” ou “rotação da bomba”, “estado da válvula (aberta/fechada)” ou “ângulo de abertura da válvula”. Na estrutura das regras essas variáveis se apresentam em faixas com limites rígidos (por exemplo, faixas de controle nos reservatórios, intervalo de

tempo do ciclo operacional, estágios de rotação das bombas, faixas de ângulo abertura das válvulas, etc.), como um valor fixo (*set point*) a ser ajustado e que delimita duas faixas, uma acima e outra abaixo deste (por exemplo, vazão/demanda de abastecimento, rotação ideal da bomba, pressão ideal de abastecimento, etc.) ou ainda, como um valor linguístico binário (por exemplo, bomba ligada ou desligada, válvula aberta ou fechada).

Esses limites rígidos são definidos admitindo-se que o valor de cada variável é conhecido e que cada elemento e/ou variável do sistema de abastecimento de água se comporta exatamente da forma como foi parametrizado e representado pelo modelo hidráulico. No entanto, esses limites são imprecisos, já que os sistemas apresentam um elevado índice de incertezas de natureza hidráulica e topológica. As imprecisões na quantificação e parametrização das variáveis e elementos, a complexidade e as alterações recorrentes nos sistemas de abastecimento de água são os principais responsáveis pela dificuldade em se aplicar modelos de fundamentação matemática elaborados para encontrar a operação otimizada desses sistemas. As regras de operação, tratadas neste trabalho, a princípio contornam melhor essas dificuldades, pois conseguem lidar com informações imprecisas ou apenas aproximadas dos sistemas, fornecendo soluções de operação ótimas ou sub-ótimas.

Uma tentativa de prover às regras uma melhor absorção da complexidade da operação e o alto nível de incertezas tratadas neste trabalho, às quais os sistemas de abastecimento de água estão sujeitos, e dar flexibilidade aos limites rígidos nos quais as variáveis de controle e operação são discretizadas, é implementá-las através de um sistema difuso (*fuzzy*) de regras. Em outras palavras, arquitetar a estrutura das regras de acordo com os conceitos da Lógica Difusa (*Fuzzy Logic*).

4.4.2 – A Lógica Difusa

A Lógica Difusa foi introduzida por ZADEH (1965). No prefácio da obra de COX (1999), Lofti A. Zadeh relata que seu artigo, de 1965 sobre conjuntos difusos, foi motivado pela convicção de que os métodos tradicionais disponíveis eram incapazes de lidar com problemas que envolvessem situações ambíguas, não passíveis de processamento através da lógica *booleana*.

Um conjunto é uma coleção de objetos. Na teoria clássica, um objeto possui apenas duas possibilidades quanto a sua relação com um conjunto, ou seja, um dado objeto é ou não é um elemento do conjunto. Na Teoria dos Conjuntos Difusos, um objeto possui variados graus de pertinência (NASCIMENTO JR & YONEYAMA, 2000).

Diante da dificuldade e até mesmo da incapacidade de os métodos tradicionais tratarem os processos carregados de incerteza, imprecisão ou ambiguidade, surgiu a necessidade de encontrar outros caminhos para a construção de modelos mais simples e consistentes capazes de tratar tais situações. ZADEH (1973) explica que "à medida que a complexidade de um sistema aumenta, nossa habilidade para fazer afirmações precisas e que sejam significativas acerca deste sistema diminui até que um limiar é atingido, além do qual precisão e significância (ou relevância) tornam-se quase que características mutuamente exclusivas".

A Lógica Difusa é uma técnica que objetiva fazer com que as decisões tomadas por máquinas imitem as decisões humanas, não se limitando apenas a um "sim" ou um "não", principalmente ao se trabalhar com multiplicidade de informações vagas e incertas, as quais podem ser descritas por expressões linguísticas do tipo: "muito, alto, médio, baixo, muito baixo", "cheio, mediano, vazio", "verdadeiro, duvidoso, falso".

AGUIAR & OLIVEIRA JR (1999) definem Lógica Difusa como sendo um conjunto de métodos baseado no conceito de conjunto difuso (*fuzzy set*) e operações difusas, que possibilita a modelagem realista e flexível do comportamento do sistema considerado. SHAW & SIMÕES (1999) afirmam que essa é uma técnica que incorpora a forma humana de pensar, onde controladores difusos podem ser projetados para comportarem-se conforme o raciocínio dedutivo que as pessoas utilizam para inferir conclusões baseadas em informações que elas já conhecem.

A Lógica Difusa é uma extensão da lógica *booleana* que admite infinitos valores lógicos intermediários a afirmações bivalentes. A lógica *booleana* é baseada no binário [0 1] que pode representar os extremos de termos linguísticos, como verdadeiro e falso, cheio e vazio, quente e frio, muito e pouco, alto e baixo, preto e branco, esperando-se sempre uma afirmação ou outra, sem haver nada entre ambas, ou seja, o meio é excluído. O conceito de *multivalência* (SHAW & SIMÕES, 1999) preenche esse vazio. É só imaginar, por exemplo, que entre as cores preta e branca existem infinitos tons de cinza ou quantas sensações térmicas diferentes existem entre o quente e o frio. No mundo real tudo é uma questão de ponto de vista ou de graduação, ou seja, tudo é relativo. Isto significa que um valor lógico difuso é um valor qualquer no intervalo de valores entre 0 e 1.

Segundo KOURO & MUSALEM (2002) a Lógica Difusa pode ser descrita como um sistema interpretativo, no qual os objetos ou elementos são relacionados por conjuntos de fronteiras comuns, não nitidamente definidas, dando-lhes um grau de pertinência relativa e não limites rígidos entre os conjuntos, como é o costume da lógica tradicional. Em um sentido mais amplo, pode-se dizer que existe uma espécie de interferência (sobreposição)

entre uma fronteira e outra, possibilitando que elementos de um conjunto pertençam com certa pertinência ou não a outro conjunto. Segundo NASCIMENTO JR & YONEYAMA (2000) a Lógica Difusa permite o tratamento de expressões que envolvem grandezas descritas de forma exata.

Segundo GALVÃO (1999), os sistemas difusos de regras (SDR) são a aplicação mais comum da Teoria dos Conjuntos Difusos (TCD). Estes sistemas são apropriados para modelar processos cujos comportamentos são descritos de forma apenas aproximada ou através de regras heurísticas. Os sistemas difusos de regras, segundo GALVÃO (1999), também são úteis quando o processo só pode ser descrito por um modelo matemático complicado ou caso se deseje maior robustez do sistema. São muito semelhantes aos sistemas especialistas, aplicação mais comum da Inteligência Artificial. Neles, o conhecimento existente sobre determinado tópico ou processo é descrito, armazenado e processado através de regras do tipo:

$$\text{SE } A = a \text{ E/OU } B = b \text{ ENTÃO } C = c$$

A, B e C são variáveis que descrevem o processo; a, b e c são valores ou estados por elas assumidos. Denomina-se *Inferência* a avaliação da regra, ou seja, a verificação do grau de verdade ou aplicabilidade da regra para um determinado estado do processo, definido pelos valores de a, b e c. No sistema difuso de regras, as variáveis do sistema são variáveis linguísticas ou números difusos.

As regras difusas relacionam as variáveis de entrada, ou antecedentes, com as de saída, ou consequentes, ou seja, relacionam o “estado atual” do processo com a “ação de controle” adequada para levá-lo ao “estado desejado” – no caso de um sistema de controle – ou com uma “conclusão” – no caso de sistema de decisão, previsão ou diagnóstico. A escolha das regras difusas tem como ponto de partida a análise do processo em si e a experiência dos especialistas que com ele trabalham. Um primeiro conjunto de regras obtido pode ser testado e melhorado, através de simulações ou pela aplicação ao próprio processo real (GALVÃO, 1999).

A Lógica Difusa, assim como qualquer técnica, apresenta pontos positivos e negativos e cabe aos engenheiros ponderarem e decidirem a utilidade e viabilidade de seu uso. O Quadro 4.1, apresentado por CAMARGOS (2002), sintetiza suas principais características, vantagens e desvantagens.

Quadro 4.1: Principais características, vantagens e desvantagens da Lógica Difusa (CAMARGOS, 2002).

Características	Vantagens	Desvantagens
Está baseada em palavras e não em números, ou seja, os valores verdadeiros são expressos linguisticamente. Por exemplo: quente, muito frio, verdadeiro, longe, perto, rápido, vagaroso, médio	O uso de variáveis linguísticas nos deixa mais perto do pensamento humano	Necessitam de mais simulação e testes
Possui vários modificadores de predicado, tais como: muito, mais ou menos, pouco, bastante, médio	Requer poucas regras, valores e decisões	Não aprendem facilmente
Possui também um amplo conjunto de quantificadores, como: poucos, vários, em torno de, usualmente	Simplifica a solução de problemas e a aquisição da base do conhecimento	Dificuldades de estabelecer regras corretamente
Faz uso das probabilidades linguísticas que são interpretados como números nebulosos e manipulados pela sua aritmética	Mais variáveis observáveis podem ser valoradas	Não há uma definição matemática precisa
Manuseia todos os valores entre 0 e 1, tomando estes como um limite apenas	Mais fáceis de entender, manter e testar	
	São robustos. Operam com falta de regras ou com regras defeituosas	
	Acumulam evidências contra e a favor	
	Proporciona um rápido protótipo dos sistemas	

4.4.3 – Controle difuso

O funcionamento da Lógica Difusa consiste na execução de um controle que imita um comportamento baseado em regras ao invés de um controle expresso por modelos matemáticos. O objetivo da aplicação da Lógica Difusa é gerar uma saída lógica a partir de um conjunto de entradas não necessariamente precisas, com ruídos ou até com ausência de informações. Em outras palavras, a Lógica Difusa tem por essência gerar valores de saída sem a necessidade de entradas exatas.

A estrutura básica de um sistema difuso de regras consiste em quatro componentes conceituais: fuzificação, base de regras, inferência e “desfuzificação”, como apresentado na Figura 4.4. O raciocínio com Lógica Difusa consiste em implementar essas etapas. Em outras palavras, transformar as regras simples em regras difusas é executar as etapas da Figura 4.4.

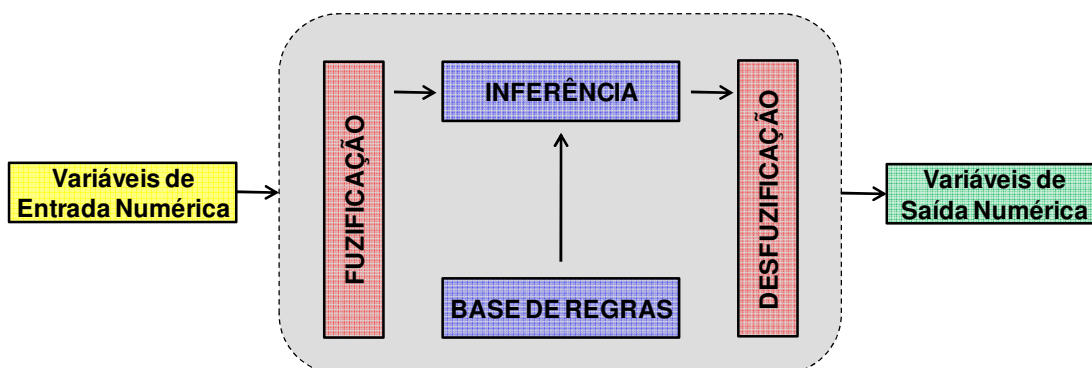


Figura 4.4: Estrutura básica de um sistema difuso de regras.

Nas regras extraídas através da metodologia proposta, as variáveis de entrada (condição) são as variáveis de controle (instante do dia, nível do reservatório, pressão, velocidade e vazão); e as variáveis de saída (ação) são as variáveis de operação (estado da bomba, rotação da bomba, estado da válvula e ângulo de abertura da válvula). Essas variáveis serão submetidas ao processo de fuzificação descrito a seguir.

4.4.3.1 – Fuzificação

A Lógica Difusa utiliza variáveis linguísticas em vez de numéricas. Estas variáveis modelam conhecimentos imprecisos e vagos sobre uma grandeza. Pode ser considerada uma variável linguística aquela cujos valores assumidos são nomes de conjuntos difusos. A fuzificação é a transformação das variáveis de um domínio discreto (numérico) para um domínio difuso, definindo-se para cada conjunto (classes de variáveis linguísticas) do domínio difuso, uma correspondente imagem limitada no intervalo de 0 a 1, representada por uma função de pertinência. As funções de pertinência e as superposições entre elas atribuem a cada elemento (número) de um conjunto difuso um grau de pertinência deste elemento ao conjunto do correspondente domínio difuso. Por exemplo, um elemento qualquer pertence a um certo conjunto com pertinência de 20%, a outro conjunto com pertinência de 80% e aos demais conjuntos com pertinência de 0%. Na lógica *booleana* tradicional o mesmo elemento pertenceria a apenas um dos conjuntos com pertinência 100%.

Como ilustração do que foi discutido, considere um reservatório com 3 metros de altura (Figura 4.5). Pode-se transformar a variável numérica “nível”, de domínio discreto igual a 3 metros, em classes linguísticas com domínio difuso igual a “nível alto”, “nível médio” e “nível baixo”. O número de classes linguísticas fica a critério da experiência do modelador, sendo um número prático (SHAW & SIMÕES, 1999) algo entre 2 e 7. Quanto maior esse número, maior a precisão, no entanto, isso aumenta a quantidade de regras e a demanda computacional. As Figuras 4.6 (a) e (b) mostram como é a configuração das

funções de pertinência para o exemplo, quando tratados de acordo com os conceitos da Lógica Difusa e da lógica *booleana* tradicional. Na Figura 4.6 (a), o nível 1,1 m é baixo com um grau de 20%, médio com um grau de 80% e alto com um grau de 0%, enquanto que na Figura 4.6 (b) é médio com grau de 100% e 0% para as demais classes, pois os limites dos conjuntos são abruptos.

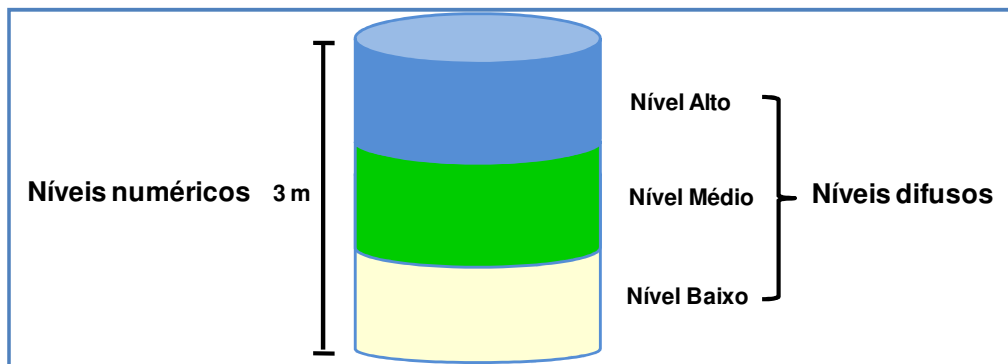


Figura 4.5: Níveis numéricos e difusos de um reservatório.

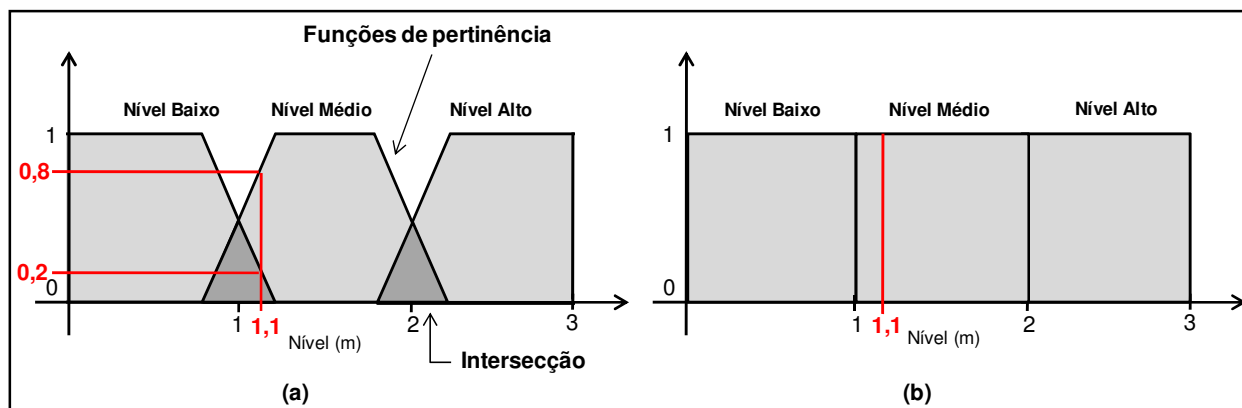


Figura 4.6: (a) fuzificação da variável “nível do reservatório”; (b) representação desta variável sem a aplicação do conceito da Lógica Difusa.

As formas de funções de pertinência mais comuns são as triangulares e as trapezoidais, pois são geradas com maior facilidade. No entanto, a forma deve ser escolhida de acordo com as características da variável à qual será aplicada (SHAW & SIMÕES, 1999). Não necessariamente todas as variáveis de entrada e de saída são fuzificadas, podendo eventualmente existir variáveis sem necessidade de fuzificação.

4.4.3.2 – Base de regras e inferência difusa

As regras difusas, assim como as regras simples, são compostas por sentenças condicionais do tipo “se”, “e”, “ou” e “então”. Consistem em uma ou mais variáveis de entrada associadas a conjuntos difusos e uma ou mais variáveis de saída também associadas a conjuntos difusos. A estrutura das regras difusas é análoga à estrutura das

regras simples. A principal diferença é que nas regras simples as variáveis são discretizadas em faixas numéricas com limites rígidos, enquanto que nas regras difusas as variáveis são discretizadas em classes linguísticas (conjuntos difusos) com sobreposição (superposição) dos limites.

Normalmente organizam-se as regras difusas em uma matriz, onde na primeira linha e na primeira coluna estão as variáveis de entrada difusas. O cruzamento linha-coluna resulta em todas as ações possíveis, que é a variável de saída também difusa.

A inferência difusa é o processo de avaliação das regras que relacionam as variáveis, levando a uma conclusão final do sistema difuso de regras (GALVÃO, 1999). Em outras palavras, é uma análise e combinação das regras que foram ativadas pelas variáveis numéricas de entrada para gerar uma resposta, um conjunto difuso, que precisa sofrer uma desfuzificação para se tornar uma variável de saída numérica.

Existem vários métodos para a inferência difusa (GALVÃO, 1999), sendo o mais utilizado a inferência “máximo-mínimo” idealizada por Mamdani (MAMDANI & ASSILIAN, 1975). Essa técnica é composta por duas fases de avaliação. Na primeira fase analisa-se individualmente o valor das pertinências das variáveis difusas de entrada para cada regra ativada, selecionando-se a variável difusa com menor (caso o operador seja “e”, exemplo: se A “e” B ocorrer) ou maior (caso o operador seja “ou”, exemplo: se A “ou” B ocorrer) grau de pertinência, para composição da variável difusa de saída. Por exemplo, suponha que em um conjunto de regras a variável difusa “pressão alta” foi ativada duas vezes, com valores de pertinências 0,8 e 0,1. Se o operador for “e”, escolhe-se o menor valor de pertinência (0,1), se for “ou”, o maior valor de pertinência (0,8). Na segunda fase, escolhem-se as variáveis difusas de saída de mesma classe com maiores graus de pertinências, que unidas constituem o conjunto difuso de saída. Por exemplo, se para a variável difusa “rotação da bomba” após a análise se todas as regras resultou os valores de pertinência 0,3, 0,7 e 0,9, então escolhe-se o maior dos valores resultantes (0,9).

4.4.3.3 – Desfuzificação

A “desfuzificação” é a transformação do conjunto difuso, resultado da inferência difusa, em um valor numérico que possa ser aplicado na tomada de decisão. O objetivo é obter um único valor numérico que melhor represente o conjunto difuso de saída obtido na inferência. Existem vários métodos usados no processo de desfuzificação. Os mais conhecidos são o Centro-de-Gravidade ou Centro-da-Área (C-o-A); Centro-do-Máximo (C-o-M) e Média-do-Máximo (M-o-M).

O método C-o-A consiste no cálculo do centro de gravidade do conjunto difuso de saída, obtido no processo de inferência. A Figura 4.7 mostra uma variável de saída, cujo

conjunto difuso de saída está representado pela área hachurada. O cálculo do centro de gravidade da área de dá da seguinte forma (SHAW & SIMÕES, 1999):

$$V_{Desfuzificado} = \frac{\sum_{i=1}^N u_i * \mu_{OUT}(u_i)}{\sum_{i=1}^N \mu_{OUT}(u_i)} \quad (4.4)$$

onde:

$V_{Desfuzificado}$: é o valor numérico que representa o conjunto difuso de saída;

$\mu_{OUT}(u_i)$: é a área de cada função de pertinência modificada pelo resultado da inferência difusa;

u_i : é a posição do centróide da função de pertinência individual.

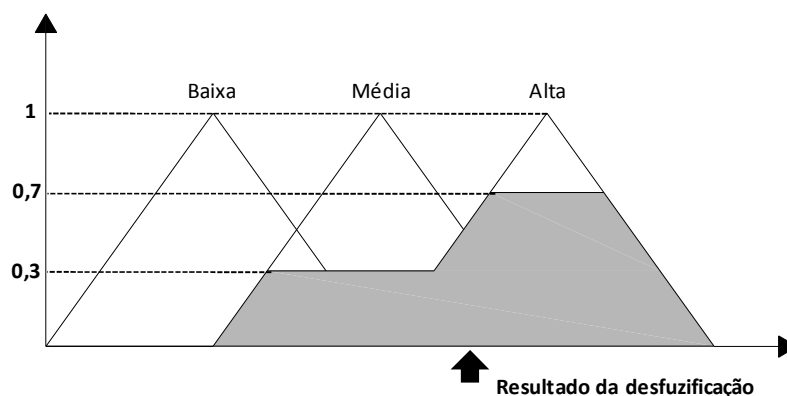


Figura 4.7: Método de desfuzificação pelo Centro-de-Área

O método C-o-M consiste em encontrar a maior pertinência de cada variável linguística que compõe o conjunto difuso de saída, e através da ponderação do peso de cada uma, encontrar o ponto de equilíbrio entre elas. O cálculo do valor desfuzificado que representa o conjunto difuso de saída se dá pela seguinte equação (SHAW & SIMÕES, 1999):

$$V_{Desfuzificado} = \frac{\sum_{i=1}^N u_i * \sum_{k=1}^n \mu_{O,k}(u_i)}{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^n \mu_{O,k}(u_i)} \quad (4.5)$$

onde:

$\mu_{O,k}(u_i)$: são os pontos em que ocorrem os máximos das funções de pertinência de saída.

O método M-o-M consiste em calcular a média entre todos os valores de pertinência máxima de cada variável linguística que compõem o conjunto difuso de saída, expresso pela seguinte equação (SHAW & SIMÕES, 1999):

$$V_{Desfuzificado} = \sum_{m=1}^M \frac{u_m}{M} \quad (4.6)$$

onde:

u_m : é o m-ésimo elemento do universo de discurso, onde a função de pertinência tenha um máximo;

M : é o número total de elementos.

4.5 – Refinamento das regras

Segundo VENTURINI (1997), o principal objetivo da simulação de um sistema é obter uma compreensão sobre o comportamento e as relações entre seus componentes, encontrando caminhos que conduzam à melhor solução possível. Não se encontra uma solução ótima diretamente, havendo a necessidade de simular iterativamente possibilidades hidráulicas, a fim de atingir a melhor eficiência. A simulação, mesmo quando combinada com técnicas eficientes de otimização para encontrar valores de cada variável de decisão, um enorme esforço pode conduzir a uma solução que está longe da melhor solução possível.

A simulação tem sido empregada com muito sucesso à modelagem de sistemas de abastecimento de água, em razão das seguintes vantagens (VENTURINI, 1997): possibilidade de incluir relações não lineares entre as variáveis; flexibilidade de representar as variações do sistema (expansões; desativação de trechos, etc.) e na demanda; permitir controles externos sobre variáveis específicas.

Após a construção das regras é necessário submetê-las a um ajuste fino, onde se busca inferir quais as faixas de controle mais adequadas para cada intervalo de tempo, considerando as características da demanda de água, dos reservatórios e da tarifa de energia elétrica. Portanto, é importante, através de um modelo hidráulico, simular a operação sugerida pelo conjunto de regras para diferentes combinações de condições iniciais e possibilidades de amplitude e localização da faixa de controle no reservatório, sempre buscando reproduzir as situações mais críticas e analisando a consistência das soluções propostas, até que se tenha a segurança de que o conjunto de regras é robusto, eficaz e eficiente.

4.5.1 – O modelo de simulação hidráulica

Neste estudo, para simular as estratégias operacionais propostas pelas regras e aplicadas ao caso de estudo, foi utilizado o EPANET2, um modelo de simulação hidráulica bastante robusto e que já é amplamente difundido e utilizado com sucesso em muitos países. O modelo foi usado para simular e ajustar o conjunto de estratégias propostas pelas regras e para avaliar diversos cenários considerando incertezas, a fim de se obter um nível de eficiência operacional satisfatório e confiável para o sistema.

O EPANET2 é um modelo hidráulico de sistemas pressurizados de redes de distribuição de água, concebido com o objetivo de simular, durante um determinado período de tempo, os valores de vazão nos dutos, pressão nos nós, níveis de água nos reservatórios, custo de energia do bombeamento, e os parâmetros de qualidade da água em toda a rede de distribuição (ROSSMAN, 2000). Permite a representação de sistemas compostos por redes de tubulações (malhadas ou ramificadas), estações de bombeamento, diversos tipos de válvulas e reservatórios de nível fixo e/ou variável.

O EPANET2 contém um conjunto de ferramentas de cálculo para apoio à simulação hidráulica, onde se destacam como principais características: dimensão (número de componentes) ilimitada da rede a analisar; cálculo da perda de carga utilizando as fórmulas de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Chezy-Manning; consideração das perdas de carga singulares em curvas, alargamentos, estreitamentos, etc.; modelagem de bombas de velocidade constante ou variável; cálculo do custo do consumo energético relativo ao bombeamento; modelagem dos principais tipos de válvulas, incluindo válvulas de retenção, reguladoras de pressão e de vazão; modelagem de reservatórios de armazenamento de nível variável de formas diversas, através de curvas de volume em função da altura do nível de água; múltiplas categorias de consumo nos nós, cada uma com um padrão próprio de variação no tempo.

O EPANET também dispõe de uma biblioteca de programação que consiste em um conjunto de funções, integradas numa *Dynamic Link Library* (DLL), que podem ser incorporadas em aplicações de 32 bits para MS® Windows®, escritas em C/C++, Delphi™ Pascal, Visual Basic® ou outro tipo de linguagem que permita a chamada de funções Windows DLL. Existem mais de 50 funções que podem ser utilizadas para ler e modificar parâmetros de dimensionamento e de operação e executar múltiplas simulações dinâmicas. A biblioteca é uma ferramenta útil no desenvolvimento de aplicações específicas, como o dimensionamento de redes ou a automatização e otimização de modelos de calibração, as quais requerem que se executem múltiplas simulações à medida que os dados são iterativamente modificados.

A biblioteca do EPANET foi uma ferramenta bastante útil no desenvolvimento deste trabalho. Diversos cenários de operação com variadas possibilidades de combinação entre os elementos componentes do sistema, as diversas variáveis e incertezas que são constituintes da sua complexa estrutura foram simulados, analisados e ajustados, necessitando repetir muitas vezes essa rotina para se obter as condições de otimização pretendidas para a operação do sistema. Neste sentido, a biblioteca, associada a uma linguagem de programação adequada, é um recurso bastante oportuno, facilitando a execução da rotina de simulação de diversos cenários das operações sugeridas pelas regras e a avaliação das possíveis circunstâncias de operação às quais o sistema está sujeito.

4.5.2 – Integração EPANET2 – MATLAB

O EPANET2 é dotado de uma janela de edição de texto, denominada “Editor de Controles”, onde é possível inserir regras e simular a operação sugerida. Esta ferramenta auxilia na análise prévia da operação e é muito útil para mensurar qual a espessura e localização ideais da faixa de controle ótima dos reservatórios em cada intervalo de tempo no qual o ciclo operacional foi fragmentado.

Entretanto, para avaliar o comportamento dos sistemas de abastecimento de água, perante o alto índice de incertezas, presentes nas variáveis e elementos hidráulicos, é imprescindível a simulação de um grande número de cenários gerados a partir da perturbação dos valores das variáveis de entrada, tornando esta atividade impraticável manualmente. Surge então a necessidade da integração da biblioteca do EPANET2 com uma linguagem de programação apropriada, para permitir a realização dessa atividade de forma mais eficiente e preferencialmente automática.

A linguagem de programação utilizada foi o MATLAB versão 7.0.0.19920 (R14), que permite a comunicação com a biblioteca do EPANET2, atendendo requisitos para o uso de suas funções, e é uma linguagem simples, de fácil e rápida compreensão e mais acessível ao usuário. A integração entre o MATLAB e o biblioteca do EPANET2 torna o modelo hidráulico flexível, permitindo iteratividade e agilidade na manipulação das variáveis do sistema ao longo da simulação. A cada intervalo de cálculo hidráulico as variáveis do sistema podem ser acessadas analisadas, e manipuladas, permitindo a aplicação das regras para decidir qual a operação mais adequada para o próximo intervalo. O código em linguagem MATLAB é bastante flexível, permitindo que alterações no sistema sejam rapidamente incorporadas e seus efeitos hidráulicos imediatamente considerados pelas

regras na definição da melhor operação. É possível salvar os resultados de todas as variáveis simuladas.

A dinâmica da simulação se processa da seguinte forma (Figura 4.8): o código desenvolvido ao ser executado carrega o simulador hidráulico do EPANET2, que a partir de então fica disponível para uso via MATLAB; em seguida o arquivo contendo o sistema a ser simulado também é carregado tornando-se acessível pelo MATLAB; o próximo passo é a simulação do estado inicial do sistema com os valores iniciais inseridos para cada variável; após a simulação do estado inicial, ao fim de cada intervalo de cálculo hidráulico a simulação pára e, externamente ao simulador hidráulico, as variáveis do sistema são avaliadas pelas regras, que decidem qual é a melhor operação para o próximo intervalo; a operação sugerida pelas regras é inserida no arquivo que contém o sistema e a simulação continua, sendo das variáveis atualizadas no final de cada intervalo simulado; o processo se repete até o fim da simulação, onde os resultados das variáveis do sistema são exportados para uma planilha eletrônica.

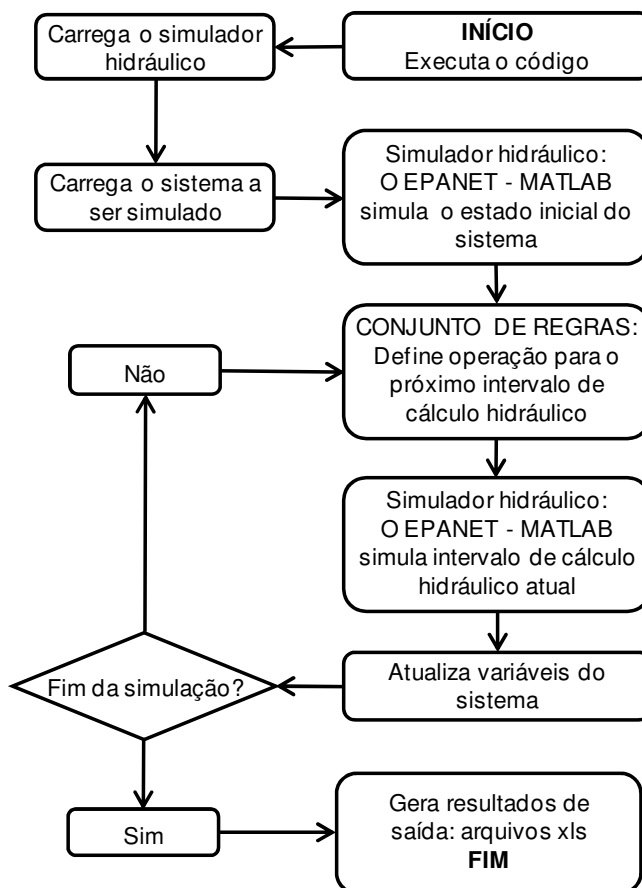


Figura 4.8: Dinâmica da simulação hidráulica

4.6 – Avaliação de desempenho das regras

4.6.1 – Metodologia de avaliação

Após o desenvolvimento das regras simples e das regras difusas é necessário avaliar seu desempenho perante o efeito das incertezas presentes principalmente nas variáveis de entrada e elementos do sistema. Para tanto são gerados e simulados vários cenários de acordo com o método de simulação Monte Carlo descrito na seção seguinte.

A dinâmica da simulação dos cenários gerados ocorre da seguinte forma (Figura 4.9): o código desenvolvido ao ser executado gera, através da simulação Monte Carlo, todos os cenários desejados a partir da perturbação das variáveis que contenham incertezas; para cada cenário gerado, um arquivo do sistema é criado, no qual são inseridos os valores gerados das variáveis perturbadas; após a geração e armazenamento cada cenário é simulado de acordo com a dinâmica da simulação hidráulica expressa no fluxograma da Figura 4.8; no final da simulação de cada cenário, os valores obtidos para as variáveis do sistema são salvos em uma planilha eletrônica (um arquivo por cenário simulado) para posterior avaliação.

Após a simulação de todos os cenários, os resultados são analisados para avaliar o desempenho das regras. Nessa avaliação dois parâmetros devem ser considerados: a capacidade de fornecer soluções operacionalmente robustas, mesmo quando submetidas a cenários diferentes do qual foram projetadas e que são possíveis de ocorrer devido às incertezas existentes nas variáveis dos sistemas; e a capacidade e a performance dos objetivos operacionais estabelecidos. A robustez da operação está relacionada ao atendimento à demanda em quantidade e qualidade e a não violação dos limites operacionais do sistema. Para cenários onde não é possível realizar a operação sem violar os limites de operação e atender plenamente a demanda, não se pode atribuir falta de robustez às operações sugeridas pelas regras. O nível de performance dos objetivos deve ser avaliado considerando os conflitos existentes entre eles.

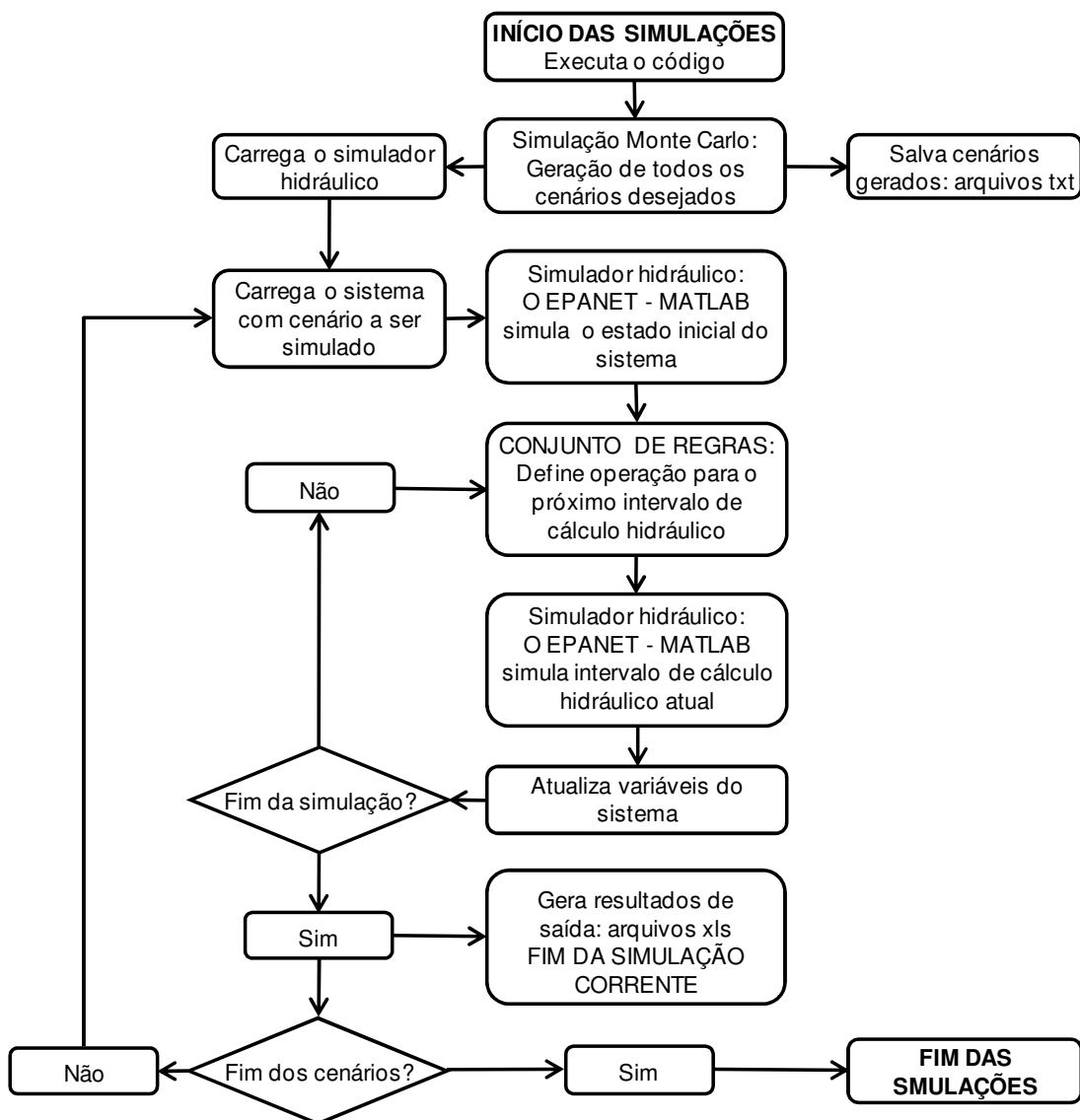


Figura 4.9: Dinâmica da simulação dos cenários gerados pelo método de Monte Carlo.

4.6.2 – Método de simulação Monte Carlo

Quando se utiliza um modelo matemático para descrever um sistema, é natural que as incertezas inerentes à sua representação física, as suas variáveis de entrada e às simplificações e aproximações do próprio modelo matemático na descrição dos processos físicos ocorrentes não permitam uma solução totalmente confiável para as variáveis de saída devido à impossibilidade de se representar fidedignamente esse sistema. Nesse caso, a simulação computacional pode ser considerada uma ferramenta de grande valia na obtenção de uma resposta mais consistente a respeito dos efeitos causados pelas incertezas nas variáveis de interesse. Uma das técnicas mais empregadas para mensurar esses efeitos, visando reproduzir, em um ambiente controlado, uma situação que ocorre em um sistema real é o método de simulação Monte Carlo.

Segundo DONATELLI & KONRATH (2005), a amostragem de Monte Carlo se refere a uma tradicional técnica que tem como finalidade gerar variáveis aleatórias de acordo com certa distribuição de probabilidade arbitrária. O método gera randomicamente um certo número de valores para as variáveis consideradas incertas, simulando assim combinações de valores dessas variáveis que levam a resultados que são o foco da análise. Segundo FERNANDES (2005) a essência da simulação Monte Carlo é estabelecer uma distribuição de probabilidade à qual responde uma variável aleatória e amostrar essa variável um número suficientemente grande de vezes.

O termo Monte Carlo foi inicialmente utilizado na Segunda Guerra Mundial, como um nome código para problemas de simulação associados ao desenvolvimento da bomba atômica. O nome vem da famosa roleta de Monte Carlo, em Mônaco. Entretanto, pelas dificuldades de realizar simulação de variáveis aleatórias à mão, a adoção da simulação Monte Carlo como técnica numérica universal tornou-se realmente difundida com a chegada dos computadores (SOBOL, 1994).

Para se aplicar as técnicas de simulação Monte Carlo é preciso identificar alguns elementos que são essenciais à sua execução: o perfil da função de distribuição de probabilidade; número de simulações necessárias; fonte geradora de números aleatórios eficaz e confiável; erro total admissível para a variável aleatória gerada; valor médio; desvio padrão; e intervalo no qual os valores gerados devem estar inseridos.

A identificação do perfil da função de distribuição de probabilidade das variáveis às quais o método será aplicado é feita mediante uma análise estatística de uma série de dados observados, medidos ou inferidos, usada como amostra. Esta análise permite também a extração de parâmetros estatísticos de interesse do método, como valor médio e desvio padrão da amostra.

