



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
CAMPUS II - CAMPINA GRANDE

**SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE BOMBAS EM SISTEMAS
DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

JULIANA MARIA DO SOCORRO GOMES BARBOSA

CAMPINA GRANDE

MARÇO - 2001

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA / CAMPUS II
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE RECURSOS HÍDRICOS

SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE BOMBAS EM SISTEMAS DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA

JULIANA MARIA DO SOCORRO GOMES BARBOSA

CAMPINA GRANDE – PB

MARÇO - 2001

JULIANA MARIA DO SOCORRO GOMES BARBOSA

**SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE BOMBAS EM SISTEMAS DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

**Dissertação apresentada ao Curso de Pós –
Graduação em Engenharia Civil, na área de
Engenharia de Recursos Hídricos, em
cumprimento às exigências para a obtenção do
Grau de Mestre**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS

**ORIENTADORES: CARLOS DE OLIVEIRA GALVÃO
HEBER PIMENTEL GOMES**

Campina Grande – PB

Março - 2001



B238s Barbosa, Juliana Maria do Socorro Gomes.
Simulação da operação de bombas em sistemas de abastecimento de água / Juliana Maria do Socorro Gomes Barbosa. - Campina Grande, 2001.
129 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2001.
"Orientação : Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão, Prof. Dr. Heber Pimentel Gomes".
Referências.

1. Água - Abastecimento. 2. Bomba - Abastecimento de Água. 3. Bombeamento de Água. 4. Dissertação - Engenharia Civil. I. Galvão, Carlos de Oliveira. II. Gomes, Heber Pimentel. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título

CDU 628.1(043)

JULIANA MARIA DO SOCORRO GOMES BARBOSA

**SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE BOMBAS EM SISTEMAS DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

Aprovada em 29 de Março de 2001

COMISSÃO EXAMINADORA



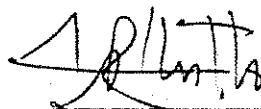
Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão

Orientador



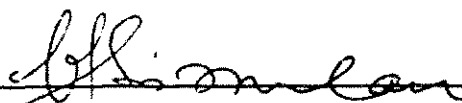
Prof. Dr. Heber Pimentel Gomes

Orientador



Prof. Dr. Antônio Marozzi Righetto

Examinador



Prof. Dr. Vajapeyam Srirangachar Srinivasan

Examinador

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Maria e Francisco.

Ao meu amor, Márcio.

Aos meus irmãos, Beto, Tia, Da e Betinho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, pelo que sou e por tudo que até hoje conquistei em minha vida.

Aos meus pais, Maria e Francisco, pelas lições de caráter, humildade, respeito ao próximo, e pela confiança que sempre depositaram em mim.

Aos meus irmãos, Beto, Tia, Da e Betinho, pelo apoio e companheirismo durante toda a minha vida.

Ao Prof. Carlos Galvão, pelos ensinamentos, conselhos e pela orientação desta dissertação.

Ao Prof. Heber Pimentel, pela orientação desta dissertação.

A todos os professores da Área de Recursos Hídricos, especialmente ao Prof. Sérgio Gois, pela oportunidade de trabalho e aprendizagem no primeiro ano desta pesquisa.

À Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA), Gerência de Campina Grande, e suas equipes de operação, manutenção e macro-medição, particularmente aos engenheiros, Faustino Cavalcanti, Frederico Figueiredo e Sakae Mishina, pelo fornecimento de informações e discussão do problema.

Aos colegas do Curso de Pós-Graduação, pela convivência e apoio.

Ao amigo Clédson Santana, pelo auxílio e parceria durante grande parte deste trabalho.

A Kennedy Lucena, pelas discussões pertinentes, e Helon Braz, pela parceria no estudo do programa utilizado.

Aos funcionários do Laboratório de Hidráulica pelos auxílios prestados, especialmente a Raulino Brito.

E finalmente, um agradecimento especial, ao meu amor, Márcio, pelo carinho, apoio e incentivo, sempre.

Àqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO.....	14
--------------------	----

CAPÍTULO II

2. REVISÃO DE LITERATURA.....	17
2.1 – OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA.....	17
2.2 - OPERAÇÃO DE BOMBAS.....	22
2.3 – MODELOS HIDRÁULICOS.....	28
2.3.1 – Modelos de Balanço de Massa.....	28
2.3.2 – Modelos de Regressão.....	29
2.3.3 - Modelos Hidráulicos Simplificados.....	29
2.3.4 – Modelos Hidráulicos Complexos.....	30

CAPÍTULO III

3. METODOLOGIA.....	32
3.1 - MODELO WADISO.....	33
3.1.1 – Rotina de Simulação.....	35
3.1.1.1 – Introdução.....	35
3.1.1.2 – Definição dos Termos	35
3.1.1.3 – Dados de Entrada	37
3.1.1.4 – Balanceamento do Sistema.....	40
3.1.1.5 – Saída de Dados.....	43
3.1.2 – Rotina de Simulação no Tempo.....	44
3.1.2.1 – Introdução.....	44
3.1.2.2 – Definições dos Termos.....	45
3.1.2.3 – Dados de Entrada.....	46
3.1.2.4 – Saída de Dados.....	50
3.1.3 – Novas Implementações no Programa WADISO.....	50

3.2 – SISTEMA ADUTOR UTILIZADO.....	51
3.3 – ESTRATÉGIA DE OPERAÇÃO DAS BOMBAS.....	59

CAPÍTULO IV

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	61
4.1 – ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES.....	68
4.1.1 – <i>Operação das Bombas</i>	68
4.1.2 – <i>Análise das Pressões</i>	80
4.2 – DIFICULDADES ENCONTRADAS NO WADISO.....	97
4.3 – DIRETRIZES PARA A FORMULAÇÃO DE UM SAD.....	99

CAPÍTULO V

5 – CONCLUSÕES.....	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104
ANEXO I.....	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Fluxograma, rotina de simulação.....	34
Figura 3.2 – Fluxograma, rotina de simulação no tempo.....	34
Figura 3.3 – Rede com dois “loops”, ilustrando o método dos nós.....	43
Figura 3.4 – Sistema adutor utilizado.....	52
Figura 3.5 – Primeira parte do sistema adutor.....	53
Figura 3.6 – Segunda parte do sistema adutor.....	53
Figura 3.7 – Sistema adutor (Esquema).....	56
Figura 3.8 - Curva de demanda horária para 24 horas (o coeficiente de demanda multiplica a demanda média diária para a derivação).....	57
Figura 4.1 – Variação dos níveis dos reservatórios, simulação 1.....	68
Figura 4.2 – Variação dos níveis dos reservatórios, simulação 5.....	70
Figura 4.3 – Variação dos níveis dos reservatórios, simulação 8.....	72
Figura 4.4 – Variação dos níveis dos reservatórios, simulação 17.....	74
Figura 4.5 – Variação dos níveis dos reservatórios, simulação 21.....	76
Figura 4.6 – Pressões em d_5 , simulação 1.....	86
Figura 4.7 – Pressões em d_5 , simulação 5.....	86
Figura 4.8 – Pressões em d_5 , simulação 8.....	86
Figura 4.9 – Pressões em d_5 , simulação 17.....	87
Figura 4.10 – Pressões em d_5 , simulação 21.....	87
Figura 4.11 – Pressões em d_7 , simulação 1.....	88
Figura 4.12 – Pressões em d_7 , simulação 5.....	88
Figura 4.13 – Pressões em d_7 , simulação 8.....	88
Figura 4.14 – Pressões em d_7 , simulação 17.....	89
Figura 4.15 – Pressões em d_7 , simulação 21.....	89
Figura 4.16 – Pressões em d_8 , simulação 1.....	90
Figura 4.17 – Pressões em d_8 , simulação 5.....	90
Figura 4.18 – Pressões em d_8 , simulação 8.....	90

Figura 4.19 – Pressões em d_8 , simulação 17.....	91
Figura 4.20 – Pressões em d_8 , simulação 21.....	91
Figura 4.21 – Pressões em d_9 , simulação 1.....	92
Figura 4.22 – Pressões em d_9 , simulação 5.....	92
Figura 4.23 – Pressões em d_9 , simulação 8.....	92
Figura 4.24 – Pressões em d_9 , simulação 17.....	93
Figura 4.25 – Pressões em d_9 , simulação 21.....	93
Figura 4.26 – Pressões no nó 13, simulação 1.....	94
Figura 4.27 – Pressões no nó 13, simulação 5.....	94
Figura 4.28 – Pressões no nó 13, simulação 8.....	95
Figura 4.29 – Pressões no nó 13, simulação 17.....	95
Figura 4.30 – Pressões no nó 13, simulação 21.....	95
Figura 4.31 – Pressões no nó 14, simulação 1.....	96
Figura 4.32 – Pressões no nó 14, simulação 5.....	96
Figura 4.33 – Pressões no nó 14, simulação 8.....	96
Figura 4.34 – Pressões no nó 14, simulação 17.....	97
Figura 4.35 – Pressões no nó 14, simulação 21.....	97
Figura 4.36 – Formas correta e incorreta para representação de reservatórios.....	98
Figura 4.37 – Formas correta e incorreta para inserir bombas em paralelo.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Comandos para simulação da distribuição de água - Formato para dados de entrada.....	37
Tabela 3.2 - Comandos para simulação no tempo - Formato para dados de entrada.....	46
Tabela 3.3 – Dados dos trechos do sistema.....	54
Tabela 3.4 – Dados dos reservatórios.....	54
Tabela 3.5 – Dados dos trechos para a entrada no programa.....	55
Tabela 3.6 – Tarifas de água.....	59
Tabela 4.1a - Resultados das simulações do sistema adutor, bomba 1.....	64
Tabela 4.1b - Resultados das simulações do sistema adutor, bomba 2.....	65
Tabela 4.1c - Resultados das simulações do sistema adutor, bomba 3.....	66
Tabela 4.2 - Resultados das simulações do sistema adutor.....	67
Tabela 4.3 – Variação dos intervalos com bomba ligada, simulação 1.....	69
Tabela 4.4 – Custo mensal com energia elétrica para operação de bombas, simulação 1.....	70
Tabela 4.5 – Variação dos intervalos com bomba ligada, simulação 5.....	71
Tabela 4.6 – Custo mensal com energia elétrica para operação de bombas, simulação 5.....	72
Tabela 4.7 – Variação dos intervalos com bomba ligada, simulação 8.....	73
Tabela 4.8 – Custo mensal com energia elétrica para operação de bombas, simulação 8.....	74
Tabela 4.9 – Variação dos intervalos com bomba ligada, simulação 17.....	75
Tabela 4.10 – Custo mensal com energia elétrica para operação de bombas, simulação 17.....	76
Tabela 4.11 – Variação dos intervalos com bomba ligada, simulação 21.....	77
Tabela 4.12 – Custo mensal com energia elétrica para operação de bombas,	

simulação 21.....	78
Tabela 4.13 – Pressões nos nós de distribuição, simulação 1.....	81
Tabela 4.14 – Pressões nos nós de distribuição, simulação 5.....	82
Tabela 4.15 – Pressões nos nós de distribuição, simulação 8.....	83
Tabela 4.16 – Pressões nos nós de distribuição, simulação 17.....	84
Tabela 4.17 – Pressões nos nós de distribuição, simulação 21.....	85