Para o método de Monte Carlo, o número de cenários a serem simulados é um importante fator a se considerar. Quanto maior for esse número, mais representativa será a aplicação do método. SOBOL (1994) demonstrou que se a distribuição de probabilidade for normal, o número mínimo de cenários a serem gerados é dado pela equação a seguir:

$$N = \left(\frac{3 \cdot \sigma}{\varepsilon} \right)^2 \quad (4.4)$$

Onde:

N: é o número mínimo de cenários gerados; σ : é o desvio padrão da variável aleatória; ε : é erro total admissível para os valores gerados.

CAPÍTULO 5

ESTUDO DE CASO

5.1 – Descrição do sistema

O objeto de estudo deste trabalho, para aplicação da metodologia de construção de regras desenvolvida, foi o Sistema Adutor do Cariri, (PROÁGUA/AESA, 2006), localizado no Estado da Paraíba. Este sistema abastece de forma integrada, a partir do manancial Epitácio Pessoa (Açude Boqueirão de Cabaceiras), as cidades de Boqueirão, Cabaceiras, Boa Vista, Soledade, Juazeirinho, São Vicente do Seridó, Seridó, Cubati, Pedra Lavrada e Olivedos, situadas nas regiões do Cariri e do Seridó paraibano. O sistema beneficia ainda 16 comunidades rurais através de chafarizes alimentados a partir de derivações ao longo dos diversos trechos do sistema adutor (Figura 5.1). O sistema entrou em operação em 2001, beneficiando inicialmente uma população de 42.376 habitantes e foi projetado para um alcance de 20 anos (2021), quando tem previsão para atender uma população de 52.978 habitantes. As simulações realizadas neste trabalho consideram as projeções de crescimento da população e demanda estimada para o ano de 2008, de acordo com a Tabela 5.1. O sistema é operado manualmente pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba – CAGEPA, e suas peculiaridades topológicas dificultam a operação.

Na modelagem hidráulica algumas informações não disponíveis foram obtidas através de catálogos, como curvas do rendimento e da bomba, rugosidade das tubulações, etc., ou inferidas a partir de informações de funcionários e coletadas em plantas e projetos fornecidos pela CAGEPA.

Tabela 5.1: Projeção do crescimento de população e demanda para o ano de 2008. Fonte: PROÁGUA/AESA (2006).

Ano: 2008		
Cidades	População Urbana (hab.)	Vazões Médias Diárias (l/s)
Boqueirão	12.137	21,07
Cabaceiras	1.967	3,41
Boa Vista	2.348	4,08
Soledade	8.550	14,84
Juazeirinho	9.350	16,23
São Vicente do Seridó	2.683	4,66
Seridó	590	1,02
Cubati	4.436	7,70
Olivedos	1.535	2,67
Pedra Lavrada	2.355	4,09
Total	45.950	79,77

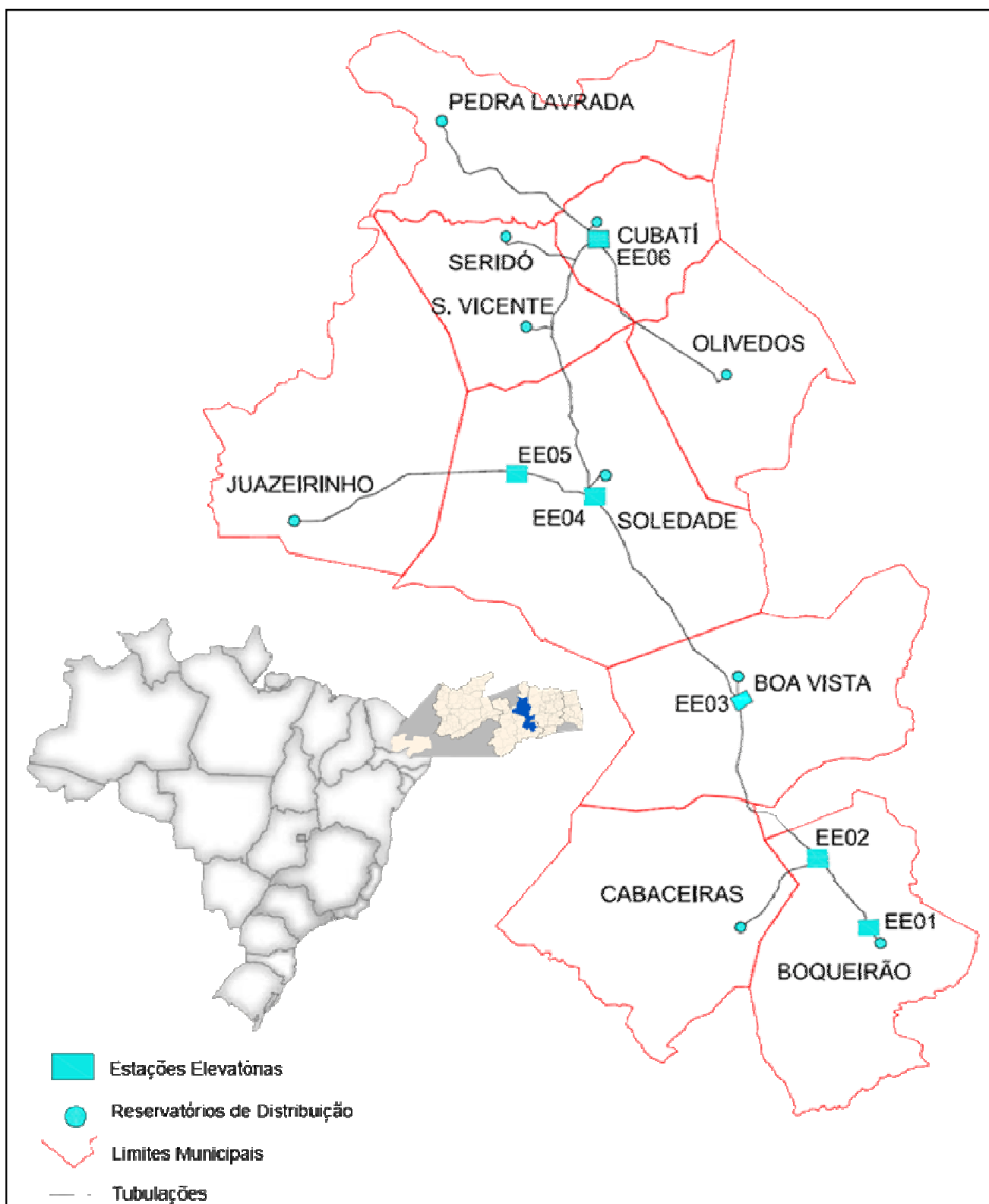


Figura 5.1: Sistema Adutor do Cariri e municípios abastecidos, adaptado de Pimentel (2004).

O Sistema Adutor do Cariri é composto por uma Estação de Tratamento de Água (ETA) com capacidade máxima de tratamento de 134,67 l/s, sendo 6,41 l/s gastos na ETA com lavagem de filtros e outras atividades, localizada na cidade de Boqueirão; 6 Estações Elevatórias (EE) sequenciais dotadas de reservatórios de rebombeamento semienterrados

(poços de sucção), cada uma abrigando 1, 2 ou 3 recalques independentes, destinados a bombear água ao reservatório de rebombeamento (poços de sucção) da próxima elevatória do sistema, ou aos reservatórios de distribuição das cidades, sendo cada recalque composto de 2 conjuntos elevatórios para funcionamento alternado (uma bomba mais uma de reserva) totalizando 26 bombas; 180.217 m de canalização, na sua maioria de RPVC e enterrada, sendo alguns pequenos trechos próximos às elevatórias de ferro fundido, por serem aéreos; chafarizes, válvulas, reservatórios de amortecimento unidirecional e nós.

As bombas do sistema são todas centrífugas e não existem conversores de frequência, sendo a operação executada de forma manual. As curvas de todas as bombas e o rendimento médio de trabalho foram obtidas através do catálogo de bombas do fabricante. A potência de cada conjunto motor-bomba foi obtida no relatório PROÁGUA/AESA (2006) ou através de visitas feitas ao sistema adutor.

A topografia do sistema com todas as cotas, as dimensões e volumes dos reservatórios e as características das tubulações, foram obtidas através do relatório PROÁGUA/AESA (2006), dados fornecidos pela CAGEPA, ou inferidas através de informações fornecidas pelos operadores em visita feita às estações de bombeamento. As Tabelas 5.2, 5.3 e 5.4 e a Figura 5.2 a seguir mostram, respectivamente, um resumo das características dos principais elementos da malha.

Tabela 5.2: Características das bombas. Fontes: catálogo de bombas KSB e PROÁGUA/AESA (2006).

Elevatórias	Bombeamento	Bombas	Curva característica (mca)	Rendimento Médio (%)	Potência (CV)
Estação Elevatória 1	R-EE1 → R-EE2	E1-01A e E1-02A	$H_{\text{man}} = 140,39 - 2,240 \times 10^{-2} \times Q^{1,60}$	77	200
	R-EE1 → R-Boqueirão	E1-01B	$H_{\text{man}} = 54,710 - 3,359 \times 10^{-4} \times Q^{2,67}$	71	40
	R-EE1 → R-Boqueirão	E1-02B	$H_{\text{man}} = 55,440 - 1,818 \times 10^{-4} \times Q^{2,92}$	68	40
Estação Elevatória 2	R-EE2 → R-EE3	E2-01A e E2-02A	$H_{\text{man}} = 117,08 - 1,075 \times 10^{-6} \times Q^{3,34}$	78	200
	R-EE2 → R-Cabaceiras	E2-01B e E2-02B	$H_{\text{man}} = 81,570 - 8,189 \times 10^{-2} \times Q^{2,83}$	67	12
Estação Elevatória 3	R-EE3 → R-EE4	E3-01A e E3-02A	$H_{\text{man}} = 95,170 - 5,058 \times 10^{-6} \times Q^{3,13}$	73	150
	R-EE3 → R-Boa Vista	E3-01B e E3-02B	$H_{\text{man}} = 27,700 - 8,285 \times 10^{-2} \times Q^{2,62}$	65	4
Estação Elevatória 4	R-EE4 → R-Soledade	E4-01A e E4-02A	$H_{\text{man}} = 82,080 - 1,279 \times 10^{-1} \times Q^{1,70}$	70	30
	R-EE4 → R- R-EE5	E4-01B e E4-02B	$H_{\text{man}} = 137,33 - 1,793 \times 10^{-1} \times Q^{1,76}$	69	50
	R-EE4 → R-S. Vicente do Seridó, R-Seridó e R-EE6	E4-01C e E4-02C	$H_{\text{man}} = 228,23 - 6,467 \times 10^{-2} \times Q^{1,70}$	70	125
Estação Elevatória 5	R-EE5 → R-Juazeirinho	E5-01A e E5-02A	$H_{\text{man}} = 137,14 - 1,726 \times 10^{-1} \times Q^{1,77}$	69	50
Estação Elevatória 6	R-EE6 → R-Pedra Lavrada	E5-01A e E5-02A	$H_{\text{man}} = 178,14 - 5,305 \times 10^{-1} \times Q^{2,47}$	62	20
	R-EE6 → R-Olivedos	E5-01B e E5-02B	$H_{\text{man}} = 111,82 - 4,014 \times 10^{-1} \times Q^{2,59}$	62	12
	R-EE6 → R-Cubatí	E5-01C e E5-02C	$H_{\text{man}} = 27,570 - 5,189 \times 10^{-5} \times Q^{2,20}$	59	5

Tabela 5.3: Características das tubulações principais. Fonte: PROÁGUA/AESA (2006).

Duto: Origem → Destino	Material	Diâmetro Nominal (mm)	Comprimento (m)	Vazão média diária (l/s)	Coefficiente de Hazen Williams
R-EE1 → R-EE2	RPVC	350	8.860,00	58,70	140
R-EE1 → Boqueirão	RPVC	200	360,00	21,07	140
R-EE2 → R-EE3	RPVC	350	20.113,50	55,29	140
R-EE2 → Cabaceiras	RPVC	100	16.580,00	3,41	140
R-EE3 → R-EE4	RPVC	200	25.860,00	51,21	140
R-EE3 → R-Boa Vista	RPVC	100	40,00	4,08	140
R-EE4 → R-EE5	RPVC	200	7.900,00	16,23	140
R-EE5 → Juazeirinho	RPVC	200	22.992,50	16,23	140
R-EE4 → R-Soledade	RPVC	150	400,00	14,84	140
R-EE4 → Deriv. p/ S. Vicente	RPVC	250	18.860,00	20,14	140
Deriv. P/ S. Vicente → Deriv. P/ Seridó	RPVC	150	4.840,00	15,48	140
Deriv. P/ São Vicente do Seridó	RPVC	100	1.740,00	4,66	140
Deriv. P/ Seridó → R-EE6	RPVC	150	6.200,00	14,46	140
Deriv. P/ Seridó	RPVC	75	4.571,00	1,02	140
R-EE6 → R-Pedra Lavrada	RPVC	100	19.613,00	4,06	140
R-EE6 → R-Olivedos	RPVC	100	22.087,00	2,67	140
R-EE6 → R-Cubatí	RPVC	100	30,00	7,70	140

Tabela 5.4: Características dos reservatórios. (Fontes: PROÁGUA/AESA (2006) e informações fornecidas pela CAGEPA).

Reservatório	Nível	Altura (m)	Conta do fundo (m)	Capacidade (m ³)
R-EE1 (semi-enterrado)	Variável	2,50	348,55	550
R-Boqueirão (elevado)	Variável	2,60	396,25	360
R-EE2 (semi-enterrado)	Variável	2,50	450,40	250
R-Cabaceiras (elevado)	Variável	2,80	498,30*	100
R-EE3 (semi-enterrado)	Variável	3,10	510,48	300
R-Boa Vista (elevado)	Variável	4,00*	528,10	50
R-EE4 (semi-enterrado)	Variável	1,80	510,32	550
R-Soledade (elevado)	Variável	4,85	563,82	350
R-EE5 (semi-enterrado)	Variável	2,10	572,40	80
R-Juazeirinho (apoiado)	Variável	2,60	596,50	250
R-S. Vicente do Seridó	Variável	3,40	646,42	75
R-Seridó (elevado)	Variável	3,60	542,56	150
R-EE6 (semi-enterrado)	Variável	2,50	558,40	180
R-Pedra Lavrada (elevado)	Variável	4,00*	546,26*	150
R-Olivedos (elevado)	Variável	4,00*	577,60*	150
R-Cubatí (elevado)	Variável	4,50	573,20	150

*Valores estimados a partir de um dado conhecido ou informações verbais de operadores

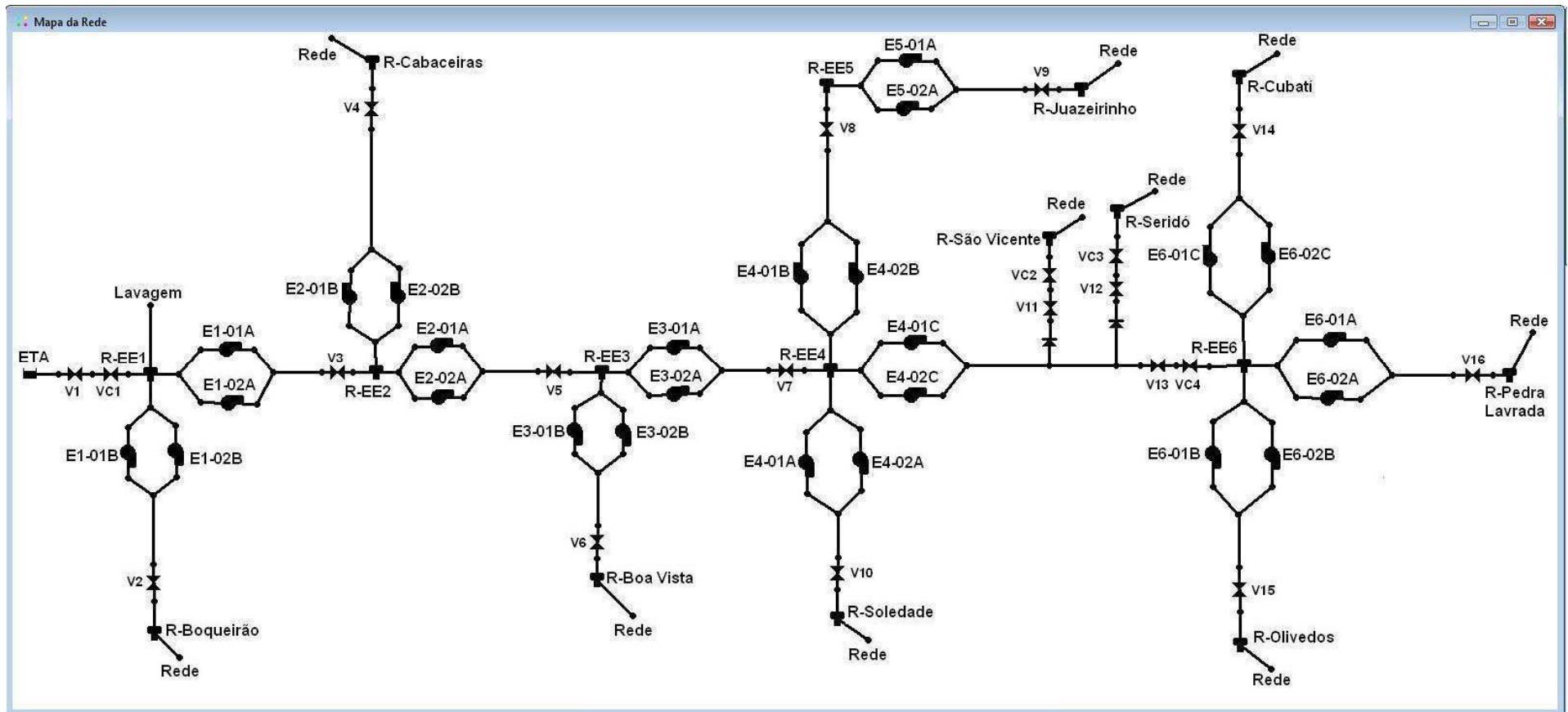


Figura 5.2: Sistema Adutor do Cariri representado no EPANET2.

LEGENDA:

ETA: Estação de Tratamento de Água; Lavagem: representação da demanda destinada à lavagem de filtros da ETA e outros serviços; R-EE1, R-EE2, R-EE3, R-EE4, R-EE5, R-EE6: Reservatórios semi-enterrados (poços de sucção) das Estações Elevatórias 1, 2, 3, 4, 5 e 6; R-Boqueirão; R-Cabaceiras, R-Boa Vista, R-Soledade, R-Juazeirinho, R-São Vicente, R-Seridó, R-Cubatí, R-Pedra Lavrada e R-Olivedos: Reservatórios de distribuição de cada cidade; Rede: representação da rede de distribuição de cada cidade; [E1-01A, E1-02A], [E1-01B, E1-02B]: recalques da Estação Elevatória 1; [E2-01A, E2-02A], [E2-01B, E2-02B]: recalques da Estação Elevatória 2; [E3-01A, E3-02A], [E3-01B, E3-02B]: recalques da Estação Elevatória 3; [E4-01A, E4-02A], [E4-01B, E4-02B], [E4-01C, E4-02C]: recalques da Estação Elevatória 4; [E5-01A, E5-02A]: recalques da Estação Elevatória 5; [E6-01A, E6-02A], [E6-01B, E6-02B], [E6-01C, E6-02C]: recalques da Estação Elevatória 6; [VC1, VC2, VC3 e VC4]: válvulas de controle de vazão na entrada dos reservatórios R-EE1, R-São Vicente, R-Seridó e R-EE6; [V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7, V8, V9, V10, V11, V12, V13, V14, V15, V16]: válvulas sustentadoras de pressão na entrada de todos os reservatórios.

5.2 – Modelagem e simulação hidráulica

Neste trabalho, usou-se o modelo hidráulico EPANET2, descrito na seção 4.5.1, para modelagem hidráulica do sistema e simulação das estratégias operacionais propostas pelo conjunto de regras desenvolvido.

As demandas dos chafarizes foram desprezadas, pois seus valores são pequenos e não têm influência relevante no resultado final da operação do sistema. Os trechos de ferro fundido próximos às elevatórias, por serem pequenos e efeitos desprezíveis na modelagem, foram ignorados, admitindo-se que a tubulação do sistema é toda de RPVC.

As válvulas VC1, VC2, VC3 e CV4 são de controle de vazão e, juntamente com as bombas, constituem o conjunto de elementos de controle manobrados para realizar a operação do sistema. Em nenhuma das fontes de informações consultadas foi possível verificar a existência das válvulas VC1, VC2 e VC3. No entanto, observando a configuração topológica do sistema, considerou-se essas válvulas na modelagem hidráulica, pois sem elas é possível ocorrer transbordamentos frequentes nos reservatórios R-EE1, R-São Vicente e R-Seridó. Na visita realizada à estação de bombeamento EE6 A verificou-se a existência da válvula VC4 que funciona totalmente aberta ou estrangulada. Segundo os operadores, o estrangulamento é feito para possibilitar o abastecimento dos dos reservatórios de São Vicente e Seridó que não são plenamente abastecidos quando esta válvula está completamente aberta. Para todas as válvulas considerou-se que a operação é feita com apenas dois estados, abertas ou fechadas, não existindo possibilidades de ângulos de abertura diferentes.

Os elementos V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7, V8, V9, V10, V11, V12, V13, V14, V15, V16 são válvulas sustentadoras de pressão virtuais, usadas como artifício para garantir que a entrada de água nos reservatórios ocorra na parte superior, já que o EPANET só modela a entrada de água pela parte inferior dos reservatórios. Para tanto, as válvulas foram ajustadas para que a pressão na entrada dos reservatórios de bombeamento fosse 0,1mca e nos reservatórios de distribuição 0,05 mca. Nas fontes de informação consultadas não foi possível verificar a existência de válvulas controladoras de vazão e pressão na entrada dos reservatórios.

A equação selecionada no EPANET2 para o cálculo da perda de carga foi a de Hazen-Williams, cujo coeficiente C assumido está expresso na Tabela 5.3. A perda de carga nas tubulações foi ajustada de forma que os valores de altura manométrica nas bombas e as vazões se equivalassem aos valores de projeto. Para tanto, nas válvulas sustentadoras de pressão, ajustou-se o coeficiente de perda de carga singular. Este é um coeficiente

adimensional usado nesse tipo de válvula para controle da perda de carga. Os valores ajustados encontram-se na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Coeficientes de perda de carga ajustados para as válvulas sustentadoras de pressão.

V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
4491	100	0	0	1000	0	2700	900
V9	V10	V11	V12	V13	V14	V15	V16
1000	0	0	0	1400	0	6300	4900

Na simulação hidráulica do Sistema Adutor do Cariri considerou-se um ciclo de operação de 24 horas, sendo o início à meia noite. O passo de cálculo hidráulico (variável de entrada do simulador hidráulico) adotado foi de 1 minuto. Quando há a integração entre o MATLAB e a biblioteca do EPANET2, a dinâmica da simulação ocorre de acordo com o fluxograma da Figura 4.8, e para o processo de simulação intensiva, de acordo com a Figura 4.9. O processo de calibração, elaboração das regras e ajuste das faixas de controle dos reservatórios foi feito através de simulações diretamente no EPANET2.

5.3 – Aplicação da metodologia proposta

5.3.1 – Elaboração das regras de operação

No processo de extração das regras, aplicou-se o procedimento sugerido na seção 4.3, descrito a seguir.

Passo 1: subdivisão do sistema em partes (subsistemas independentes)

O Sistema Adutor do Cariri foi dividido em 14 subsistemas, como mostra a Figura 5.3 e discriminados a seguir:

Subsistema 1: a válvula VC1 controla a entrada de água no reservatório de rebombeamento R-EE1; considerou-se que a mesma só permite dois estados: aberta ou fechada;

Subsistema 2: as bombas E1-01A e E1-02A são iguais (Tabela 5.2), não possuem conversores de frequência e funcionam alternadamente bombeando água para o reservatório de rebombeamento R-EE2;

Subsistema 3: as bombas E1-01B e E1-02B têm curvas ligeiramente diferentes (Tabela 5.2), mas com vazões de trabalho semelhantes; não possuem conversores de frequência e funcionam alternadamente bombeando água para o reservatório de distribuição da cidade de Boqueirão R-Boqueirão;

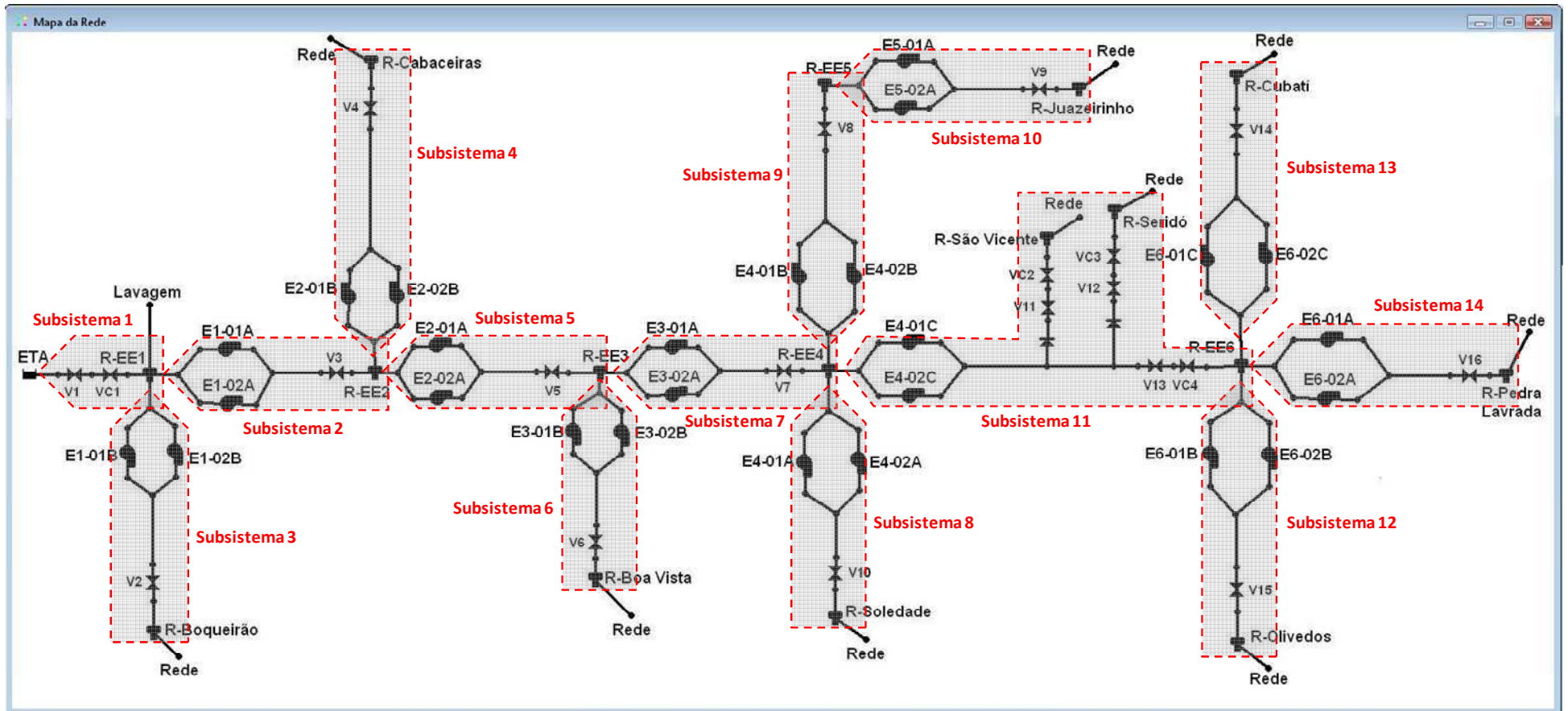


Figura 5.3: Divisão do Sistema Adutor do Cariri em subsistemas.

Subsistema 4: as bombas E2-01B e E2-02B são iguais, não possuem conversores de frequência e funcionam alternadamente bombeando água para o reservatório de distribuição da cidade de Cabaceiras R-Cabaceiras;

Subsistema 5: as bombas E2-01A e E2-02A são iguais, não possuem conversores de frequência e funcionam alternadamente bombeando água para o reservatório de rebombeamento R-EE3;

Subsistema 6: as bombas E3-01B e E3-02B são iguais, não possuem conversores de frequência e funcionam alternadamente bombeando água para o reservatório de distribuição da cidade de Boa Vista R-Boa Vista;

Subsistema 7: as bombas E3-01A e E3-02A são iguais, não possuem conversores de frequência e funcionam alternadamente bombeando água para o reservatório de rebombeamento R-EE4;

Subsistema 8: as bombas E4-01A e E4-02A são iguais, não possuem conversores de frequência e funcionam alternadamente bombeando água para o reservatório de distribuição da cidade de Soledade R-Soledade;

Subsistema 9: as bombas E4-01B e E4-02B são iguais, não possuem conversores de frequência e funcionam alternadamente bombeando água para o reservatório de rebombeamento R-EE5;

Subsistema 10: as bombas E5-01A e E5-02A são iguais, não possuem conversores de frequência e funcionam alternadamente bombeando água para o reservatório de distribuição da cidade de Juazeirinho R-Juazeirinho;

Subsistema 11: as bombas E4-01C e E4-02C são iguais, não possuem conversores de frequência e funcionam alternadamente bombeando água para os reservatórios de distribuição da cidade de Seridó R-Seridó, de São Vicente (distrito de Seridó) R-São Vicente e de rebombeamento R-EE6; as válvulas VC2, VC3 e VC4 controlam as vazões de entradas destes reservatórios e considerou-se que as mesmas só funcionam em dois estados: aberto e fechado;

Subsistema 12: as bombas E6-01B e E6-02B são iguais, não possuem conversores de frequência e funcionam alternadamente bombeando água para o reservatório de distribuição da cidade de Olivedos R-Olivedos;

Subsistema 13: as bombas E6-01C e E6-02C são iguais, não possuem conversores de frequência e funcionam alternadamente bombeando água para o reservatório de distribuição da cidade de Cubatí R-Cubatí;

Subsistema 14: as bombas E6-01A e E6-02A são iguais, não possuem conversores de frequência e funcionam alternadamente bombeando água para o reservatório de distribuição da cidade de Pedra Lavrada R-Pedra Lavrada;

Passo 2: divisão do ciclo de operação em intervalos de tempo

As cidades abastecidas pelo Sistema Adutor do Cariri são todas de pequeno porte, com pouca ou nenhuma atividade industrial. Adotou-se para todas as cidades a mesma curva de demanda apresentada na Figura 5.4.

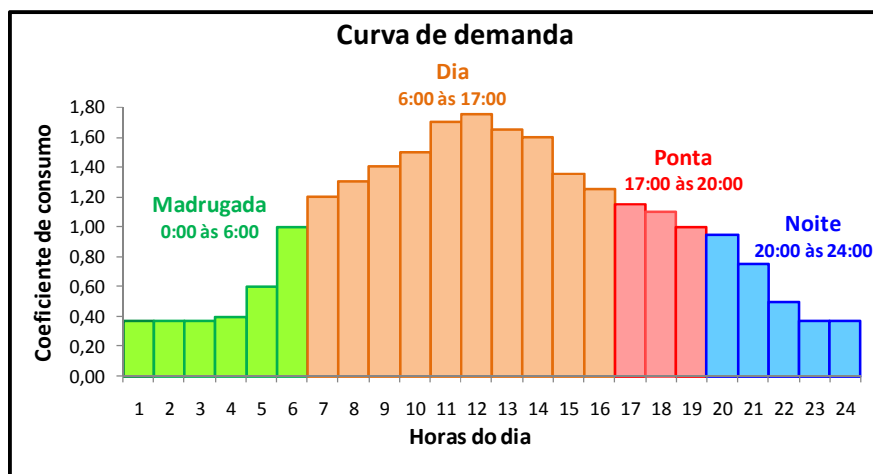


Figura 5.4: Variação da demanda ao longo do dia (Adaptado de PEDROSA FILHO (2006)).

Baseando-se na variação do consumo ao longo do dia dividiu-se o ciclo operacional em quatro intervalos de tempo estrategicamente delimitados, considerando-se o comportamento do consumo e do custo da tarifa de energia elétrica: de meia noite às seis horas, onde o consumo é baixo e pouco variável; de seis horas às dezessete horas, onde o consumo é alto e bastante variável; de dezessete horas às vinte horas, onde se concentra o horário de tarifas elevadas; e das vinte horas à meia noite, onde o comportamento do consumo é semelhante ao primeiro intervalo. Considerou-se o horário de ponta como sendo de 17:00 às 20:00 horas.

Passo 3: determinação das faixas de controle para as variáveis

Utilizando o intervalo de cálculo hidráulico escolhido para simulação do sistema no EPANET2, que foi de um minuto, definiram-se os níveis máximos e mínimos de controle usando as equações 4.1, 4.2 e 4.3 (Tabela 5.6). Os níveis máximos e mínimos de operação foram fornecidos pela CAGEPA, coletados no relatório PROÁGUA/AESA (2006) ou estimados a partir das informações dos outros reservatórios.

Tabela 5.6: Níveis máximos e mínimos de operação e controle dos reservatórios.

Nível (m)		R-EE1	R-EE2	R-EE3	R-EE4	R-EE5	R-EE6
Operação	Máx.	2,50	2,50	3,10	1,80	2,10	2,50
	Mín.	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Controle	Máx.	2,40	2,40	3,00	1,70	2,00	2,40
	Mín.	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
		R-Boqueirão	R-Cabaceiras	R-B. Vista	R- Soledade	R-Juazeirinho	R- S. Vicente
Operação	Máx.	2,60	2,80	4,00	4,85	2,60	3,40
	Mín.	0,05	0,05	0,05	0,15	0,10	0,10
Controle	Máx.	2,50	2,70	3,90	4,75	2,50	3,30
	Mín.	0,15	0,15	0,15	0,25	0,20	0,20
		R-Seridó	R-Cubatí	R-P. Lavrada	R-Olivedos		
Operação	Máx.	3,60	4,50	4,00	4,00		
	Mín.	0,10	0,10	0,05	0,05		
Controle	Máx.	3,50	4,40	3,90	3,90		
	Mín.	0,20	0,20	0,15	0,15		

No Sistema Adutor do Cariri, a operação é presa a duas manobras de operação: ligar e desligar bombas, abrir e fechar válvulas. Devido ao pequeno grau de liberdade em todas as estações de bombeamento e válvulas de controle dividiu-se os reservatórios em apenas três faixas de controle, usando-se o seguinte critério: determinou-se uma faixa intermediária no reservatório considerada ideal (Tabela 5.7), acima da qual devem-se executar manobras de desligar bombas e/ou fechar válvulas e abaixo do qual executar manobras de ligar bombas e/ou abrir válvulas de forma a manter o nível nesta faixa. Enquanto o nível do reservatório permanecer dentro da faixa ótima, a operação deve permanecer inalterada. A espessura e a posição da faixa de controle ótima no reservatório é variável de acordo com o intervalo de tempo do ciclo operacional em que ela se encontrar e com as características da demanda de abastecimento, como ilustrado na Figura 5.5. A partir da simulação hidráulica do sistema é possível observar qual a melhor trajetória que o nível de cada reservatório deve seguir para que os objetivos estabelecidos sejam satisfeitos. Por exemplo: analiticamente fica claro que, nos reservatórios de distribuição, no intervalo de tempo de 00:00 às 06:00 hs é melhor manter seus níveis bem elevados para que no intervalo de 06:00 às 17:00 hs, período em que a demanda quase dobra, se consiga manter esses níveis também elevados, para que no início do horário de ponta (tarifa de energia elevada) os reservatórios estejam com o nível mais elevado possível e conseqüentemente as bombas possam ser desligadas. Mas, como não é possível manter o reservatório exatamente no nível desejado, então se estabelece uma faixa considerada ideal para o nível permanecer. Para dimensionar a espessura dessa faixa e sua posição em cada intervalo de tempo, é bastante oportuno o uso do simulador hidráulico. Portanto, a partir da simulação hidráulica do sistema no EPANET2 analisou-se cuidadosamente o comportamento do nível dos reservatórios de acordo com a variação da demanda em cada intervalo de tempo, definidos

no passo 2, e determinaram-se a espessuras e a posição das faixas de controle consideradas ideais para cada reservatório (Tabela 5.7).

Tabela 5.7: Faixas de controle ideais e níveis iniciais estabelecidos para os reservatórios.

		Intervalos (h)	Nível	R-EE1 (m)	R-EE2 (m)	R-EE3 (m)	R-EE4 (m)	R-EE5 (m)	R-EE6 (m)
Faixas de controle ideais	Intervalo 1: 00:00 às 06:00	Máx.		2,40	2,40	3,00	1,70	2,00	2,40
		Mín.		0,20	1,50	2,00	1,00	1,50	1,30
	Intervalo 2: 06:00 às 17:00	Máx.		2,40	2,40	3,00	1,70	2,00	2,40
		Mín.		0,20	1,50	2,50	1,20	1,50	1,30
	Intervalo 3: 17:00 às 20:00	Máx.		2,40	1,00	1,00	0,90	1,00	1,00
		Mín.		0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
	Intervalo 4: 20:00 às 24:00	Máx.		1,60	1,55	1,85	1,20	1,30	1,60
		Mín.		1,00	0,95	1,25	0,60	0,70	1,00
Nível inicial				1,30	1,25	1,55	0,90	1,00	1,30
				R-Boqueirão (m)	R-Cabaceiras (m)	R-B. Vista (m)	R- Soledade (m)	R-Juazeirinho (m)	R- S. Vicente (m)
Faixas de controle ideais	Intervalo 1: 00:00 às 06:00	Máx.		2,50	2,70	3,90	4,75	2,50	3,30
		Mín.		2,05	2,25	3,00	3,40	2,00	2,00
	Intervalo 2: 06:00 às 17:00	Máx.		2,50	2,70	3,90	4,75	2,50	3,30
		Mín.		2,20	2,25	3,20	3,90	2,00	2,00
	Intervalo 3: 17:00 às 20:00	Máx.		0,75	1,15	1,15	1,24	1,00	1,70
		Mín.		0,15	0,15	0,15	0,25	0,20	0,20
	Intervalo 4: 20:00 às 24:00	Máx.		1,60	1,55	2,30	2,70	1,60	2,00
		Mín.		1,00	0,95	1,70	2,10	1,00	1,40
Nível inicial				1,30	1,25	2,00	2,40	1,30	1,70
				R-Seridó (m)	R-Cubatí (m)	R-P. Lavrada (m)	R-Olivedos (m)		
Faixas de controle ideais	Intervalo 1: 00:00 às 06:00	Máx.		3,50	4,40	3,90	3,90		
		Mín.		1,80	3,20	3,20	3,20		
	Intervalo 2: 06:00 às 17:00	Máx.		3,50	4,40	3,90	3,90		
		Mín.		1,80	3,60	3,20	3,20		
	Intervalo 3: 17:00 às 20:00	Máx.		1,80	1,20	1,15	1,15		
		Mín.		0,20	0,20	0,15	0,15		
	Intervalo 4: 20:00 às 24:00	Máx.		2,10	2,60	2,30	2,30		
		Mín.		1,50	2,00	1,70	1,70		
Nível inicial				1,80	2,30	2,00	2,00		

No último intervalo de tempo (20:00 às 24:00 hs), que tem como um dos seus objetivos recuperar o nível inicial dos reservatórios, definiu-se para todos os reservatórios uma faixa de controle de espessura 60 cm (mais ou menos 30 cm em torno do nível inicial), considerada como ideal para a estabilização do nível final. Nas simulações realizadas, para faixa de espessura menor que 60 cm resultaram em sugestões de operação com um maior número de chaveamentos, já que era preciso chavear os elementos com maior frequência para manter o nível dentro da faixa estabelecida. Em contrapartida, se a faixa tiver espessura superior a 60 cm, o objetivo de recuperar o nível inicial do reservatório pode não ser atendido de forma satisfatória.

Na Tabela 5.7 encontram-se os níveis iniciais adotados para todas as simulações. Diversas situações de níveis iniciais foram testadas e, como as regras se mostraram robustas a todas elas, por comodidade escolheu-se o nível médio como inicial.

As faixas que determinam as folgas inferiores e superiores dos reservatórios (Figura 4.3) são regiões nas quais obrigatoriamente devem ocorrer manobras de bombas e válvulas para deter o nível e impedir transbordamento e cavitação nas bombas. É importante perceber que eventualmente essas faixas podem ser parte de outra faixa ou coincidir com uma faixa de controle delimitada para o reservatório. Na Figura 5.5, por exemplo, no intervalo de tempo de 20:00 às 24:00 horas, a folga superior pertence à faixa de controle que está acima da faixa ótima, enquanto que a folga inferior pertence à que está abaixo. No intervalo de 00:00 às 06:00 horas, a própria folga superior é a faixa de controle superior à ótima.

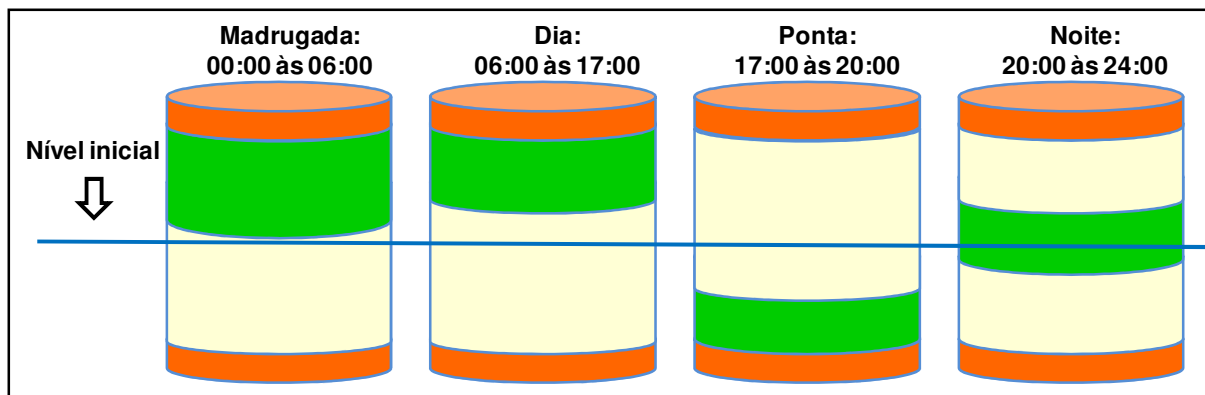


Figura 5.5: Posicionamento da faixa de controle ótima ao longo do ciclo operacional.

As variáveis discretizadas em faixas foram apenas o nível dos reservatórios e o ciclo operacional, pois no Sistema Adutor do Cariri as bombas não possuem conversores de frequência nem as válvulas, ângulos de abertura diferentes, só permitindo dois estados: ligadas e desligadas, abertas ou fechadas. O sistema não apresenta excessos de pressão e velocidade nas tubulações, pois, devido a sua configuração topológica, já foi projetado de forma a não ocorrer esse tipo de problema. Portanto, no estudo de caso, as variáveis envolvidas na construção das regras são: nível dos reservatórios, estado das bombas e válvulas e instante do dia.

Em situações em que a operação permitisse um maior grau de liberdade, o reservatório poderia ser dividido em várias faixas de controle, sendo uma considerada a ideal, e às demais faixas associariam-se manobras com graus de liberdade correspondentes, onde o objetivo seria sempre fazer o nível do reservatório permanecer dentro da faixa de controle ótima estabelecida.

Passo 4: elaboração das regras para cada intervalo de tempo e subsistemas

As regras extraídas para cada subsistema (Figura 5.3) e intervalos de tempo (Figura 5.4), respeitando as faixas de controle consideradas ideais determinadas na Tabela 5.7 estão descritas a seguir para alguns subsistemas e o restante encontra-se no Anexo A. O subsistema 1 é controlado apenas por uma válvula; o subsistema 11 é controlado por bombas e válvulas; os demais subsistemas são controlados apenas por bombas e as regras extraídas para os mesmos são similares às do subsistema 2, mudando apenas as espessuras e localização das faixas de controle.

SUBSISTEMA 1:

Variável de controle: nível de R-EE1; variável de operação: estado da válvula VC1;

- **Intervalo de tempo 1: 00:00 à 06:00 horas (madrugada):** faixa de controle ótima: (0,20 – 2,40) m;

Regra 1: **SE** nível de R-EE1 for **maior** que 2,40 m, **ENTÃO fecha** VC1;

Regra 2: **SE** nível de R-EE1 for **menor** que 0,20 m, **ENTÃO abre** VC1;

Regra 3: **SE** nível de R-EE1 for **menor** que 2,40 m **E maior** que 0,20 m, **ENTÃO permanece** o estado de VC1;

- **Intervalo de tempo 2: 06:00 à 17:00 horas (dia):** faixa de controle ótima: (0,20 – 2,40) m;

Regra 1: **SE** nível de R-EE1 for **maior** que 2,40 m, **ENTÃO fecha** VC1;

Regra 2: **SE** nível de R-EE1 for **menor** que 0,20 m, **ENTÃO abre** VC1;

Regra 3: **SE** nível de R-EE1 for **menor** que 2,40 m **E maior** que 0,20 m, **ENTÃO permanece** o estado de VC1;

- **Intervalo tempo 3: 17:00 à 20:00 horas (ponta):** faixa de controle ótima: (0,20 – 2,40) m;

Regra 1: **SE** nível de R-EE1 for **maior** que 2,40 m, **ENTÃO fecha** VC1;

Regra 2: **SE** nível de R-EE1 for **menor** que 0,20 m, **ENTÃO abre** VC1;

Regra 3: **SE** nível de R-EE1 for **menor** que 2,40 m **E maior** que 0,20 m, **ENTÃO permanece** o estado de VC1;

- **Intervalo de tempo 4: 20:00 à 24:00 horas (noite):** nível inicial: 1,30 m; faixa de controle ótima: (1,00 – 1,60) m;

Regra 1: **SE** nível de R-EE1 for **maior** que 2,40 m, **ENTÃO fecha** VC1;

Regra 2: **SE** nível de R-EE1 for **menor** que 0,20 m, **ENTÃO abre** VC1;

Regra 3: **SE** nível de R-EE1 for **menor** que 2,40 m **E maior** que 0,20 m, **ENTÃO permanece** o estado de VC1;

SUBSISTEMA 2:

Variável de controle: nível de R-EE2; variável de operação: estado da bomba E1-01A ou E1-02A;

- **Intervalo de tempo 1: 00:00 à 06:00 horas (madrugada):** faixa de controle ótima: (1,50 – 2,40) m;

Regra 1: **SE** nível de R-EE2 for **maior** que 2,40 m, **ENTÃO desliga** E1-01A ou E1-02A;

Regra 2: **SE** nível de R-EE2 for **menor** que 1,50 m, **ENTÃO liga** E1-01A ou E1-02A;

Regra 3: **SE** nível de R-EE2 for **menor** que 2,40 m **E maior** que 1,50 m, **ENTÃO permanece** o estado de E1-01A ou E1-02A;

- **Intervalo de tempo 2: 06:00 à 17:00 horas (dia):** faixa de controle ótima: (1,50 – 2,40) m;

Regra 1: **SE** nível de R-EE2 for **maior** que 2,40 m, **ENTÃO desliga** E1-01A ou E1-02A;

Regra 2: **SE** nível de R-EE2 for **menor** que 1,50 m, **ENTÃO liga** E1-01A ou E1-02A;

Regra 3: **SE** nível de R-EE2 for **menor** que 2,40 m **E maior** que 1,50 m, **ENTÃO permanece** o estado de E1-01A ou E1-02A;

- **Intervalo tempo 3: 17:00 à 20:00 horas (ponta):** faixa de controle ótima: (0,20 – 1,00) m;

Regra 1: **SE** nível de R-EE2 for **maior** que 1,00 m, **ENTÃO desliga** E1-01A ou E1-02A;

Regra 2: **SE** nível de R-EE2 for **menor** que 0,20 m, **ENTÃO liga** E1-01A ou E1-02A;

Regra 3: **SE** nível de R-EE2 for **menor** que 1,00 m **E maior** que 0,20 m, **ENTÃO permanece** o estado de E1-01A ou E1-02A;

- **Intervalo de tempo 4: 20:00 à 24:00 horas (noite):** nível inicial: 1,25 m; faixa de controle ótima: (0,95 – 1,55) m;

Regra 1: **SE** nível de R-EE2 for **maior** que 1,55 m, **ENTÃO desliga** E1-01A ou E1-02A;

Regra 2: **SE** nível de R-EE2 for **menor** que 0,95 m, **ENTÃO liga** E1-01A ou E1-02A;

Regra 3: **SE** nível de R-EE2 for **menor** que 1,55 m **E maior** que 0,95 m, **ENTÃO permanece** o estado de E1-01A ou E1-02A;

SUBSISTEMA 11:

Variáveis de controle: nível de R-São Vicente, R-Seridó e R-EE6; variáveis de operação: estado da bomba E4-01C ou E4-02C e das válvulas VC2, VC3 e VC4;

- **Intervalo de tempo 1: 00:00 à 06:00 horas (madrugada):** faixa de controle ótima: R-São Vicente: (2,00 – 3,30) m; R-Seridó: (1,80 – 3,50) m; R-EE6: (1,30 – 2,40) m;

Regra 1: **SE** nível de R-São Vicente for **maior** que 3,30 m, **ENTÃO fecha** VC2;

Regra 2: **SE** nível de R-São Vicente for **menor** que 2,00 m, **ENTÃO abre** VC2;

Regra 3: **SE** nível de R-São Vicente for **menor** que 3,30 m **E maior** que 2,00 m, **ENTÃO permanece** o estado de VC2;

Regra 4: **SE** nível de R-Seridó for **maior** que 3,50 m, **ENTÃO fecha** VC3;

Regra 5: **SE** nível de R-Seridó for **menor** que 1,80 m, **ENTÃO abre** VC2;

Regra 6: **SE** nível de R-Seridó for **menor** que 3,50 m **E maior** que 1,80 m, **ENTÃO permanece** o estado de VC3;

Regra 7: **SE** nível de R-EE6 for **maior** que 2,40 **E** VC2 **OU** VC3 estiver **aberta**, **ENTÃO liga** E4-01C ou E4-02C **E fecha** VC4;

Regra 8: **SE** nível de R-EE6 for **maior** que 2,40 **E** VC2 **E** VC3 estiver **fechada**, **ENTÃO desliga** E4-01C ou E4-02C **E fecha** VC4;

Regra 9: **SE** nível de R-EE6 for **menor** que 1,30 m, **ENTÃO liga** E4-01C ou E4-02C **E abre** VC4;

Regra 10: **SE** nível de R-EE6 for **menor** que 2,40 **E maior** 1,30 m **E** VC2 **OU** VC3 estiver **aberta**, **ENTÃO liga** E4-01C ou E4-02C **E permanece** o estado de VC4;

Regra 11: **SE** nível de R-EE6 for **menor** que 2,40 **E maior** 1,30 m **E** VC2 **E** VC3 estiver **fechada**, **ENTÃO permanece** o estado de E4-01C ou E4-02C **E permanece** o estado de VC4;

- **Intervalo de tempo 2: 06:00 à 17:00 horas (dia):** faixa de controle ótima: R-São Vicente: (2,00 – 3,30) m; R-Seridó: (1,80 – 3,50) m; R-EE6: (1,30 – 2,40) m;

Regra 1: **SE** nível de R-São Vicente for **maior** que 3,30 m, **ENTÃO fecha** VC2;

Regra 2: **SE** nível de R-São Vicente for **menor** que 2,00 m, **ENTÃO abre** VC2;

Regra 3: **SE** nível de R-São Vicente for **menor** que 3,30 m **E maior** que 2,00 m, **ENTÃO permanece** o estado de VC2;

Regra 4: **SE** nível de R-Seridó for **maior** que 3,50 m, **ENTÃO fecha** VC3;

Regra 5: **SE** nível de R-Seridó for **menor** que 1,80 m, **ENTÃO abre** VC2;

Regra 6: **SE** nível de R-Seridó for **menor** que 3,50 m **E maior** que 1,80 m, **ENTÃO permanece** o estado de VC3;

Regra 7: **SE** nível de R-EE6 for **maior** que 2,40 **E** VC2 **OU** VC3 estiver **aberta**, **ENTÃO liga** E4-01C ou E4-02C **E fecha** VC4;

Regra 8: **SE** nível de R-EE6 for **maior** que 2,40 **E** VC2 **E** VC3 estiver **fechada**, **ENTÃO desliga** E4-01C ou E4-02C **E fecha** VC4;

Regra 9: **SE** nível de R-EE6 for **menor** que 1,30 m, **ENTÃO liga** E4-01C ou E4-02C **E abre** VC4;

Regra 10: **SE** nível de R-EE6 for **menor** que 2,40 **E maior** 1,30 m **E** VC2 **OU** VC3 estiver **aberta**, **ENTÃO liga** E4-01C ou E4-02C **E permanece** o estado de VC4;

Regra 11: **SE** nível de R-EE6 for **menor** que 2,40 **E maior** 1,30 m **E** VC2 **E** VC3 estiver **fechada**, **ENTÃO permanece** o estado de E4-01C ou E4-02C **E permanece** o estado de VC4;

- **Intervalo de tempo 3: 17:00 à 20:00 horas (ponta):** faixa de controle ótima: R-São Vicente: (0,20 – 1,70) m; R-Seridó: (0,20 – 1,80) m; R-EE6: (0,20 – 1,00) m;

Regra 1: **SE** nível de R-São Vicente for **maior** que 1,70 m, **ENTÃO fecha** VC2;

Regra 2: **SE** nível de R-São Vicente for **menor** que 0,20 m, **ENTÃO abre** VC2;

Regra 3: **SE** nível de R-São Vicente for **menor** que 1,70 m **E maior** que 0,20 m, **ENTÃO permanece** o estado de VC2;

Regra 4: **SE** nível de R-Seridó for **maior** que 1,80 m, **ENTÃO fecha** VC3;

Regra 5: **SE** nível de R-Seridó for **menor** que 0,20 m, **ENTÃO abre** VC2;

Regra 6: **SE** nível de R-Seridó for **menor** que 1,80 m **E maior** que 0,20 m, **ENTÃO permanece** o estado de VC3;

Regra 7: **SE** nível de R-EE6 for **maior** que 1,00 **E** VC2 **OU** VC3 estiver **aberta**, **ENTÃO liga** E4-01C ou E4-02C **E fecha** VC4;

Regra 8: **SE** nível de R-EE6 for **maior** que 1,00 **E** VC2 **E** VC3 estiver **fechada**, **ENTÃO desliga** E4-01C ou E4-02C **E fecha** VC4;

Regra 9: **SE** nível de R-EE6 for **menor** que 0,20 m, **ENTÃO liga** E4-01C ou E4-02C **E abre** VC4;

Regra 10: **SE** nível de R-EE6 for **menor** que 1,00 **E maior** 0,20 m **E VC2 OU VC3** estiver **aberta**, **ENTÃO** liga E4-01C ou E4-02C **E permanece** o estado de VC4;

Regra 11: **SE** nível de R-EE6 for **menor** que 1,00 **E maior** 0,20 m **E VC2 E VC3** estiver **fechada**, **ENTÃO** permanece o estado de E4-01C ou E4-02C **E permanece** o estado de VC4;

- **Intervalo de tempo 4: 20:00 à 24:00 horas (ponta):** nível inicial de R- São Vicente: 1,70 m; nível inicial de R-Seridó: 1,80 m; nível inicial de R-EE6: 1,30 m; faixa de controle ótima: R-São Vicente: (1,40 – 2,00) m; R-Seridó: (1,50 – 2,10) m; R-EE6: (1,00 – 1,60) m;

Regra 1: **SE** nível de R-São Vicente for **maior** que 2,00 m, **ENTÃO** fecha VC2;

Regra 2: **SE** nível de R-São Vicente for **menor** que 1,40 m, **ENTÃO** abre VC2;

Regra 3: **SE** nível de R-São Vicente for **menor** que 2,00 m **E maior** que 1,40 m, **ENTÃO** permanece o estado de VC2;

Regra 4: **SE** nível de R-Seridó for **maior** que 2,10 m, **ENTÃO** fecha VC3;

Regra 5: **SE** nível de R-Seridó for **menor** que 1,50 m, **ENTÃO** abre VC2;

Regra 6: **SE** nível de R-Seridó for **menor** que 2,10 m **E maior** que 1,50 m, **ENTÃO** permanece o estado de VC3;

Regra 7: **SE** nível de R-EE6 for **maior** que 1,60 **E VC2 OU VC3** estiver **aberta**, **ENTÃO** liga E4-01C ou E4-02C **E fecha** VC4;

Regra 8: **SE** nível de R-EE6 for **maior** que 1,60 **E VC2 E VC3** estiver **fechada**, **ENTÃO** desliga E4-01C ou E4-02C **E fecha** VC4;

Regra 9: **SE** nível de R-EE6 for **menor** que 1,00 m, **ENTÃO** liga E4-01C ou E4-02C **E abre** VC4;

Regra 10: **SE** nível de R-EE6 for **menor** que 1,60 **E maior** 1,00 m **E VC2 OU VC3** estiver **aberta**, **ENTÃO** liga E4-01C ou E4-02C **E permanece** o estado de VC4;

Regra 11: **SE** nível de R-EE6 for **menor** que 1,60 **E maior** 1,00 m **E VC2 E VC3** estiver **fechada**, **ENTÃO** permanece o estado de E4-01C ou E4-02C **E permanece** o estado de VC4;

Passo 5: elaboração das regras para configurações específicas

No Sistema Adutor do Cariri, devido a sua simplicidade topológica, não existe qualquer configuração específica ou objetivo especial que as regras construídas não consigam contemplar. No entanto é necessária atenção ao subsistema 11 (Figura 5,3), pois

os reservatórios de São Vicente e Seridó são abastecidos indiretamente pela bomba E4-01C ou E4-01C, através do manejo das válvulas VC2 e VC3, que controlam a entrada de fluido nesses reservatórios, já que a operação é destinada a suprir a demanda do reservatório R-EE6, que é bem superior às dos outros dois. Portanto, nesta parte do sistema as regras atuam considerando o nível dos três reservatórios, atuando nas bombas (E4-01C ou E4-02C) e válvulas (VC2, VC3 e VC4) do referido trecho.

5.3.2 – Desenvolvimento do controle difuso

Para cada subsistema da Figura 5.3 desenvolveu-se um controlador difuso capaz de sugerir uma operação (saída) robusta e eficiente a partir de informações (entrada) das condições do sistema. A atuação conjunta da operação sugerida para os 14 subsistemas também resultará em uma operação eficiente para o sistema completo.

A construção do controlador difuso consiste em transformar as regras simples, baseadas na lógica booleana, extraídas no item anterior, em regras difusas, capazes de tomar decisões baseadas em variáveis linguísticas, informações ambíguas e imprecisas. Em outras palavras, as regras simples tomam decisões baseadas em variáveis discretizadas em faixas numéricas com limites rígidos, determinadas a partir da investigação do sistema e dimensionadas acreditando-se que o mesmo se comportará exatamente da forma que foi modelado e simulado, ou seja, pouco flexível às incertezas. As regras difusas tomam decisões baseadas em variáveis discretizadas em faixas linguísticas (conjuntos difusos) com limites não bem definidos e flexíveis e não estão presas à precisão numérica e ao comportamento exato previsto para o sistema, conseguindo absorver níveis de incertezas das variáveis de entrada e da modelagem hidráulica.

Nos sistemas de abastecimento de água, podem-se apontar as principais variáveis envolvidas na definição da operação: instante do dia, nível de reservatório, pressão, velocidade, vazão (demanda), estado de bombas, rotação da bombas, estado de válvulas e ângulo de abertura de válvulas. Em um processo de construção de regras difusas, todas essas variáveis estão sujeitas à fuzificação, no entanto não necessariamente todas precisam ser fuzificadas para se obter os resultados esperados.

Como já ressaltado anteriormente, o Sistema Adutor do Cariri não apresenta excessos de pressão e velocidade nas tubulações pois, devido a sua configuração topológica, já foi projetado de forma a não ocorrer esse tipo de problema. Além do mais, as bombas não possuem conversores de frequência nem as válvulas com ângulos de abertura diferentes, só permitindo dois estados: ligadas e desligadas, abertas ou fechadas. Portanto,

assim como nas regras simples, as variáveis envolvidas nas regras difusas são: nível de reservatórios, instante do dia, estado das bombas e estado das válvulas.

Em cada controlador difuso desenvolvido as variáveis de entrada (variáveis de controle) são: nível de reservatórios e instante do dia; e as variáveis de saída (variáveis de operação) são: estado das bombas e estado das válvulas (Figura 5.6).

O controle difuso foi implementado através do módulo de Lógica Difusa existente no MATLAB, o *Fuzzy Logic Toolbox*.

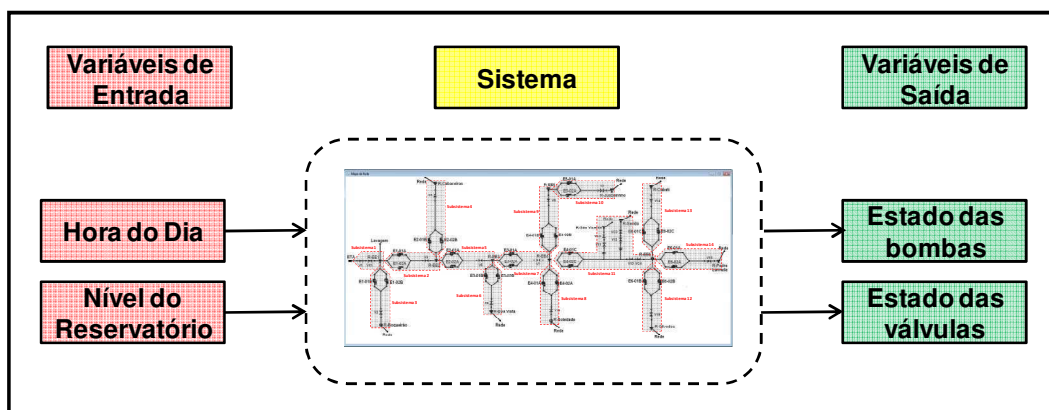


Figura 5.6: Entradas e saídas dos controladores difusos.

5.3.2.1 – Fuzificação das variáveis de entrada e saída

Variável linguística “Instante do Dia”

O ciclo operacional, considerado como sendo de 24 horas, foi dividido em quatro faixas, às quais foram associadas às seguintes funções de pertinência: Madrugada, Dia, Ponta e Noite.

Determinou-se uma faixa de superposição de uma hora entre as funções de pertinência “Dia”, “Ponta” e “Noite”; e para as demais superposições, duas horas (Figura 5.7). Esses valores foram ajustados através de simulações hidráulicas do sistema.

É importante notar que, como a operação constitui um ciclo, a primeira função de pertinência “Madrugada” deve ter superposição com última “Noite”. Para melhor visualização deste fato, é como se as funções de pertinência estivessem desenhadas em uma folha de papel. Unindo-se as duas extremidades do papel, percebe-se que realmente deve existir uma superposição entre elas. Como artifício de contorno para representar essa situação no *Fuzzy Logic Toolbox* do MATLAB, repetiu-se, no início, a função de pertinência “Noite”, renomeada para “R-Noite”; e no fim, a função de pertinência “Madrugada”, renomeada para “R-Madrugada” (Figura 5.7).

Escolheu-se a forma trapezoidal para todas as funções de pertinência devido às características da variável. Escolhem-se funções de pertinência com esse formato quando existe mais de um valor que se pode afirmar que pertence 100% a determinado conjunto difuso. Por exemplo, é bem cômodo afirmar que o intervalo de tempo ente 18 e 19 horas pertence 100% ao conjunto difuso “Noite”, enquanto que valores próximos 17 e 20 horas podem pertencer respectivamente, com diferentes graus de pertinências aos conjuntos difusos “Dia” e “Noite”.

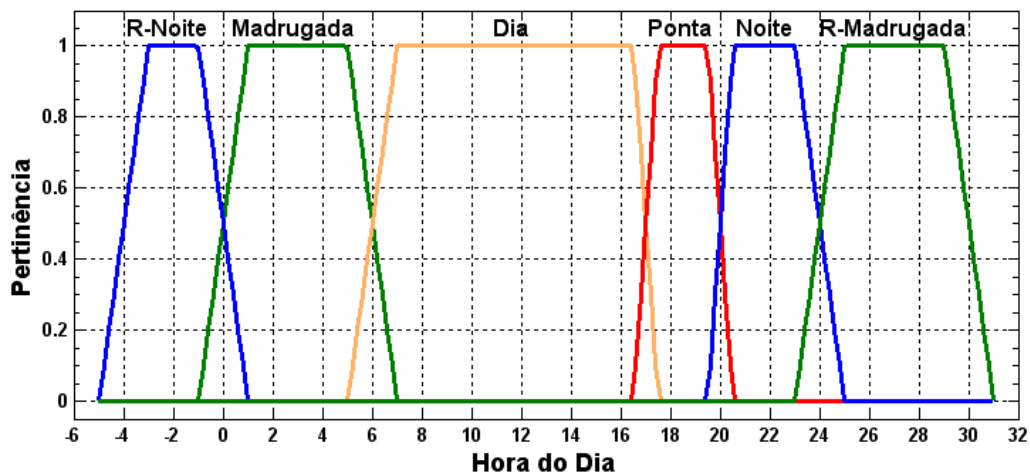


Figura 5.7: Funções de pertinência da variável linguística de entrada “Instante do Dia”.

Dependendo das características da demanda de cada cidade do Sistema Adutor do Cariri, poder-se-ia determinar um número de funções de pertinência diferente de 5, com formas e regiões de superposição diferentes. No entanto, adotou-se uma única configuração na fuzificação desta variável de entrada, já que assumiu-se que a curva de demanda em todo o sistema tem forma semelhante. A Tabela 5.8 mostra os valores dos vértices das funções de pertinências trapezoidais adotados para esta variável.

Tabela 5.8: Valores dos vértices das funções de pertinência da variável linguística de entrada “Instante do Dia”.

Função de pertinência	Valores dos vértices (horas)			
R-Noite	-5:00	-3:00	-1:00	1:00
Madrugada	-1:00	1:00	5:00	7:00
Dia	5:00	7:00	16:30	17:30
Ponta	16:30	17:30	19:30	20:30
Noite	19:30	20:30	23:00	25:00
R- Madrugada	23:00	25:00	29:00	31:00

Variável linguística “Nível”

Na Tabela 5.7, quando, através de simulações hidráulicas do sistema, determinou-se a faixa de operação ideal (ótima) para cada reservatório, automaticamente delimitou-se uma

faixa de nível superior e outra inferior a esta. Para que as regras difusas correspondam exatamente às regras simples fuzificadas, é necessário adotar essas faixas como a divisão do nível em variáveis linguísticas. Portanto, para tornar flexíveis os limites rígidos estabelecidos, a essas faixas foram associadas às seguintes funções de pertinência: S (faixa superior à faixa de operação ótima); O (faixa de operação ótima); I (faixa inferior à faixa de operação ótima).

A divisão do nível em faixas com espessuras e posições diferentes ao longo da altura dos reservatórios, para cada intervalo de tempo que o ciclo operacional foi discretizado, proporciona a divisão da variável linguística “Nível” em quatro variáveis distintas: Nível-Madrugada, Nível-Dia, Nível-Ponta, N-Noite. Portanto, para cada uma delas a fuzificação proverá diferentes funções de pertinência de acordo com os valores estabelecidos para as faixas em cada intervalo de tempo:

- Nível-Madrugada: S-M (faixa superior para o intervalo de tempo “Madrugada”); O-M (faixa de operação ótima para o intervalo de tempo “Madrugada”); I-M (faixa inferior para o intervalo de tempo “Madrugada”);

- Nível-Dia: S-D (faixa superior para o intervalo de tempo “Dia”); O-D (faixa de operação ótima para o intervalo de tempo “Dia”); I-D (faixa inferior para o intervalo de tempo “Dia”);

Nível-Ponta: S-P (faixa superior para o intervalo de tempo “Ponta”); O-P (faixa de operação ótima para o intervalo de tempo “Ponta”); I-P (faixa inferior para o intervalo de tempo “Ponta”);

Nível-Noite: S-N (faixa superior para o intervalo de tempo “Ponta”); O-N (faixa de operação ótima para o intervalo de tempo “Noite”); I-N (faixa inferior para o intervalo de tempo “Noite”);

A forma das funções de pertinência e a sobreposição entre elas foram determinadas de acordo com as características da variável “Nível” e através de simulações hidráulicas do sistema.

Nos intervalos de tempo “Madrugada”, “Dia” e “Ponta”, para as funções de pertinência “O” correspondentes à faixa de operação considerada ótima, adotaram-se formas trapezoidais, pois, como o objetivo é manter o nível dentro desta faixa, então existe uma região com pertinência 100% e nas extremidades, devido à superposição das funções adjacentes, esse valor diminui gradativamente até zero (Figura 5.8 (a)). Quando o intervalo de tempo é “Noite”, o objetivo também é manter o nível dentro da faixa de controle ótima, no

entanto, o centro da faixa é o único valor com pertinência 100%, pois coincide com o nível inicial do reservatório que se deseja recuperar, sendo um dos objetivos da operação. Para este caso, adotou-se uma função de pertinência triangular (Figura 5.8 (b)).

Para as funções de pertinência do tipo “I” e “S” adotaram-se formas trapezoidais e/ou triangulares em todos os intervalos de tempo. Na elaboração das regras simples, as faixas superior e/ou inferior à faixa de operação ótima em muitas situações são coincidentes com as folgas superiores e/ou inferiores dos reservatórios. Quando esta situação ocorre, a forma escolhida para a função de pertinência foi a triangular. Nas regras simples, quando o nível encontra-se na folga superior e/ou inferior, bombas e/ou válvulas devem ser manobradas imediatamente para deter o nível do reservatório. Nas regras difusas, a urgência de executar essas manobras, que são imediatas nas regras simples, varia gradualmente de zero a 100% (limites da folga), sendo traduzida através da correspondente função de pertinência (ver “faixa superior” na Figura 5.8 (a)). Quando as faixas superior e/ou inferior à faixa de operação ótima não coincidem com as folgas, a forma escolhida para a função de pertinência é trapezoidal, o que garante que certa região da função tem pertinência constante de 100% (ver “faixa inferior” da Figura 5.8 (a) e “faixa inferior” e “faixa superior” da Figura 5.8 (b)).

As superposições entre as funções de pertinência foram ajustadas através de simulações. Quanto menor for a superposição mais as regras difusas se aproximam das regras simples. Em contrapartida, uma superposição muito grande diminui a performance das regras em relação aos objetivos pretendidos. A superposição das funções de pertinência consiste em tornar flexíveis os limites rígidos das faixas estabelecidas na Tabela 5.7 e ilustrados na Figura 5.8. As simulações mostraram que as melhores faixas de superposição são as seguintes: cada função de pertinência deve sobrepor a função adjacente em 20%, contados a partir do limite rígido que deu origem a cada função (Figura 5.8). Caso a função de pertinência descreva uma faixa de operação coincidente com uma folga de trabalho superior ou inferior (ver função de pertinência “S” que descreve a faixa superior da Figura 5.8(a)), a sobreposição com a função de pertinência adjacente é 100% da sua amplitude. A seguir encontra-se a fuzificação dos níveis de todos os reservatórios.

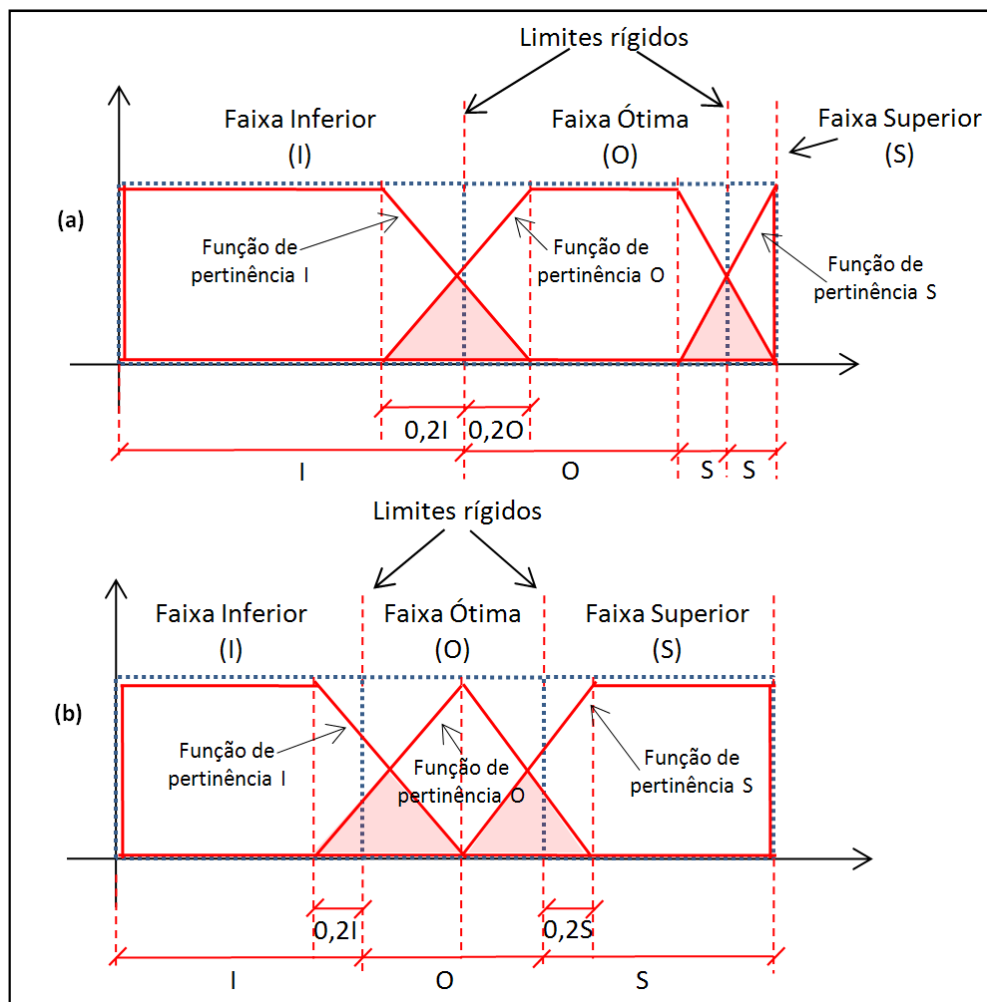


Figura 5.8: Funções de pertinência da variável linguística de entrada "Nível".

Reservatório R-Boqueirão

A Figura 5.9 mostra os gráficos das funções de pertinência do nível do reservatório R-Boqueirão para os quatro intervalos de tempo em que o ciclo operacional foi dividido. A Tabela 5.9 também mostra os valores dos vértices de cada função de pertinência.

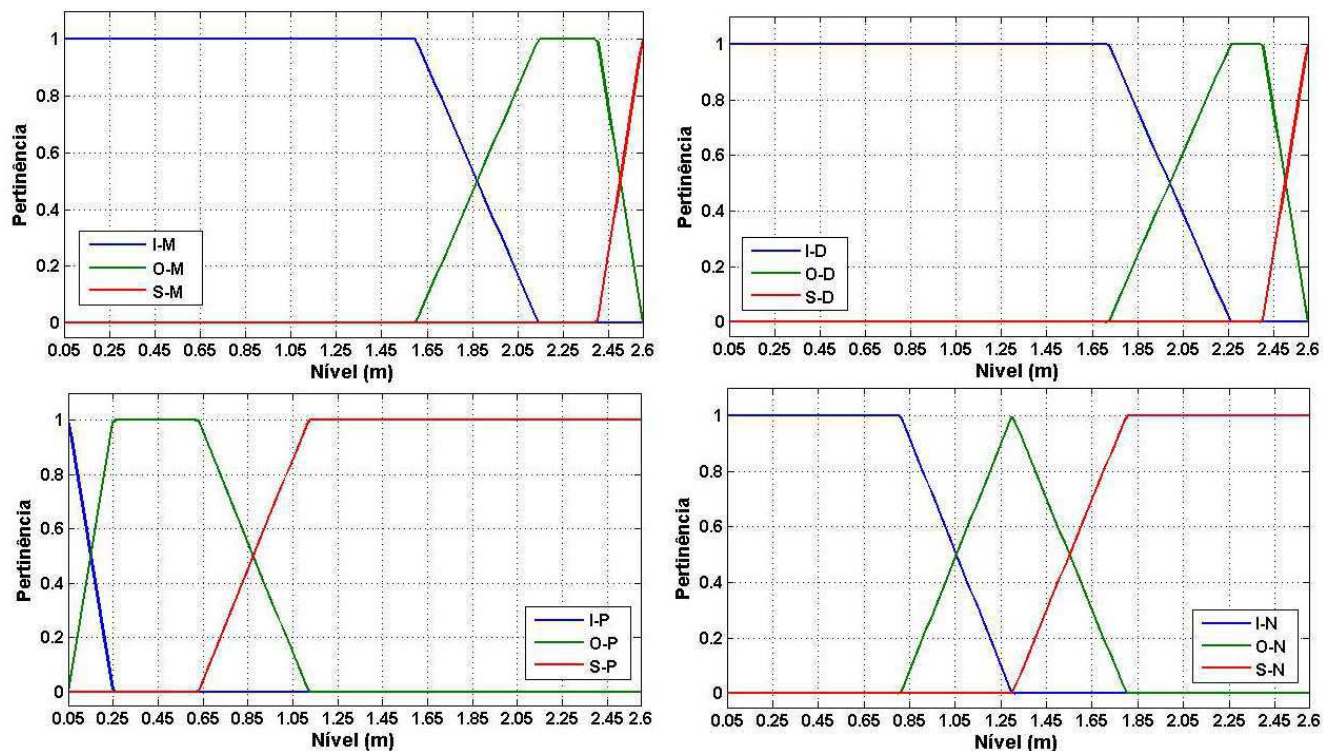


Figura 5.9: Funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-Boqueirão para os quatro intervalos de tempo.

Tabela 5.9: Valores dos vértices das funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-Boqueirão para os quatro intervalos de tempo.

Intervalo	Função de pertinência	Forma	Valores dos vértices (m)			
Madrugada	I-M	Trapezoidal	0,05	0,05	1,60	2,14
	O-M	Trapezoidal	1,60	2,14	2,40	2,60
	S-M	Triangular	2,40	2,60	2,60	-
Dia	I-D	Trapezoidal	0,05	0,05	1,72	2,26
	O-D	Trapezoidal	1,72	2,26	2,40	2,60
	S-D	Triangular	2,40	2,60	2,60	-
Ponta	I-P	Triangular	0,05	0,05	0,25	-
	O-P	Trapezoidal	0,05	0,05	0,63	1,12
	S-P	Trapezoidal	0,63	1,12	2,60	2,60
Noite	I-N	Trapezoidal	0,05	0,05	0,81	1,30
	O-N	Triangular	0,81	1,30	1,80	-
	S-N	Trapezoidal	1,30	1,80	2,60	2,60

Reservatório R-EE6

A fuzificação do nível do reservatório R-EE6 apresenta uma particularidade em relação aos demais. O estado das válvulas VC2 e VC3, que controlam os reservatórios R-São Vicente e R-Seridó, também é uma variável linguística de entrada para este reservatório. Isto ocorre porque no subsistema 11 (Figura 5.3) a bomba E4-01C ou E4-02C abastece os três reservatórios simultaneamente. Neste caso, antes de tomar uma decisão de desligar ou ligar esta bomba, devido à satisfação do nível em R-EE6, primeiro deve-se

consultar o estado das válvulas VC2 ou VC3, para decidir qual deve ser o estado adequado da bomba considerando os níveis dos três reservatórios. Portanto, além do Instante do Dia, Nível-Madrugada, Nível-Dia, Nível-Ponta, N-Noite, o “Estado de VC2 ou VC3” também passa a ser uma variável linguística de entrada para R-EE6.

Devido à natureza estritamente binária da variável “Estado de VC2 ou VC3”, as funções de pertinência a ela atribuídas são “Aberta” e “Fechada” (Figura 5.10). A forma dessas funções é retangular, pois como não existe um estágio possível entre “Aberta” e “Fechada”, devido essas válvulas não permitirem ângulos de abertura diferentes, não tem sentido existir superposição entre elas (a pertinência é sempre 0 ou 1).

A Tabela 5.10 mostra os valores dos vértices de cada função de pertinência do nível do reservatório R-EE6 para os quatro intervalos de tempo em que o ciclo operacional foi dividido. A Figura 5.11 mostra os gráficos das funções de pertinência da variável linguística “Nível”.

As figuras e tabelas com a descrição das funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” para os demais reservatórios encontram-se no Anexo B.

Tabela 5.10: Valores dos vértices das funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-EE6 para os quatro intervalos de tempo.