RESUMO

Em geral, a otimização de um sistema de abastecimento de água consiste em minimizar o seu custo de operação, sendo um dos principais fatores a operação de bombas. Neste trabalho determinou-se estratégias simples para operação de bombas em sistemas de abastecimento de água, buscando minimizar os custos com o bombeamento, assim como oferecer diretrizes para o desenvolvimento de um Sistema de Apoio à Decisão na operação de bombas. Foi analisado o comportamento de um sistema de adução real, constituído de várias estações de bombeamento e reservatórios de distribuição em série, com auxílio de um modelo computacional de simulação hidráulica de redes, WADISO, desenvolvido pelo U S Army Corps of Engineers. Estratégias de operação foram definidas na forma de níveis de reservatórios de distribuição que determinam os momentos de ligar e desligar cada bomba, durante um período de 24 horas. Foram também identificadas algumas características importantes que a ferramenta de apoio deve apresentar para auxiliar no processo de tomada de decisão na operação de redes: gráficos da linha piezométrica em toda a rede, alerta quando as restrições adotadas são violadas, variação dos níveis dos reservatórios de distribuição ao longo do dia, capacidade de análise horária para as 24 horas seguintes de operação, ferramenta de otimização, e um sistema de representação das decisões a base de regras. 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. A utilização combinada de um modelo de simulação computacional com critérios de avaliação da eficiência da operação de bombas em sistemas de abastecimento de água constitui um procedimento metodológico adequado e simples para a análise e o controle operacional desses sistemas.

ABSTRACT

The optimization of a water distribution system is usually performed through the minimization of its operation costs, being one the most important those resulting from pumping operation. In this dissertation, simple strategies for pumping operations in water distribution systems were determined, aiming at minimizing the pumping costs. Other objective was the proposal of guidelines for developing a Decision Support System for pumping operations. An actual water pipeline, comprised of several pumping stations and tanks, was analyzed by means of a hydraulic network computer simulation model – WADISO, developed by the US Army Corps of Engineers. Operation strategies were defined in the form of tank levels, which determine when each pump should be switched on/off, in a 24-hour period. Some important features of a decision support system were identified: graphs showing the piezometric head and tank levels for the whole network, warning for violated constraints, hourly network analysis for the next 24 hours, optimization tool, and a rule-based system for decision representation. The results showed the possibility of reducing water pumping costs through simple operation strategies, keeping pumping operational constraints as well as minimum and maximum discharge and pressure constraints. The combined utilization of a computer simulation model and criteria for evaluating pumping operation efficiency in water distribution system is an appropriate and simple methodological procedure for analyzing and controlling such systems.

CAPÍTULO I

1 - INTRODUÇÃO

Os sistemas de abastecimento de água, principalmente os sistemas de abastecimento público, possuem muitos problemas de Engenharia que se caracterizam pelo alto grau de complexidade e importância social.

A preocupação no dimensionamento de sistemas de abastecimento de água de forma econômica surgiu na década de quarenta, quando o processo de urbanização se acelerou (Hamberg e Shamir, 1988). Na década de sessenta, houve um aumento das aplicações, principalmente com a utilização das técnicas de otimização, com a consolidação dos recursos computacionais, quando surgiram as principais idéias sobre a simulação e otimização no dimensionamento das redes de abastecimento de água. Porém, apenas no final da década de 60, e início dos anos 70, é que surgiram soluções mais fundamentadas, baseadas em técnicas heurísticas e no uso da Programação Linear e da Programação Dinâmica, para a otimização de redes de abastecimento (Walski *et al.*, 1987). A década de oitenta foi caracterizada pela consolidação das metodologias (Santana e Soares, 1997). A década de noventa, devido à evolução computacional e às inovações tecnológicas, tem se caracterizado pela busca da consolidação teórica, através da sofisticação dos algoritmos. Segundo Burgi (1999), o desafio da pesquisa hidráulica

contemporânea é a identificação clara dos problemas e o trabalho em conjunto com a sociedade e a comunidade científica no desenvolvimento das soluções.

Nos últimos anos tem ocorrido uma importante mudança: a tentativa de solucionar os problemas existentes na *operação das redes* de abastecimento d'água, ao invés de tratar apenas do seu dimensionamento. Segundo Ormsbee e Lansey (1994), devido ao crescimento dos níveis de urbanização, com conseqüente aumento das demandas, a operação da maioria dos sistemas de distribuição de água tem se tornado muito complexa. Os requerimentos operacionais de tais sistemas são geralmente influenciados por pressões de comissões reguladoras e pelo público em geral, para ter custos operacionais mínimos. Um caminho para realizar este objetivo é a utilização de um controle "ótimo" do sistema.

Em geral, a otimização, em termos econômicos, da operação de um sistema de abastecimento de água consiste em minimizar o seu custo. Vários fatores envolvem a operação de um sistema de abastecimento, sendo um deles a operação de bombas, que é responsável por grande parte do custo total de operação das redes de abastecimento, devido ao custo inicial e ao consumo de energia elétrica. Portanto a redução dos custos de bombeamento de água implicará num menor custo de operação da rede de abastecimento.

Como o agendamento da operação de bombas é um problema multi-objetivo, o custo de energia elétrica não deve ser o único critério utilizado na escolha de uma melhor agenda: as demandas de água devem ser atendidas de forma satisfatória, como também as implicações da operação das bombas sobre seu custo de manutenção devem ser considerados.

Então, dado um sistema de abastecimento de água que inclua instalações de bombeamento, deve-se determinar os momentos de ligar e desligar cada bomba durante um certo período futuro (horizonte de operação); sob dada previsão de consumo (vazões); atendendo restrições de vazões e pressões mínimas e máximas, de capacidade de armazenamento interno (reservatórios de distribuição), e operacionais das bombas; sob determinado esquema tarifário da concessionária de energia elétrica; sob custo mínimo.

A ausência de uma política operacional é observada em vários serviços de abastecimento de água do país, com monitoramento e procedimentos de controle inadequados ou insuficientes, enquanto já encontram-se disponíveis recursos técnico-científicos que poderiam auxiliar na operação. Verifica-se que há um distanciamento entre o desenvolvimento tecnológico e a prática, fato que pode ser atribuído, entre outros possíveis motivos, à falta de investimentos em tecnologia 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. Portanto a disponibilidade de estratégias mais simples de operação poderia facilitar a implementação de políticas operacionais pelas companhias.

Nesta linha, este trabalho tem como objetivo determinar estratégias simples para operação de bombas em sistemas de abastecimento de água, buscando minimizar os custos com o bombeamento. Analisa-se o comportamento de um sistema de adução real, com auxílio de um modelo de simulação computacional. O trabalho tem também como objetivo oferecer diretrizes para o desenvolvimento de um Sistema de Apoio à Decisão (SAD) na operação de bombas.

CAPÍTULO II

2 – REVISÃO DE LITERATURA

2.1 – OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

O abastecimento de água é um fator fundamental para o bem estar de uma sociedade. Os sistemas de abastecimento de água vêm apresentando um crescimento elevado da demanda, extrapolando as previsões e a capacidade de oferta do produto água em um nível satisfatório de qualidade, não somente referente à qualidade física, química e bacteriológica, mas também na qualidade quanto a freqüência no atendimento à demanda.

O desenvolvimento urbano sustentável está diretamente condicionado à disponibilidade de água. O crescimento rápido da população urbana e da industrialização está submetendo os recursos hídricos em muitas cidade a graves pressões. Deste modo, faz-se necessário dedicar atenção especial aos efeitos crescentes da urbanização sobre a demanda e o consumo de água, exigindo uma revisão do papel das autoridades públicas na gestão do abastecimento de água (Francato e Barbosa, 1999). Uma melhor gestão dos recursos hídricos urbanos pode dar uma contribuição substancial à mitigação da pobreza e à melhora da saúde e da qualidade de vida das populações urbanas menos

favorecidas. Segundo Cabrera (1997), para que se consiga bons resultados em planejamento de recursos hídricos deve-se conciliar: uma boa ação política, um conhecimento adequado de ferramentas de engenharia e uma coordenação entre ambas as atuações. Ormsbee e Reddy (1995) assinalam que o aumento nos níveis de urbanização nas últimas décadas e a conseqüente demanda por água potável tornou a operação dos sistemas de distribuição uma tarefa bastante complexa, exigindo dos serviços públicos de abastecimento de água grandes esforços nos âmbitos técnico, organizacional e financeiro, na tentativa de atender à demanda. Diante desta problemática percebe-se a necessidade da aplicação e desenvolvimento de metodologias que procurem minimizar estes efeitos, juntamente com a minimização dos déficits de atendimento à população, garantindo compreensão sistêmica do conjunto de elementos e funções de um sistema de abastecimento urbano de água. Tal tarefa vem sendo conseguida em muitos países com os recursos da pesquisa operacional.

De acordo com Silva *et al.* (1999), o controle da operação de sistemas hídricos constitui tema da maior relevância na atualidade, principalmente se encarado sob a ótica da sustentabilidade dos recursos água e energia elétrica. Dentre os sistemas hídricos urbanos, destacam-se as redes de distribuição de água para abastecimento, que, espalhados por todo o mundo, chegam a perder grande parte do volume total bombeado e quimicamente tratado. Tais perdas implicam em despesas desnecessárias relativas a custos de bombeamento e tratamento da água e requerem investimentos prematuros no que se refere à expansão do sistema ou necessidade de exploração de novas fontes de recursos hídricos. Tais fatos, associados à perspectiva atual de pagamento pelo uso da água, vêm preocupando os profissionais da área, e levando-os a propor soluções no sentido de minimizar problemas operacionais em sistemas de distribuição de água.