Intervalo	Função de pertinência	Forma	Valores dos vértices (m)			
Madrugada	I-M	Trapezoidal	0,05	0,05	1,60	2,14
	O-M	Trapezoidal	1,60	2,14	2,40	2,60
	S-M	Triangular	2,40	2,60	2,60	-
Dia	I-D	Trapezoidal	0,05	0,05	1,72	2,26
	O-D	Trapezoidal	1,72	2,26	2,40	2,60
	S-D	Triangular	2,40	2,60	2,60	-
Ponta	I-P	Triangular	0,05	0,05	0,25	-
	O-P	Trapezoidal	0,05	0,05	0,63	1,12
	S-P	Trapezoidal	0,63	1,12	2,60	2,60
Noite	I-N	Trapezoidal	0,05	0,05	0,81	1,30
	O-N	Triangular	0,81	1,30	1,80	-
	S-N	Trapezoidal	1,30	1,80	2,60	2,60

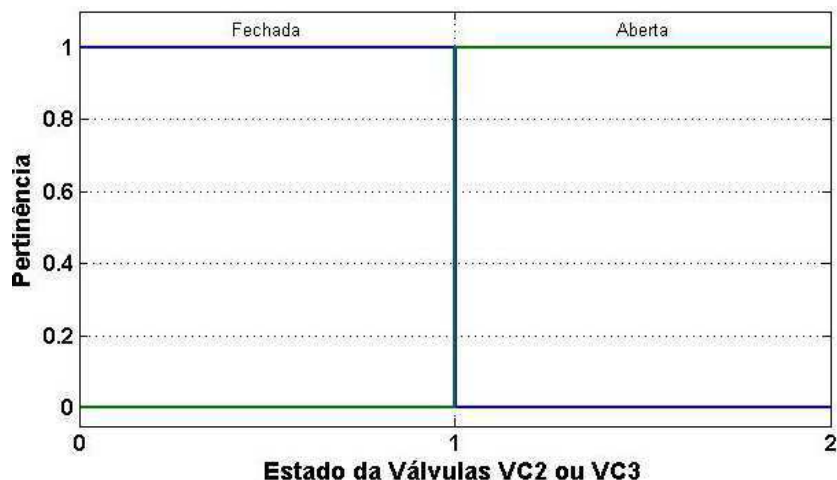


Figura 5.10: Funções de pertinência da variável linguística de entrada “Estado de VC2 ou VC3” para os quatro intervalos de tempo.

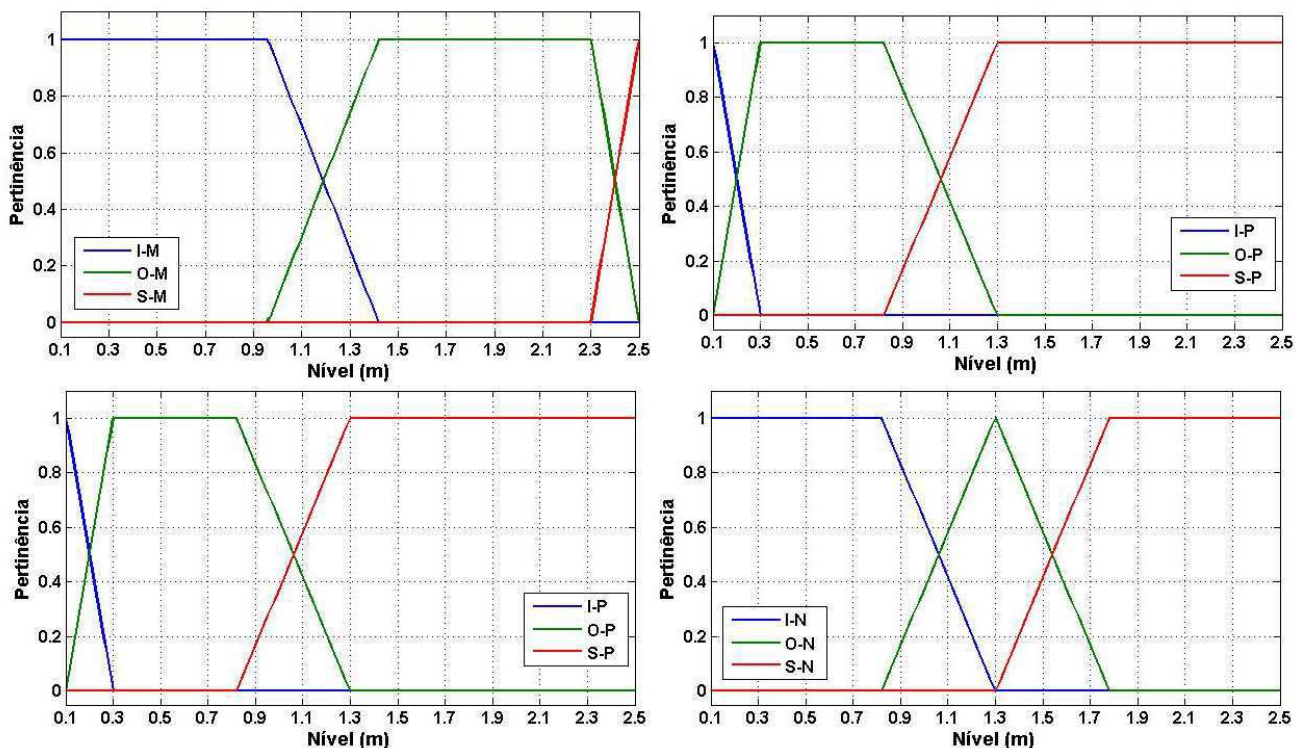


Figura 5.11: Funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-EE6 para os quatro intervalos de tempo.

Variável linguística “Estado de Bomba”

O estado de bomba é uma das variáveis de saída das regras difusas. De acordo com a faixa de operação onde o nível do reservatório se encontra, só existem três possibilidades de manobras para as bombas, já que não há conversores de frequência: ligar, desligar ou permanecer a operação (não realizar manobra alguma). As possibilidades de manobras constituem as três funções de pertinência atribuídas à esta variável: “Desligar”,

“Permanecer” e “Ligar”. Devido à natureza binária da variável, onde não se permitem graduações de estados entre ligada e desligada, não há necessidade de superposição entre as funções de pertinência. Para estas funções adotou-se a forma retangular, onde só existem duas possibilidades de pertinência: 0 ou 100% (Figura 5.12).

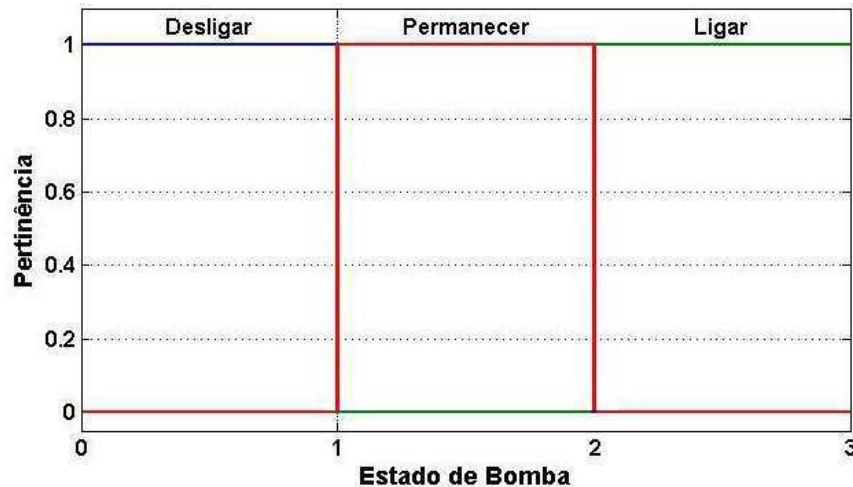


Figura 5.12: Funções de pertinência da variável linguística de entrada “Estado de Bomba” para os quatro intervalos de tempo.

Variável linguística “Estado de Válvula”

A outra variável de saída das regras difusas é o estado de válvula. Para as válvulas também só existem três possibilidades de manobras, já que não há graduações de ângulos de abertura: abrir, fechar ou permanecer a operação (não realizar manobra alguma). As possibilidades de manobras constituem as três funções de pertinência atribuídas à esta variável: “Abrir”, “Permanecer” e “Fechar”. Nesta variável também não há necessidade de superposição das funções de pertinência, às quais atribuiu-se a forma retangular, onde só existem duas possibilidades de pertinência: 0 ou 100% (Figura 5.13).

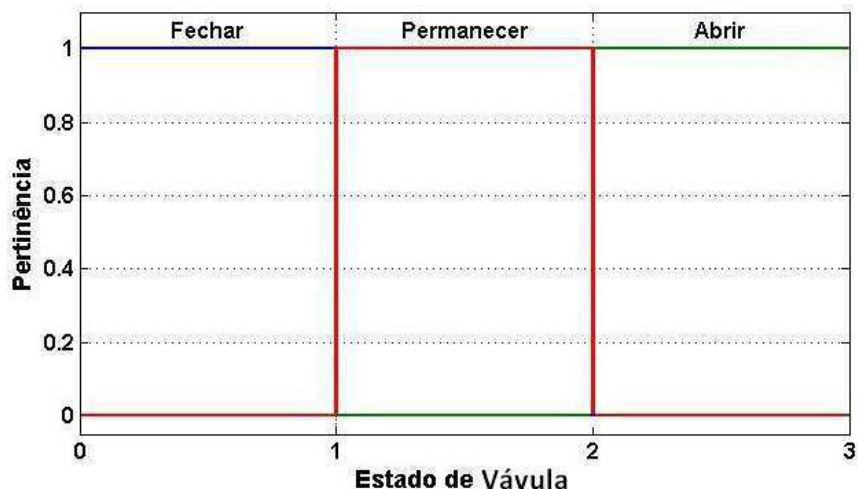


Figura 5.13: Funções de pertinência da variável linguística de entrada “Estado de Válvula” para os quatro intervalos de tempo.

5.3.2.2 – Base de regras e inferência

A estrutura das regras difusas é praticamente a mesma das regras simples usando-se as mesmas sentenças condicionais. A diferença é que, nas regras simples, as condições impostas às variáveis obedeciam limites numéricos rígidos, enquanto que nas regras difusas as sentenças condicionais associam as variáveis através de classes linguísticas (conjuntos difusos) considerando a superposição das funções de pertinência que descreve cada classe.

Analogamente às regras simples, para cada reservatório foram estabelecidas 12 regras de inferência que relacionam as variáveis de entrada às variáveis de saída através das sentenças condicionais. A Tabela 5.11 apresenta a tabela de regras comum à todos os reservatórios, exceto o R-EE6, por motivos justificados mais adiante. Quando a variável de saída for “Estado de Válvula”, os termos “Ligar” e “Desligar” são substituídos pelos termos “Abrir” e “Fechar”, respectivamente.

Tabela 5.11: Regras difusas para todos os reservatórios, exceto R-EE6.

		Instante do Dia			
		Madrugada	Dia	Ponta	Noite
Nível	Faixa Superior (S)	Desligar	Desligar	Desligar	Desligar
	Faixa Ótima (O)	Permanecer	Permanecer	Permanecer	Permanecer
	Faixa Inferior (I)	Ligar	Ligar	Ligar	Ligar

Apesar da aparência simples da tabela de regras, vale salientar que, para cada intervalo de tempo, as faixas de nível (inferior, ótima e superior) variam de espessura e localização nos reservatórios, mudando também a forma, configuração e superposição das funções de pertinência.

As 12 regras de inferência da Tabela 5.11 estão enunciadas a seguir:

1 – **SE** o Instante do Dia é “Madrugada” **E** Nível do reservatório é “Faixa Superior”, **ENTÃO** desliga/fecha bomba/válvula;

2 – **SE** o Instante do Dia é “Madrugada” **E** Nível do reservatório é “Faixa Ótima”, **ENTÃO** permanece o estado da bomba/válvula;

3 – **SE** o Instante do Dia é “Madrugada” **E** Nível do reservatório é “Faixa Inferior”, **ENTÃO** liga/abre bomba/válvula;

4 – **SE** o Instante do Dia é “Dia” **E** Nível do reservatório é “Faixa Superior”, **ENTÃO** desliga/fecha bomba/válvula;

5 – **SE** o Instante do Dia é “Dia” **E** Nível do reservatório é “Faixa Ótima”, **ENTÃO** permanece o estado da bomba/válvula;

6 – **SE** o Instante do Dia é “Dia” **E** Nível do reservatório é “Faixa Inferior”, **ENTÃO** liga/abre bomba/válvula;

7 – **SE** o Instante do Dia é “Ponta” **E** Nível do reservatório é “Faixa Superior”, **ENTÃO** desliga/fecha bomba/válvula;

8 – **SE** o Instante do Dia é “Ponta” **E** Nível do reservatório é “Faixa Ótima”, **ENTÃO** permanece o estado da bomba/válvula;

9 – **SE** o Instante do Dia é “Ponta” **E** Nível do reservatório é “Faixa Inferior”, **ENTÃO** liga/abre bomba/válvula;

10 – **SE** o Instante do Dia é “Noite” **E** Nível do reservatório é “Faixa Superior”, **ENTÃO** desliga/fecha bomba/válvula;

11 – **SE** o Instante do Dia é “Noite” **E** Nível do reservatório é “Faixa Ótima”, **ENTÃO** permanece o estado da bomba/válvula;

12 – **SE** o Instante do Dia é “Noite” **E** Nível do reservatório é “Faixa Inferior”, **ENTÃO** liga/abre bomba/válvula;

O reservatório R-EE6, além de ter o estado das válvulas VC2 e VC3 como uma variável de entrada, é o único que possui duas variáveis de saída: estado da bomba E4-01C ou E4-02C e estado da válvula VC4. Para este reservatório foram estabelecidas 24 regras de inferência, expressas na Tabela 5.12 e enunciadas a seguir:

1 – **SE** o Instante do Dia é “Madrugada” **E** Nível do reservatório é “Faixa Superior” **E** VC3 **OU** VC4 está aberta, **ENTÃO** fecha a válvula VC4 **E** liga a bomba E4-01C ou E4-02C;

2 – **SE** o Instante do Dia é “Madrugada” **E** Nível do reservatório é “Faixa Superior” **E** VC3 **E** VC4 estão fechadas, **ENTÃO** fecha a válvula VC4 **E** desliga a bomba E4-01C ou E4-02C;

3 – **SE** o Instante do Dia é “Madrugada” **E** Nível do reservatório é “Faixa Ótima” **E** VC3 **OU** VC4 está aberta, **ENTÃO** permanece o estado da válvula VC4 **E** permanece o estado da bomba E4-01C ou E4-02C;

4 – **SE** o Instante do Dia é “Madrugada” **E** Nível do reservatório é “Faixa Ótima” **E** VC3 **E** VC4 está fechada, **ENTÃO** permanece o estado da válvula VC4 **E** permanece o estado da bomba E4-01C ou E4-02C;

5 – **SE** o Instante do Dia é “Madrugada” **E** Nível do reservatório é “Faixa Inferior” **E** VC3 **OU** VC4 está aberta, **ENTÃO** abre a válvula VC4 **E** liga a bomba E4-01C ou E4-02C;

6 – **SE** o Instante do Dia é “Madrugada” **E** Nível do reservatório é “Faixa Inferior” **E** VC3 **E** VC4 estão fechadas, **ENTÃO** abre a válvula VC4 **E** liga a bomba E4-01C ou E4-02C;

Tabela 5.12: Regras para o reservatório R-EE6.

		Instante do Dia			
		Madrugada	Dia	Ponta	Noite
Nível	Faixa Superior (S)	Se VC2 ou VC3 = Aberta: VC4 = Fechar Bomba = Ligar	Se VC2 ou VC3 = Aberta: VC4 = Fechar Bomba = Ligar	Se VC2 ou VC3 = Aberta: VC4 = Fechar Bomba = Ligar	Se VC2 ou VC3 = Aberta: VC4 = Fechar Bomba = Ligar
		Se VC2 e VC3 = Fechada: VC4 = Fechar Bomba = Desligar	Se VC2 e VC3 = Fechada: VC4 = Fechar Bomba = Desligar	Se VC2 e VC3 = Fechada: VC4 = Fechar Bomba = Desligar	Se VC2 e VC3 = Fechada: VC4 = Fechar Bomba = Desligar
	Faixa Ótima (O)	Se VC2 ou VC3 = Aberta: VC4 = Permanece Bomba = Permanece	Se VC2 ou VC3 = Aberta: VC4 = Permanece Bomba = Permanece	Se VC2 ou VC3 = Aberta: VC4 = Permanece Bomba = Permanece	Se VC2 ou VC3 = Aberta: VC4 = Permanece Bomba = Permanece
		Se VC2 e VC3 = Fechada: VC4 = Permanece Bomba = Permanece	Se VC2 e VC3 = Fechada: VC4 = Permanece Bomba = Permanece	Se VC2 e VC3 = Fechada: VC4 = Permanece Bomba = Permanece	Se VC2 e VC3 = Fechada: VC4 = Permanece Bomba = Permanece
	Faixa Inferior (I)	Se VC2 ou VC3 = Aberta: VC4 = Abrir Bomba = Ligar	Se VC2 ou VC3 = Aberta: VC4 = Abrir Bomba = Ligar	Se VC2 ou VC3 = Aberta: VC4 = Abrir Bomba = Ligar	Se VC2 ou VC3 = Aberta: VC4 = Abrir Bomba = Ligar
		Se VC2 e VC3 = Fechada: VC4 = Abrir Bomba = Ligar	Se VC2 e VC3 = Fechada: VC4 = Abrir Bomba = Ligar	Se VC2 e VC3 = Fechada: VC4 = Abrir Bomba = Ligar	Se VC2 e VC3 = Fechada: VC4 = Abrir Bomba = Ligar

7 – **SE** o Instante do Dia é “Dia” **E** Nível do reservatório é “Faixa Superior” **E** VC3 **OU** VC4 está aberta, **ENTÃO** fecha a válvula VC4 **E** liga a bomba E4-01C ou E4-02C;

8 – **SE** o Instante do Dia é “Dia” **E** Nível do reservatório é “Faixa Superior” **E** VC3 **E** VC4 estão fechadas, **ENTÃO** fecha a válvula VC4 **E** desliga a bomba E4-01C ou E4-02C;

9 – **SE** o Instante do Dia é “Dia” **E** Nível do reservatório é “Faixa Ótima” **E** VC3 **OU** VC4 está aberta, **ENTÃO** permanece o estado da válvula VC4 **E** permanece o estado da bomba E4-01C ou E4-02C;

10 – **SE** o Instante do Dia é “Dia” **E** Nível do reservatório é “Faixa Ótima” **E** VC3 **E** VC4 está fechada, **ENTÃO** permanece o estado da válvula VC4 **E** permanece o estado da bomba E4-01C ou E4-02C;

11 – **SE** o Instante do Dia é “Dia” **E** Nível do reservatório é “Faixa Inferior” **E** VC3 **OU** VC4 está aberta, **ENTÃO** abre a válvula VC4 **E** liga a bomba E4-01C ou E4-02C;

12 – **SE** o Instante do Dia é “Dia” **E** Nível do reservatório é “Faixa Inferior” **E** VC3 **E** VC4 estão fechadas, **ENTÃO** abre a válvula VC4 **E** liga a bomba E4-01C ou E4-02C;

13 – **SE** o Instante do Dia é “Ponta” **E** Nível do reservatório é “Faixa Superior” **E** VC3 **OU** VC4 está aberta, **ENTÃO** fecha a válvula VC4 **E** liga a bomba E4-01C ou E4-02C;

14 – **SE** o Instante do Dia é “Ponta” **E** Nível do reservatório é “Faixa Superior” **E** VC3 **E** VC4 estão fechadas, **ENTÃO** fecha a válvula VC4 **E** desliga a bomba E4-01C ou E4-02C;

15 – **SE** o Instante do Dia é “Ponta” **E** Nível do reservatório é “Faixa Ótima” **E** VC3 **OU** VC4 está aberta, **ENTÃO** permanece o estado da válvula VC4 **E** permanece o estado da bomba E4-01C ou E4-02C;

16 – **SE** o Instante do Dia é “Ponta” **E** Nível do reservatório é “Faixa Ótima” **E** VC3 **E** VC4 está fechada, **ENTÃO** permanece o estado da válvula VC4 **E** permanece o estado da bomba E4-01C ou E4-02C;

17 – **SE** o Instante do Dia é “Ponta” **E** Nível do reservatório é “Faixa Inferior” **E** VC3 **OU** VC4 está aberta, **ENTÃO** abre a válvula VC4 **E** liga a bomba E4-01C ou E4-02C;

18 – **SE** o Instante do Dia é “Ponta” **E** Nível do reservatório é “Faixa Inferior” **E** VC3 **E** VC4 estão fechadas, **ENTÃO** abre a válvula VC4 **E** liga a bomba E4-01C ou E4-02C;

19 – **SE** o Instante do Dia é “Noite” **E** Nível do reservatório é “Faixa Superior” **E** VC3 **OU** VC4 está aberta, **ENTÃO** fecha a válvula VC4 **E** liga a bomba E4-01C ou E4-02C;

20 – **SE** o Instante do Dia é “Noite” **E** Nível do reservatório é “Faixa Superior” **E** VC3 **E** VC4 estão fechadas, **ENTÃO** fecha a válvula VC4 **E** desliga a bomba E4-01C ou E4-02C;

21 – **SE** o Instante do Dia é “Noite” **E** Nível do reservatório é “Faixa Ótima” **E** VC3 **OU** VC4 está aberta, **ENTÃO** permanece o estado da válvula VC4 **E** permanece o estado da bomba E4-01C ou E4-02C;

22 – **SE** o Instante do Dia é “Noite” **E** Nível do reservatório é “Faixa Ótima” **E** VC3 **E** VC4 está fechada, **ENTÃO** permanece o estado da válvula VC4 **E** permanece o estado da bomba E4-01C ou E4-02C;

23 – **SE** o Instante do Dia é “Noite” **E** Nível do reservatório é “Faixa Inferior” **E** VC3 **OU** VC4 está aberta, **ENTÃO** abre a válvula VC4 **E** liga a bomba E4-01C ou E4-02C;

24 – **SE** o Instante do Dia é “Noite” **E** Nível do reservatório é “Faixa Inferior” **E** VC3 **E** VC4 estão fechadas, **ENTÃO** abre a válvula VC4 **E** liga a bomba E4-01C ou E4-02C;

Utilizou-se o método inferência “máximo-mínimo” para relacionar as variáveis de entrada às de saída através das regras difusas estabelecidas. A escolha desta técnica foi devido à mesma ser bastante conhecida e amplamente utilizada em trabalhos científicos desse gênero.

5.3.2.3 – Desfuzificação

O método de desfuzificação escolhido no Fuzzy Logic Toolbox do MATLAB foi o Centro-da-Área (C-o-A), que consiste no cálculo do centro de gravidade do conjunto difuso de saída, obtido no processo de inferência.

5.3.3 – Refinamento e validação das regras

Durante o processo de construção do conjunto de regras simples e difusas, simularam-se várias situações de operação do sistema e níveis iniciais de reservatórios no modelo hidráulico EPANET2 e analisou-se, para cada intervalo de tempo em que o ciclo operacional foi dividido, qual a faixa de controle ideal (ótima) a se adotar para cada reservatório, obtendo-se assim os valores mostrados na Tabela 5.7 e usados nas regras extraídas, além de se avaliar a consistência das operações sugeridas.

5.3.4 – Geração e simulação de cenários

Após a construção das regras simples e das regras difusas, com o intuito de avaliar seu desempenho perante o efeito das incertezas presentes, principalmente nas variáveis de

entrada e elementos do sistema, foram gerados e simulados vários cenários. A principal fonte de incerteza existente no Sistema Adutor do Cariri é a demanda de água das cidades abastecidas. Portanto, os cenários foram gerados a partir da perturbação da demanda de todas as cidades.

Na aplicação da simulação Monte Carlo é essencial o conhecimento do perfil da função de distribuição de probabilidade da variável analisada, o seu valor médio e o seu desvio padrão, o intervalo no qual os valores gerados devem estar inseridos e o número mínimo de cenários gerados para que a simulação seja considerada representativa.

O perfil função de distribuição de probabilidade da variação horária da demanda pode ser identificado através de uma análise estatística de uma série de dados observados, medidos ou inferidos. No entanto, não foi possível conseguir, junto à Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA), essas informações, pois o Sistema Adutor do Cariri não dispõe de instalações para realizar esse tipo de medição. Também não foi encontrado na literatura qualquer trabalho que trate da distribuição da variação horária da demanda.

Na ausência de informações sobre o sistema modelado, casos na literatura e também por ser uma hipótese bastante plausível, admitiu-se que a função de distribuição de probabilidade da variação horária da demanda é a Normal.

Dados apresentados por SILVA (2003) mostram que o desvio padrão da variação horária da demanda de vários reservatórios de distribuição do Sistema Adutor Metropolitano de São Paulo em todas as estações do ano é em torno de 10% da média. Nas cidades abastecidas pelo Sistema Adutor do Cariri, espera-se que as variações sejam menores, em decorrência dos padrões de atividades desenvolvidas e costumes da população, dos quais não se espera muita variabilidade como em uma cidade do porte de São Paulo. Portanto, assumiu-se 10% da média como um valor realista para o desvio padrão.

Através da Equação 4.4, apresentada por SOBOL (1994), calculou-se o número mínimo de cenários a ser gerados. O erro ϵ da equação, que representa o erro total admissível para os valores gerados, foi assumido como sendo de 1%. Portanto, o número mínimo de cenários a serem gerados e simulados é 900.

Nos experimentos realizados foram gerados 1000 cenários de demanda para cada cidade, 100 a mais do que o mínimo necessário estabelecido por SOBOL (1994). O critério adotado foi o seguinte: inicialmente assumiu-se um perfil de curva de demanda média para todas as cidades, baseado nas características das atividades e costumes da população (Figura 5.4); para cada valor médio do consumo horário das curvas de demanda gerou-se simultaneamente 1000 valores; cada curva de demanda foi constituída pela ordem de

geração dos valores. Desta forma, as curvas de demanda média, que assumiu-se serem as mesmas para todas as cidades, foram perturbadas de forma independente em cada cidade. A Figura 5.14 mostra 250 dos 1000 cenários de demanda gerados para a cidade de Boqueirão. A linha azul e a linha vermelha foram traçadas, respectivamente, a partir dos máximos e mínimos valores gerados para cada hora; a linha preta é a curva de demanda média adotada para todas as cidades; as demais linhas representam cenários gerados. A dinâmica do processo de geração de cenários e simulação hidráulica de cada um deles está descrita no Capítulo 4, na Figura 4.8.

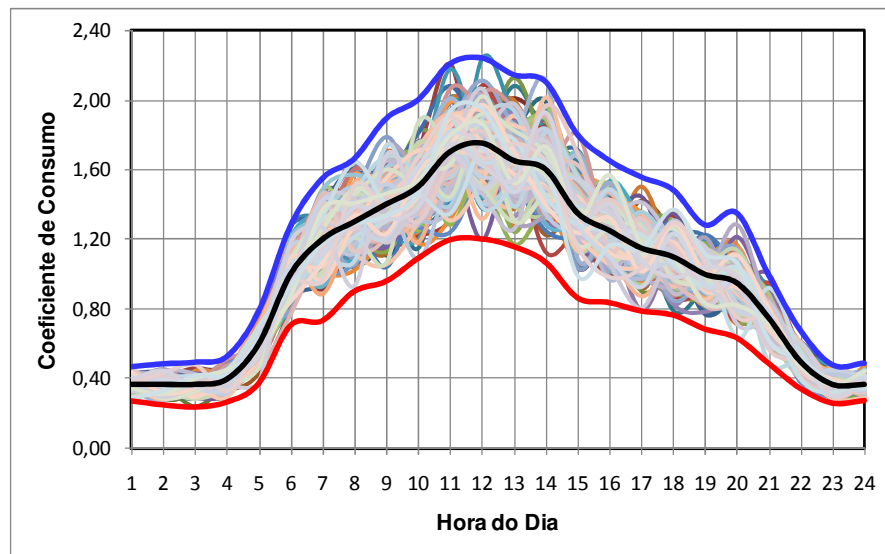


Figura 5.14: Cenários de demanda gerados para a cidade de Boqueirão.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E DICUSSÃO

6.1 – Metodologia para construção de regras

A aplicação da metodologia sugerida ao Sistema Adutor do Cariri mostra que, através da análise do comportamento da demanda, da configuração topológica e da relação entre os elementos do sistema e dos fatores operacionais que regem a operação, é possível extrair, de forma simples, regras de operação que agreguem propósitos multi-objetivos.

Apesar de, em um sistema de abastecimento de água, as relações entre as variáveis de entrada, os efeitos das manobras operacionais e as variáveis de saída serem extremamente não-lineares, ficou evidente que a operação pode ser inferida através da observação das ações “causa-efeito” do sistema, sem envolver as equações dos processos físicos que regem seu equilíbrio hidráulico.

O principal condicionante para a simplicidade da construção das regras é a relação entre o controle de bombas e válvulas e os limites hidráulicos do escoamento (limites máximos e mínimos de pressão e velocidade) e dos níveis de operação dos reservatórios. Através da escolha de manobras mais adequadas a serem executadas nestes elementos para cada momento é possível sugerir estratégias de operação obedecendo aos limites operacionais do sistema, sem necessidade da sua modelagem hidráulica rigorosa. Dessa forma, as regras funcionam como um elemento regulador, organizando e harmonizando as ações de operação sobre bombas e válvulas, de forma que os objetivos desejados para a operação sejam alcançados sem infringir os limites operacionais do sistema.

Apesar de a operação recomendada pelas regras independer do modelo hidráulico, o uso desta ferramenta é essencial para análise e refinamento das regras, principalmente para sistemas mais complexos. Com o modelo hidráulico pode-se simular a ocorrência de inúmeras situações possíveis de ocorrer, sendo possível avaliar se as regras estão adequadas a essas situações.

Nas regras extraídas, a discretização do sistema em subsistemas, a divisão do ciclo operacional em intervalos de tempo e a determinação de faixas de controle ótimas, que variam de amplitude e posição nos reservatórios ao longo do dia, são técnicas que lhes

proporcionam a acomodação das manobras de forma a conduzir a operação a alcançar os objetivos estabelecidos.

A simplicidade do processo de concepção e da estrutura das regras permite sua fácil compreensão e manipulação, sendo bastante flexíveis a ampliações e alterações topológicas no sistema e inclusão/exclusão de objetivos e variáveis. Esta é uma grande vantagem que as regras apresentam em relação aos modelos de otimização apresentados no Capítulo 3. Estes modelos são pouco flexíveis a ampliações, alterações topológicas e inclusão de novos objetivos, muito dependentes do conhecimento das características físicas do sistema, pouco robustos na presença de incertezas, além do difícil entendimento do arcabouço matemático que são concebidos. A eficiência e robustez das regras não estão vinculadas à modelagem hidráulica rigorosa do sistema, enquanto os modelos matemáticos exigem esse rigor para que consigam encontrar soluções otimizadas. As regras, apesar de não garantirem encontrar a solução ótima do sistema, sugerem soluções operacionais bastante satisfatórias, com significativas melhorias da performance hidráulica e energética dos sistemas.

6.2 – Regras simples

Apesar da sua extensão e da quantidade de cidades abastecidas, o Sistema Adutor do Cariri tem uma topologia relativamente simples. Os conjuntos elevatórios possuem apenas duas bombas, uma de operação e outra reserva, sendo que nenhuma bomba possui conversor de frequência. As válvulas não possuem estágios de abertura diferentes, funcionando apenas aberta ou fechada. A forma como o sistema foi concebido não permite a existência de problemas de pressão e velocidade nas tubulações, já que em todos os recalques, apenas uma bomba é acionada por vez.

Devido a essas características, não é possível explorar todas as potencialidades que a metodologia de elaboração de regras contempla. As regras para a operação do Sistema Adutor do Cariri foram elaboradas considerando apenas os estados “ligada” e “desligada” para as bombas, “fechada” e “aberta” para as válvulas e os limites máximos e mínimos dos reservatórios.

A metodologia permite incorporar outras variáveis de decisão, presentes em sistemas mais complexos, como bombas de rotação variável (conversores de frequência), válvulas com múltiplas possibilidades de ângulos de abertura, limites de pressão e velocidade, elevatórias com mais de uma bomba de trabalho, etc.

As alternativas de operação propostas para o Sistema Adutor do Cariri contemplam os seguintes objetivos: atendimento da demanda de abastecimento com fornecimento contínuo de água; redução do custo operacional energético, fazendo o gerenciamento adequado do bombeamento nos horários de ponta e fora de ponta; preservação da vida útil dos equipamentos, com menor número de acionamentos/desligamentos (chaveamentos) das bombas e válvulas; e recuperação das condições iniciais do sistema ao final de um ciclo de operação.

Outros objetivos previstos na metodologia e que, devido às características do Sistema Adutor do Cariri, não foram contemplados são: redução das perdas de água através do controle de pressão no sistema; atendimento aos limites operacionais de pressão de abastecimento e velocidade do fluxo nas tubulações.

A análise das simulações dos cenários gerados a partir da perturbação da demanda, via simulação Monte Carlo, mostra que as estratégias de operação sugeridas pelo conjunto de regras são sempre robustas e com desempenho bastante satisfatório, obedecendo fielmente aos limites operacionais e contemplando os objetivos traçados pela metodologia e consolidados pelas regras.

6.2.1 – Atendimento à demanda

O objetivo prioritário na operação de qualquer sistema de abastecimento é o atendimento à demanda de água. Em todos os cenários de demanda gerados e simulados para o Sistema Adutor do Cariri este objetivo foi plenamente satisfeito. Para quaisquer condições iniciais simuladas e analisadas em cada reservatório, as regras sempre recomendaram operações consistentes e eficientes.

A Figura 6.1 apresenta o comportamento do nível de alguns reservatórios de acordo com a operação sugerida pelas regras para diferentes cenários de demanda simulados. As linhas horizontais vermelhas e verdes, na parte superior e inferior dos gráficos, indicam respectivamente os níveis máximos e mínimos de operação e controle estabelecidos para cada reservatório. O perfil de nível representado pela linha preta é a simulação do sistema com a curva de demanda média adotada para todos os reservatórios de distribuição. Para evitar uma grande quantidade de figuras ao longo do texto, os gráficos para os demais reservatórios encontram-se na Figura C.1, no Anexo C.

Os gráficos mostram que, mesmo com a divisão do ciclo operacional em intervalos de tempo e as faixas de controle definidas para os reservatórios terem sido ajustadas de acordo com a curva de demanda média assumida, as regras continuam sugerindo estratégias de operação consistentes, contemplando todos os objetivos estabelecidos, para

outros possíveis cenários de demanda. A permanência do nível de cada reservatório entre os níveis máximos e mínimos de controle estabelecidos assegura que em nenhum momento ocorrerá colapso na operação, ou seja, não há transbordamento nem esvaziamento dos reservatórios, sendo o objetivo de atendimento à demanda plenamente satisfeito.

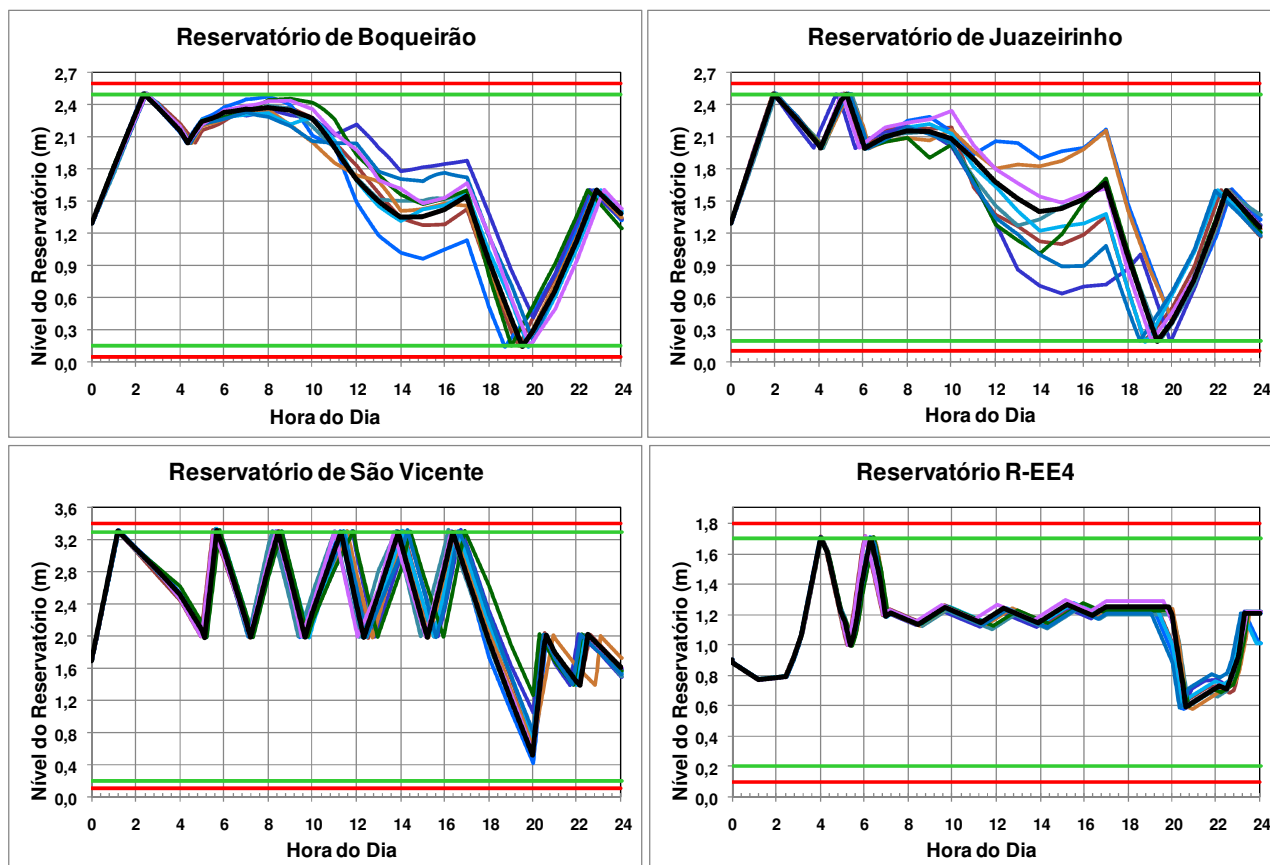


Figura 6.1: Comportamento do nível de alguns reservatórios para as estratégias de operação sugeridas perante diferentes cenários de demanda.

O comportamento típico do nível dos reservatórios apresenta diferentes aspectos, que são função da forma como os reservatórios recebem e transferem água e das condições que as regras impõem ao longo do ciclo operacional. No Sistema Adutor do Cariri os reservatórios apresentam três aspectos diferentes de comportamento de níveis: a) os reservatórios que são abastecidos diretamente por bombas e transferem água para a rede de distribuição: R-Boqueirão e R-Juazeirinho (Figura 6.1), R-Cabaceiras, R-Boa Vista, R-Soledade, R-Cubatí, R-Pedra Lavrada e R-Olivedos (C.1, Anexo C); b) os reservatórios que são abastecidos indiretamente por bombas, mas operados através da manobra de válvulas e transferem água para a rede de distribuição: R-São Vicente (Figura 6.1) e R-Seridó (C.1, Anexo C); c) e os reservatórios de rebombeamento que são abastecidos por bombas ou por gravidade e transferem água para outros reservatórios (de distribuição ou de

rebombeamento): R-EE4 (Figura 6.1), R-EE1 (abastecido por gravidade), R-EE2, R-EE3, R-EE5 e R-EE6 (C.1, Anexo C).

O comportamento do nível para diferentes cenários de demanda indica que na maioria dos reservatórios de distribuição (por exemplo, Boqueirão, Juazeirinho) o efeito da perturbação da demanda sobre a operação sugerida causa uma maior variabilidade no comportamento dos níveis, enquanto que nos reservatórios de rebombeamento (por exemplo, R-EE4) esses efeitos são menos influentes.

É importante observar que o perfil da operação sugerida para cada cenário de demanda obedece fielmente à arquitetura proposta no procedimento metodológico de construção de regras. No primeiro e segundo intervalos de tempo (00:00 às 06:00 e 06:00 às 17:00 horas) observa-se que as operações sugeridas pelas regras buscam manter o nível dos reservatórios sempre elevados, de forma a chegar no final de cada intervalo com o maior valor possível e dentro da faixa de controle que foi estabelecida, com a finalidade de manter os reservatórios cheios. No segundo intervalo de tempo, devido ao consumo de água ser muito alto na maioria dos reservatórios de distribuição, mesmo que as bombas que abastecem os reservatórios permaneçam ligadas não se consegue elevar os níveis ao máximo (Figura 6.1: reservatórios de Boqueirão e Juazeirinho; C.1, Anexo C). Ainda assim, as regras sugerem operações de forma que, no final deste intervalo (início do horário de ponta), os níveis estejam o mais alto possível, para que as bombas possam ser desligadas por mais tempo no intervalo seguinte. Os reservatórios controlados por manobras de válvulas e abastecidos indiretamente pelas bombas (R-São Vicente e R-Seridó) apresentam comportamentos diferentes dos demais, mas sempre mantêm os níveis em um patamar elevado de forma que garanta o atendimento à demanda. No último intervalo de tempo o nível inicial dos reservatórios são recuperados e estabilizam dentro da faixa de 60 cm (folga de ± 30 cm em relação ao nível inicial) estabelecida.

As análises feitas neste tópico são estendidas aos demais reservatórios, cujos gráficos são apresentados na Figura C.1 do Anexo C.

6.2.2 – Chaveamento de bombas e válvulas

O número de chaveamentos de bombas e válvulas é sempre pequeno nas operações sugeridas pelas regras e distribuído de forma que não haja manobras em pequenos intervalos de tempo. No último intervalo de tempo o número de chaveamento pode aumentar de forma significativa se a faixa de controle estabelecida para recuperação do nível inicial for excessivamente estreita. A recomendação é que a faixa de controle nos demais intervalos de tempo também seja bem dimensionada de forma a não provocar o

aumento deste número. Os gráficos da Figuras 6.2 mostram o estado de algumas bombas e válvulas para o cenário de demanda média assumido. As demais bombas e válvulas do sistema também apresentam um baixo número de chaveamentos e seus gráficos para o cenário de demanda média estão apresentados na Figura C.2 do Anexo C. Quem determina quanto tempo uma bomba ou válvula permanece ligada ou desligada, aberta ou fechada são as espessuras das faixas de controle ótimas em cada intervalo de tempo, as características da demanda e o horário de ponta. As regras buscam sugerir operações com menor número possível de manobras e evitar, dentro do possível, manobras de operação em curtos intervalos de tempo.

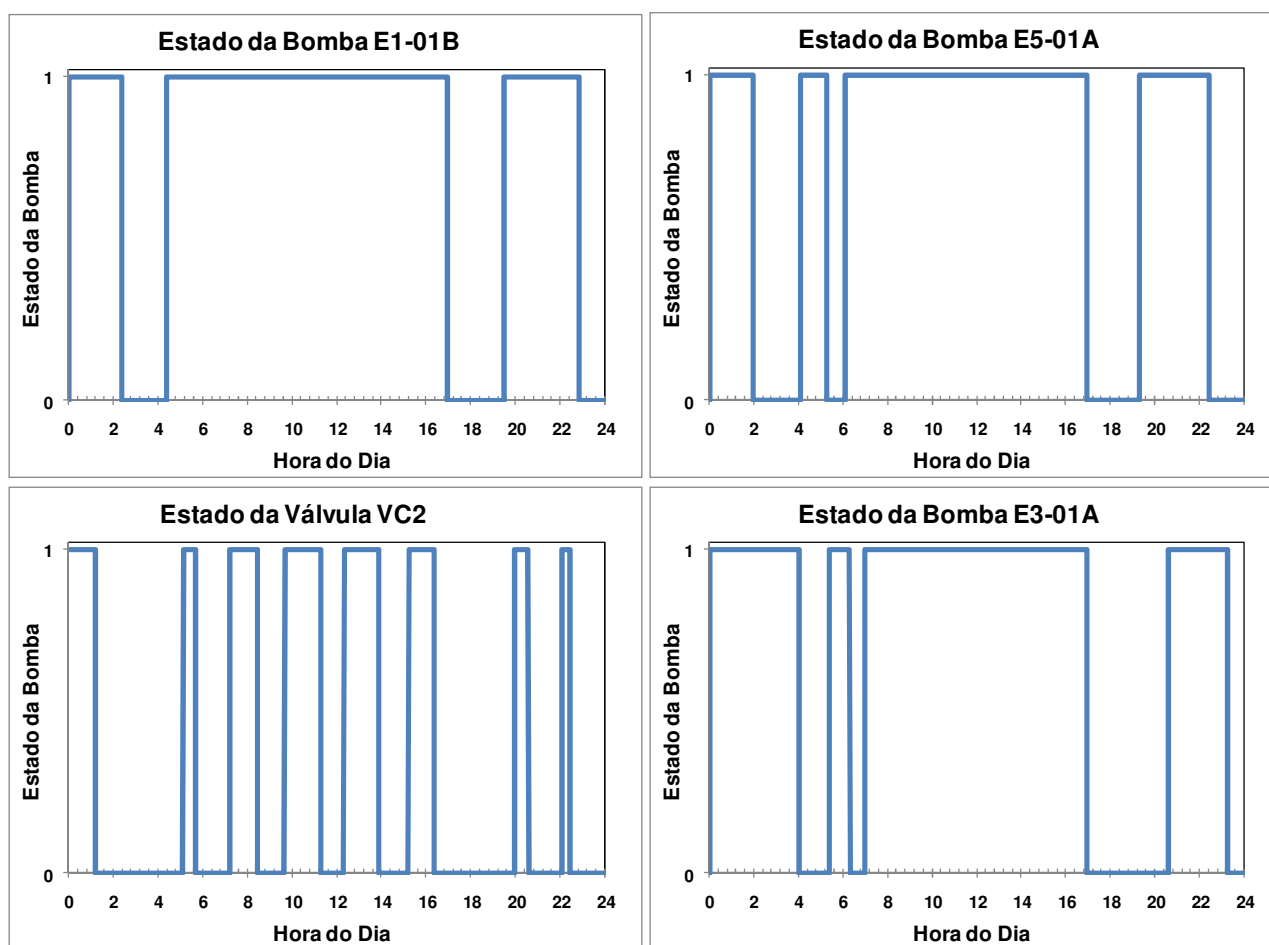


Figura 6.2: Perfil da operação de bombas e válvulas para a curva de demanda média adotada.

6.2.3 – Redução do custo energético

No terceiro intervalo (17:00 às 20:00 horas), onde se concentra o horário de tarifa de energia elétrica elevada (horário de ponta) os reservatórios esvaziam e podem atingir o nível

mínimo de controle estabelecido, no momento em que começam a encher novamente (Figuras 6.1 e C.1 do Anexo C).

Isto significa que as bombas que os abastecem foram desligadas para reduzir o consumo de energia no horário de ponta e são religadas quando um reservatório, por elas abastecido, atinge o nível mínimo de controle estabelecido para o intervalo. Nos reservatórios de rebombeamento, como o R-EE4 (Figura 6.1), que são abastecidos por bombas e transferem água para outros reservatórios, os seus níveis podem se manter constantes neste intervalo, o que significa que as bombas que abastecem e retiram água do reservatório permanecem desligadas.

Os gráficos das Figuras 6.2 e C.2 do Anexo C mostram com clareza que as regras propõem operações onde as bombas e válvulas passam todo o horário de ponta (tarifa de energia elevada) ou parte dele desligadas, o que implica na redução do custo com energia elétrica. Isso se verifica nas operações sugeridas para todos os cenários simulados.

6.2.4 – Recuperação das condições iniciais do sistema

Na Figura 6.1 pode-se observar que no último intervalo (20:00 às 24:00), quando se deseja que as condições iniciais do sistema sejam recuperadas, a operação busca atender este objetivo dentro da faixa de controle estabelecida. É importante que o sistema recupere seu estado inicial para que o procedimento operacional adotado possa ser reproduzido nos ciclos subsequentes. Quanto mais estreita for a faixa de controle ótima definida para este intervalo de tempo, mais precisa será a recuperação dos níveis iniciais dos reservatórios. No entanto, isto provoca o aumento do número de chaveamentos de bombas e válvulas na operação. A faixa adotada, de mais ou menos 30 centímetros em torno do nível inicial, se mostrou satisfatória, pois não causa aumento considerável no número de chaveamentos e proporciona uma boa aproximação do nível final ao nível inicial.

6.3 – Regras difusas

As regras difusas, emanadas das regras simples a partir da aplicação das técnicas da Lógica Difusa, também se mostraram robustas e eficientes quando aplicadas ao Sistema Adutor do Cariri. Para todos os cenários de demanda gerados, simulados e avaliados as regras difusas apresentaram desempenho bastante satisfatório, sugerindo operações que contemplam seus objetivos.

O comportamento do nível dos reservatórios e dos instantes de operação das bombas e válvulas para as estratégias de operação sugeridas pelas regras simples e

difusas nos diferentes cenários de demanda gerados para o Sistema Adutor do Cariri, são muito semelhantes. Isso ocorre devido às características das variáveis de decisão e o pequeno grau de liberdade da operação. Tanto as bombas quanto as válvulas não permitem outros estados, além de ligadas e desligadas, abertas e fechadas. Não existe meio termo entre esses estados, ou é um ou outro.

Portanto, no Sistema Adutor do Cariri, as diferenças existentes entre os dois tipos de regras reduz-se unicamente ao tratamento dos limites estabelecidos para as variáveis, onde as regras simples os tratam como fronteiras rígidas e as regras difusas como fronteiras flexíveis (sobrepostas), sendo que um valor pode pertencer aos dois lados da fronteira com diferentes graus de pertinência.

Todas as análises feitas aos resultados gerados pelas regras simples são extensivas às regras difusas.

6.4 – Regras simples versus regras difusas

O propósito de implementar as regras simples através de um sistema difuso não é melhorar seu desempenho em relação aos objetivos que elas se propõem a alcançar. A aplicação dessa técnica visa agregar mais robustez à operação sugerida pelas regras diante as incertezas às quais os sistemas estão sujeitos. A incorporação da Lógica Difusa acrescenta duas vantagens muito relevantes à operação.

A primeira vantagem é absorver as incertezas inerentes do sistema, da demanda e da própria operação, tornando-a mais robusta. As próprias regras simples já absorvem parte dessas incertezas, pois não dependem fundamentalmente da descrição física detalhada do sistema nem de precisão rigorosa na sua modelagem hidráulica para fornecerem boas estratégias de operação. No entanto, as regras simples são baseadas em limites rígidos que estabelecem faixas bem definidas para as variáveis da operação. Essas faixas são determinadas, de certa forma, baseadas na experiência do operador ou na resposta do modelo hidráulico e presumindo-se que o cenário assumido é invariável ou pouco variável. Ou seja, necessitam de uma certa precisão no seu dimensionamento. As regras difusas flexibilizam a rigidez existente nos limites determinados para as faixas que discretizam cada variável de decisão da operação. Como exemplo para reflexão, se alguém estabelece que, no ciclo operacional, depois das 17:00 horas é horário de ponta, e antes deste horário é dia, seria justo afirmar que 16:58 horas é dia ou 17:10 horas é horário de ponta? Nas regras simples seria justo sim, pois esse é o tratamento que elas dão às variáveis consideradas na operação do sistema. Já nas regras difusas os dois horários considerados poderiam pertencer tanto ao dia quanto ao horário de ponta com diferentes graus de pertinência. Essa

forma de tratamento que a Lógica Difusa dá às variáveis envolvidas na operação faz com que essa técnica assimile melhor as imprecisões presentes na definição das faixas e no sistema como um todo.

A segunda vantagem é que as regras difusas proporcionam um ajuste contínuo da operação, enquanto que nas regras simples esse ajuste é discreto. A lógica booleana trata as variáveis envolvidas na operação de forma discreta, e a Lógica Difusa, de forma contínua. Como exemplo, pode-se citar um caso onde exista uma bomba com conversor de frequência. No tratamento empregado pelas regras simples, para cada situação do sistema a operação recomendaria um ajuste de um delta na rotação (positivo ou negativo), o que provocaria um salto na variável resposta. No tratamento empregado pelas regras difusas, para a mesma situação, a operação forneceria um valor de rotação, em vez de um delta, o que permitiria um ajuste suave na variável resposta.

O Sistema Adutor do Cariri, objeto do caso de estudo deste trabalho, foi uma excelente escolha para ilustrar a simplicidade da aplicação da metodologia de extração de regras, sua flexibilidade para ajuste, devido a alterações e expansões no sistema, a robustez das soluções de operação sugeridas e sua eficiência em buscar e atingir os objetivos estabelecidos. No entanto, o pequeno grau de liberdade existente na operação do sistema não permite mostrar todos os benefícios que a Lógica Difusa pode agregar à operação. Também não permite a exploração de outras potencialidades expressas na metodologia, como o controle de pressão, que proporciona a redução das perdas físicas do sistema, e a incorporação de outras variáveis de decisão, como bombas com rotação variável e válvulas de diferentes ângulos de abertura.

O desempenho entre os dois tipos de regras são bem semelhantes, onde alternam melhor desempenho de um cenário para outro. As Figuras 6.3 e 6.5 mostram o comportamento do nível dos reservatórios de Boqueirão e Juazeirinho e os instantes de funcionamento das bombas que os abastecem para dois cenários de demanda apresentados na Figura 6.4.

No cenário 1 as regras difusas se mostram sensivelmente melhores, pois além da operação por elas sugerida contemplar todos os objetivos desejados, no horário de ponta as bombas passam mais tempo desligadas. No cenário 2 são as regras simples que apresentam melhor desempenho. Isso demonstra que os dois tipos de regras apresentam um ótimo desempenho com pequena diferença entre um e outro.

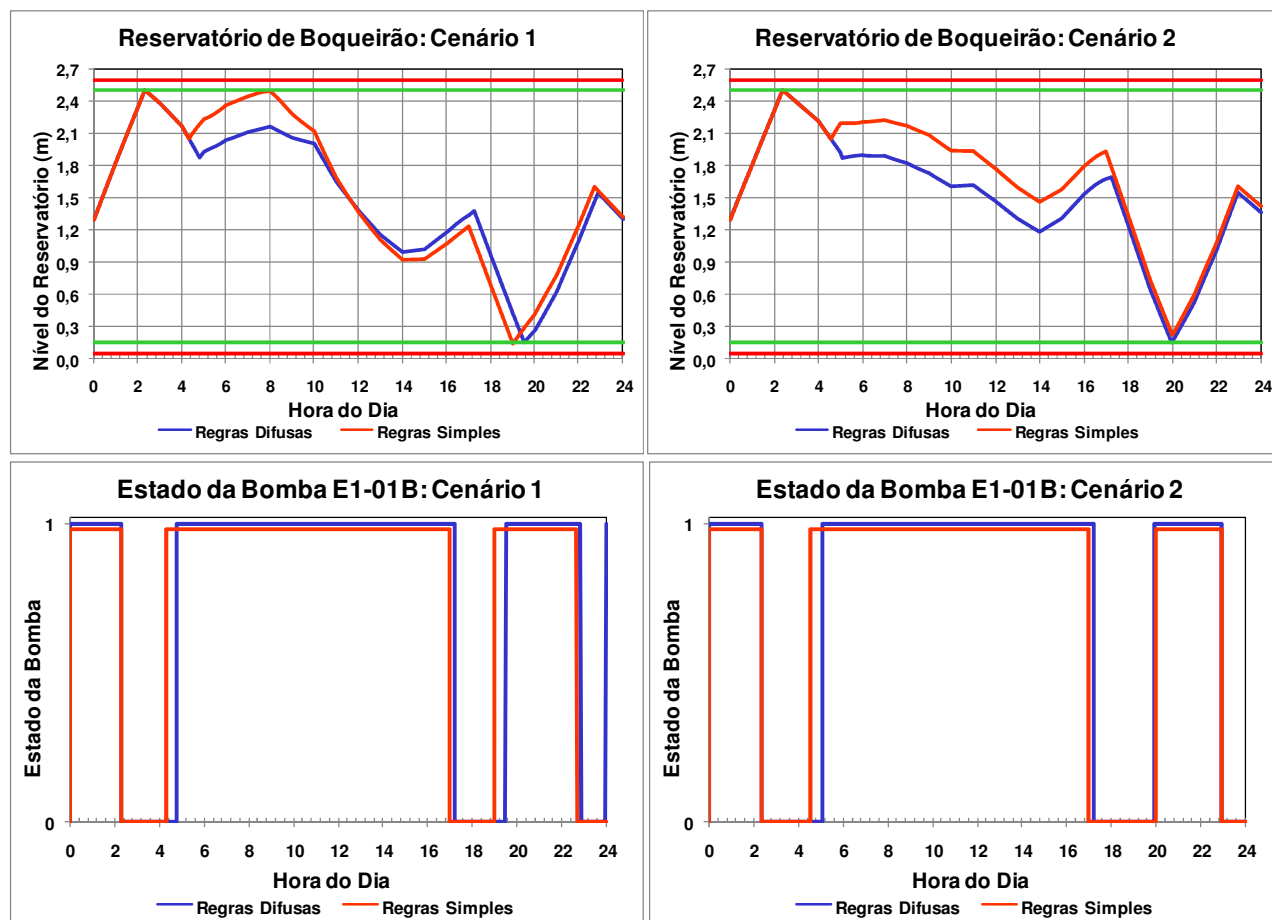


Figura 6.3: Comportamento do nível e operação sugerida pelas regras simples e difusas para o reservatório de Boqueirão para dois cenários de demanda.

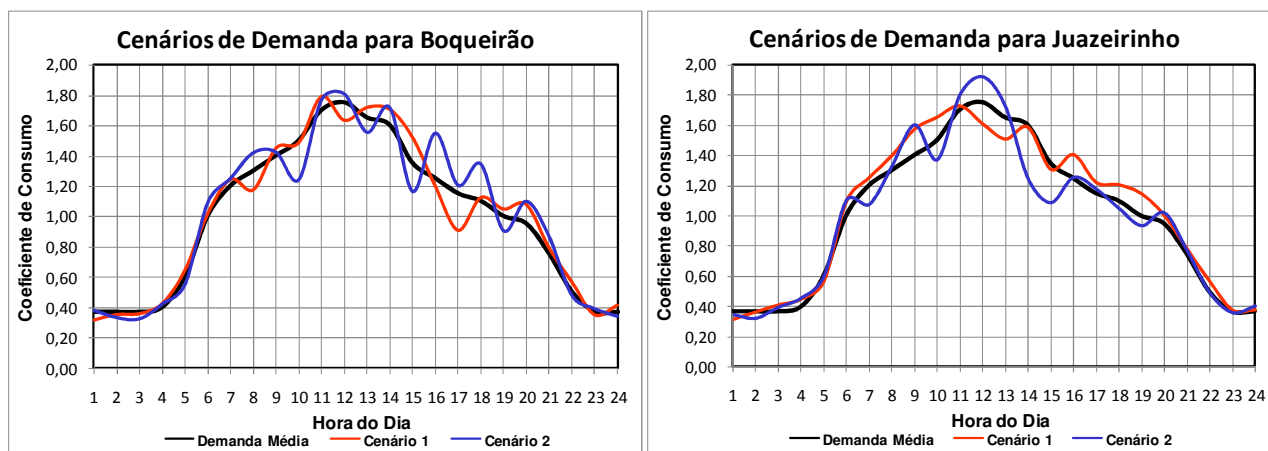


Figura 6.4: Cenários de demandas simulados para os Reservatórios de Boqueirão e Juazeirinho.

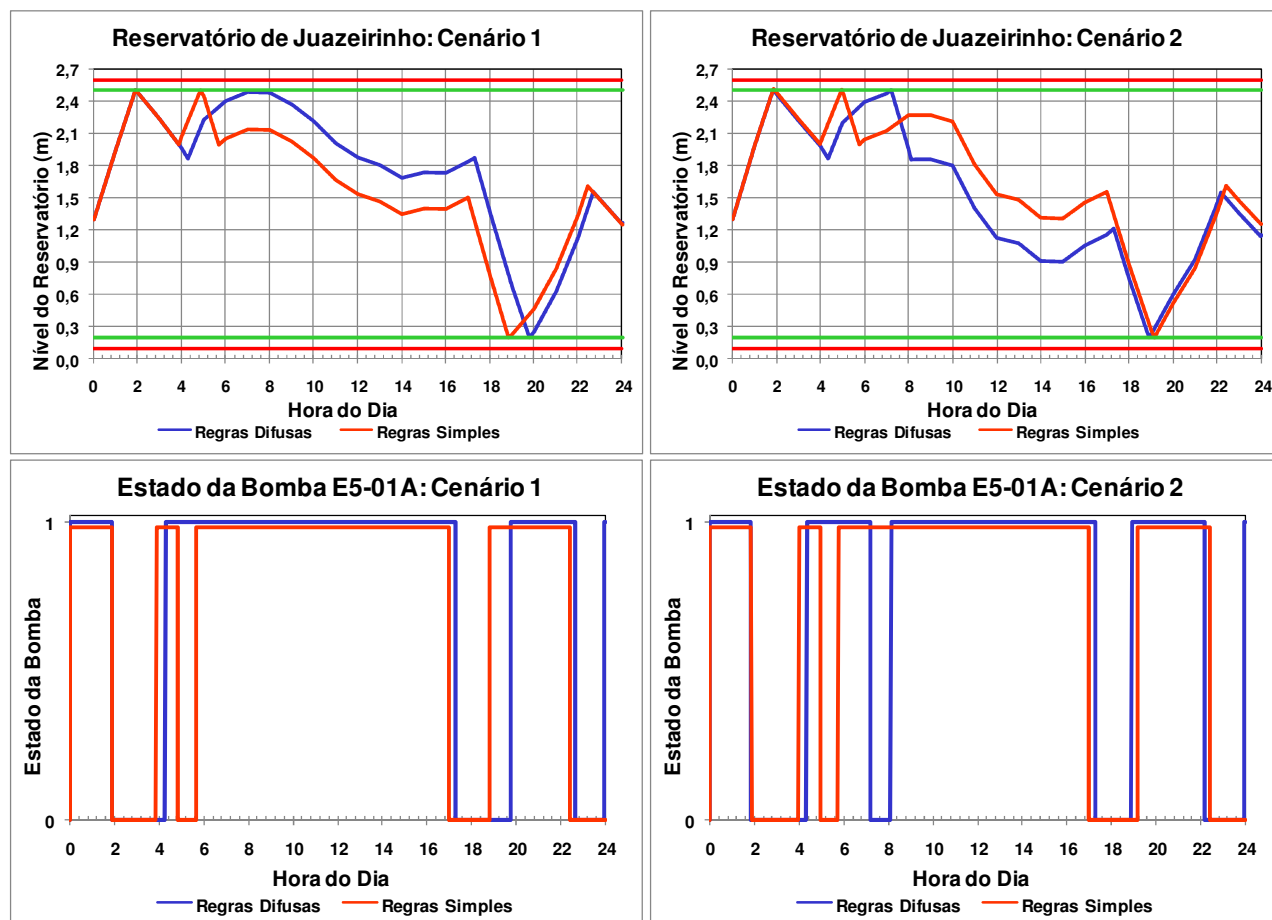


Figura 6.5: Comportamento do nível e operação sugerida pelas regras simples e difusas para o reservatório de Juazeirinho para dois cenários de demanda.

O caso de um sistema dotado de bombas com conversores de frequência, válvulas que permitem diferentes ângulos de abertura, estações elevatórias com mais de uma bomba de trabalho e uma configuração topológica que exija controle de pressão, caracterizaria uma situação mais efetiva para uso da Lógica Difusa, pois a operação teria um número grande de graus de liberdade e a necessidade de controlar a pressão e o nível simultaneamente a tornaria mais complexa. Nesse caso, os efeitos causados pela aplicação da Lógica Difusa se tornariam mais evidentes, pois o ajuste da operação ocorreria de uma forma semelhante a alguém que tenta sintonizar uma frequência, suavizando o comportamento da variável resposta. Fazendo uma comparação análoga para as regras simples, o ajuste da operação ocorreria de forma semelhante a alguém que ajusta a velocidade de um ventilador que tem valores discretos de velocidades diferentes de acordo com a posição da chave de ajuste.

No caso do Sistema Adutor do Cariri, não é possível um ajuste suave da operação, pois as manobras realizadas nas bombas e válvulas são ligar e desligar, abrir ou fechar, não permitindo estágios intermediários entre uma ação e outra. A pequena margem de manobras operacionais (graus de liberdade) é o principal fator que faz com que

praticamente não existam diferenças entre a operação sugerida por cada tipo de regras, tornando-as tecnicamente iguais, do ponto de vista prático. Se existisse um maior grau de liberdade no sistema, as variáveis, como “nível do reservatório” e “o instante do dia” poderiam ser discretizadas em um número maior de faixas, o que permitiria um ajuste fino e mais suave da operação.

6.5 – Avaliação das regras

As curvas de demanda das cidades abastecidas pelo Sistema Adutor do Cariri são desconhecidas. A CAGEPA não dispõe de medições horárias do consumo das cidades, não sendo possível traçar o perfil de cada curva de demanda. As únicas informações disponíveis são o volume diário aduzido para cada reservatório e as horas de funcionamento de cada bomba.

Portanto, na falta de informações, adotou-se inicialmente um perfil de curva de demanda considerado igual para todas as cidades e através do método de simulação Monte Carlo geraram-se cenários de demandas, os quais foram simulados e analisados através do simulador hidráulico EPANET2 para realizar um diagnóstico da robustez das regras perante possíveis variações no comportamento da curva de demanda. Para cada cidade foram gerados 1000 cenários de demanda, admitindo-se que a variação do consumo médio horário tem distribuição normal e desvio padrão de 10% em relação à média.

A Figura 5.14 apresenta um gráfico com 250 cenários gerados para a cidade de Boqueirão, onde várias curvas de demanda estão dispostas em torno da curva média assumida, o que mostra uma boa representatividade das possibilidades de cenários de demandas que podem ocorrer para todas as cidades abastecidas. Neste gráfico não foram incluídos todos os cenários gerados para a cidade de Boqueirão, para não comprometer a legibilidade da figura.

A simulação de todos os cenários gerados para cada cidade mostrou que as regras são robustas às possíveis variações na demanda, sempre sugerindo soluções eficientes e com bom nível de melhoria da operação em relação aos objetivos estabelecidos.

6.6 – Operação real versus operação sugerida pelas regras

Na modelagem hidráulica do Sistema Adutor do Cariri assumiu-se a vazão média diária de projeto, com projeção para o ano de 2008, como sendo a demanda de abastecimento de cada cidade. O projeto original do sistema considera incluso nesta vazão um índice de perdas de 25%. No entanto, segundo o relatório PROÁGUA/AESA (2006), a

CAGEPA, empresa que opera o sistema, tem um índice de perdas entre 30% e 40%, que é maior do que se considerou na demanda de projeto. Outro fato relevante e que não foi considerado na modelagem hidráulica é que em toda a extensão do Sistema Adutor do Cariri existem trechos onde ocorrem retiradas não computadas (furtos) de água, dificultando mais ainda a estimativa precisa das demandas consumidas.

Tomando-se como base os boletins diários da operação do mês de junho de 2008 fornecidos pela CAGEPA que registram os horários de funcionamento para todas as bombas do Sistema Adutor do Cariri, pode-se verificar que: em várias situações as bombas são desligadas por causa de extravasamento de reservatórios; não há a preocupação de organizar a operação para reduzir o bombeamento no horário de ponta, sendo comuns situações onde há bombeamento integral neste horário e com paradas em horários fora de ponta; em algumas estações elevatórias as bombas funcionam alternadamente 24 horas por dia, ou seja, no seu limite máximo, fato que só deveria ocorrer no final do alcance do projeto que é em 2021; a maioria das bombas trabalha entre 16 a 22 horas por dia.

Segundo informações verbais fornecidas pelos operadores do sistema, algumas bombas funcionam estranguladas em alguns períodos do ano ou manutenções e alterações realizadas ao longo do tempo modificaram sua curva original. Ainda segundo relato dos operadores, alguns trechos da adutora, como entre a estação elevatória EE2 e o reservatório de Cabaceiras, são necessárias frequentes patrulhas da polícia florestal para coibir o furto de água. Esses fatos não foram considerados na modelagem hidráulica do sistema.

Devido às perdas por furto de água e as perdas reais da adução e distribuição não serem consideradas integralmente na curva de demanda assumida na modelagem do Sistema Adutor do Cariri, não foi possível fazer uma análise econômica comparando-se o custo da operação real do sistema com a operação sugerida pelas regras simples e difusas. Em alguns trechos do sistema, existem estações que chegam a bombear água até 24 horas por dia, sendo o total de horas de bombeamento da operação real incompatível com o da sugerida pelas regras. Outro fato que pode ser causador desta diferença são as curvas das bombas, que na modelagem hidráulica foram usadas as dos catálogos e que podem ter sofrido alterações devido às manutenções realizadas e às depreciações.

No entanto, boa parte das bombas do sistema apresenta equivalência entre o total de horas de funcionamento na operação real e na sugerida pelas regras simples e difusas. Nas simulações realizadas para os diversos cenários de demandas gerados para o Sistema Adutor do Cariri, as bombas trabalham de 17 a 21 horas por dia, bem próximo à operação real, onde trabalham entre 16 e 22 horas por dia. A seguir, serão apresentados alguns

gráficos comparando os instantes de funcionamento das bombas para cada operação (real, sugerida pelas regras simples e difusas). Usou-se o cenário de demanda média para todas as cidades na operação sugerida pelas regras.

A Figura 6.6 mostra os horários de funcionamento alternado das bombas E3-01A e E3-02A, que aduzem água de R-EE3 para R-EE4, na operação real executada nos dias 06 e 10/06/2008 e a operação sugerida pelas regras simples e difusas. Na operação real a bomba permaneceu 18h03min e 18h22min ligada para os dias 06 e 10/06/2008, respectivamente. As regras difusas sugerem uma operação com 17h34min e a regras simples com 17h37min. Tanto as regras simples quanto as regras difusas sugeriram operações onde a bomba passa 100% e 93%, respectivamente, do horário de ponta desligada, enquanto que na operação real a bomba passou 100% do horário de ponta ligada.

Para as demais bombas onde o total de horas de bombeamento da operação real é compatível com o da operação sugerida pelas regras sempre ocorre a mesma situação: na operação real não houve preocupação de gerenciar o bombeamento de forma a não ligar bombas no horário de ponta, mesmo existindo folga para tanto, concentrando-se as atenções em atender apenas à demanda; nas operações sugeridas tanto pelas regras simples quanto para as regras difusas as bombas passam todo ou parte do horário de ponta desligadas e todos os objetivos de melhora da performance da operação estabelecidos para as regras são contemplados. Pode-se constatar isto nas Figuras 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, 6.10, 6.11 e 6.12, correspondentes ao funcionamento das bombas E3-01A e E3-2A, E4-01A e E4-2A, E4-01B e E4-2B, E4-01C e E4-2C, E5-01A e E5-2A, E6-01A e E6-2A, E6-01B e E6-2B, que aduzem água para os reservatórios de Soledade, R-EE5, R-EE6, Juazeirinho, Pedra Lavrada e olivedos, respectivamente.

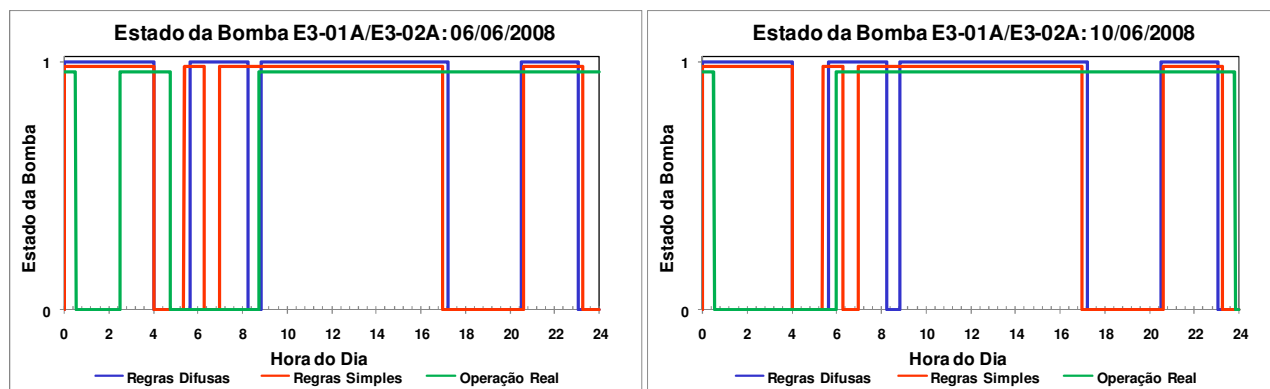


Figura 6.6: Instante de bombeamento de E3-01A/E3-02A para a operação real e a sugerida pelas regras difusas e simples.

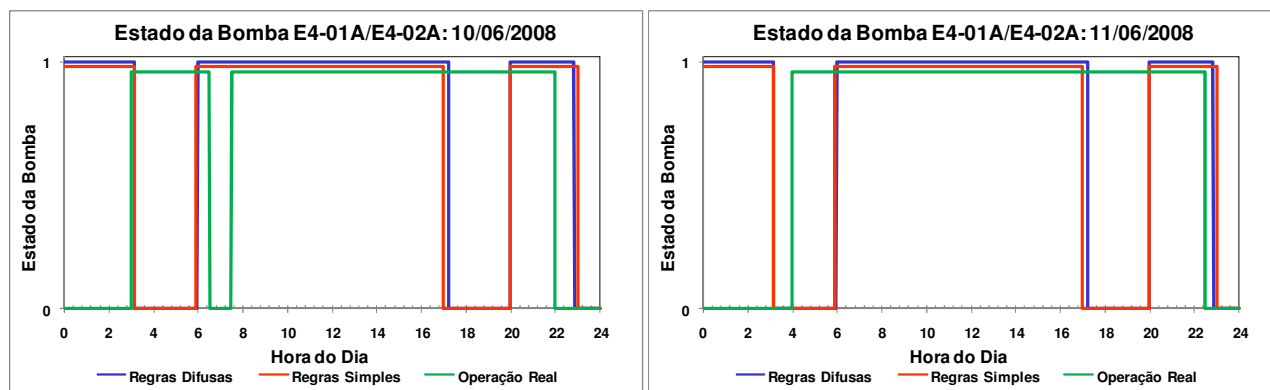


Figura 6.7: Instante de bombeamento de E4-01A/E4-02A para a operação real e a sugerida pelas regras difusas e simples.

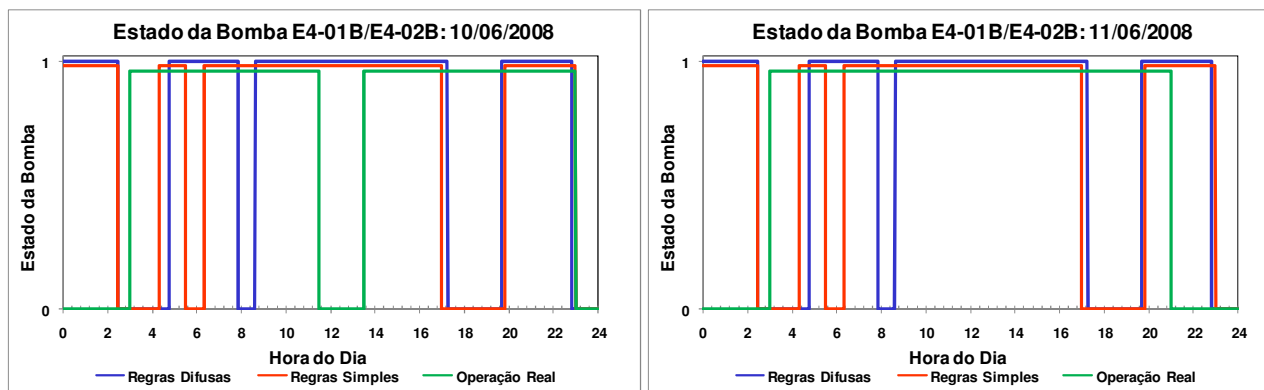


Figura 6.8: Instante de bombeamento de E4-01B/E4-02B para a operação real e a sugerida pelas regras difusas e simples.

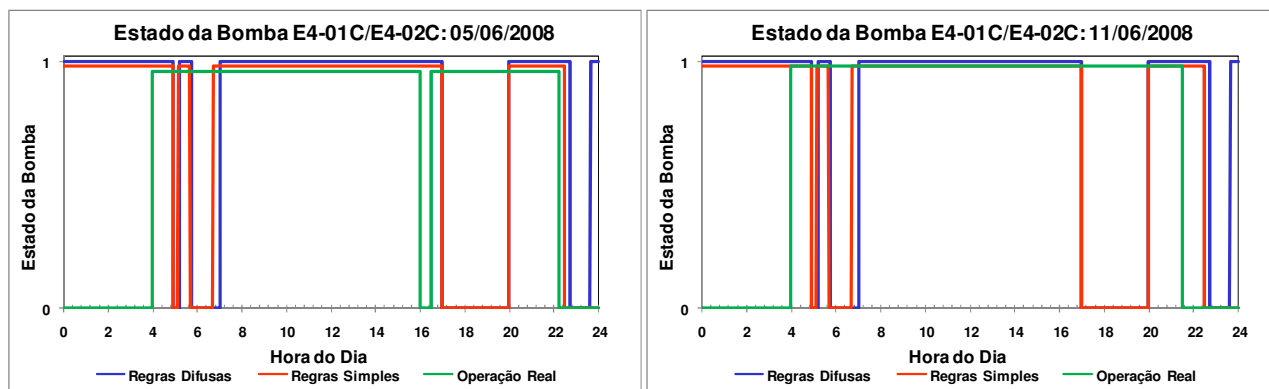


Figura 6.9: Instante de bombeamento de E4-01C/E4-02C para a operação real e a sugerida pelas regras difusas e simples.

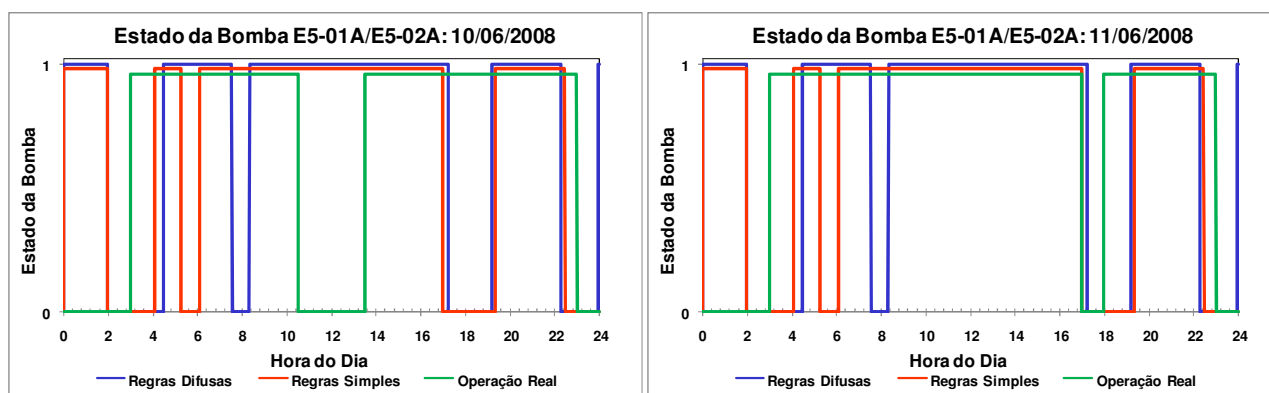


Figura 6.10: Instante de bombeamento de E5-01A/E5-02A para a operação real e a sugerida pelas regras difusas e simples.

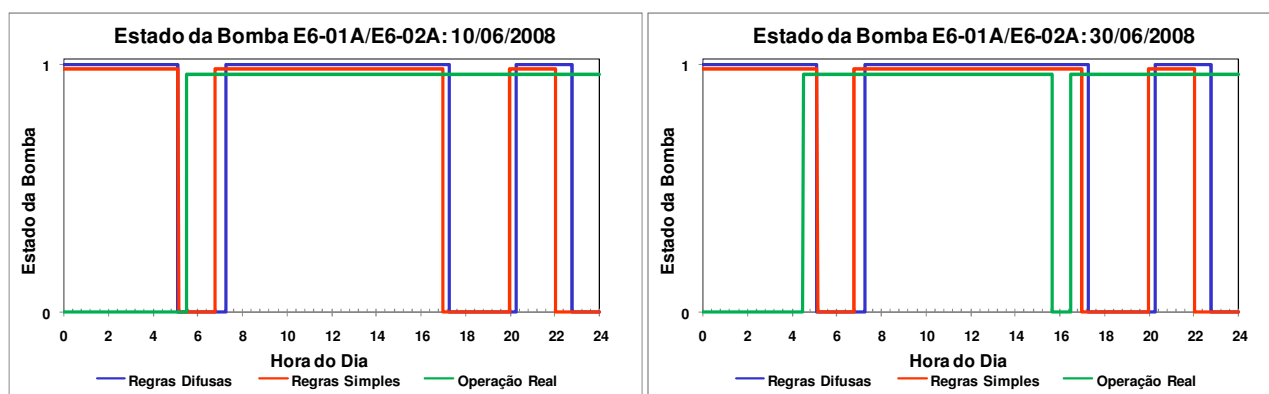


Figura 6.11: Instante de bombeamento de E6-01A/E6-02A para a operação real e a sugerida pelas regras difusas e simples.