O controle operacional automatizado dos referidos sistemas pode ser realizado desde que o comportamento dos mesmos possa ser simulado, face a diferentes estratégias operacionais atuais e futuras. Para tanto, é requerido um ferramental básico que viabilize a análise do comportamento de redes.

Nos últimos anos, as técnicas de pesquisa operacional vêm ganhando papel de destaque na análise dos sistemas de recursos hídricos, pois possibilitam uma análise mais

realista dos problemas, viabilizando soluções em computadores. Dentre as técnicas de pesquisa operacional para o gerenciamento de sistemas pode destacar a programação dinâmica, a programação linear, a programação não linear, a simulação e a otimização de fluxo de redes.

As decisões num problema são representadas pelas variáveis de decisão. Deste modo, a medida do desempenho do modelo é função das variáveis de decisão, conhecida como função objetivo. Para a realização da modelagem matemática de problema, faz-se necessário o estabelecimento de relações lógico-matemáticas, a fim de tornar um problema físico em um problema matemático (Francato *et al.*, 2000).

No entanto, deve-se tomar cuidado especial na formulação do problema e também na análise e interpretação dos resultados, reavaliando as hipóteses assumidas em confronto com os resultados ótimos obtidos. Brion e Mays (1991) lembram a necessidade de se fazer uma análise de sensibilidade para excluir a possibilidade de ótimos locais em contrapartida aos ótimos globais.

Com o advento dos computadores, as técnicas de simulação passaram a ser mais atraentes devido à facilidade e agilidade nos processamentos, permitindo a mudança rápida na configuração de sistemas, e portanto permitindo comparações. Assim como as técnicas de simulação, as técnicas de otimização vêm sendo incorporadas progressivamente ao setor de recursos hídricos, devido principalmente às facilidades computacionais disponíveis atualmente.

Segundo Barbosa *et al.* (2000) a análise de sistemas de recursos hídricos é um campo relativamente novo que vem se desenvolvendo paralelamente ao desenvolvimento dos recursos computacionais. Graças a esta evolução paralela pode-se modelar sistemas complexos que envolvem muitas variáveis, o que seria praticamente impossível sem o auxílio de um algoritmo matemático implementado dentro de um programa computacional.

Os procedimentos operacionais dos sistemas de abastecimento sempre visam a garantia da continuidade dos serviços, a qualquer custo. A implantação de projetos para a redução de despesas tem demonstrado que a otimização e a automação desses

procedimentos operacionais resultam em ganhos financeiros significativos, além do aumento de qualidade no processo (Francato e Barbosa, 1999).

A inexistência de procedimentos adequados de planejamento e controle operacionais das redes de distribuição traz como decorrência uma operação empírica baseada em tentativas para solucionar cada problema localizado, que podem gerar outros problemas, uma vez que não é feita uma análise técnica de forma sistêmica.

Recentemente, tem-se observado o desenvolvimento de programas para otimização e automação de procedimentos operacionais. Além do ganho de qualidade no processo, resultam em uma redução dos gastos com energia elétrica e dos custos de operação, pela possibilidade de se evitar perdas ou gastos adicionais por manobras desnecessárias ou impróprias.

Na literatura é possível encontrar várias experiências bem sucedidas com a aplicação de técnicas de pesquisa operacional na tentativa de redução de custos operacionais em sistemas de distribuição de água. Em Melbourne, Austrália, foi implementado um modelo computacional e uma tecnologia de monitoramento para o planejamento e operação do sistema de abastecimento de água (Cosgriff *et al.*, 1985). Tal implementação tem resultado em um melhor entendimento do sistema hidráulico, auxiliando no planejamento, operação e manutenção, além de economias consideráveis no sistema. Brion e Mays (1991) testaram um modelo de otimização e simulação em Austin, Texas, conseguindo, com uma política otimizada de bombeamento, uma redução de 17,3% no custo operacional que vinha sendo realizado até então. Ormsbee e Reddy (1995) aplicaram um algoritmo de otimização em Washington, Estados Unidos, e obtiveram resultados significativos com a política fornecida pelo modelo, observando uma redução de 6,9% nos custos com energia elétrica. León *et al.* (2000) desenvolveram um sistema especialista híbrido para gerenciar o sistema de abastecimento de água da cidade de Sevilha, Espanha. O sistema tem sido testado e tem fornecido uma economia de até 25% no gasto com energia elétrica.

A Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) tem desenvolvido programas de baixo custo, abordando ações de otimização e automação na

operação dos sistemas de abastecimento de água, buscando melhorias na qualidade do processo, como também redução no consumo de energia elétrica. Nesse foco a SABESP está estruturando modelos em parceria com a iniciativa privada, na forma de contratos de risco ou desempenho, onde o parceiro contratado será remunerado pelos investimentos efetuados, baseado nos ganhos obtidos com a redução de gastos com energia elétrica (Kravosac *et al.*, 1999).

Com o grande número de técnicas desenvolvidas no campo da otimização, o analista de sistemas de recursos hídricos tem maior agilidade e flexibilidade para a solução de problemas. Deve-se ter um cuidado especial na formulação do problema, bem como na análise de seus resultados. 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.

Dentre os objetivos que estão envolvidos em um modelo de otimização podem-se citar alguns conforme Jarrige (1993), apud Francato e Barbosa (1999):

a) Mínimo Custo:

É um dos principais objetivos nos sistemas de distribuição de água. Experiências mostram que pode-se atingir reduções de 5 a 20% no consumo de energia elétrica. Até pouco tempo a maioria dos modelos era desenvolvido para atender este único objetivo;

b) Controle de Vazamentos:

Para que o sistema apresente uma boa eficiência é necessário minimizar as pressões de serviço para controlar as perdas na rede, objetivando diminuir o volume de água que é tratado e aduzido mas não faturado;

c) Segurança:

Melhorar a segurança da operação dos sistemas com o uso da automação, pois uma das mais freqüentes causas de falhas em sistemas complexos é o erro humano ou falhas de comunicação;

d) Qualidade do Serviço:

Deve-se procurar sempre o melhor padrão de qualidade de água e o nível de serviço;

e) Homogeneização da Distribuição do Déficit:

Evitar a concentração de falhas do sistema em determinadas regiões, distribuindo assim de forma equilibrada possíveis deficiências no atendimento à demanda.

Como observou-se, nos últimos anos, a otimização das condições operacionais dos sistemas de abastecimento de água tem recebido uma atenção especial por parte dos pesquisadores, tornando-se alvo de pesquisas teóricas e práticas. Nestes sistemas, o bombeamento da água tratada contém a maior fração do orçamento total de energia. Baseado neste fato, muitos trabalhos têm sido desenvolvidos na tentativa de reduzir o consumo de energia elétrica dos sistemas de abastecimento de água, buscando melhorar a eficiência da operação de bombas.

2.2 - OPERAÇÃO DE BOMBAS

Os custos operacionais dos sistemas de abastecimento de água merecem atenção especial por parte de seus administradores, principalmente aqueles referentes à energia elétrica consumida pelas operações de bombeamento. Segundo Tarquin e Dowdy (1989), uns dos itens mais caros nos orçamentos municipais são os custos provenientes com o bombeamento de água para distribuição. Brailey e Jacobs (1980) apud Ormsbee *et al.* (1989), relatam que aproximadamente 7% da energia elétrica consumida nos Estados Unidos é utilizada pelas empresas de saneamento. Este custo corresponde a uma porção significativa dos orçamentos municipais, podendo-se estimar que 90% deles são referentes ao tratamento e bombeamento de água bruta. Clingenpeel (1983) assinala que 50% (ou mais) dos custos anuais das empresas de saneamento são com energia elétrica, nos quais mais de 95% do orçamento de energia elétrica pode ser associado com os custos de

bombeamento. Segundo Pezeshk e Helweg (1996), a otimização das operações de bombeamento pode gerar economias significativas, as quais, no caso de grandes sistemas, poderão atingir a ordem de centenas de milhares de dólares anualmente.

A política operacional para uma estação de bombeamento consiste em um conjunto de regras ou diretrizes que indicam quando uma bomba em particular ou conjunto de bombas devem ser ligados e desligados para um período específico de tempo. O plano de ação ótimo de bombas é definido com a agenda do bombeamento que resultará no mais baixo custo de operação, para um dado conjunto de condições, como a demanda do sistema, a tarifa elétrica e os níveis desejados nos reservatórios de distribuição (Ormsbee *et al.*, 1989).

Os primeiros trabalhos que trataram de um agendamento ótimo de bombas foram desenvolvidos na década de setenta, aplicando a programação dinâmica, (Lansey e Awumah, 1994), seguidos por uma série de outros trabalhos utilizando esse método (Jolland e Cohen, 1980; Zessler e Shamir, 1989). De acordo com Ormsbee *et al.* (1989), apesar de muitos destes algoritmos terem sido desenvolvidos para sistemas relativamente simples, estratégias de controle em tempo real têm sido desenvolvidas para sistemas mais complexos.

Vários autores têm investigado economias potenciais que podem resultar de uma modificação do plano de operação de bombas existente, baseando-se muitas vezes na experiência do operador e lançando mão dos recursos da pesquisa operacional acoplados aos modernos recursos da informática, incluindo: métodos heurísticos (Lannuzel e Ortolano, 1989; Tarquin e Dowdy, 1989; Ormsbee e Reddy, 1995; Pezeshk e Helweg, 1996); programação dinâmica (Ormsbee *et al.*, 1989; Zessler e Shamir, 1989; Yeh *et al.*, 1992; Lansey e Awumah, 1994; Nitivattananon *et al.* 1996); programação linear (Little e McCrodden, 1989; Jowitt e Xu, 1990; Jowitt e Germanopoulos, 1992; Crawley e Dandy, 1993); programação não linear (Brion e Mays, 1991; Santana, 1999).

Ormsbee *et al.* (1989) desenvolveram uma metodologia que é diretamente aplicável para um sistema complexo de distribuição de água ou zonas isoladas de pressão com um único sistema simples de armazenamento e múltiplas estações de bombeamento. A

metodologia para a operação ótima de bombas envolve duas fases básicas: o desenvolvimento de uma trajetória ótima do tanque, e o desenvolvimento de uma política de operação ótima de bomba para alcançar a trajetória ótima. A trajetória ótima é determinada usando programação dinâmica, enquanto a política de associação das bombas é determinada usando um método de enumeração explícita. A metodologia desenvolvida foi usada no sistema de distribuição de água de Washington, Estados Unidos.