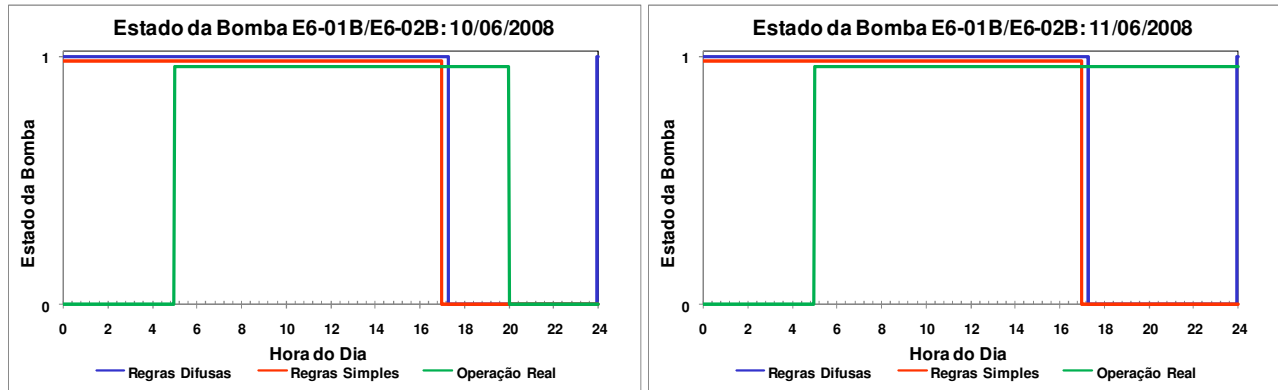


Figura 6.12: Instante de bombeamento de E6-01B/E6-02B para a operação real e a sugerida pelas regras difusas e simples.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise dos resultados obtidos a partir do estudo de caso mostra que a metodologia proposta neste trabalho pode ser aplicada com sucesso na construção de regras para operação multi-objetivo de sistemas de abastecimento de água e usada como uma ferramenta de apoio à operação desses sistemas. O método de construção de regras é bastante simples, de fácil e rápida compreensão, manipulação, implementação e suficientemente flexível a adaptações para diferentes configurações de sistemas e particularidades.

O Sistema Adutor do Cariri é bastante heterogêneo, extenso, porém com operação relativamente simples, devido a sua configuração topológica e elementos hidráulicos, apresentando situações de adução, bombeamento, armazenamento e distribuição de água. É, sem dúvida, um bom estudo de caso para mostrar a simplicidade, flexibilidade e eficiência das regras, no entanto, a metodologia deve ser aplicada a situações mais complexas, que envolvam a pressão e velocidade nas tubulações como limites operacionais e sistemas como maior grau de liberdade na operação.

Tanto as regras simples quanto as regras difusas extraídas para o Sistema Adutor do Cariri apresentaram excelentes desempenhos, sugerindo operações robustas para o sistema e contemplando com sucesso os objetivos estabelecidos para efficientização da operação. No entanto, a simplicidade topológica e operacional do sistema, o pequeno grau de liberdade existente na operação, o fato de só uma bomba aduzir água por vez em cada conjunto elevatório, a ausência de conversores de frequência nas bombas e de válvulas que tolerem múltiplos ângulos de abertura não permitiram a exploração de todas as potencialidades sugeridas na metodologia e inibiram alguns dos valores que a técnica da lógica difusa pode agregar à operação.

O simulador hidráulico EPANET2 mostrou-se bastante útil e adequado como modelo de simulação e de avaliação da eficiência das operações sugeridas e como ferramenta de apoio ao desenvolvimento do conjunto de regras. A possibilidade de se confeccionarem regras no próprio módulo de controle de condições múltiplas do EPANET2 permitiu maior agilidade no desenvolvimento, ajuste, simulação e avaliação das regras e das estratégias sugeridas. A biblioteca que o software dispõe possibilitou a sua integração com o MATLAB,

permitindo que diversos cenários de operação fossem simulados e avaliados de forma interativa com bastante agilidade.

A aplicação do método de Simulação Monte Carlo foi bastante oportuna e eficiente, pois é uma técnica simples, de fácil compreensão, implementação e adequada para este tipo de situação. O emprego do método agilizou a geração de diversos cenários de possíveis variações da demanda de abastecimento, proporcionando uma análise robusta das operações sugeridas pelas regras extraídas.

A comparação entre operações reais executadas no sistema e as operações sugeridas pelas regras simples e difusas mostrou que existe possibilidade concreta de reduzir o bombeamento no horário de ponta em até 100%, permitindo assim uma redução relevante no custo da operação.

Com base no que foi exposto neste trabalho, recomenda-se que a metodologia apresentada seja aplicada a sistemas mais complexos, com um maior número de graus de liberdade, dotado de bombas com conversores de frequência, válvulas reguladoras de pressão e vazão que permitam diferentes ângulos de abertura e que envolvam a pressão e velocidade nas tubulações como limites operacionais. Sistemas deste porte permitiriam explorar todas as potencialidades apresentadas na metodologia de construção de regras e avaliar sua eficiência na sugestão de operações mais complexas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, H.; OLIVEIRA JR., 1999. **Lógica Difusa: aspectos práticos e aplicações**. 1ª Edição, 192 p., Editora Interciência Ltda, Rio de Janeiro – RJ.

ALBUQUERQUE, A. A.; FIRMINO, M. B. M.; CURI, W. F., 2004. **Uso racional de energia no bombeamento de água em sistemas de abastecimento via programação não-linear**. In: Seminário Hispano-Brasileiro sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água - IV SEREA, João Pessoa – PB.

ALIANCE – Aliança para Conservação e Energia, 2002. **Água e Energia: Aproveitando as Oportunidades de Eficientização de Água e Energia não Explorados nos Sistemas de Água Municipais**. 159p.

ALMEIDA, R., 2001. **Operação de Sistemas Urbanos de Abastecimento de Água com Base em Modelos de Otimização Não-Lineares**. Dissertação de Mestrado, 281p., Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, Campinas – SP.

ALMEIDA, R.; BARBOSA, P. S. F., 2001. **Comparação de Políticas Operativas para a Redução de Custos de Bombeamento em Redes de Distribuição de Água**. In: XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, João Pessoa – PB.

ALMEIDA, R.; BARBOSA, P. S. F., 2001. **Operação Ótima de Sistemas de Distribuição de Água via Modelo de Programação Não-Linear Inteira Mista**. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Aracajú – SE.

ALMEIDA, R.; FRANCATO, A. L.; BARBOSA, P. S. F., 2000. **Algoritmos de Otimização para a Operação em Tempo Real de Sistemas Urbanos de Abastecimento De Água**. In: XIX Congresso Latino-Americano de Hidráulica, Córdoba.

ALMEIDA, R.; BARBOSA, P. S. F., 2002. **Modelo Computacional para a Gestão Operacional Ótima de Sistemas de Distribuição de Água**. In: V Congresso de Engenharia Civil, Juiz de Fora – MG.

- BARBOSA, J. M. S. G., 2001. **Simulação da operação de bombas em sistemas de abastecimento de água.** Dissertação de Mestrado, 112p., Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande – PB.
- BARDALES, K. L. N.; CHEUNG, P. B.; SILVA JUNIOR, A. R.; IDE, C. N., 2007. **Otimização Energética Operacional de Sistemas de Bombeamento de Água Tratada Utilizando Algoritmos Evolucionários Multi-objetivo.** In: XXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Belo Horizonte – MG.
- BEZERRA, S. T. M.; CAMBOIM, W. L. L.; SILVA, S. A.; GOMES, H. P.; SILVA, M. J. G., 2008. **Lógica fuzzy aplicada ao controle de pressão em sistemas de bombeamento.** In: VIII SEREA - Seminário Ibero-Americano, Lisboa.
- BORGES, V. M. N. A., 2003. **Acoplamento de um modelo de previsão de demanda de água a um modelo simulador em tempo real – um estudo de caso: sistema adutor metropolitano de São Paulo.** Dissertação Mestrado, 205p., Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP.
- BOULOS, P. F.; WU, Z.; ORR, C. H.; MOORE, M.; HISUNG, P; THOMAS, D., 2001. **Optimal pump operation of water distribution systems using genetic algorithms.** AWWA Distribution System Symposium, Journal American Water Works Association.
- CAMARGOS, F. L., 2002. **Lógica Nebulosa: uma abordagem filosófica e aplicada.** Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis – SC.
- CAMBOIM, W. L. L., 2008. **Aplicações de Técnicas de Controle Fuzzy para Sistemas de Abastecimento de Água.** Dissertação de mestrado, 96p., Universidade, Federal da Paraíba João Pessoa – SP.
- CARRIJO, I. B., 2004. **Extração de regras operacionais ótimas de sistemas de distribuição de água através de algoritmos genéticos multi-objetivo e aprendizado de máquina.** Tese de Doutorado, 217p., Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP.
- CHEUNG, P. B., 2003. **Análise de reabilitação de redes de distribuição de distribuição de água para abastecimento via algoritmos genéticos multi-objetivo.** Tese de Doutorado, 268p., Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP.
- COX, E., 1999. **The Fuzzy Systems Handbook.** Chappaqua. Second Edition, New York: AP Professional.

DONATELLI, G. D.; KONRATH, A. C., 2005. **Monte Carlo Simulation for the Evaluation of Measurement Uncertainty**. In: Revista de Ciência e Tecnologia, v.13, n. 25/26, p. 5-15, Recife – PE.

ERTIN, E.; DEAN, A. N.; MOORE, M. L.; PRIDDY, L., 2001. **Dynamic optimization for optimal control of water distribution systems**, Applications and Science of Computational Intelligence IV, Proc. SPIE, v. 4390, p. 142-149.

FARMANI, R.; SAVIC, D.A.; WALTERS, G.A., 2005. **Fuzzy rules for hydraulic reliability-based design and operation of water distribution system**. Impacts of Global Climate Change World Water and Environmental Resources Congress. Anchorage, Alaska, USA.

FERNANDES, C. A., (2005). **Gerenciamento de Riscos em Projetos: como usar o Microsoft Excel para realizar a simulação de Monte Carlo**. Disponível em: <http://www.bbbrothers.com.br/scripts/artigos.asp>. Acesso em: 25/02/2009.

FRANCATO, L. A.; BARBOSA, P. S. F., 1999. **Operação Ótima de Sistemas Urbanos se Abastecimento se Água**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Águas de Lindóia – SP.

FRANCATO, L. A., 2002. **Otimização Multi-objetivo para a Operação de Sistemas Urbanos de Abastecimento de Água**. Tese de Doutorado, 182p., Faculdade de engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas – Campinas.

FUNASA, 2006. **Manual de Saneamento: Orientações Técnicas**. Brasília – DF.

GALVÃO, C. O., 1999. **Introdução à Teoria dos Conjuntos Difusos**. In: GALVÃO, C.; VALENÇA, M. (organizadores), **Sistemas inteligentes: Aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais**. ABRH, editora UFRGS, Porto Alegre – RS.

GOMES, H. P., 2004. **Sistema de Abastecimento de Água: Dimensionamento Econômico e Operação de Redes e Elevatórias**, 2ª Edição, 242p., Editora Universitária, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – PB.

GOMES, H. P.; SILVA, F. C., 2004. **Viabilidade técnica e econômica da operação de uma rede de distribuição de água sem bombear no horário de ponta**. In: Seminário Hispano-Brasileiro sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água - IV SEREA, João Pessoa – PB.

HASSEGAWA, C. M.; ZAHED FILHO, K.; VICENTE, R. V., 1999. **Caracterização dos perfis de consumo da região metropolitana de São Paulo**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro – RJ.

KSB BOMBAS HIDRÁULICAS. **Catálogo de seleção de bombas online**. Disponível em: www.ksb.com.br. Acesso em: 10/05/2008.

KOURO, S. R.; MUSALEM, R. M., sem data. **Control Mediante Lógica Difusa**. Técnicas Modernas en Automática. Disponível em:

<http://alumnos.elo.utfsm.cl/~aflores/identsistemas.pdf>. Acesso em: 25/02/2009.

JOWITT, P. W.; GERMANOPOULOS, G., 1992. **Optimal Pump Scheduling in Water-Supply Networks**, Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 118, nº. 4, p. 406-422.

LACERDA, I. S.; LUCENA, K. F. M.; GALVÃO, C. O.; MACHADO, E. C. N.; PEDROSA FILHO, L., 2008. **Operação multi-objetivo de sistemas de abastecimento de água: regras heurísticas**. In: Seminário Hispano-Brasileiro sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água – VIII SEREA, Lisboa.

LACERDA, I. S.; LUCENA, K. F. M.; GALVÃO, C. O.; MACHADO, E. C. M. N., 2008. **Construção de Regras para Operação Multi-Objetivo de Sistemas de Abastecimento de Água**. In: IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste – Salvador – BA.

LANSEY, K.; AWUMAH, K., 1994. **Optimal pump operations considering pump switches**. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 120, nº 1, p. 17 – 35.

LEE, M.; MCBEAN, E.; SCHUSTER, C.; HUANG, J., 2007. **Use of a Fuzzy Logic Model to Investigate Potential Failures of Drinking Water Systems**. World Environmental and Water Resources Congress, Tampa, Florida.

LEÓN, C.; MARTÍN, S.; ELENA, J. M.; LUQUE, J., 2000. **EXPLORE – Hybrid Expert Systems for Water Networks Management**. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 126, nº 2, p. 65-74, New York, NY, USA.

LI, G.; BAGGETT, C. C., 2007. **Real-Time Operation Optimization of Variable-Speed Pumping Stations in Water Distribution Systems by Adaptive Discharge Pressure Control**. World Environmental and Water Resources Congress, Tampa, Florida.

LÓPEZ-IBÁÑEZ, M.; PRASAD, D.; PAECHTER, B., 2005. **Optimal pump scheduling: Representation and multiple objectives**. In: Proceedings of the Eighth International

Conference on Computing and Control for the Water Industry, v. 1, p.117 – 122, University of Exeter, UK.

LÓPEZ-IBÁÑEZ, M.; PRASAD, D.; PAECHTER, B., 2008. **Ant Colony Optimization for Optimal Control of Pumps in Water Distribution Networks**. Journal of Water Resources Planning and Management. v. 135, nº 4, p. 337-346.

MACHADO, E. C. N.; CRUZ, C. A.; RÊGO, M. G.; CARVALHO, M. W. A.; LACERDA, I. S.; GALVÃO, C. O., 2008. **Operação multi-objetivo de sistemas de abastecimento de água: algoritmo genético**. In: Seminário Hispano-Brasileiro sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água – VIII SEREA, Lisboa.

McCORMICK, G.; POWELL, R.S., 2003. **Optimal Pump Scheduling in Water Supply Systems with Maximum Demand Charges**. Journal of Water Resources Planning and Management, v.129, nº. 5, pp. 372-379.

MAMDANI, E, H.; ASSILIAN, S. **An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller**. International Journal of Man-Machine Studies, v. 7 pp. 1-13.

NASCIMENTO JR, C. L. & YONEYAMA, T., 2000. **Inteligência artificial em controle e automação**, FAPESP, 1ª Edição, Editora Edgard Blucher Ltda., São Paulo – SP.

OPPINGER, P., 2009. **Redução das perdas de água por meio do gerenciamento de pressão**, Hydro, ano III, nº 28, p. 28-33.

OTERO, O. L. C.; COURA, S. P.; GOMES, A. S., 2007. **Método Expedito para Avaliação de Desempenho de Conjuntos Motobombas**. In: XXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Belo Horizonte – BH.

ORMSBEE, L. E.; WALSKI, T. M.; CHASE, D. V.; SHARP, W. W., 1989. **Methodology for Improving Pump Operation Efficiency**. Journal of Water Resources Planning and Management, v.115, nº.2, p. 148-164.

PEDROSA FILHO, L. A., 2006. **Um modelo de operação de sistemas adutores de abastecimento de água com vistas a minimização dos custos energéticos**, Tese de Doutorado,160p., Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB.

PIMENTEL, C. E. B., 2004. **Relatório Técnico Ambiental das Obras do Sistema Adutor do Cariri e Sistema Adutor do Congo**, 49 p., Projeto UNESCO 700BRA2000 - PROÁGUA Obras Prioritárias .

PRASAD, D. T.; MANUEL LÓPEZ-IBÁÑEZ, M.; PAECHTER, B., 2006. **Ant-colony optimization for optimal pump scheduling**. 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium, Cincinnati, Ohio, USA.

PROÁGUA/AESA, 2006. **Relatório final: Plano de Administração, Operação e Manutenção – PAOM Sistemas Adutores do Cariri e do Congo**, segunda fase, Tomo 1, 147p.

REVELLI, R.; RIDOLFI, L., 2002. **Fuzzy Approach for Analysis of Pipe Networks**. Journal of Hydraulic Engineering, v. 128, nº 1, pp. 93-10.

RIGHETTO, A. M., 2002. **Operação Ótima de Sistema Urbano de Distribuição de Água**. In: Seminário-Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água, João Pessoa – PB.

RIBEIRO, L. C. L. J., 2002. **Modelo Híbrido para o estabelecimento de rotações ótimas de bombas de rotação variável**, Dissertação de mestrado, 117p., Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP.

RIBEIRO, L. C. L. J., 2007. **Modelo Híbrido Multi-objetivo para obtenção de roteiros operacionais de bombas de rotação variável em instalações hidráulicas**, Tese de Doutorado, 112p., Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP.

ROSSMAN, L. A., 2000. **EPANET2. Users Manual**. U.S. Environmental Protection Agency – EPA. Cincinnati, Ohio. Disponível em:
www.epa.gov/nrmrl/wswrd/epanet.html. Acesso em: 25/02/2009

SALAS, D.; GÓMEZ, R.; SALDARRIAGA, J., 2004. **Water Distribution Network Calibration with Fuzzy Logic**. World Water and Environmental Resources Congress. Salt Lake City, Utah, USA.

SANTANA, G. C., 1999. **Otimização da Operação de Sistemas de Distribuição de Água Abastecidos por Bombeamento e Reservatórios de Regularização**, Tese de Doutorado 191p., Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP.

SILVA, K. R. G.; KISHI, R. T., 2003. **Modelagem matemática do cloro em redes de distribuição de água**. Revista Técnica da Sanepar, v.19, nº.19, p. 26-40, Curitiba – PR.

SHAW, I. S. & SIMÕES, G. M., 1999. **Controle e Modelagem Fuzzy**, 1ª Edição, 165p., Editora Edgard Blucher Ltda., FAPESP, São Paulo – SP.

SOBOL, I.M., 1994. **A Primer for the Monte Carlo Method**. Flórida, USA.

SJOBOM JUNIOR, A. A.; OLIVEIRA, M. A. A., 2006. **Otimização de Bombeamento com Algoritmos Genéticos e Previsor de Nível nas Próximas 24 Horas**. In: VI SEREA - Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água, João Pessoa – PB.

SPILOTIS, M.; TSAKIRIS, G., 2007. **Minimum Cost Irrigation Network Design Using Interactive Fuzzy Integer Programming**. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v. 133, nº 3, p. 242-248.

TSUTIYA, M. T.; ALÉM SOBRINHO, P., sem data. **Consumo de Água**. Material didático, 45p, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da USP, São Paulo – SP.

TSUTIYA, M. T., 2007. **Uso de Inversores de Frequência para Diminuição do Consumo de Energia em Bombeamentos**. In: GOMES, H. P.; GRACÍA, R. P.; REY, P. L. I. (organizadores), **Abastecimento de Água: O Estado da Arte e Técnicas Avançadas**, p. 103 – 122, Editora Universitária, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – PB.

TSUTIYA, M. T., 2004. **Abastecimento de Água**. 1ª Edição, 643p., São Paulo – SP – Departamento de engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da universidade de São Paulo.

TSUTIYA, M. T., 1997. **Redução do Custo de Energia Elétrica em Estações elevatórias de Água e Esgoto**. In: XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Foz do Iguaçu – PR.

VAMVAKERIDOU-LYROUDIA, L. S.; WALTERS, G. A.; SAVIC, D. A., 2005. **Fuzzy Multi-objective Optimization of Water Distribution Networks**. Journal of Water Resources Planning and Management. v. 131, nº 6, p. 467 – 476.

VAMVAKERIDOU-LYROUDIA, L. S.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A., 2007. **Tank Simulation for the Optimization of Water Distribution Networks**. Journal of Water Resources Planning and Management v. 133, nº 6, p. 625-636.

VENTURINI, M. A. A. G., 1997. **Contribuição ao Estudo da Otimização de Redes Hidráulicas Através de um Modelo de Programação Linear**, Dissertação de Mestrado, 97p., Faculdade de Engenharia Civil, Campinas – SP.

VICENTE, R. V., 2005. **Modelo de operação para centros de controle de sistemas de abastecimento de água - estudo de caso: sistema adutor metropolitano de São Paulo**.

Dissertação Mestrado, 139p., Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP.

WALENDA, A.; ULANICKI, B.; PETER BOUNDS, P., 2006. **Synthesis of feedback control for pump operation in water distribution networks**. 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium, Cincinnati, Ohio, USA.

YU, T.; ZHANG T.; LI, X., 2005. **Optimal operation of water supply systems with tanks based on genetic algorithm**. Journal of Zhejiang University SCIENCE.

ZADEH L. A., 1965. **Fuzzy sets**. Information and Control, v.8, number 3, pp 338-353.

ZADEH, L. A., 1973. **Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes**. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, v. SMC-3, nº 1, p 28-44.

ANEXOS

ANEXO A

CONSTRUÇÃO DE REGRAS PARA OS SUBSISTEMAS

SUBSISTEMA 3:

Variável de controle: nível de R-Boqueirão; variável de operação: estado da bomba E1-01B ou E1-02B;

- **Intervalo de tempo 1: 00:00 à 06:00 horas (madrugada):** faixa de controle ótima: (2,05 – 2,50) m;

Regra 1: **SE** nível de R-Boqueirão for **maior** que 2,50 m, **ENTÃO desliga** E1-01B ou E1-02B;

Regra 2: **SE** nível de R-Boqueirão for **menor** que 2,05 m, **ENTÃO liga** E1-01B ou E1-02B;

Regra 3: **SE** nível de R-Boqueirão for **menor** que 2,50 m **E maior** que 2,05 m, **ENTÃO permanece** o estado de E1-01B ou E1-02B;

- **Intervalo de tempo 2: 06:00 à 17:00 horas (dia):** faixa de controle ótima: (2,20 – 2,50) m;

Regra 1: **SE** nível de R-Boqueirão for **maior** que 2,50 m, **ENTÃO desliga** E1-01B ou E1-02B;

Regra 2: **SE** nível de R-Boqueirão for **menor** que 2,20 m, **ENTÃO liga** E1-01B ou E1-02B;

Regra 3: **SE** nível de R-Boqueirão for **menor** que 2,50 m **E maior** que 2,20 m, **ENTÃO permanece** o estado de E1-01B ou E1-02B;

- **Intervalo tempo 3: 17:00 à 20:00 horas (ponta):** faixa de controle ótima: (0,15 – 0,75) m;

Regra 1: **SE** nível de R-Boqueirão for **maior** que 0,75 m, **ENTÃO desliga** E1-01B ou E1-02B;

Regra 2: **SE** nível de R-Boqueirão for **menor** que 0,15 m, **ENTÃO liga** E1-01B ou E1-02B;

Regra 3: **SE** nível de R-Boqueirão for **menor** que 0,75 m **E maior** que 0,15 m, **ENTÃO permanece** o estado de E1-01B ou E1-02B;

- **Intervalo de tempo 4: 20:00 à 24:00 horas (noite):** nível inicial: 1,30 m; faixa de controle ótima: (1,00 – 1,60) m;

Regra 1: **SE** nível de R-Boqueirão for **maior** que 1,60 m, **ENTÃO desliga** E1-01B ou E1-02B;

Regra 2: **SE** nível de R-Boqueirão for **menor** que 1,00 m, **ENTÃO liga** E1-01B ou E1-02B;

Regra 3: **SE** nível de R-Boqueirão for **menor** que 1,60 m **E maior** que 1,00 m, **ENTÃO permanece** o estado de E1-01B ou E1-02B;

SUBSISTEMA 4:

Variável de controle: nível de R-Cabaceiras; variável de operação: estado da bomba E2-01B ou E2-02B;

- **Intervalo de tempo 1: 00:00 à 06:00 horas (madrugada):** faixa de controle ótima: (2,25 – 2,70) m;

Regra 1: **SE** nível de R-Cabaceiras for **maior** que 2,70 m, **ENTÃO desliga** E2-01B ou E2-02B;

Regra 2: **SE** nível de R-Cabaceiras for **menor** que 2,25 m, **ENTÃO liga** E2-01B ou E2-02B;

Regra 3: **SE** nível de R-Cabaceiras for **menor** que 2,70 m **E maior** que 2,25 m, **ENTÃO permanece** o estado de E2-01B ou E2-02B;

- **Intervalo de tempo 2: 06:00 à 17:00 horas (dia):** faixa de controle ótima: (2,25 – 2,70) m;

Regra 1: **SE** nível de R-Cabaceiras for **maior** que 2,70 m, **ENTÃO desliga** E2-01B ou E2-02B;

Regra 2: **SE** nível de R-Cabaceiras for **menor** que 2,25 m, **ENTÃO liga** E2-01B ou E2-02B;

Regra 3: **SE** nível de R-Cabaceiras for **menor** que 2,70 m **E maior** que 2,25 m, **ENTÃO permanece** o estado de E2-01B ou E2-02B;;

- **Intervalo tempo 3: 17:00 à 20:00 horas (ponta):** faixa de controle ótima: (0,15 – 1,15) m;

Regra 1: **SE** nível de R-Cabaceiras for **maior** que 1,15 m, **ENTÃO desliga** E2-01B ou E2-02B;

Regra 2: **SE** nível de R-Cabaceiras for **menor** que 0,15 m, **ENTÃO liga** E2-01B ou E2-02B;

Regra 3: **SE** nível de R-Cabaceiras for **menor** que 1,15 m **E maior** que 0,15 m, **ENTÃO permanece** o estado de E2-01B ou E2-02B;

- **Intervalo de tempo 4: 20:00 à 24:00 horas (noite):** nível inicial: 1,25 m; faixa de controle ótima: (0,95 – 1,55) m;

Regra 1: **SE** nível de R-Cabaceiras for **maior** que 1,55 m, **ENTÃO desliga** E2-01B ou E2-02B;

Regra 2: **SE** nível de R-Cabaceiras for **menor** que 0,15 m, **ENTÃO liga** E2-01B ou E2-02B;

Regra 3: **SE** nível de R-Cabaceiras for **menor** que 1,55 m **E maior** que 0,15 m, **ENTÃO permanece** o estado de E2-01B ou E2-02B;

SUBSISTEMA 5:

Variável de controle: nível de R-EE3; variável de operação: estado da bomba E2-01A ou E2-02A;

- **Intervalo de tempo 1: 00:00 à 06:00 horas (madrugada):** faixa de controle ótima: (2,00 – 3,00) m;

Regra 1: **SE** nível de R-EE3 for **maior** que 3,00 m, **ENTÃO desliga** E2-01A ou E2-02A;

Regra 2: **SE** nível de R-EE3 for **menor** que 2,00 m, **ENTÃO liga** E2-01A ou E2-02A;

Regra 3: **SE** nível de R-EE3 for **menor** que 3,00 m **E maior** que 2,00 m, **ENTÃO permanece** o estado de E2-01A ou E2-02A;

- **Intervalo de tempo 2: 06:00 à 17:00 horas (dia):** faixa de controle ótima: (2,50 – 3,00) m;

Regra 1: **SE** nível de R-EE3 for **maior** que 3,00 m, **ENTÃO desliga** E2-01A ou E2-02A;

Regra 2: **SE** nível de R-EE3 for **menor** que 2,50 m, **ENTÃO liga** E2-01A ou E2-02A;

Regra 3: **SE** nível de R-EE3 for **menor** que 3,00 m **E maior** que 2,50 m, **ENTÃO permanece** o estado de E2-01A ou E2-02A;

- **Intervalo tempo 3: 17:00 à 20:00 horas (ponta):** faixa de controle ótima: (0,20 – 1,00) m;

Regra 1: **SE** nível de R-EE3 for **maior** que 1,00 m, **ENTÃO desliga** E2-01A ou E2-02A;

Regra 2: **SE** nível de R-EE3 for **menor** que 0,20 m, **ENTÃO liga** E2-01A ou E2-02A;

Regra 3: **SE** nível de R-EE3 for **menor** que 1,00 m **E maior** que 0,20 m, **ENTÃO permanece** o estado de E2-01A ou E2-02A;

- **Intervalo de tempo 4: 20:00 à 24:00 horas (noite):** nível inicial: 1,55 m; faixa de controle ótima: (1,25 – 1,85) m;

Regra 1: **SE** nível de R-EE3 for **maior** que 1,85 m, **ENTÃO desliga** E2-01A ou E2-02A;

Regra 2: **SE** nível de R-EE3 for **menor** que 1,25 m, **ENTÃO liga** E2-01A ou E2-02A;

Regra 3: **SE** nível de R-EE3 for **menor** que 1,85 m e **maior** que 1,25 m, **ENTÃO permanece** o estado de E2-01A ou E2-02A;

SUBSISTEMA 6:

Variável de controle: nível de R-Boa Vista; variável de operação: estado da bomba E3-01B ou E3-02B;

- **Intervalo de tempo 1: 00:00 à 06:00 horas (madrugada):** faixa de controle ótima: (3,00 – 3,90) m;

Regra 1: **SE** nível de R-Boa Vista for **maior** que 3,90 m, **ENTÃO desliga** E3-01B ou E3-02B;

Regra 2: **SE** nível de R-Boa Vista for **menor** que 3,00 m, **ENTÃO liga** E3-01B ou E3-02B;

Regra 3: **SE** nível de R-Boa Vista for **menor** que 3,90 m **E maior** que 3,00 m, **ENTÃO permanece** o estado de E3-01B ou E3-02B;

- **Intervalo de tempo 2: 06:00 à 17:00 horas (dia):** faixa de controle ótima: (3,20 – 3,90) m;

Regra 1: **SE** nível de R-Boa Vista for **maior** que 3,90 m, **ENTÃO desliga** E3-01B ou E3-02B;

Regra 2: **SE** nível de R-Boa Vista for **menor** que 3,20 m, **ENTÃO liga** E3-01B ou E3-02B;

Regra 3: **SE** nível de R-Boa Vista for **menor** que 3,90 m **E maior** que 3,20 m, **ENTÃO permanece** o estado de E3-01B ou E3-02B;

- **Intervalo tempo 3: 17:00 à 20:00 horas (ponta):** faixa de controle ótima: (0,15 – 1,15) m;

Regra 1: **SE** nível de R-Boa Vista for **maior** que 1,15 m, **ENTÃO desliga** E3-01B ou E3-02B;

Regra 2: **SE** nível de R-Boa Vista for **menor** que 0,15 m, **ENTÃO liga** E3-01B ou E3-02B;

Regra 3: **SE** nível de R-Boa Vista for **menor** que 1,15 m **E maior** que 0,15 m, **ENTÃO permanece** o estado de E3-01B ou E3-02B;

- **Intervalo de tempo 4: 20:00 à 24:00 horas (noite):** nível inicial: 2,00 m; faixa de controle ótima: (1,70 – 2,30) m;

Regra 1: **SE** nível de R-Boa Vista for **maior** que 2,30 m, **ENTÃO desliga** E3-01B ou E3-02B;

Regra 2: **SE** nível de R-Boa Vista for **menor** que 1,70 m, **ENTÃO liga** E3-01B ou E3-02B;

Regra 3: **SE** nível de R-Boa Vista for **menor** que 2,30 m **E maior** que 1,70 m, **ENTÃO permanece** o estado de E3-01B ou E3-02B;

SUBSISTEMA 7:

Variável de controle: nível de R-EE4; variável de operação: estado da bomba E3-01A ou E3-02A;

- **Intervalo de tempo 1: 00:00 à 06:00 horas (madrugada):** faixa de controle ótima: (1,00 – 1,70) m;

Regra 1: **SE** nível de R-EE4 for **maior** que 1,70 m, **ENTÃO desliga** E3-01A ou E3-02A;

Regra 2: **SE** nível de R-EE4 for **menor** que 1,00 m, **ENTÃO liga** E3-01A ou E3-02A;

Regra 3: **SE** nível de R-EE4 for **menor** que 1,70 m **E maior** que 1,00 m, **ENTÃO permanece** o estado de E3-01A ou E3-02A;

- **Intervalo de tempo 2: 06:00 à 17:00 horas (dia):** faixa de controle ótima: (1,20 – 1,70) m;

Regra 1: **SE** nível de R-EE4 for **maior** que 1,70 m, **ENTÃO desliga** E3-01A ou E3-02A;

Regra 2: **SE** nível de R-EE4 for **menor** que 1,20 m, **ENTÃO liga** E3-01A ou E3-02A;

Regra 3: **SE** nível de R-EE4 for **menor** que 1,70 m **E maior** que 1,20 m, **ENTÃO permanece** o estado de E3-01A ou E3-02A;

- **Intervalo tempo 3: 17:00 à 20:00 horas (ponta):** faixa de controle ótima: (0,20 – 0,90) m;

Regra 1: **SE** nível de R-EE4 for **maior** que 0,90 m, **ENTÃO desliga** E3-01A ou E3-02A;

Regra 2: **SE** nível de R-EE4 for **menor** que 0,20 m, **ENTÃO liga** E3-01A ou E3-02A;

Regra 3: **SE** nível de R-EE4 for **menor** que 0,90 m **E maior** que 0,20 m, **ENTÃO permanece** o estado de E3-01A ou E3-02A;

- **Intervalo de tempo 4: 20:00 à 24:00 horas (noite):** nível inicial: 0,90 m; faixa de controle ótima: (0,60 – 1,20) m;

Regra 1: **SE** nível de R-EE4 for **maior** que 1,20 m, **ENTÃO desliga** E3-01A ou E3-02A;

Regra 2: **SE** nível de R-EE4 for **menor** que 0,60 m, **ENTÃO liga** E3-01A ou E3-02A;

Regra 3: **SE** nível de R-EE4 for **menor** que 1,20 m **E maior** que 0,60 m, **ENTÃO permanece** o estado de E3-01A ou E3-02A;

SUBSISTEMA 8:

Variável de controle: nível de R-Soledade; variável de operação: estado da bomba E4-01A ou E4-02A;

- **Intervalo de tempo 1: 00:00 à 06:00 horas (madrugada):** faixa de controle ótima: (3,40 – 4,75) m;

Regra 1: **SE** nível de R-Soledade for **maior** que 4,75 m, **ENTÃO desliga** E4-01A ou E4-02A;

Regra 2: **SE** nível de R-Soledade for **menor** que 3,40 m, **ENTÃO liga** E4-01A ou E4-02A;

Regra 3: **SE** nível de R- Soledade for **menor** que 4,75 m **E maior** que 3,40 m, **ENTÃO permanece** o estado de E4-01A ou E4-02A;

- **Intervalo de tempo 2: 06:00 à 17:00 horas (dia):** faixa de controle ótima: (3,90 – 4,75) m;

Regra 1: **SE** nível de R-Soledade for **maior** que 4,75 m, **ENTÃO desliga** E4-01A ou E4-02A;

Regra 2: **SE** nível de R-Soledade for **menor** que 3,90 m, **ENTÃO liga** E4-01A ou E4-02A;

Regra 3: **SE** nível de R-Soledade for **menor** que 4,75 m **E maior** que 3,90 m, **ENTÃO permanece** o estado de E4-01A ou E4-02A;

- **Intervalo tempo 3: 17:00 à 20:00 horas (ponta):** faixa de controle ótima: (0,25 – 1,24 m);

Regra 1: **SE** nível de R-Soledade for **maior** que 1,24 m, **ENTÃO desliga** E4-01A ou E4-02A;

Regra 2: **SE** nível de R- Soledade for **menor** que 0,25 m, **ENTÃO liga** E4-01A ou E4-02A;

Regra 3: **SE** nível de R-Soledade for **menor** que 1,24 m **E maior** que 0,25 m, **ENTÃO permanece** o estado de E4-01A ou E4-02A;

- **Intervalo de tempo 4: 20:00 à 24:00 horas (noite):** nível inicial: 2,40 m; faixa de controle ótima: (2,10 – 2,70) m;

Regra 1: **SE** nível de R-Soledade for **maior** que 2,70 m, **ENTÃO desliga** E4-01A ou E4-02A;

Regra 2: **SE** nível de R-Soledade for **menor** que 2,10 m, **ENTÃO liga** E4-01A ou E4-02A;

Regra 3: **SE** nível de R-Soledade for **menor** que 2,70 m **E maior** que 2,10 m, **ENTÃO permanece** o estado de E4-01A ou E4-02A;

SUBSISTEMA 9:

Variável de controle: nível de R-EE5; variável de operação: estado da bomba E4-01B ou E4-02B;

- **Intervalo de tempo 1: 00:00 à 06:00 horas (madrugada):** faixa de controle ótima: (1,50 – 2,00) m;

Regra 1: **SE** nível de R-EE5 for **maior** que 2,00 m, **ENTÃO desliga** E4-01B ou E4-02B;

Regra 2: **SE** nível de R-EE5 for **menor** que 1,50 m, **ENTÃO liga** E4-01B ou E4-02B;

Regra 3: **SE** nível de R-EE5 for **menor** que 2,00 m **E maior** que 1,50 m, **ENTÃO permanece** o estado de E4-01B ou E4-02B;

- **Intervalo de tempo 2: 06:00 à 17:00 horas (dia):** faixa de controle ótima: (1,50 – 2,00) m;

Regra 1: **SE** nível de R-EE5 for **maior** que 2,00 m, **ENTÃO desliga** E4-01B ou E4-02B;

Regra 2: **SE** nível de R-EE5 for **menor** que 1,50 m, **ENTÃO liga** E4-01B ou E4-02B;

Regra 3: **SE** nível de R-EE5 for **menor** que 2,00 m **E maior** que 1,50 m, **ENTÃO permanece** o estado de E4-01B ou E4-02B;

- **Intervalo tempo 3: 17:00 à 20:00 horas (ponta):** faixa de controle ótima: (0,20 – 1,00) m;

Regra 1: **SE** nível de R-EE5 for **maior** que 1,00 m, **ENTÃO desliga** E4-01B ou E4-02B;

Regra 2: **SE** nível de R-EE5 for **menor** que 0,20 m, **ENTÃO liga** E4-01B ou E4-02B;

Regra 3: **SE** nível de R-EE5 for **menor** que 1,00 m **E maior** que 0,20 m, **ENTÃO permanece** o estado de E4-01B ou E4-02B;

- **Intervalo de tempo 4: 20:00 à 24:00 horas (noite):** nível inicial: 1,00 m; faixa de controle ótima: (0,70 – 1,30) m;

Regra 1: **SE** nível de R-EE5 for **maior** que 1,30 m, **ENTÃO desliga** E4-01B ou E4-02B;

Regra 2: **SE** nível de R-EE5 for **menor** que 0,70 m, **ENTÃO liga** E4-01B ou E4-02B;

Regra 3: **SE** nível de R-EE5 for **menor** que 1,30 m **E maior** que 0,70 m, **ENTÃO permanece** o estado de E4-01B ou E4-02B;

SUBSISTEMA 10:

Variável de controle: nível de R-Juazeirinho; variável de operação: estado da bomba E5-01A ou E5-02A;

- **Intervalo de tempo 1: 00:00 à 06:00 horas (madrugada):** faixa de controle ótima: (2,00 – 2,50) m;

Regra 1: **SE** nível de R-Juazeirinho for **maior** que 2,50 m, **ENTÃO desliga** E5-01A ou E5-02A;

Regra 2: **SE** nível de R-Juazeirinho for **menor** que 2,00 m, **ENTÃO liga** E5-01A ou E5-02A;

Regra 3: **SE** nível de R-Juazeirinho for **menor** que 2,50 m **E maior** que 2,00 m, **ENTÃO permanece** o estado de E5-01A ou E5-02A;

- **Intervalo de tempo 2: 06:00 à 17:00 horas (dia):** faixa de controle ótima: (2,00 – 2,50) m;

Regra 1: **SE** nível de R-Juazeirinho for **maior** que 2,50 m, **ENTÃO desliga** E5-01A ou E5-02A;

Regra 2: **SE** nível de R-Juazeirinho for **menor** que 2,00 m, **ENTÃO liga** E5-01A ou E5-02A;

Regra 3: **SE** nível de R-Juazeirinho for **menor** que 2,50 m **E maior** que 2,00 m, **ENTÃO permanece** o estado de E5-01A ou E5-02A;

- **Intervalo tempo 3: 17:00 à 20:00 horas (ponta):** faixa de controle ótima: (0,20 – 1,00) m;

Regra 1: **SE** nível de R-Juazeirinho for **maior** que 1,00 m, **ENTÃO desliga** E5-01A ou E5-02A;

Regra 2: **SE** nível de R-Juazeirinho for **menor** que 0,20 m, **ENTÃO liga** E5-01A ou E5-02A;

Regra 3: **SE** nível de R-Juazeirinho for **menor** que 1,00 m **E maior** que 0,20 m, **ENTÃO permanece** o estado de E5-01A ou E5-02A;

- **Intervalo de tempo 4: 20:00 à 24:00 horas (noite):** nível inicial: 1,30 m; faixa de controle ótima: (1,00 – 1,60) m;

Regra 1: **SE** nível de R-Juazeirinho for **maior** que 1,60 m, **ENTÃO desliga** E5-01A ou E5-02A;

Regra 2: **SE** nível de R-Juazeirinho for **menor** que 1,00 m, **ENTÃO liga** E5-01A ou E5-02A;

Regra 3: **SE** nível de R-Juazeirinho for **menor** que 1,60 m **E maior** que 1,60 m, **ENTÃO permanece** o estado de E5-01A ou E5-02A;

SUBSISTEMA 12:

Variável de controle: nível de R-Olivedos; variável de operação: estado da bomba E6-01B ou E6-02B;

- **Intervalo de tempo 1: 00:00 à 06:00 horas (madrugada):** faixa de controle ótima: (3,20 – 3,90) m;

Regra 1: **SE** nível de R-Olivedos for **maior** que 3,90 m, **ENTÃO desliga** E6-01B ou E6-02B;

Regra 2: **SE** nível de R-Olivedos for **menor** que 3,20 m, **ENTÃO liga** E6-01B ou E6-02B;

Regra 3: **SE** nível de R-Olivedos for **menor** que 3,90 m **E maior** que 3,20 m, **ENTÃO permanece** o estado de E6-01B ou E6-02B;

- **Intervalo de tempo 2: 06:00 à 17:00 horas (dia):** faixa de controle ótima: (3,20 – 3,90) m;

Regra 1: **SE** nível de R-Olivedos for **maior** que 3,90 m, **ENTÃO desliga** E6-01B ou E6-02B;

Regra 2: **SE** nível de R-Olivedos for **menor** que 3,20 m, **ENTÃO liga** E6-01B ou E6-02B;

Regra 3: **SE** nível de R-Olivedos for **menor** que 3,90 m **E maior** que 3,20 m, **ENTÃO permanece** o estado de E6-01B ou E6-02B;

- **Intervalo tempo 3: 17:00 à 20:00 horas (ponta):** faixa de controle ótima: (0,15 – 1,15) m;

Regra 1: **SE** nível de R-Olivedos for **maior** que 1,15 m, **ENTÃO desliga** E6-01B ou E6-02B;

Regra 2: **SE** nível de R-Olivedos for **menor** que 0,15 m, **ENTÃO liga** E6-01B ou E6-02B;

Regra 3: **SE** nível de R-Olivedos for **menor** que 1,15 m **E maior** que 0,15 m, **ENTÃO permanece** o estado de E6-01B ou E6-02B;

- **Intervalo de tempo 4: 20:00 à 24:00 horas (noite):** nível inicial: 2,00 m; faixa de controle ótima: (1,70 – 2,30) m;

Regra 1: **SE** nível de R-Olivedos for **maior** que 2,30 m, **ENTÃO desliga** E6-01B ou E6-02B;

Regra 2: **SE** nível de R-Olivedos for **menor** que 1,70 m, **ENTÃO liga** E6-01B ou E6-02B;

Regra 3: **SE** nível de R-Olivedos for **menor** que 2,30 m **E maior** que 1,70 m, **ENTÃO permanece** o estado de E6-01B ou E6-02B;

SUBSISTEMA 13:

Variável de controle: nível de R-Cubatí; variável de operação: estado da bomba E6-01C ou E6-02C;

- **Intervalo de tempo 1: 00:00 à 06:00 horas (madrugada):** faixa de controle ótima: (3,20 – 4,40) m;

Regra 1: **SE** nível de R-Cubatí for **maior** que 4,40 m, **ENTÃO desliga** E6-01C ou E6-02C;

Regra 2: **SE** nível de R-Cubatí for **menor** que 3,20 m, **ENTÃO liga** E6-01C ou E6-02C;

Regra 3: **SE** nível de R-Cubatí for **menor** que 4,40 m **E maior** que 3,20 m, **ENTÃO permanece** o estado de E6-01C ou E6-02C;

- **Intervalo de tempo 2: 06:00 à 17:00 horas (dia):** faixa de controle ótima: (3,60 – 4,40) m;

Regra 1: **SE** nível de R-Cubatí for **maior** que 4,40 m, **ENTÃO desliga** E6-01C ou E6-02C;

Regra 2: **SE** nível de R-Cubatí for **menor** que 3,60 m, **ENTÃO liga** E6-01C ou E6-02C;

Regra 3: **SE** nível de R-Cubatí for **menor** que 4,40 m **E maior** que 3,60 m, **ENTÃO permanece** o estado de E6-01C ou E6-02C;

- **Intervalo tempo 3: 17:00 à 20:00 horas (ponta):** faixa de controle ótima: (0,20 – 1,20) m;

Regra 1: **SE** nível de R-Cubatí for **maior** que 1,20 m, **ENTÃO desliga** E6-01C ou E6-02C;

Regra 2: **SE** nível de R-Cubatí for **menor** que 0,20 m, **ENTÃO liga** E6-01C ou E6-02C;

Regra 3: **SE** nível de R-Cubatí for **menor** que 1,20 m **E maior** que 0,20 m, **ENTÃO permanece** o estado de E6-01C ou E6-02C;

- **Intervalo de tempo 4: 20:00 à 24:00 horas (noite):** nível inicial: 2,30 m; faixa de controle ótima: (2,00 – 2,60) m;

Regra 1: **SE** nível de R-Cubatí for **maior** que 2,60 m, **ENTÃO desliga** E6-01C ou E6-02C;

Regra 2: **SE** nível de R-Cubatí for **menor** que 2,00 m, **ENTÃO liga** E6-01C ou E6-02C;

Regra 3: **SE** nível de R-Cubatí for **menor** que 2,60 m **E maior** que 2,00 m, **ENTÃO permanece** o estado de E6-01C ou E6-02C;

SUBSISTEMA 14:

Variável de controle: nível de R-Pedra Lavrada; variável de operação: estado da bomba E6-01A ou E6-02A;

- **Intervalo de tempo 1: 00:00 à 06:00 horas (madrugada):** faixa de controle ótima: (3,20 – 3,90) m;

Regra 1: **SE** nível de R-Pedra Lavrada for **maior** que 3,90 m, **ENTÃO desliga** E6-01A ou E6-02A;

Regra 2: **SE** nível de R-Pedra Lavrada for **menor** que 3,20 m, **ENTÃO liga** E6-01A ou E6-02A;

Regra 3: **SE** nível de R-Pedra Lavrada for **menor** que 3,90 m **E maior** que 3,20 m, **ENTÃO permanece** o estado de E6-01A ou E6-02A;

- **Intervalo de tempo 2: 06:00 à 17:00 horas (dia):** faixa de controle ótima: (3,20 – 3,90) m;

Regra 1: **SE** nível de R-Pedra Lavrada for **maior** que 3,90 m, **ENTÃO desliga** E6-01A ou E6-02A;

Regra 2: **SE** nível de R-Pedra Lavrada for **menor** que 3,20 m, **ENTÃO liga** E6-01A ou E6-02A;

Regra 3: **SE** nível de R-Pedra Lavrada for **menor** que 3,90 m **E maior** que 3,20 m, **ENTÃO permanece** o estado de E6-01A ou E6-02A;

- **Intervalo tempo 3: 17:00 à 20:00 horas (ponta):** faixa de controle ótima: (0,15 – 1,15) m;

Regra 1: **SE** nível de R-Pedra Lavrada for **maior** que 1,15 m, **ENTÃO desliga** E6-01A ou E6-02A;

Regra 2: **SE** nível de R-Pedra Lavrada for **menor** que 0,15 m, **ENTÃO liga** E6-01A ou E6-02A;

Regra 3: **SE** nível de R-Pedra Lavrada for **menor** que 1,15 m **E maior** que 0,15 m, **ENTÃO permanece** o estado de E6-01A ou E6-02A;

- **Intervalo de tempo 4: 20:00 à 24:00 horas (noite):** nível inicial: 2,00 m; faixa de controle ótima: (1,70 – 2,30) m;

Regra 1: **SE** nível de R-Pedra Lavrada for **maior** que 2,30 m, **ENTÃO desliga** E6-01A ou E6-02A;

Regra 2: **SE** nível de R-Pedra Lavrada for **menor** que 1,70 m, **ENTÃO liga** E6-01C ou E6-02C;

Regra 3: **SE** nível de R-Pedra Lavrada for **menor** que 2,30 m **E maior** que 1,70 m, **ENTÃO permanece** o estado de E6-01C ou E6-02C;

ANEXO B

FUZIFICAÇÃO DO NÍVEL DOS RESERVATÓRIOS

Reservatório R-EE1:

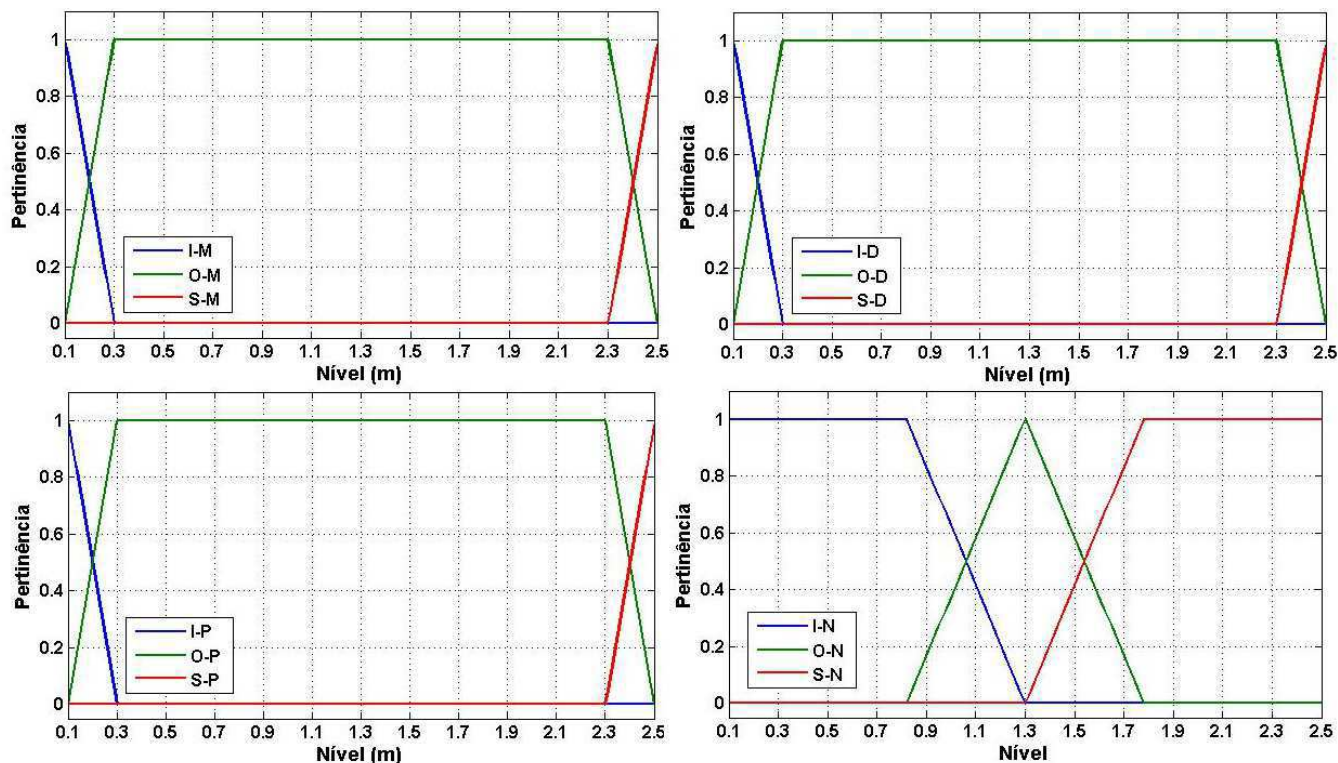


Figura B.1: Funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-EE1 para os quatro intervalos de tempo (Madrugada, Dia, Ponta e Noite).

Tabela B.1: Valores dos vértices das funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-EE1 para os quatro intervalos de tempo .

Intervalo	Função de pertinência	Forma	Valores dos vértices (m)			
Madrugada	I-M	Triangular	0,10	0,10	0,30	-
	O-M	Trapezoidal	0,10	0,30	2,30	2,50
	S-M	Triangular	2,30	2,50	2,50	-
Dia	I-D	Triangular	0,10	0,30	2,30	2,50
	O-D	Trapezoidal	2,30	2,50	2,50	-
	S-D	Triangular	0,10	0,30	2,30	2,50
Ponta	I-P	Triangular	0,10	0,30	2,30	2,50
	O-P	Trapezoidal	2,30	2,50	2,50	-
	S-P	Triangular	0,10	0,30	2,30	2,50
Noite	I-N	Trapezoidal	0,10	0,10	0,82	1,30
	O-N	Triangular	0,82	1,30	1,78	-
	S-N	Trapezoidal	1,30	1,78	2,50	2,50

Reservatório R-EE2:

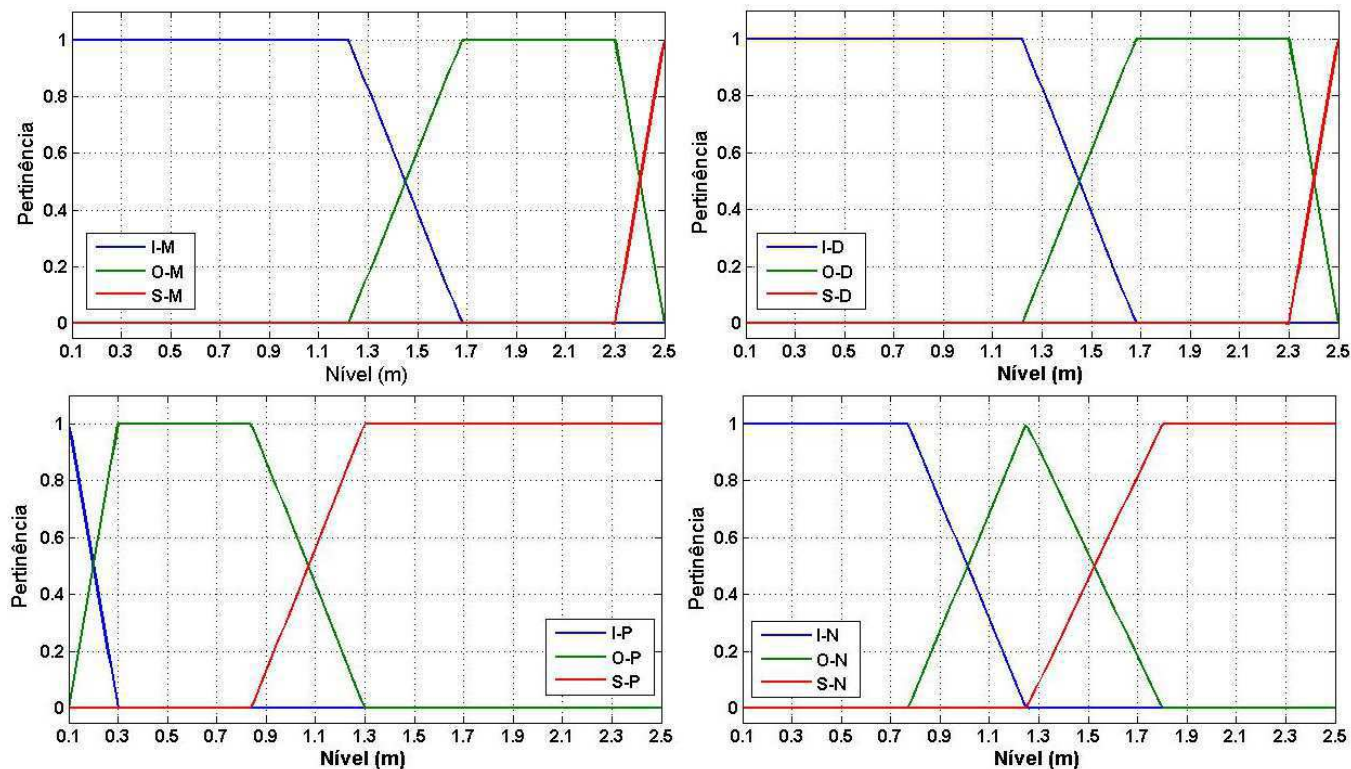


Figura B.2: Funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-EE2 para os quatro intervalos de tempo (Madrugada, Dia, Ponta e Noite).

Tabela B.2: Valores dos vértices das funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-EE2 para os quatro intervalos de tempo.

Intervalo	Função de pertinência	Forma	Valores dos vértices (m)			
Madrugada	I-M	Trapezoidal	0,10	0,10	1,22	1,68
	O-M	Trapezoidal	1,22	1,68	2,30	2,50
	S-M	Triangular	2,30	2,50	2,50	-
Dia	I-D	Trapezoidal	0,10	0,10	1,22	1,68
	O-D	Trapezoidal	1,22	1,68	2,30	2,50
	S-D	Triangular	2,30	2,50	2,50	-
Ponta	I-P	Triangular	0,10	0,10	0,30	-
	O-P	Trapezoidal	0,10	0,30	0,84	1,30
	S-P	Trapezoidal	0,84	1,30	2,50	2,50
Noite	I-N	Trapezoidal	0,10	0,10	0,77	1,25
	O-N	Triangular	0,77	1,25	1,80	-
	S-N	Trapezoidal	1,25	1,80	2,50	2,50

Reservatório R-Cabaceiras:

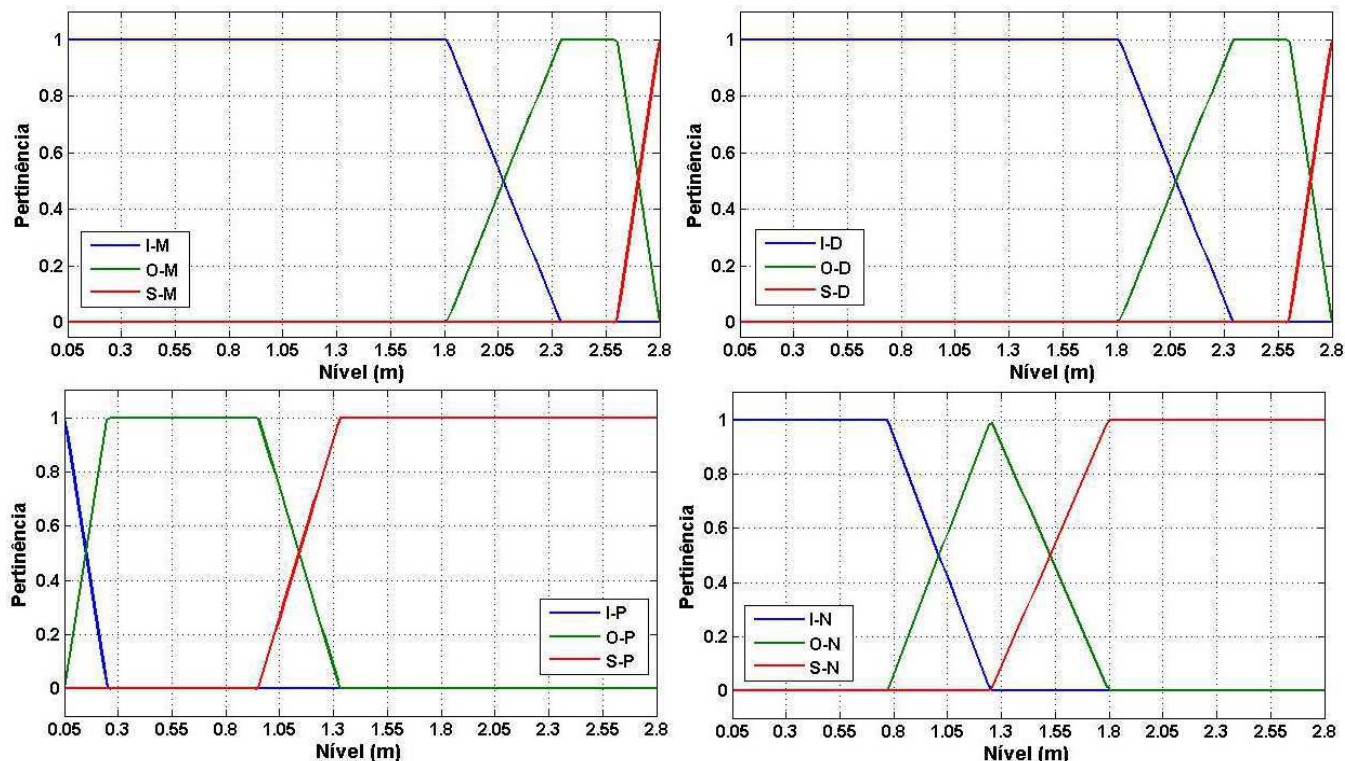


Figura B.3: Funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-Cabaceiras para os quatro intervalos de tempo (Madrugada, Dia, Ponta e Noite).

Tabela B.3: Valores dos vértices das funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-Cabaceiras para os quatro intervalos de tempo.

Intervalo	Função de pertinência	Forma	Valores dos vértices (m)			
Madrugada	I-M	Trapezoidal	0,05	0,05	1,81	2,34
	O-M	Trapezoidal	1,81	2,34	2,60	2,80
	S-M	Triangular	2,60	2,80	2,80	-
Dia	I-D	Trapezoidal	0,05	0,05	1,81	2,34
	O-D	Trapezoidal	1,81	2,34	2,60	2,80
	S-D	Triangular	2,60	2,80	2,80	-
Ponta	I-P	Triangular	0,05	0,05	0,25	-
	O-P	Trapezoidal	0,05	0,25	0,95	1,33
	S-P	Trapezoidal	0,95	1,33	2,80	2,80
Noite	I-N	Trapezoidal	0,05	0,05	0,77	1,25
	O-N	Triangular	0,77	1,25	1,80	-
	S-N	Trapezoidal	1,25	1,80	2,80	2,80

Reservatório R-EE3:

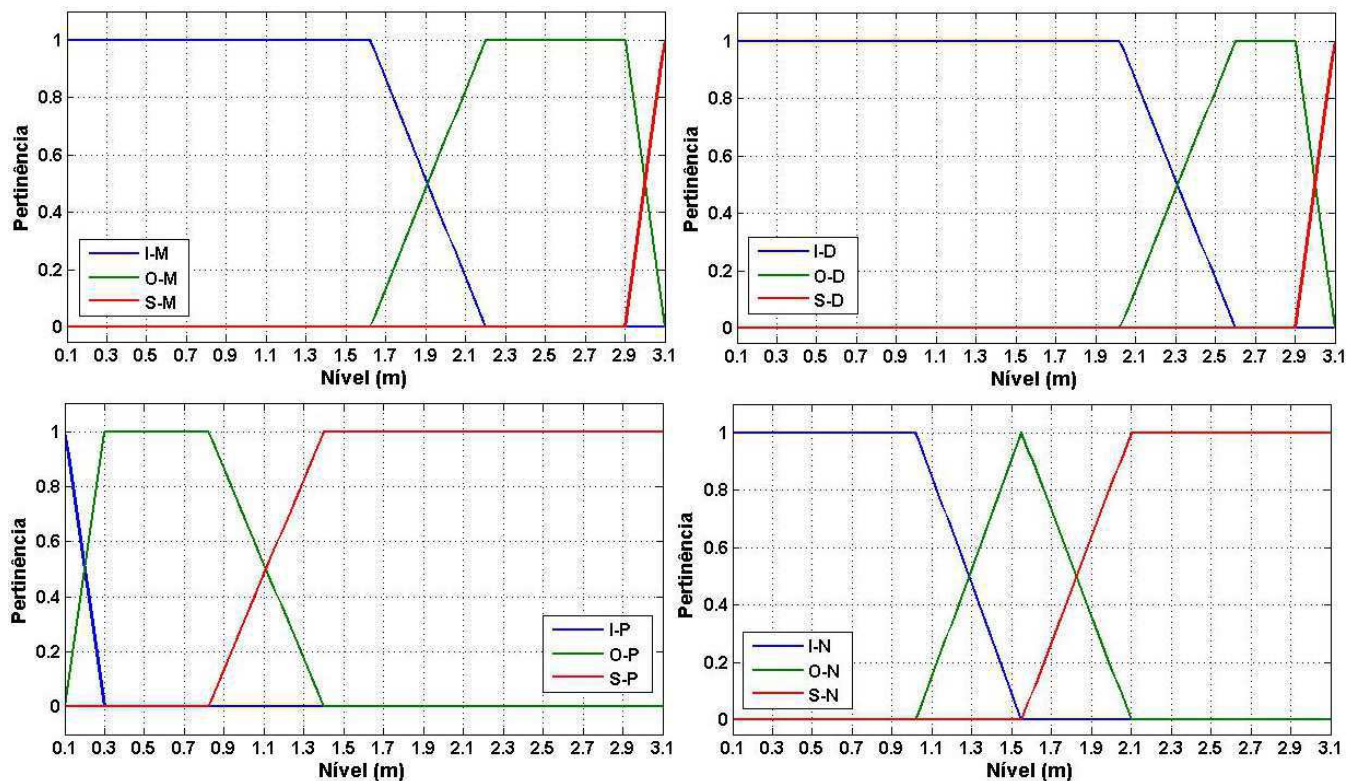


Figura B.4: Funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-EE3 para os quatro intervalos de tempo (Madrugada, Dia, Ponta e Noite).

Tabela B.4: Valores dos vértices das funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-EE3 para os quatro intervalos de tempo.

Intervalo	Função de pertinência	Forma	Valores dos vértices (m)			
Madrugada	I-M	Trapezoidal	0,10	0,10	1,62	2,20
	O-M	Trapezoidal	1,62	2,20	2,90	3,10
	S-M	Triangular	2,90	3,10	3,10	-
Dia	I-D	Trapezoidal	0,10	0,10	2,90	2,31
	O-D	Trapezoidal	2,90	2,31	2,90	3,10
	S-D	Triangular	2,90	3,10	3,10	-
Ponta	I-P	Triangular	0,10	0,10	0,30	-
	O-P	Trapezoidal	0,10	0,30	0,82	1,40
	S-P	Trapezoidal	0,82	1,40	3,10	3,10
Noite	I-N	Trapezoidal	0,10	0,10	1,02	1,55
	O-N	Triangular	1,02	1,55	2,10	-
	S-N	Trapezoidal	1,55	2,10	3,10	3,10

Reservatório R-Boa Vista:

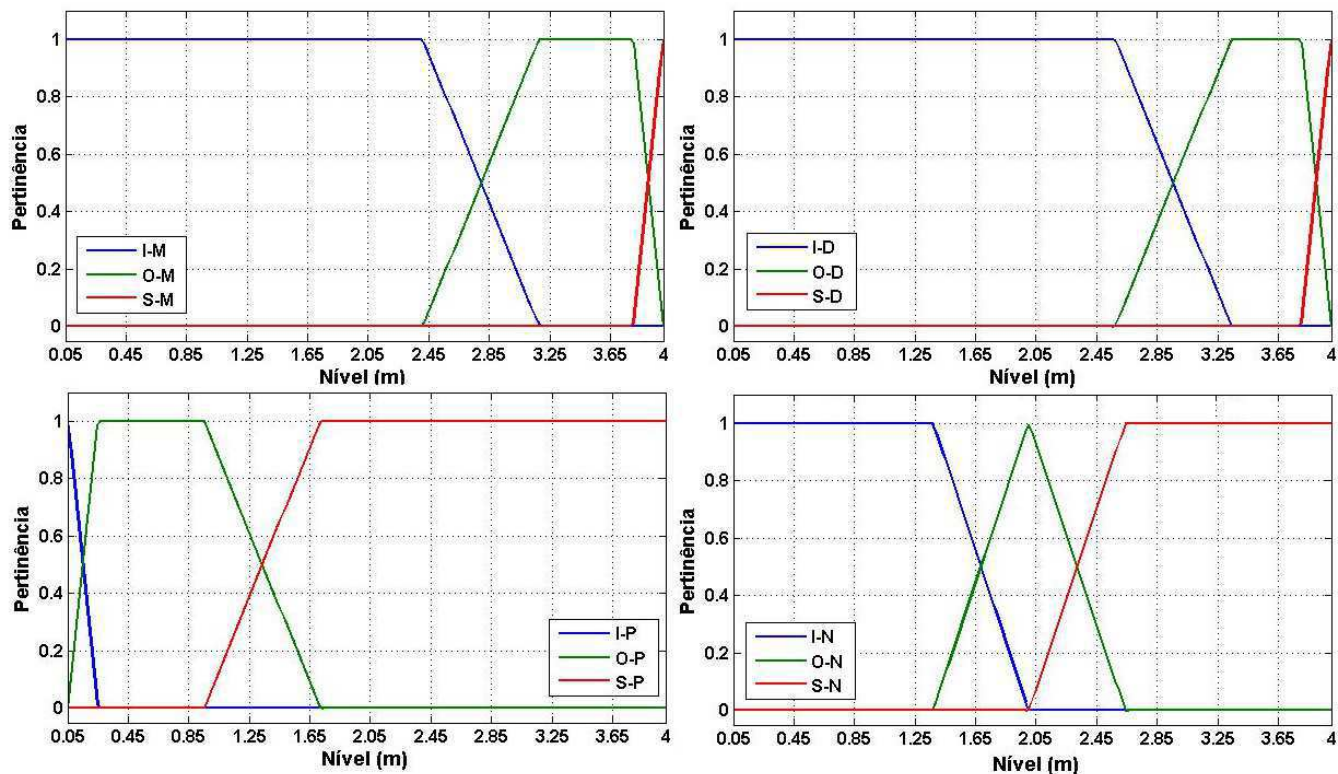


Figura B.5: Funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-Boa Vista para os quatro intervalos de tempo (Madrugada, Dia, Ponta e Noite).

Tabela B.5: Valores dos vértices das funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-Boa Vista para os quatro intervalos de tempo.

Intervalo	Função de pertinência	Forma	Valores dos vértices (m)			
Madrugada	I-M	Trapezoidal	0,05	0,05	2,41	3,18
	O-M	Trapezoidal	2,41	3,18	3,80	4,00
	S-M	Triangular	3,80	4,00	4,00	-
Dia	I-D	Trapezoidal	0,05	0,05	2,57	2,34
	O-D	Trapezoidal	2,57	2,34	3,80	4,00
	S-D	Triangular	3,80	4,00	4,00	-
Ponta	I-P	Triangular	0,05	0,05	0,25	-
	O-P	Trapezoidal	0,05	0,25	0,95	1,72
	S-P	Trapezoidal	0,95	1,72	4,00	4,00
Noite	I-N	Trapezoidal	0,05	0,05	1,37	2,00
	O-N	Triangular	1,37	2,00	2,64	-
	S-N	Trapezoidal	2,00	2,64	4,00	4,00

Reservatório R-EE4:

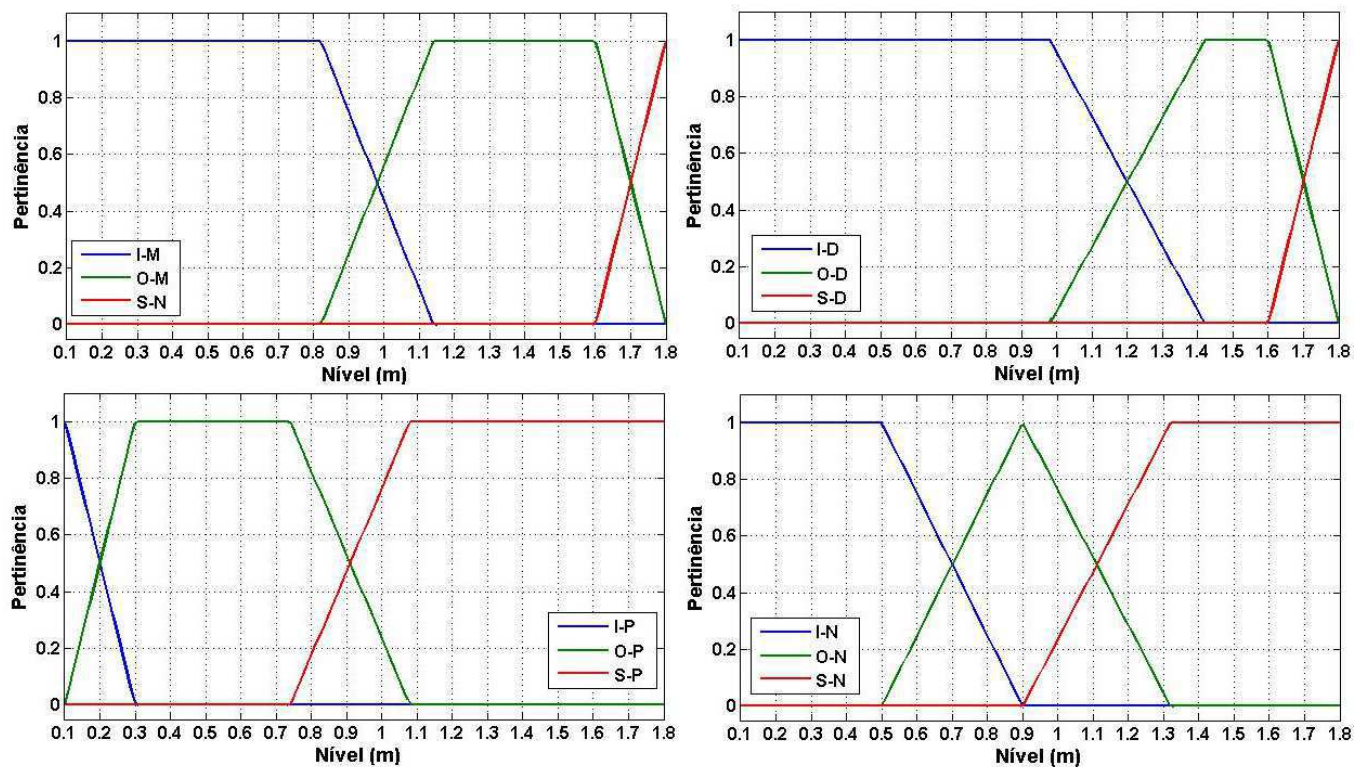


Figura B.6: Funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-EE4 para os quatro intervalos de tempo (Madrugada, Dia, Ponta e Noite).

Tabela B.6: Valores dos vértices das funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-EE4 para os quatro intervalos de tempo.

Intervalo	Função de pertinência	Forma	Valores dos vértices (m)			
Madrugada	I-M	Trapezoidal	0,10	0,10	0,82	1,14
	O-M	Trapezoidal	0,82	1,14	1,60	1,80
	S-M	Triangular	1,60	1,80	1,80	-
Dia	I-D	Trapezoidal	0,10	0,10	0,98	1,42
	O-D	Trapezoidal	0,98	1,42	1,60	1,80
	S-D	Triangular	1,60	1,80	1,80	-
Ponta	I-P	Triangular	0,10	0,10	0,30	-
	O-P	Trapezoidal	0,10	0,30	0,74	1,08
	S-P	Trapezoidal	0,74	1,08	1,80	1,80
Noite	I-N	Trapezoidal	0,10	0,10	0,50	0,90
	O-N	Triangular	0,50	0,90	1,32	-
	S-N	Trapezoidal	0,90	1,32	1,80	1,80

Reservatório R-Soledade:

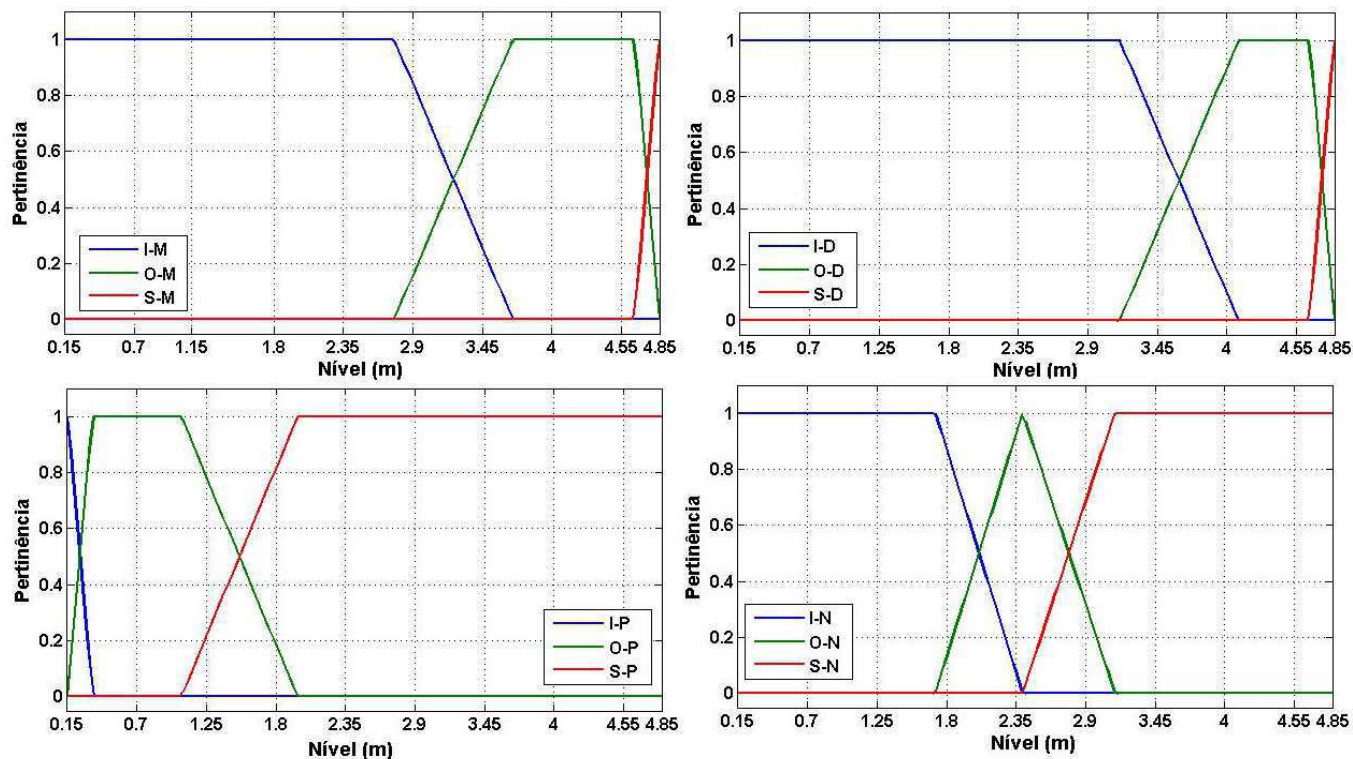


Figura B.7: Funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-Soledade para os quatro intervalos de tempo (Madrugada, Dia, Ponta e Noite).

Tabela B.7: Valores dos vértices das funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-Soledade para os quatro intervalos de tempo.