Zessler e Shamir (1989), após analisarem os aspectos da operação de redes de distribuição de água, definiram como um problema de controle ótimo encontrar as decisões para operação de bombas e válvulas, ao longo de um período de tempo definido (24 horas), tal que as demandas sejam atendidas, as condições de pressão satisfeitas e o custo total minimizado. Discutiram o uso da programação dinâmica como procedimento lógico, porém apontaram as limitações práticas do tamanho do problema, pelas dimensões da rede.

O modelamento proposto pelos autores, utilizado na parte norte de Israel, subdivide a rede em regiões em que haja uma estação de bombeamento entre dois reservatórios. Um simulador hidráulico é usado para estudar cada sub-sistema, determinando as condições de vazões, pressões e mudanças nos níveis dos reservatórios. Segue para a próxima sub-região da rede, considerando a anterior como fixa, adotando procedimento semelhante para toda a rede, construindo para cada intervalo de tempo, a curva de custo em função do bombeamento. Ajustando estas curvas a uma função parabólica para cada estação e tempo e, adotando como variável de decisão na programação dinâmica os volumes dos reservatórios, a solução pode ser encontrada.

Segundo Brion e Mays (1991), a tentativa para melhorar a eficiência da operação de bombas enfoca três diferentes aspectos: ineficiência das combinações das bombas, agendamento ineficiente das bombas, e bombas ineficientes. Os autores propuseram a utilização de um modelo de programação não linear acoplado a um simulador para determinação da operação de custo mínimo em uma rede de abastecimento de água. Considerando que o ótimo global não é garantido, desenvolveram uma análise de sensibilidade dos vários parâmetros do modelo, de modo a estabelecer a combinação que produza a solução ótima.

Jowitt e Germanopoulos (1992), utilizando a linearização das equações e restrições da rede, desenvolveram um método usando programação linear para otimizar a operação de bombeamento num período de 24 horas. Os autores fizeram uma análise da estrutura de custos de energia, considerando esta a maior componente da operação de redes de distribuição de água. Através da simulação intensiva da operação da rede, foram determinados os parâmetros para linearização do sistema. Uma aplicação do método foi realizada em Buckinghamshire, Inglaterra.

De acordo com Ulanicki *et al.* (1993), as decisões de seleções de bombas determinam as condições posteriores de operação, e neste sentido dominam as decisões de controle operacional. Um bom procedimento de projeto deveria, portanto, usar um modelo da rede trabalhando em condições operacionais ótimas. Nesse sentido, projetos de estação e seleção de bombas têm recebido ampla cobertura na literatura, como Alperovits e Shamir (1977), Ormsbee e Wood (1986), Lansey e Mays (1989), e Lansey *et al.* (1989).

Uma metodologia para a determinação de um agendamento ótimo para a operação de bombas para sistemas de distribuição de água foi apresentada por Lansey e Awumah (1994). Além de minimizar o custo da energia consumida, o modelo inclui restrições quanto ao número de bombas que são ligadas durante um certo período, restrições para o nível dos reservatórios, taxa de modificação do nível destes reservatórios. A metodologia utiliza dois níveis onde as características hidráulicas do sistema são analisadas, gerando uma simplificação hidráulica e funções de custo para operação on-line. As funções obtidas para cada combinação de bombas podem ser avaliadas rapidamente através de um algoritmo de otimização de programação dinâmica.

Yu *et al.* (1994) avaliaram a complexidade da estrutura de tarifas de energia elétrica para o setor industrial, quando utilizada a tarifação pela demanda máxima mensal em curto período (15 a 30 minutos), tornando a análise da operação mais complexa, uma vez que se dá em período de 24 horas. Avaliaram as técnicas utilizadas até então, no que se refere ao uso de programação dinâmica, porém, limitada a poucos reservatórios na rede.

Os requerimentos e componentes básicos para um controle ótimo típico de sistemas de bombeamento para abastecimento de água foram apresentados e discutidos por

Ormsbee e Lansey, 1994. Os componentes examinados inicialmente incluem os diversos tipos de modelamento hidráulico de rede, para uma posterior avaliação dos problemas dos modelos de otimização. Os autores discutiram as características da estrutura de custo, enfatizando a avaliação, apenas, dos custos associados ao consumo médio diário. As restrições quanto à operação também foram avaliadas, principalmente quanto aos níveis dos reservatórios.

Apesar da grande quantidade de algoritmos de controle ótimo desenvolvidos para sistemas de bombeamento para abastecimento d'água, várias áreas de pesquisa em potencial ainda perduram. Por exemplo, pouco trabalho tem sido conduzido com o uso de tecnologias como sistemas especialistas ou redes neurais, embora aparentemente seja uma área de ótimo potencial, no desenvolvimento ou implementação de estratégias para ótimo controle de bombas (Ormsbee e Lansey, 1994).

A responsabilidade do gerenciamento do sistema de abastecimento depende principalmente dos operadores. Embora algumas tarefas sejam executadas automaticamente, os operadores tomam a maioria das decisões usando sua própria intuição e experiência para decidir a ação mais adequada a cada momento (Léon *et al.*, 2000). Nesta linha, Lannuzel e Ortolano (1989) examinaram um sistema de bombeamento para abastecimento d'água e desenvolveram um método heurístico operacional baseado na experiência de operadores. As regras provenientes dos operadores experientes foram então combinados com um modelo de simulação num sistema especialista.

Ormsbee e Reddy (1995) avaliaram as dificuldades do uso da programação dinâmica e a complexidade dos modelos de programação não linear, no que se refere ao número elevado de variáveis de decisão, quando considera a operação individual de cada bomba em operação a cada intervalo de tempo. Apresentaram um modelamento heurístico visando reduzir o número de variáveis de decisão, adotando para cada estação de bombeamento uma única variável a cada intervalo de tempo.

Um modelo de otimização foi desenvolvido por Nitivattananon *et al.* (1996) para gerar um agendamento de bombas em tempo real de operação, considerando as dificuldades atribuídas por uma complexa tarifa de energia, especialmente demandas,

vazões discretas das bombas, e outras restrições físicas. A otimalidade progressiva é utilizada pelo modelo para decompor a rede no espaço e no tempo em vários subsistemas. As vazões de bombeamento são discretizadas e arranjadas heurísticamente, de modo a reduzir os intervalos de tempo em que cada bomba será utilizada. A aplicação do modelo foi feita em Pittsburgh, Pensilvânia, Estados Unidos, obtendo economias de até 20% do custo total anual no sistema de abastecimento de água.

Segundo León *et al.* (2000), usualmente o plano de aproveitamento global do sistema de abastecimento d'água não é definido claramente. A principal razão é a dificuldade em reunir as informações requeridas, devido ao fato que elas são baseadas na experiência dos operadores. Outras razões são a variedade de mecanismos de controle e as mudanças freqüentes na topologia da rede. Os autores desenvolveram um sistema especialista híbrido, a base de regras, para gerenciar o sistema de abastecimento de água da cidade de Sevilha, Espanha, que reduz o custo da operação do bombeamento de água para diferentes reservatórios de distribuição. As regras do sistema contêm o conhecimento necessário para a operação de um sistema de abastecimento. Estas regras, que constituem a base do conhecimento do sistema especialista, combinam procedimentos heurísticos com algoritmos de cálculo. O sistema tem fornecido um melhoramento ótimo nos custos com energia elétrica, com economia de até 25%.

Os trabalhos citados anteriormente mostram que tem aumentado a consciência da necessidade de uma melhor operação do bombeamento nos sistemas de abastecimento de água. Esta tendência deve continuar, principalmente no que se refere a escassez contínua dos recursos hídricos e energéticos, paralela ao aumento da disponibilidade de recursos computacionais, com custos progressivamente decrescentes e capacidade de processamento cada vez maior, aliada a melhores recursos de interface homem-máquina.

Conclui-se, também, que torna-se difícil obter uma solução automatizada, baseada apenas em modelos de simulação ou otimização. Uma alternativa seria a utilização desses modelos que representem o comportamento da rede e do sistema de bombeamento, de modo que se possa avaliar os impactos das estratégias de operação adotadas, aliada a uma outra ferramenta que represente o processo de tomada de decisão sobre a operação.

2.3 – MODELOS HIDRÁULICOS

De acordo com Ormsbee e Lansey (1994), para avaliar o custo de uma política particular de operação de bombas ou avaliar as restrições operacionais associadas, algum tipo de modelo matemático do sistema de distribuição é requerido. Os autores destacaram os diferentes modelos para simulação de uma rede hidráulica, classificando-os como modelos de balanço de massa, modelos de regressão, modelos hidráulicos simplificados, e modelos hidráulicos complexos.

2.3.1 – Modelos de Balanço de Massa

Em um modelo simples de balanço de massa de um sistema com um único reservatório, o fluxo no interior do sistema é igual à demanda mais a razão de variação do total armazenado no reservatório. A carga de pressão requerida para o fluxo alcançar o interior do reservatório é omitida, e é assumido que a combinação de bombas disponível é que alcança a variação desejada no total armazenado. As pressões requeridas nos nós são geralmente assumidas como satisfeitas se o volume restante no reservatório está dentro de um limite desejado. Quando um modelo de balanço de massa é usado, deve-se tomar cuidado na determinação do custo operacional da bomba a um dado fluxo, uma vez que o custo de operação está relacionado com a vazão e a energia adicionada para o fluxo.

Modelos multidimensionais de balanço de massa também têm sido desenvolvidos. Tais modelos consistem de importantes relações funcionais entre o nível do reservatório e a vazão bombeada. As influências associadas com as relações funcionais podem ser determinadas usando regressão linear ou a partir da linearização da rede não linear.

A principal vantagem dos modelos de balanço de massa é que a resposta do sistema pode ser determinada mais rapidamente do que a partir de modelos de simulação. Deste modo, eles são bem adaptados para uso com estratégias de otimização que requerem grande número de análises de simulação. Em geral, modelos de balanço de massa são mais apropriados para sistemas de abastecimento regionais no qual o fluxo é conduzido

principalmente por tubulações maiores (adução) do que por redes de distribuição onde a hidráulica é comumente dominada por sistemas de tubulações malhadas (Jolland e Cohen, 1980).

2.3.2 – Modelos de Regressão

Ao invés de utilizar um simples modelo de balanço de massa, a natureza não linear dos sistemas hidráulicos pode ser melhor representada usando um conjunto de equações de regressão não lineares. As informações requeridas para construção de tais modelos podem ser obtidas de várias formas. Curvas de regressão podem ser geradas pela execução intensiva de um modelo de simulação calibrado para diferentes níveis em um reservatório e diferentes condições de operação (Ormsbee *et al.* 1987) ou pelo uso de informações provenientes das condições atuais de operação para formar uma base de dados sobre a rede, relacionando as pressões e vazões de bombeamento, os níveis dos reservatórios, e demandas do sistema (Tarquin e Dowdy, 1989).