Intervalo	Função de pertinência	Forma	Valores dos vértices (m)			
Madrugada	I-M	Trapezoidal	0,15	0,15	2,75	3,69
	O-M	Trapezoidal	2,75	3,69	4,65	4,85
	S-M	Triangular	4,65	4,85	4,85	-
Dia	I-D	Trapezoidal	0,15	0,15	3,15	4,09
	O-D	Trapezoidal	3,15	4,09	4,65	4,85
	S-D	Triangular	4,65	4,85	4,85	-
Ponta	I-P	Triangular	0,15	0,15	0,35	-
	O-P	Trapezoidal	0,15	0,35	1,05	1,97
	S-P	Trapezoidal	1,05	1,97	4,85	4,85
Noite	I-N	Trapezoidal	0,15	0,15	1,71	2,40
	O-N	Triangular	1,71	2,40	3,13	-
	S-N	Trapezoidal	2,40	3,13	4,85	4,85

Reservatório R-EE5:

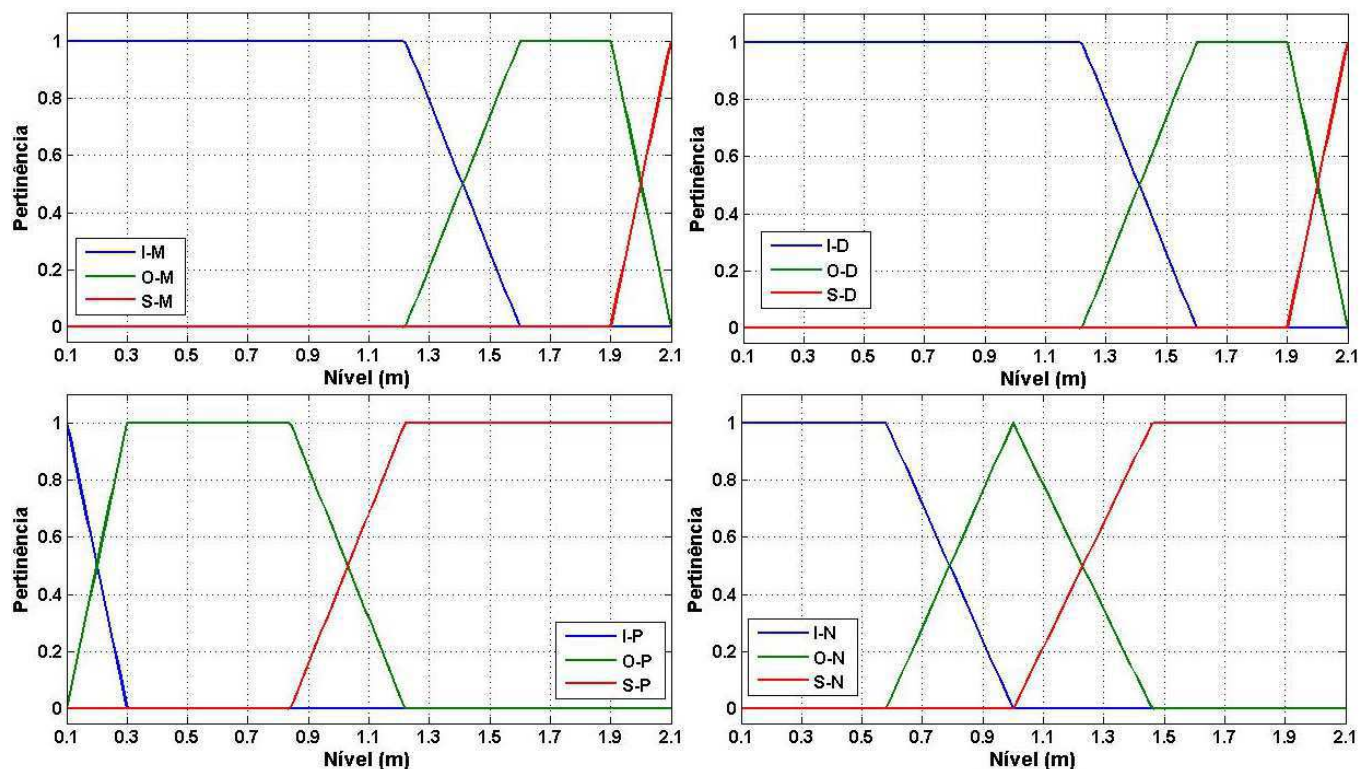


Figura B.8: Funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-EE5 para os quatro intervalos de tempo (Madrugada, Dia, Ponta e Noite).

Tabela B.8: Valores dos vértices das funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-EE5 para os quatro intervalos de tempo.

Intervalo	Função de pertinência	Forma	Valores dos vértices (m)			
Madrugada	I-M	Trapezoidal	0,10	0,10	1,22	1,60
	O-M	Trapezoidal	1,22	1,60	1,90	2,10
	S-M	Triangular	1,90	2,10	2,10	-
Dia	I-D	Trapezoidal	0,10	0,10	1,22	1,60
	O-D	Trapezoidal	1,22	1,60	1,90	2,10
	S-D	Triangular	1,90	2,10	2,10	-
Ponta	I-P	Triangular	0,10	0,10	0,30	-
	O-P	Trapezoidal	0,10	0,30	0,84	1,22
	S-P	Trapezoidal	0,84	1,22	2,10	2,10
Noite	I-N	Trapezoidal	0,10	0,10	0,58	1,00
	O-N	Triangular	0,58	1,00	1,46	-
	S-N	Trapezoidal	1,00	1,46	2,10	2,10

Reservatório R-Juazeirinho:

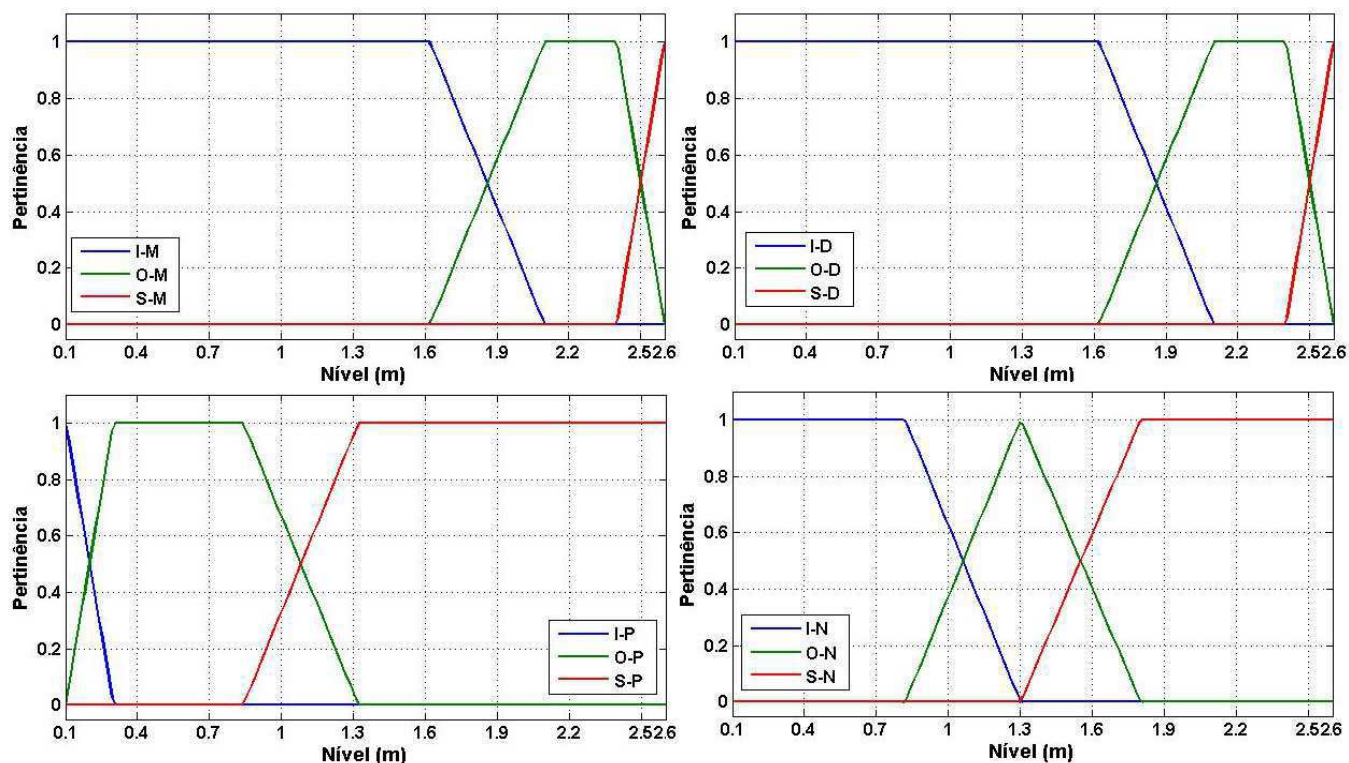


Figura B.9: Funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-Juazeirinho para os quatro intervalos de tempo (Madrugada, Dia, Ponta e Noite).

Tabela B.9: Valores dos vértices das funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-Juazeirinho para os quatro intervalos de tempo.

Intervalo	Função de pertinência	Forma	Valores dos vértices (m)			
Madrugada	I-M	Trapezoidal	0,10	0,10	1,62	2,10
	O-M	Trapezoidal	1,62	2,10	2,40	2,60
	S-M	Triangular	2,40	2,60	2,60	-
Dia	I-D	Trapezoidal	0,10	0,10	1,62	2,10
	O-D	Trapezoidal	1,62	2,10	2,40	2,60
	S-D	Triangular	2,40	2,60	2,60	-
Ponta	I-P	Triangular	0,10	0,10	0,30	-
	O-P	Trapezoidal	0,10	0,30	0,84	1,32
	S-P	Trapezoidal	0,84	1,32	2,60	2,60
Noite	I-N	Trapezoidal	0,10	0,10	0,82	1,30
	O-N	Triangular	0,82	1,30	1,80	-
	S-N	Trapezoidal	1,30	1,80	2,60	2,60

Reservatório R-São Vicente:

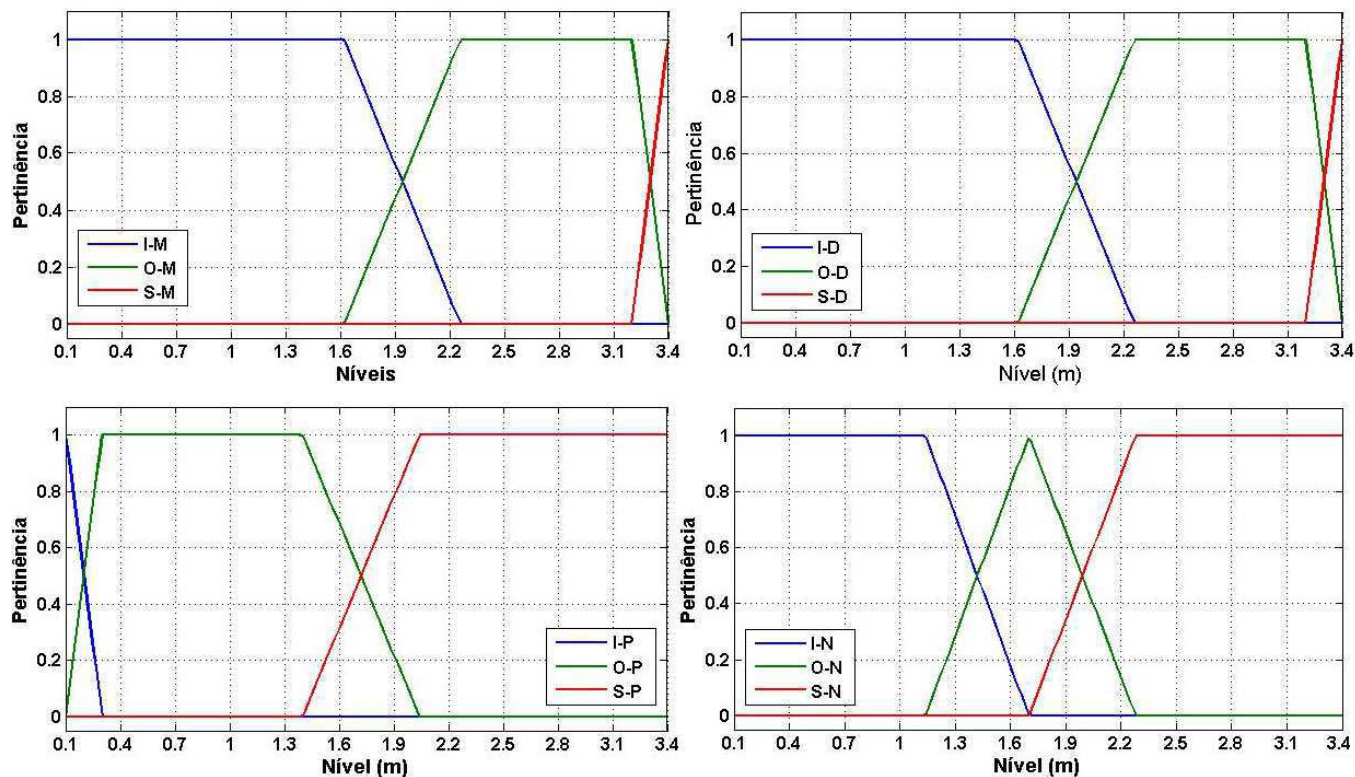


Figura B.10: Funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-São Vicente para os quatro intervalos de tempo (Madrugada, Dia, Ponta e Noite).

Tabela B.10: Valores dos vértices das funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-São Vicente para os quatro intervalos de tempo.

Intervalo	Função de pertinência	Forma	Valores dos vértices (m)			
Madrugada	I-M	Trapezoidal	0,10	0,10	1,62	2,26
	O-M	Trapezoidal	1,62	2,26	3,20	3,40
	S-M	Triangular	3,20	3,40	3,20	3,40
Dia	I-D	Trapezoidal	0,10	0,10	1,62	2,26
	O-D	Trapezoidal	1,62	2,26	3,20	3,40
	S-D	Triangular	3,20	3,20	3,40	-
Ponta	I-P	Triangular	0,10	0,10	0,30	-
	O-P	Trapezoidal	0,10	0,30	1,40	2,04
	S-P	Trapezoidal	1,40	2,04	3,40	3,40
Noite	I-N	Trapezoidal	0,10	0,10	1,14	1,70
	O-N	Triangular	1,14	1,70	2,28	-
	S-N	Trapezoidal	1,70	2,28	3,40	3,40

Reservatório R-Seridó:

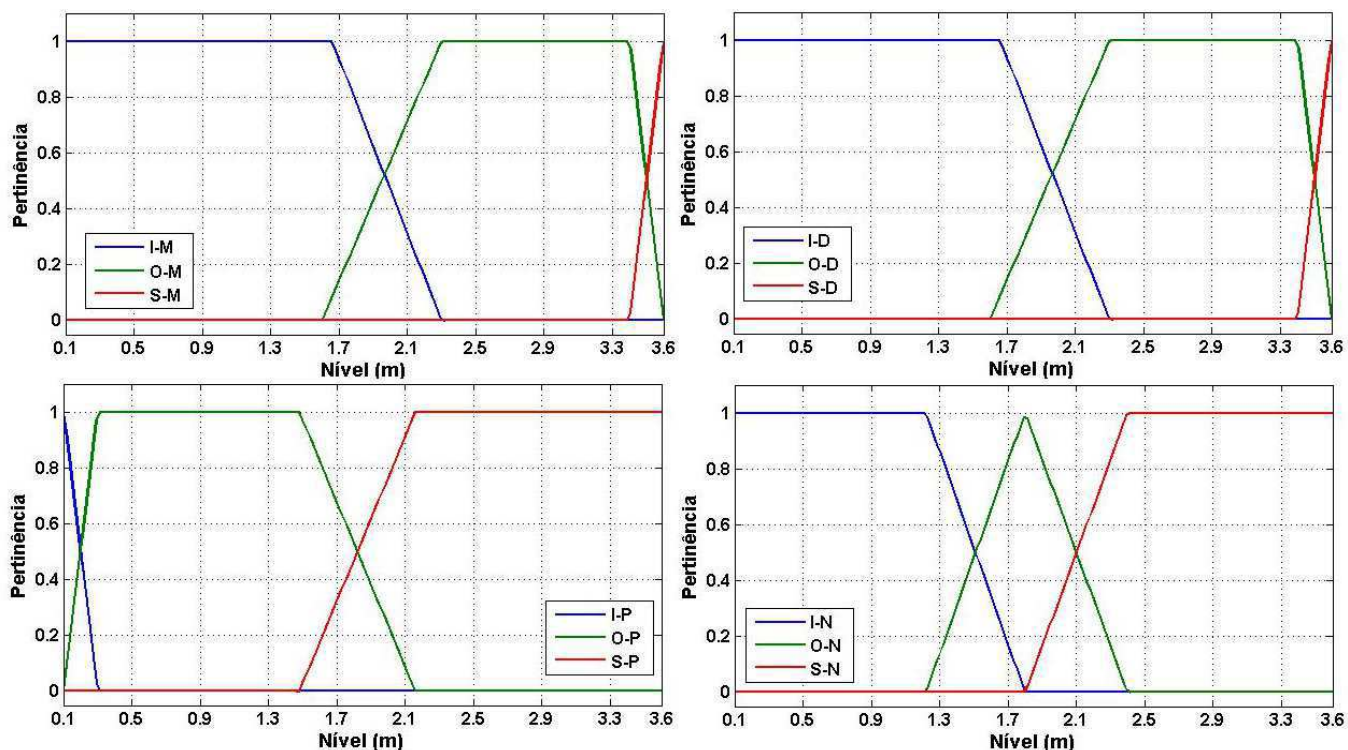


Figura B.11: Funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-Seridó para os quatro intervalos de tempo (Madrugada, Dia, Ponta e Noite).

Tabela B.11: Valores dos vértices das funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-Seridó para os quatro intervalos de tempo.

Intervalo	Função de pertinência	Forma	Valores dos vértices (m)			
Madrugada	I-M	Trapezoidal	0,10	0,10	1,66	2,30
	O-M	Trapezoidal	1,66	2,30	3,40	3,60
	S-M	Triangular	3,40	3,60	3,60	-
Dia	I-D	Trapezoidal	0,10	0,10	1,66	2,30
	O-D	Trapezoidal	1,66	2,30	3,40	3,60
	S-D	Triangular	3,40	3,60	3,60	-
Ponta	I-P	Triangular	0,10	0,10	0,30	-
	O-P	Trapezoidal	0,10	0,30	1,48	2,16
	S-P	Trapezoidal	1,48	2,16	3,60	3,60
Noite	I-N	Trapezoidal	0,10	0,10	1,22	1,80
	O-N	Triangular	1,22	1,80	2,40	-
	S-N	Trapezoidal	1,80	2,40	3,60	3,60

Reservatório R-Cubatí:

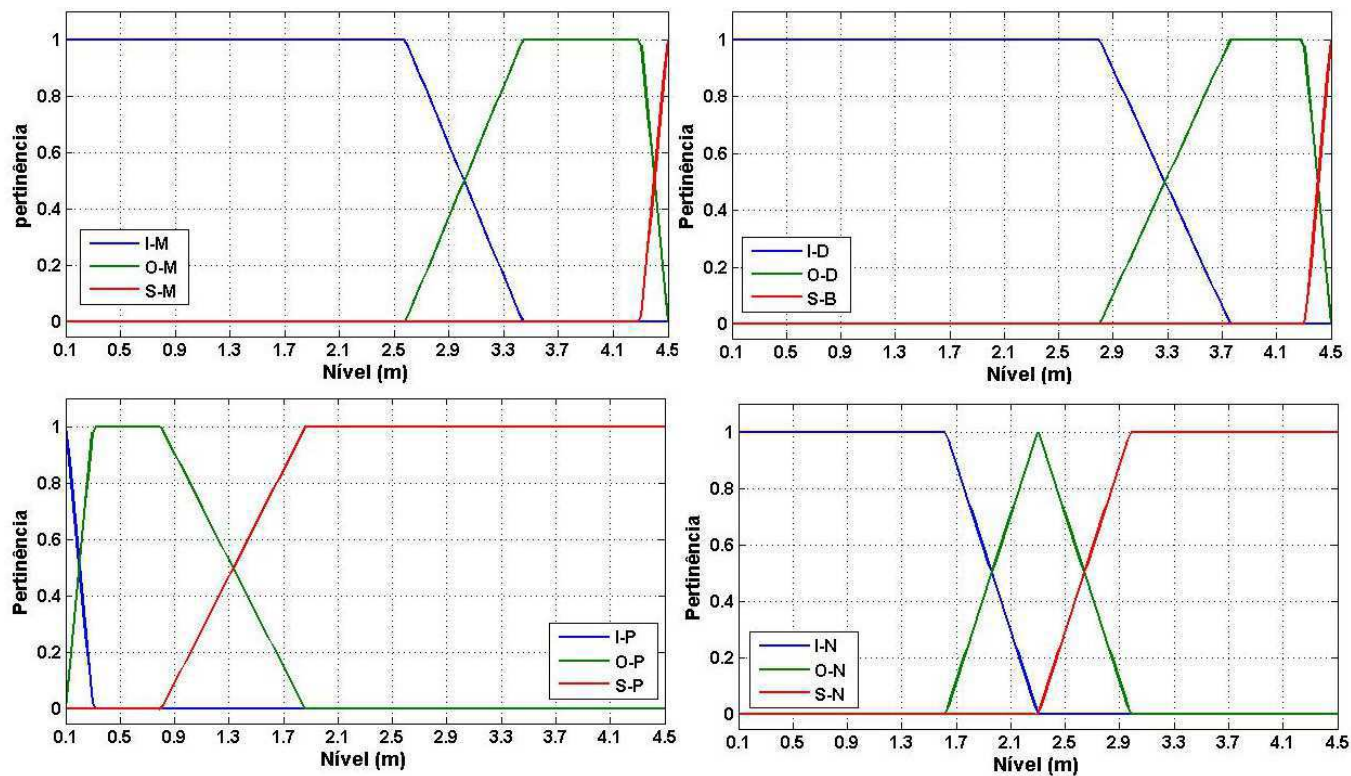


Figura B.12: Funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-Cubatí para os quatro intervalos de tempo (Madrugada, Dia, Ponta e Noite).

Tabela B.12: Valores dos vértices das funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-Cubatí para os quatro intervalos de tempo.

Intervalo	Função de pertinência	Forma	Valores dos vértices (m)			
Madrugada	I-M	Trapezoidal	0,10	0,10	2,58	3,44
	O-M	Trapezoidal	2,58	3,44	4,30	4,50
	S-M	Triangular	4,30	4,50	4,50	-
Dia	I-D	Trapezoidal	0,10	0,10	2,80	3,76
	O-D	Trapezoidal	2,80	3,76	4,30	4,50
	S-D	Triangular	4,30	4,50	4,50	-
Ponta	I-P	Triangular	0,10	0,10	0,30	-
	O-P	Trapezoidal	0,10	0,30	0,80	1,86
	S-P	Trapezoidal	0,80	1,86	4,50	4,50
Noite	I-N	Trapezoidal	0,10	0,10	1,62	2,30
	O-N	Triangular	1,62	2,30	2,98	-
	S-N	Trapezoidal	2,30	2,98	4,50	4,50

Reservatório R-Olivedos:

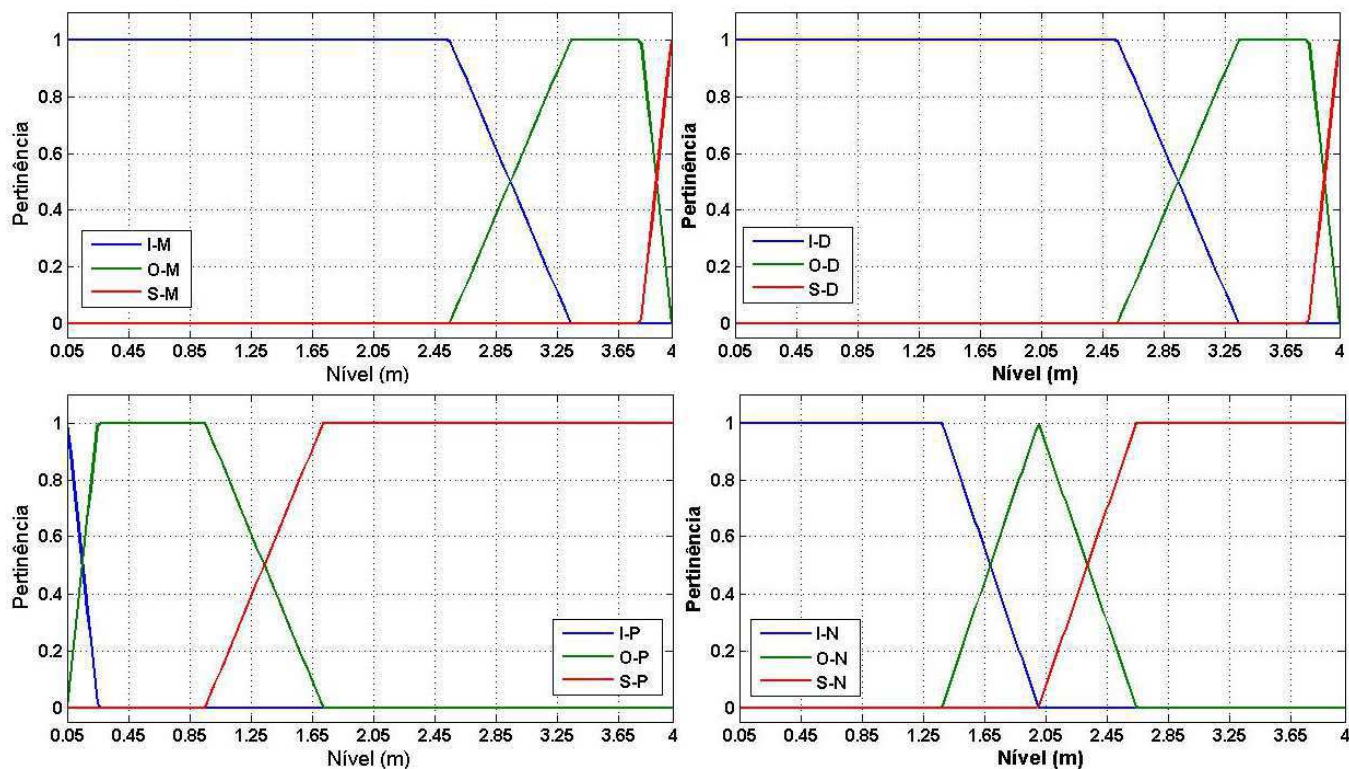


Figura B.13: Funções de pertinência da variável linguística de entrada "Nível" de R-Olivedos para os quatro intervalos de tempo (Madrugada, Dia, Ponta e Noite).

Tabela B.13: Valores dos vértices das funções de pertinência da variável linguística de entrada "Nível" de R-Olivedos para os quatro intervalos de tempo.

Intervalo	Função de pertinência	Forma	Valores dos vértices (m)			
Madrugada	I-M	Trapezoidal	0,05	0,05	2,55	3,34
	O-M	Trapezoidal	2,55	3,34	3,80	4,00
	S-M	Triangular	3,80	4,00	4,00	-
Dia	I-D	Trapezoidal	0,05	0,05	2,55	3,34
	O-D	Trapezoidal	2,55	3,34	3,80	4,00
	S-D	Triangular	3,80	4,00	4,00	-
Ponta	I-P	Triangular	0,05	0,05	0,25	-
	O-P	Trapezoidal	0,05	0,25	0,95	1,72
	S-P	Trapezoidal	0,95	1,72	4,00	4,00
Noite	I-N	Trapezoidal	0,05	0,05	1,37	2,00
	O-N	Triangular	1,37	2,00	2,64	-
	S-N	Trapezoidal	2,00	2,64	4,00	4,00

Reservatório R-Pedra Lavrada:

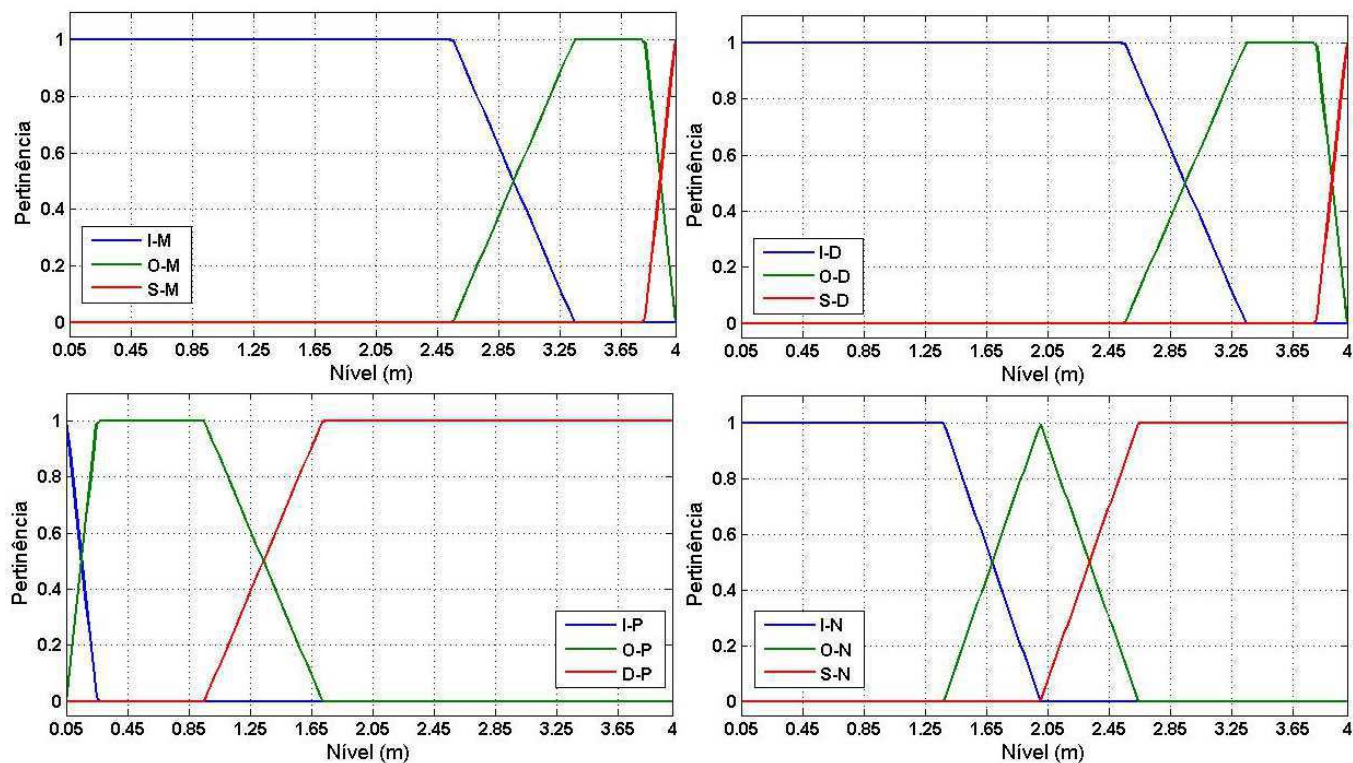


Figura B.14: Funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-Pedra Lavrada para os quatro intervalos de tempo (Madrugada, Dia, Ponta e Noite).

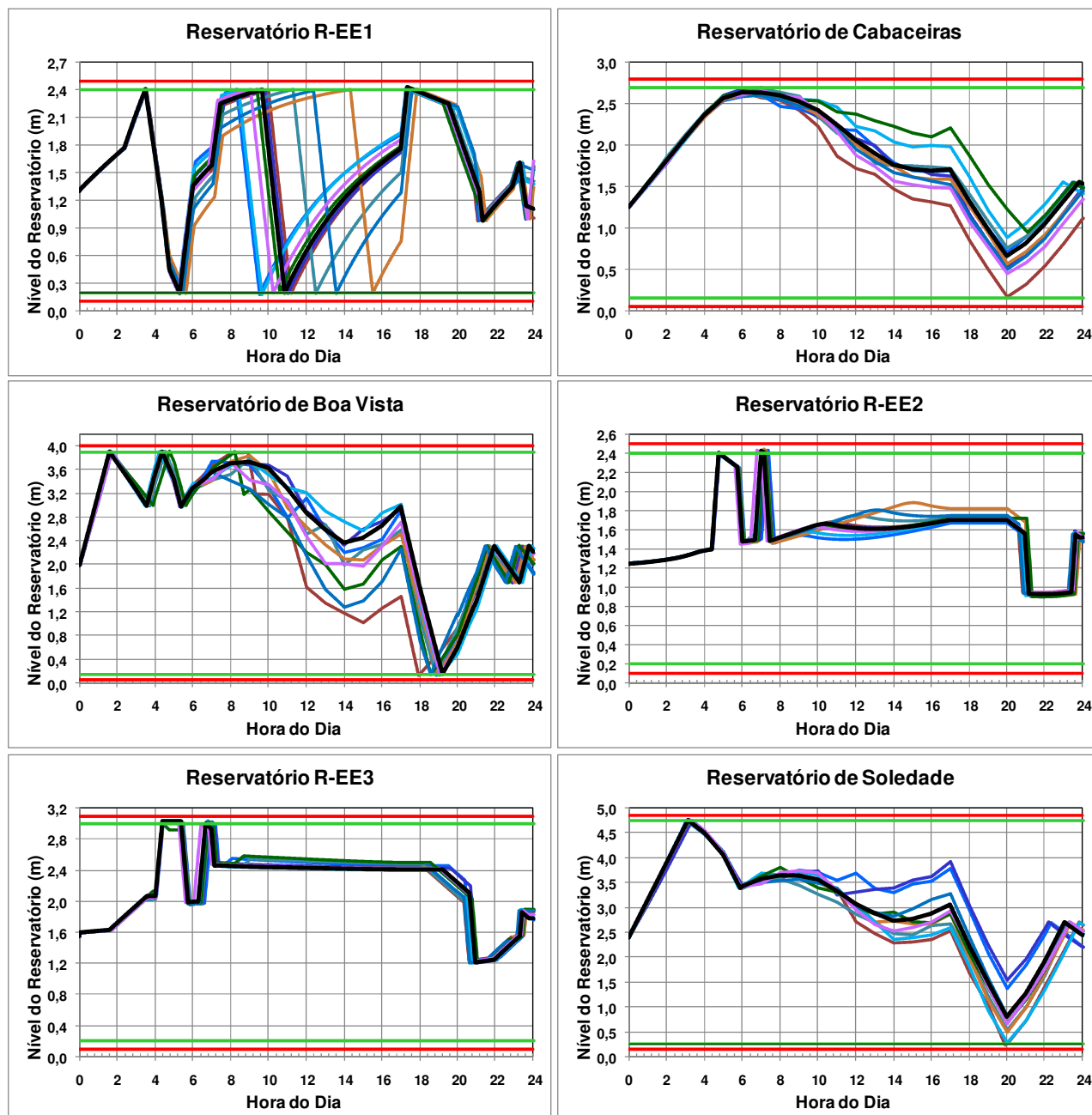
Tabela B.14: Valores dos vértices das funções de pertinência da variável linguística de entrada “Nível” de R-Pedra Lavrada para os quatro intervalos de tempo.

Intervalo	Função de pertinência	Forma	Valores dos vértices (m)			
Madrugada	I-M	Trapezoidal	0,05	0,05	2,55	3,34
	O-M	Trapezoidal	2,55	3,34	3,80	4,00
	S-M	Triangular	3,80	4,00	4,00	-
Dia	I-D	Trapezoidal	0,05	0,05	2,55	3,34
	O-D	Trapezoidal	2,55	3,34	3,80	4,00
	S-D	Triangular	3,80	4,00	4,00	-
Ponta	I-P	Triangular	0,05	0,05	0,25	-
	O-P	Trapezoidal	0,05	0,25	0,95	1,72
	S-P	Trapezoidal	0,95	1,72	4,00	4,00
Noite	I-N	Trapezoidal	0,05	0,05	1,37	2,00
	O-N	Triangular	1,37	2,00	2,64	-
	S-N	Trapezoidal	2,00	2,64	4,00	4,00

ANEXO C

GRÁFICOS DOS NÍVEIS DE RESERVATÓRIOS E ESTADOS DE BOMBAS E VÁLVULAS

Figura C.1: Comportamento do nível de reservatórios para as estratégias de operação sugeridas perante diferentes cenários de demanda.



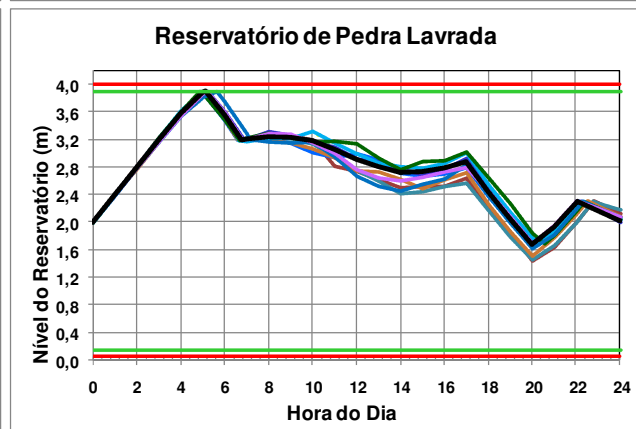
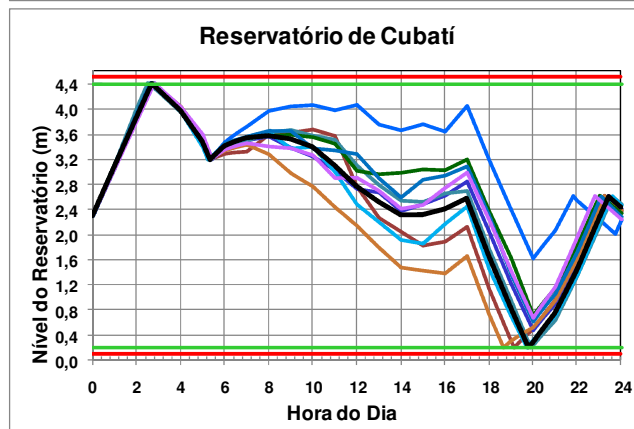
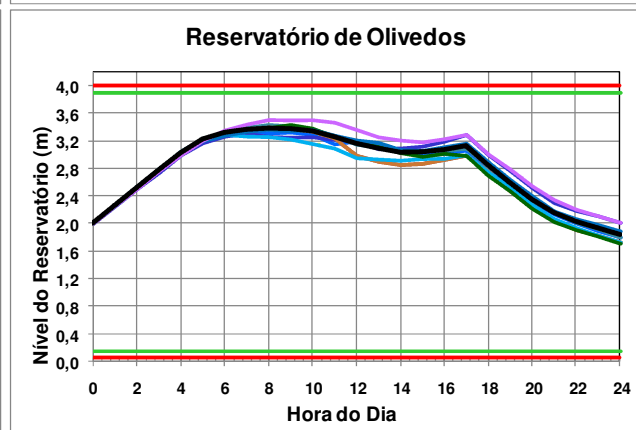
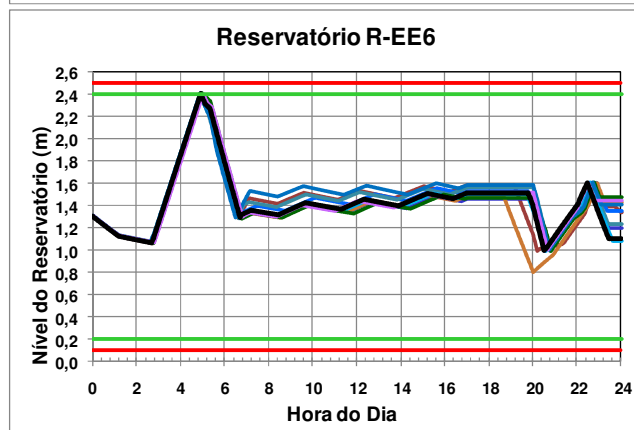
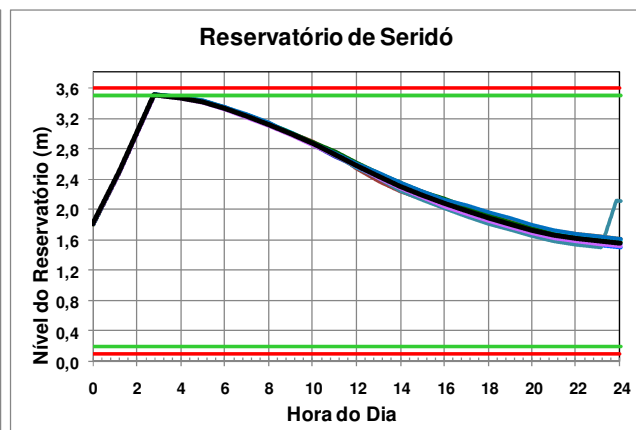
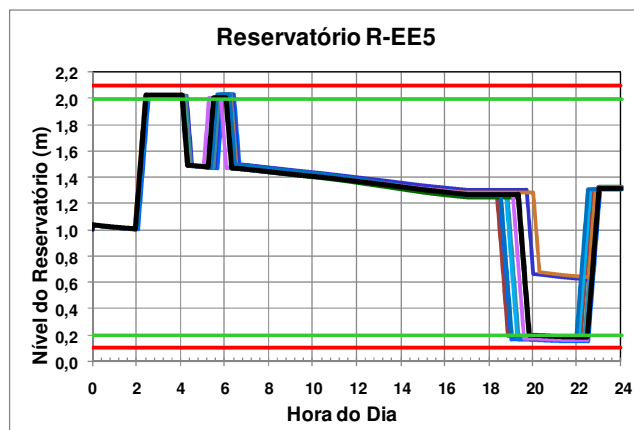


Figura C.2: Perfil da operação de bombas e válvulas para a curva de demanda média adotada.