Modelos de regressão têm a vantagem de serem capazes de incorporar algum grau de não-linearidade do sistema enquanto produzem um mecanismo eficiente para avaliação da sua resposta. No entanto, curvas de regressão e base de dados apenas contêm informações para uma dada rede sobre uma dada série de demandas. Se a rede muda consideravelmente ou as demandas previstas estão fora de série da base de dados, tal método provê resultados errôneos. Além disso, curvas de regressão são aproximações da resposta do sistema. A não ser que as curvas sejam bem próximas da resposta real, erros podem acumular-se durante o curso da operação, o que pode afetar desfavoravelmente o algoritmo de otimização e a exatidão e aceitabilidade desses resultados.

2.3.3 - Modelos Hidráulicos Simplificados

Os modelos hidráulicos simplificados podem ser usados como um intermediário entre um modelo de regressão não-linear e um modelo hidráulico complexo não linear. Em tais casos, a rede pode ser aproximada ou analisada usando um modelo de rede

macroscópico que usa um sistema de equações hidráulicas linearizadas. Modelos macroscópicos representam o sistema pelo uso de uma rede simplificada. Tipicamente apenas uma bomba, um fator de resistência para a tubulação e uma demanda constante são incluídas.

Em certos casos, por exemplo onde condições limites do sistemas são independentes da vazão da estação de bombeamento, pode ser possível representar o sistema hidráulico utilizando um modelo linear simples. Jowitt e Germanopoulos (1992) usaram um modelo linear aproximado para um sistema dominado por cargas de bombas elevadas. Neste caso, pequenas variações nos níveis dos reservatórios não influenciaram significativamente na operação das bombas. Em uma aplicação similar, Little e McCrodden (1989) desenvolveram um modelo linear simples para um sistema de abastecimento no qual a carga para controle do reservatório foi mantida constante. Os coeficientes para os dois tipos de modelos citados podem ser determinados após uma extensiva análise do sistema. Como resultado, tais modelos devem ser avaliados em uma base dependente do sistema para julgar sua aceitabilidade.

2.3.4 – Modelos Hidráulicos Complexos

Modelos hidráulicos complexos apresentam a capacidade para modelar a dinâmica não-linear de um sistema de distribuição de água através da solução de um conjunto de equações de fluxo quase permanente (Ormsbee e Lansey, 1994). As equações que governam um sistema de distribuição de água incluem as equações da conservação de massa em cada nó e a conservação de energia ao longo dos laços da rede. Estas equações podem ser solucionadas pelo ajuste dos fatores dos nós das grades (Shamir e Howard, 1968), taxa de fluxo na malha (Epp e Fowler, 1970) e taxa de fluxo na tubulação (Wood e Charles, 1972).

Ao contrário dos modelos de balanço de massa e regressão, os modelos hidráulicos complexos são adaptáveis a mudanças no sistema e variações de demanda. Por exemplo, se um reservatório subitamente for desconectado do sistema, um modelo complexo de simulação, calibrado, forneceria uma resposta das condições do sistema modificado. Um

modelo de balanço de massa ou de regressão, por outro lado, requereria modificações da base de dados ou curvas de regressão para considerar as mudanças na resposta do sistema. Embora modelos hidráulicos de simulação sejam mais robustos do que modelos de balanço de massa ou de regressão, eles geralmente requerem mais dados na sua formulação. Eles também requerem muito trabalho para serem calibrados. Como este tipo de modelo demanda um grande suporte computacional comparado com os modelos de balanço de massa e de regressão, são geralmente mais usados com formulações de controle ótimo que requerem um número mínimo de avaliações do sistema (Ormsbee e Lansey, 1994).

CAPÍTULO III

3 – METODOLOGIA

Para avaliar os impactos da tomada de decisão na operação, foi utilizada uma ferramenta já disponível para a simulação do sistema de abastecimento, submetido a diferentes cenários de operação.

Em conjunto com a simulação da rede, surge a necessidade de uma outra ferramenta para análise dos resultados e para apoiar a tomada de decisão para operação das bombas, o que tem se chamado de Sistema de Apoio a Decisão (SAD). Neste trabalho, toda a análise da simulação foi realizada tendo em vista o objetivo de propor diretrizes para o desenvolvimento futuro de um SAD para a operação de bombas em sistemas de abastecimento de água.

O sistema adutor utilizado como exemplo é parte do sistema de abastecimento da cidade de Campina Grande, Paraíba, operado pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA).

Foram consideradas as diferentes tarifas de energia elétrica, convencional e horosazonal azul, oferecidas pela concessionária de energia elétrica na região, CELB – Companhia Energética da Borborema, para um horizonte de operação de 24 horas.

3.1 - MODELO WADISO

Embora na literatura existam diversos modelos de simulação de redes, para este trabalho foi utilizado o modelo WADISO - Water Distribution System Optimization - (Walski *et al.*, 1990) pelo fato de ser um modelo de domínio público, adequado ao problema estudado, e ter sido utilizado anteriormente na UFPB (Leal, 1995).

O WADISO é um programa implementado em linguagem FORTRAN e foi desenvolvido no Programa de Conservação e Abastecimento d'Água do U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station. O programa consiste em três partes: a primeira parte, *Rotina de Simulação*, computa as distribuições de pressões e vazões na rede; a segunda, *Rotina de Otimização*, usada para dimensionamento, calcula os custos e algumas distribuições de pressão, encontrando os diâmetros ótimos; a terceira, *Rotina de Simulação no Tempo*, computa a distribuição das pressões e vazões na rede, considerando a flutuação do(s) nível(is) do(s) reservatório(s) de distribuição e a variação dos padrões de uso d'água ao longo de um período determinado.

No WADISO estão representados os principais elementos de uma rede de distribuição d'água: os elementos físicos - os tubos, os reservatórios de distribuição, os mananciais, as válvulas redutoras de pressão e de controle, as bombas; e os elementos abstratos - pressões, vazões e velocidades.

Não há limitações no layout do sistema exceto que este precisa conter pelo menos um nó com carga constante (reservatório de distribuição ou manancial) para cada rede.

O WADISO possui um ambiente interativo, com vários menus relacionados com as três rotinas já citadas, e um conjunto de comandos, os quais inserem, retiram ou alteram elementos na rede.

As duas rotinas usadas neste trabalho (Figuras 3.1 e 3.2) encontram-se detalhadas a seguir.

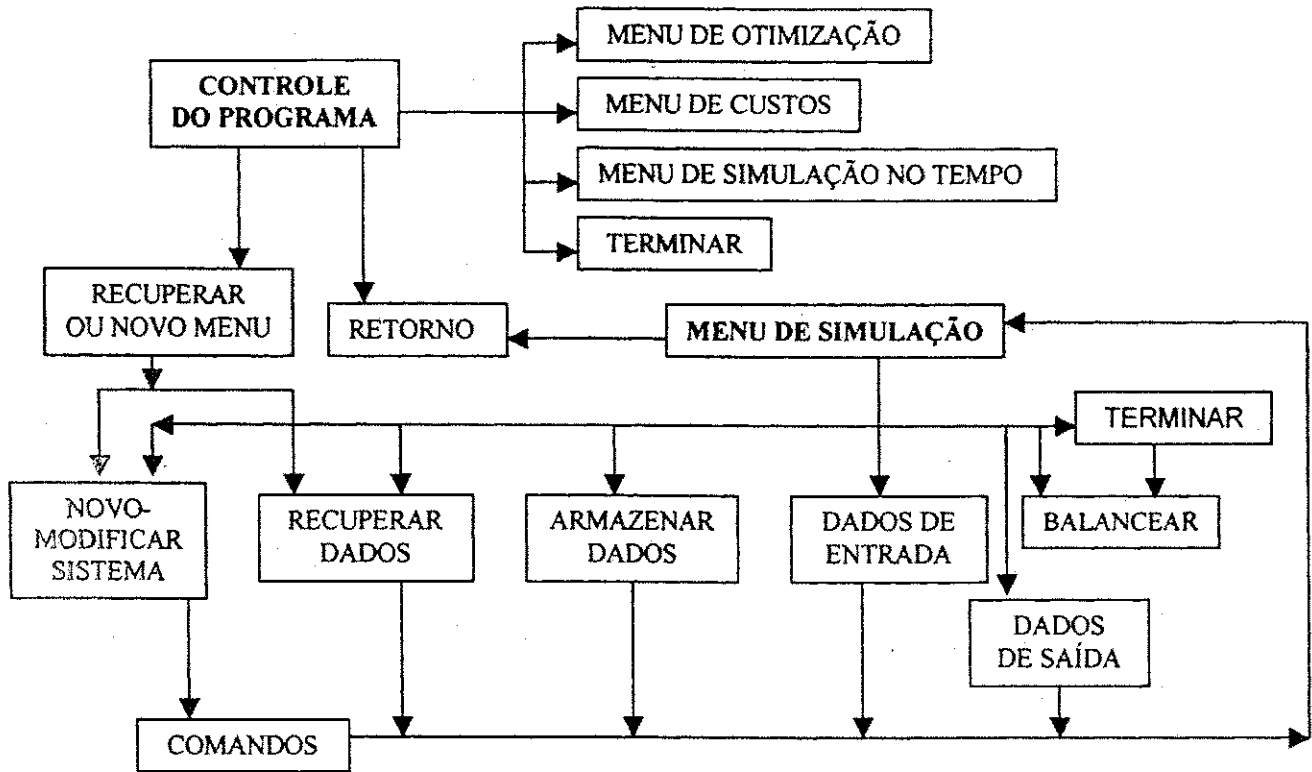


Figura 3.1 – Fluxograma, rotina de simulação (Walski *et al.*, 1990)

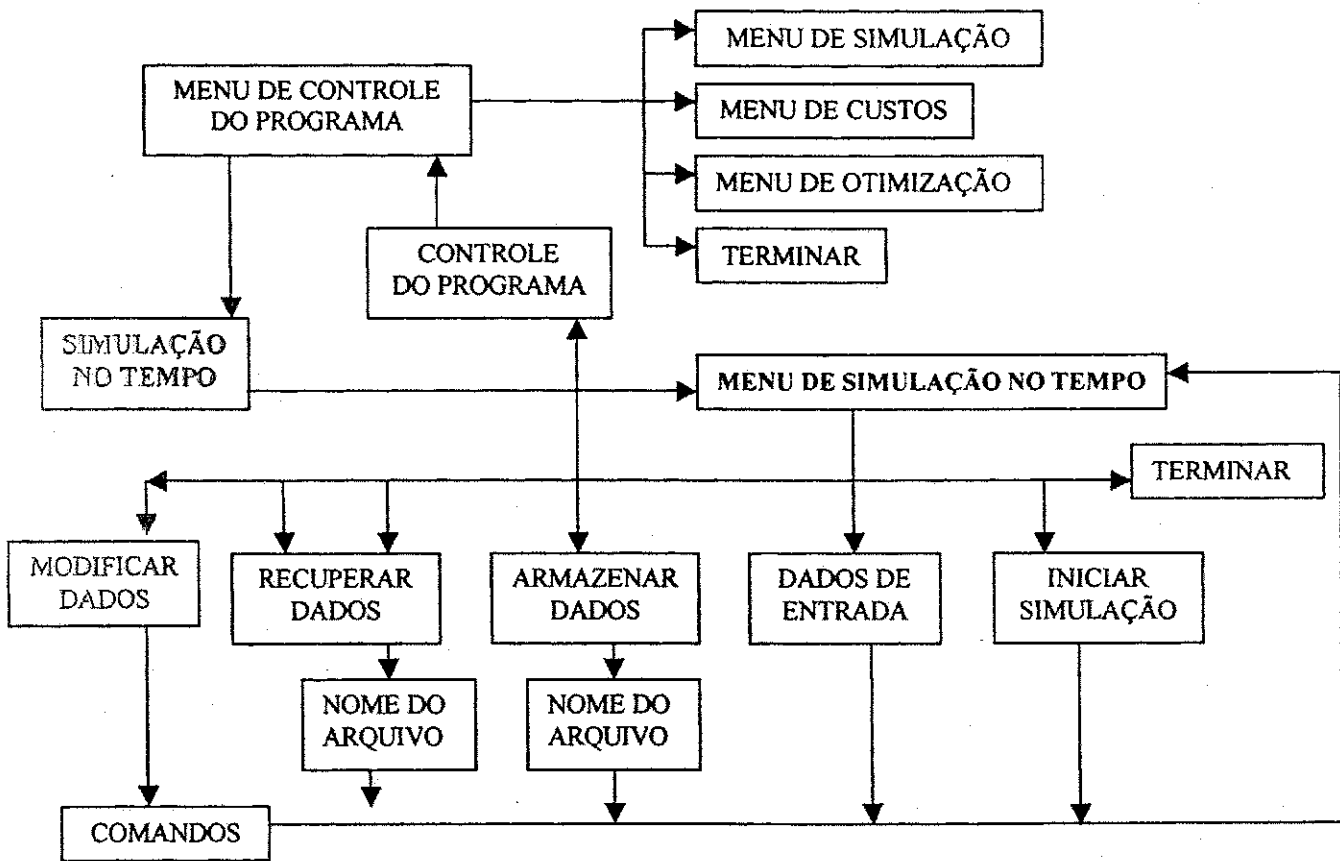


Figura 3.2 – Fluxograma, rotina de simulação no tempo (Walski *et al.*, 1990)

3.1.1 – Rotina de Simulação

3.1.1.1 – Introdução

É a parte do programa que calcula, no sistema de distribuição de água, a altitude da linha de energia e pressão para cada nó, a vazão e a perda de carga em cada tubo, a vazão e a altura manométrica para cada bomba, e o modo de operação para cada válvula redutora de pressão e válvula de controle para as condições no regime permanente. O programa trabalha com redes malhadas e ramificadas, não sendo necessário para o usuário identificar o tipo de rede. Pode ser rodado como um programa suporte e é requerido com as rotinas de otimização e simulação no tempo.

3.1.1.2 – Definição dos Termos

Os principais elementos representados pelo WADISO na rotina de simulação estão descritos abaixo:

- **Conexão:** é o elemento entre dois nós. Pode ser um tubo, uma bomba, ou uma válvula redutora de pressão. É representada por um número.
- **Nó:** é o elemento das extremidades das conexões. Em um nó podem ser ligadas várias conexões. Pontos de suprimento (mananciais, reservatórios de distribuição) são também nós, uma vez que estão localizados nas extremidades das conexões. É também representado por um número.
- **Tubo:** é a mais comum das conexões, tem definido um diâmetro constante entre os dois nós aos quais está conectado. O diâmetro é expresso em polegadas, e o comprimento em pés. O programa usa a equação de perda de carga de Hazen-Williams e o coeficiente correspondente. A fórmula de Hazen-Williams é largamente empregada no dimensionamento de sistemas de distribuição de água, uma vez que os diâmetros das tubulações destes, encontram-se na faixa de

50 a 1.000 mm, valores para os quais a fórmula foi desenvolvida e pode ser aplicada satisfatoriamente (Azevedo Neto e Alvarez, 1991; Hwang, 1981).

- **Bomba**: é uma conexão. Possui uma curva característica que relaciona a vazão com a altura manométrica. O usuário especifica três pontos da curva característica e o programa então definirá uma parábola a partir desses três pontos. Em uma outra opção, o usuário pode entrar com apenas um ponto da curva, e o programa ajustará uma parábola a partir deste único ponto. Não é associado um comprimento à conexão que representa a bomba. Os dois nós extremos devem ter a mesma cota.
- **Válvula Redutora de Pressão (VRP)**: é um outro tipo de conexão. A pressão de serviço definida (em *psi*) para uma VRP é a pressão que a válvula tentará manter para o nó a jusante da VRP. Se a pressão a jusante puder ser mantida dentro da pressão de serviço, a válvula está ativa. Se por alguma razão a pressão a jusante exceder a pressão de serviço na VRP, a válvula é fechada. Se a pressão a montante da VRP é menor do que a pressão de serviço, a válvula é completamente aberta. VRPs também atuam como válvulas de controle, sendo fechada quando ocorre fluxo reverso. O modo operacional de VRPs (ativa, fechada, ou aberta) é indicado na saída do programa. Os dois nós extremos devem ter a mesma cota.
- **Válvula de Controle**: uma válvula de controle limita a direção do fluxo na tubulação. É sempre associada com um tubo, não sendo representado por uma conexão. A saída do programa imprime a informação quanto à válvula de controle, se encontra-se fechada ou aberta.
- **Manancial**: é fixado em um nó extremo, com o nível d'água fixo e coincidente com a cota deste nó. É representado por um número.
- **Reservatório de Distribuição**: é um nó com nível da superfície d'água fixo e coincidente com a cota deste nó. É também representado por um número.

- **Saída:** é a demanda d'água pontual retirada em um nó do sistema.
- **Entrada:** é a demanda d'água pontual injetada em um nó do sistema.

3.1.1.3 – Dados de Entrada

A entrada de dados para a análise do sistema de distribuição é realizada de forma interativa. Os comandos usados durante a entrada de dados encontram-se resumidos na Tabela 3.1 e são descritos em seguida. Alguns desses comandos são mais utilizados para dados de entrada, enquanto outros para modificações.

Tabela 3.1 - Comandos para simulação da distribuição de água - Formato para dados de entrada

BOMBA	xxx (Conexão)	xxx (Nó a montante)	xxx (Nó a jusante)	
	Alerta seguinte: Ponto da Curva Característica:			
	xxx.x (Vazão, gpm)	xxx.x (Altura manométrica, pé)		
COEFICIENTE	xxx (Primeira Conexão)	xxx (Última Conexão)	xxx (Coeficiente)	ou
COEFICIENTE	xxx (Conexão)	xxx (Coeficiente)		ou
COEFICIENTE	xxx (Coeficiente)			
CONTROLE	xxx (Conexão)	xxx (Nó a Montante)	xxx (Nó a Jusante)	
DIÂMETRO	xxx (Conexão)	xx.x (Diâmetro, pol)		
ELEVAÇÃO	xxx (Nó)	xxx.x (Elevação, pé)		
ENTRADA	xxx (Nó)	xxx.x (Entrada, gpm)		

Tabela 3.1 - Comandos para simulação da distribuição de água - Formato para dados de entrada (Continuação)

EXATIDÃO	xx.x (Exatidão da Pressão)	xx.x (Exatidão da Vazão)	xx (Nº Máximo de Iterações)
NÓ	xxxx.x (Elevação, pé)	xxx.x (Saída, gpm)	
RESERVATÓRIO	xxx (Nó)	xxx.x (Nível da Superfície d'água, pé)	
SAÍDA	xxx (Nó)	xxx.x (Saída, gpm)	
TRABALHO	Nome (Nome do Trabalho)		
TUBO	xxx (Conexão)	xxx (Nó a Montante)	xxx (Nó a Jusante)
	xxx (Comprimento)	xxx.x (Coeficiente)	xxx (Diâmetro, pol) ...
VRP	xxx (Conexão)	xxx (Nó a Montante)	xxx (Nó a Jusante)

- **TRABALHO:** é necessário especificar um nome para o trabalho que será iniciado.
- **TUBO:** este comando é utilizado para entrada de um tubo, com diâmetro em polegadas e o comprimento em pés. O coeficiente de Hazen-Williams é opcional. O programa assumirá o valor 100, caso o usuário não especifique um valor para o coeficiente.
- **ELEVAÇÃO:** este comando é usado para entrada da elevação dos nós. A elevação é dada em pés e deve ser maior que zero.
- **SAÍDA:** comando usado para uma saída constante de água, por exemplo para uso doméstico, que é independente da pressão para ser calculada pelo programa. A saída é dada em gpm.

- **ENTRADA:** comando usado para inserir no sistema uma entrada constante de água, que é independente da pressão para ser calculada pelo programa. A entrada é dada em gpm. Usar o comando *ENTRADA* é equivalente a usar o comando *SAÍDA* com o valor negativo.
- **RESERVATÓRIO:** esse comando é usado para designar um nó com carga constante. O nível d'água no reservatório é dado em pés, acima da elevação do nó. Se o nível d'água no reservatório é especificado como zero, o programa assumirá o nó como um manancial.
- **DIÂMETRO:** usado para indicar o diâmetro do tubo, é dado em polegadas. Esse comando é usado apenas quando deseja-se alterar um diâmetro, já que o valor foi especificado anteriormente no comando *TUBO*.
- **COMPRIMENTO:** usado para a entrada do comprimento de um determinado tubo, é dado em pés. Comando também utilizado para alteração de um comprimento, que foi anteriormente especificado no comando *TUBO*.
- **COEFICIENTE:** comando usado para entrada do coeficiente de Hazen-Williams de um tubo, grupo de tubos, ou alteração de todos os valores previamente especificados.
- **EXATIDÃO:** comando utilizado para especificar a exatidão com a qual as iterações devem ser conduzidas, e o número máximo de interações que deve ser efetuado. O usuário especifica a exatidão da pressão em psi e da vazão em gpm. O maior erro no sistema será menor do que o valor especificado neste comando. Se o comando *EXATIDÃO* não é utilizado, o programa utilizará os seguintes valores: pressão, 2 psi (1,36 mca); vazão, 10 gpm (0,63 l/s); e número de iterações, 25. O número de interações é opcional. O programa usa uma técnica de enumeração, na qual as equações de perda de carga de todos os tubos são linearizadas e solucionadas simultaneamente com a equação da continuidade de todos os nós. O número de interações requeridas é independente do número de nós e tubos no sistema (Walski *et al.*, 1990).

- **BOMBA:** comando usado na entrada de dados para uma bomba. Primeiramente, o número da conexão e dos nós inicial e final são especificados. Embora a ordem do número dos nós não seja importante quando os dados são inseridos no comando *TUBO*, no caso das bombas é importante, pois é assumido que a água é bombeada do primeiro nó especificado para o segundo. Em seguida deve-se entrar com os pontos (vazão, altura manométrica) para a construção da curva característica, sendo a vazão em gpm, e altura manométrica em pés.
- **VRP:** usado na entrada de dados para válvulas redutoras de pressão. Primeiramente, o número da conexão e os nós são especificados. A VRP assume que o sentido do fluxo é do primeiro nó listado para o segundo, uma vez que VRPs atuam também como válvulas de controle. Em seguida deve-se entrar com a pressão de serviço desejada.
- **CONTROLE:** comando utilizado para inserir uma válvula de controle em um tubo previamente especificado. Deve-se entrar com o número da conexão e o número dos nós. O programa assumirá que a válvula de controle permitirá o fluxo apenas do primeiro para o segundo nó especificado.
- **NÓ:** este comando oferece uma alternativa para entrada de dados de *ELEVAÇÃO* e *SAÍDA*, pertencentes a um nó. O valor numérico para *SAÍDA* é opcional. Por exemplo, nós com carga constante requerem apenas a elevação.

3.1.1.4 – Balanceamento do Sistema

Após a entrada de dados é realizado o balanceamento do sistema, que computa as distribuições de pressão e vazão. O programa primeiramente lista os limites de exatidão de pressão e vazão, e então imprime o erro máximo estimado ao final de cada iteração.

O programa prossegue com a impressão da saída de dados. Se o sistema não é balanceado após o número máximo especificado de iterações será exibida uma mensagem de alerta.

O WADISO, para realizar o balanceamento da rede, usa o método dos nós, tipo Hardy-Cross. O método dos nós é a técnica de balancear a vazão dos trechos ligados a um nó qualquer, por meio da correção de uma pressão inicial assumida para este nó. Através da pressão inicial estimada em cada nó, pode-se calcular uma vazão para cada trecho ligado a ele. Se o sistema fosse perfeitamente balanceado, o somatório dos fluxos que entram com os que saem de cada nó seria zero ($\sum Q_i = 0$). Porém, baseado nas alturas estimadas, haverá uma taxa de vazão residual a ser corrigida.

O grupo de pressões assumido é sucessivamente corrigido até que a equação da continuidade esteja satisfeita, em cada nó, dentro de limites práticos de erro aceitável.

O WADISO usa a equação de perda de carga da Hazen-Williams para calcular as perdas nos tubos:

$$h_i = c_i Q_i^{1,85} \quad (\text{eq. 3.1})$$

onde: h_i = perda de carga no tubo i , em pé

c_i = coeficiente de perda no tubo i .

Q_i = vazão no tubo i , em pe^3/s

c_i é definido como:
$$c_i = \frac{4,72 L_i}{C_i^{1,85} D_i^{4,87}} \quad (\text{eq. 3.2})$$

onde: L_i = comprimento do tubo i , em pé

C_i = coeficiente de Hazen-Williams do tubo i

D_i = diâmetro do tubo i em pé

A equação 3.1 pode ser reescrita considerando a vazão (Q_i) em dois termos: um constante (Q_{io}), estimado, e um termo (q) que corrige o valor estimado para dar o valor calculado (Q_i):

$$H_j - H_k = c_i Q_{io}^{1,85} + 1,85 c_i Q_{io}^{0,85} q \quad (\text{eq. 3.3})$$

onde: H_j e H_k = cargas totais dos nós inicial e final do tubo i , com $H_j > H_k$

Q_{io} = taxa de fluxo estimada no tubo i

e

$$Q_i = Q_{io} + q \quad (\text{eq. 3.4})$$

onde: Q_i = taxa de fluxo calculada no tubo i

q = diferença entre as taxas de fluxo calculada e estimada.

As equações 3.3 e 3.4 são combinadas, eliminando o q , resultando em:

$$Q_i = 0,46 Q_{io} + 0,54 \frac{H_j - H_k}{c_i Q_{io}^{0,85}} \quad (\text{eq. 3.5})$$

onde: $H_j > H_k$ e $Q_{io} > 0$

Seja a equação da continuidade para o nó 2 na Figura 3.3, considerando as direções do fluxo indicadas como corretas e assumindo o influxo como negativo e o defluxo como positivo:

$$-0,46 Q_{1o} - 0,54 \frac{H_1 - H_2}{c_1 Q_{1o}^{0,85}} + 0,46 Q_{2o} + 0,54 \frac{H_2 - H_3}{c_2 Q_{2o}^{0,85}} + 0,46 Q_{5o} + 0,54 \frac{H_2 - H_5}{c_5 Q_{5o}^{0,85}} + Q_{d2} = 0$$

(eq. 3.6)

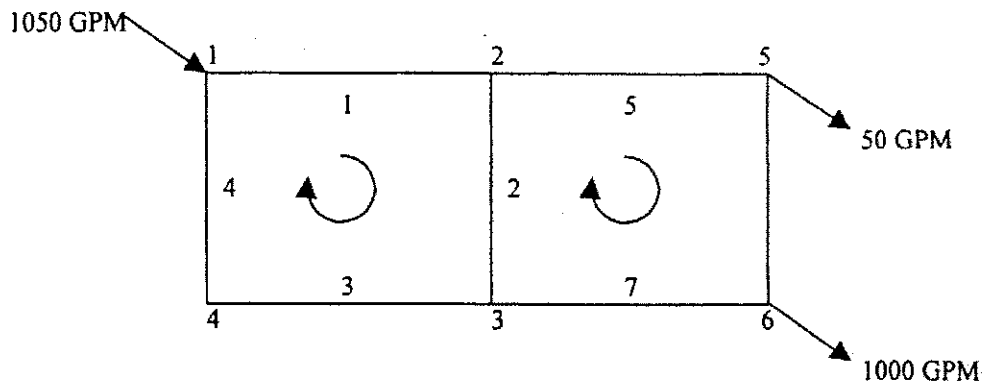


Figura 3.3 – Rede com dois “loops”, ilustrando o método dos nós (Walski *et al.*, 1990).

onde: Q_{d2} é o total de água retirada do nó 2. Se a razão de fluxo estimada aproximasse da razão de fluxo correta então:

$$-0,46Q_{10} + 0,46Q_{20} + 0,46Q_{50} + Q_{d2} \cong 0 \quad (\text{eq. 3.7})$$

que permitiu simplificar a equação 3.6 para:

$$-\frac{1}{c_1 Q_{10}^{0,85}} H_1 + \left(\frac{1}{c_1 Q_{10}^{0,85}} + \frac{1}{c_2 Q_{20}^{0,85}} + \frac{1}{c_5 Q_{50}^{0,85}} \right) H_2 - \frac{1}{c_2 Q_{20}^{0,85}} H_3 - \frac{1}{c_5 Q_{50}^{0,85}} H_5 = -Q_{d2} \quad (\text{eq. 3.8})$$

Esta é a equação da continuidade linearizada (equação com expoente 1 na carga H) para o nó 2, expressa em termos das cargas desconhecidas nos nós adjacentes e para o nó 2, como também em termos das taxas de fluxo estimadas nos tubos que conduzem ao nó 2.

3.1.1.5 – Saída de Dados

A saída é automática após o balanceamento. São fornecidas as seguintes listas de dados:

i. **Lista de nós:** a primeira tabela lista todos os nós, e fornece:

- Número de nós;
- Elevação dos nós, pé;
- Saída, gpm;
- Elevação da linha de energia, pé;
- Altura manométrica, pé;
- Pressão, psi;
- Comentário.

A coluna de comentário mostra os nós de carga constante, especificando se é manancial ou reservatório de distribuição.

ii. **Lista das Conexões:** a segunda tabela mostra todos os tubos, bombas, e válvulas redutoras de pressão. A lista fornece:

- Número da conexão;
- Número do nó a montante da conexão;
- Número do nó a jusante da conexão;
- Diâmetro, pol (Estado de VRP ou Válvula de Controle);
- Comprimento, pé;
- Coeficiente de Hazen-Williams;
- Vazão, gpm;
- Velocidade, pé/seg;
- Perda de carga, pé.

3.1.2 – Rotina de Simulação no Tempo

3.1.2.1 – Introdução

O WADISO inclui uma rotina de simulação no tempo, que trata o problema como um regime quase-permanente. O programa assume que terminado um curto intervalo de

tempo os níveis nos reservatórios de distribuição e as saídas não mudam significativamente. Como resultado, as vazões de afluxo e defluxo de reservatórios permanecem aproximadamente constantes. Um simples balanço de massa para cada reservatório irá indicar quanto os níveis d'água aumentaram ou diminuiram:

$$Q\Delta t = A_{RES} \cdot \Delta Z \quad (eq.3.9)$$

onde:

Q = vazão que entra no reservatório (positiva) ou vazão que dele sai (negativa)

Δt = intervalo de tempo

A_{RES} = área de seção transversal do reservatório

ΔZ = mudança de nível no reservatório no intervalo de tempo Δt .

Anterior à entrada da simulação no tempo, os dados para o sistema devem ser inseridos usando a rotina de simulação (estado permanente) e balanceado.

3.1.2.2 – Definições dos Termos

Os seguintes termos são usados na conexão com a rotina de simulação no tempo:

- **Duração**: é o tempo em horas que é simulado durante uma execução da simulação no tempo.
- **Simulação no tempo**: é a simulação de pressões, vazões, níveis d'água de reservatórios, e a variação do padrão de uso da água no tempo determinado.
- **Fator de carregamento**: a saída em um nó é multiplicada pelo *fator de carregamento* que descreve o uso da água para um dado intervalo de tempo. Por exemplo, se a vazão é de 1.000 gpm e o fator de carregamento para um intervalo de tempo é 1,2, a vazão durante este intervalo será de 1.200 gpm.

- **Distribuição Espacial:** a distribuição espacial determina quais nós são destinados para um padrão particular de uso da água. Por exemplo, num sistema, alguns nós de saída podem ser governados por um padrão de uso residencial e outros por um padrão de uso comercial.
- **Período:** é o período de tempo em horas igual a duração dividido pelo número de intervalos de tempo. Por exemplo, se a duração na simulação no tempo é de 24 horas e o número de intervalos é de 12, o período de tempo é igual a 2 horas.
- **Intervalo de tempo:** é o número destinado para o período de tempo para o qual um fator de carregamento particular é aplicado.
- **Padrão de uso da água:** é a série de fatores de carregamento. A cada intervalo de tempo é destinado um fator de carregamento.

3.1.2.3 – Dados de Entrada

A entrada de dados na simulação no tempo é similar a entrada na simulação. Um conjunto de comandos encontra-se resumidos na Tabela 3.2 e são descritos em seguida.

Tabela 3.2 - Comandos para simulação no tempo - Formato para dados de entrada

BOMBA	xxx (Conexão)	xxx (Reservatório)	xx (Nível p/ ligar, pé)	xx (Nível p/ desligar, pé) ou
BOMBA	xxx (Conexão)	PSI xxx (Nó)	xx (Pressão p/ ligar, psi)	xx (Pressão p/ desligar, psi) ou
BOMBA	xx (Conexão)	TEMPO	xx.x (Hora inicial)	xx.x (Hora Final)
DURAÇÃO	xx.x (Horas de Simulação)			

Tabela 3.2 - Comandos para simulação no tempo - Formato para dados de entrada

(Continuação)

ESPACIAL	xx (Padrão)	Nós	xxx	xxx	xxx				
			(Lista de Nós)				ou		
ESPACIAL	xx (Padrão)	Série	xxx		xxx				
			(Primeiro Nó)		(Último Nó)				
EXCLUIR		xxx (Conexão)	xx.x (Hora Inicial)		xx.x (Hora Final)				
INCÊNDIO	xxx (Nó)	xx.x (Interv. de Tempo Inic.)		xx.x (Interv. de Tempo Fin.)		xx.x (Vazão, gpm)		ou	
INCÊNDIO	xxx (Nó)								
INCLUIR		xxx	xxx	xxx					
		(Lista de Conexões)							
INÍCIO	xxx (Conexão)	ON					ou		
INÍCIO	xxx (Conexão)	OFF							
INTERVALOS		xx (Número de Intervalos)							
PCONEXÃO		xxx	xxx	xxx ...				ou	
		(Lista de Conexões)							
PCONEXÃO		xxx	xxx	xxx ...	DELETE				
		(Lista de Conexões)							
PNÓ		xxx	xxx	xxx ...				ou	
		(Lista de Nós)							
PNÓ		xxx	xxx	xxx ...	DELETE				
		(Lista de Nós)							
RAZÃO		xx.x (Razão)							
RESERVATÓRIO		xxx (Nó)	xxx (Altura Máxima, pé)	xxx ... (Altura Mínima, pé)					
		xxxx (Área, pé ²)	xxx (Altura Inicial, pé)						
RESERVATÓRIO		xxx (Nó)	DELETE						
USO	xx (Padrão)		xx.x (Intervalo de Tempo Inicial)		xx.x (Intervalo de Tempo Final)				

- **DURAÇÃO:** comando usado para a entrada do número de horas de duração da simulação. Se a duração não é especificada, o programa irá simular 24 horas de operação.
- **INTERVALOS:** usado para especificar o número de intervalos para o período de simulação de tempo. Se o usuário não especificar o número de intervalos de tempo, será assumido o valor 24.
- **RESERVATÓRIO:** usado para atribuir no período de simulação dados para um reservatório. As alturas (máxima e mínima) da superfície d'água no reservatório são medidas acima da cota do nó especificado na simulação no regime permanente. O nível d'água inicial é opcional. Caso não seja especificado, será assumido o nível atribuído na simulação. Qualquer nó inserido com o comando *RESERVATÓRIO* deve ser previamente declarado como um reservatório na rotina de simulação. Dados de até 20 reservatórios podem ser designados na simulação no tempo.
- **USO:** usado para atribuir *fatores de carregamento* do uso da água durante uma série de intervalos de tempo. Primeiramente, deve-se definir o padrão de uso de água que governa a série de intervalos (doméstico, comercial, ou industrial), para em seguida entrar com os fatores que multiplicam a vazão atribuída na rotina de simulação, definido assim a demanda ao longo do período especificado.
- **ESPACIAL:** usado para designar o padrão de uso da água para uma série de nós ou nós individuais. Quando o uso da água não é designado o programa assume o padrão 1 (uso doméstico). O comando *USO* é utilizado para a entrada de valores que multiplica cada padrão.
- **RAZÃO:** este comando pode ser usado para multiplicar o valor da demanda da *Rotina de Simulação* por um fator de correção. Não pode ser aplicado para um único nó.

- **INCÊNDIO:** comando usado para instruir o programa a simular uma vazão de combate a incêndio num determinado período de tempo, podendo ser designado até cinco nós. Observar que o início e duração do *INCÊNDIO* são dados em *INTERVALOS DE TEMPO*, não em horas.
- **BOMBA:** comando usado para ativar bombas para atuar no sistema durante um determinado período de simulação. Podem também ser controlados pelos níveis d'água nos reservatórios, pressão nos nós, ou no tempo. Também é possível controlar combinado nível d'água no reservatório (ou pressão nos nós da rede) com tempo.
- **INÍCIO:** comando usado para inicialmente ligar ou desligar as bombas que foram inseridas com o comando *BOMBA*. Se este comando não for usado, as bombas serão consideradas ligadas no início da simulação.
- **PCONEXÃO:** usado para designar as conexões para as quais as vazões serão impressas no final de cada intervalo de tempo.
- **PNÓ:** usado para designar os nós ou reservatórios para os quais as pressões ou níveis d'água serão exibidos no final de cada intervalo de tempo ou quando uma bomba está ligada ou desligada. A quantidade de nós e conexões designadas para impressão não pode exceder 10.
- **EXCLUIR:** comando usado para remover conexões da rede por um período de tempo determinado. Até sete pares de fechamento e reabertura de um tubo ao longo do período de simulação podem ser especificados, e até 15 tubos podem ser excluídos do sistema.
- **INCLUIR:** comando usado para reinserir conexões que foram removidas do sistema com o comando *EXCLUIR*.

Neste trabalho, usou-se o controle das bombas pelo nível do reservatório, simulando-se em 24 horas o comportamento do sistema de bombeamento para várias

combinações de níveis de acionamento e desligamento, verificando-se os níveis que levaram ao bombeamento mais eficiente de acordo com os critérios e restrições adotados.

3.1.2.4 – Saída de Dados

Após a entrada de dados na rotina de simulação no tempo o programa calcula:

- O nível da linha de energia e pressão em cada nó;
- A vazão e perda de carga em cada tubo;
- A vazão e altura manométrica para cada bomba;
- O modo de operação para cada bomba, PRV e válvula de controle;
- Níveis dos reservatórios ao final de cada intervalo de tempo.

Ao final de cada intervalo de tempo, as vazões através dos tubos que foram especificados com o comando *PCONEXÃO* são impressas. O programa também imprime as pressões nos nós (ou níveis do reservatório, caso não seja um reservatório) que foram especificados com o comando *PNÓ*. Também ao de cada intervalo de tempo e início do próximo intervalo, o programa grava os níveis d'água de cada reservatório do sistema, pressão mínima, e o nó onde ocorreu. Estes valores são exibidos no final da simulação.

3.1.3 – Novas Implementações no Programa WADISO

Tendo em vista que na versão original do programa WADISO não há suporte ao cálculo tarifário, uma rotina extra com este fim foi desenvolvida por Braz (2000), membro da equipe do projeto de pesquisa no qual este trabalho está inserido. A descrição do cálculo tarifário está a seguir, na seção 3.2.

Nesta nova configuração o usuário fornece como entradas o período da simulação e o horário de início da mesma, em horas, e as tarifas elétricas cobradas pela operadora. Como saída obtém-se um relatório com o resumo dos ligamentos e desligamentos

observados em cada bomba e os custos relacionados, além de uma totalização diária e mensal nas diferentes tarifas.

A execução do programa, que originalmente era baseada em opções sequenciais de menus, também foi alterada neste trabalho. Nessa nova versão, o fluxo de opções foi automatizado, sendo agora lido de um arquivo auxiliar, reduzindo assim o tempo associado à execução do programa.

3.2 – SISTEMA ADUTOR UTILIZADO

O sistema adutor utilizado como exemplo (Figura 3.4) é parte do sistema de abastecimento da cidade de Campina Grande, Paraíba. O suprimento de água é realizado a partir de um reservatório (Reservatório R-9, situado no bairro de Santa Rosa), que no estudo funcionará com um manancial (M). O sistema estudado compreende três estações de bombeamento (B_i), três reservatórios de distribuição (R_i) e derivações para anéis secundários de distribuição (d_i).

A estação de bombeamento B_1 (Estação Elevatória 3, situada no bairro de Bodocongó) bombeia uma vazão média (Q) de 37 l/s para o reservatório de distribuição R_1 (Reservatório R-13, localizado no bairro do Serrotão), que a fornece por gravidade para os anéis de distribuição (d_i). Cada anel (d_1 a d_6) distribui uma vazão média de 2,1 l/s em pontos distintos do sistema, para uso doméstico, e 24,4 l/s segue para estação de bombeamento seguinte B_2 (Figura 3.5).

A estação seguinte de bombeamento B_2 (Estação Elevatória 4, situada às margens da BR-230, próximo ao distrito de São José da Mata) bombeia uma vazão média (Q) de 24,4 l/s para o reservatório de distribuição R_2 (Reservatório R-14, localizado no distrito de São José da Mata), que abastece o distrito com uma vazão média de 8,0 l/s e uma vazão de 16,4 l/s para o município de Pocinhos (Figura 3.6).

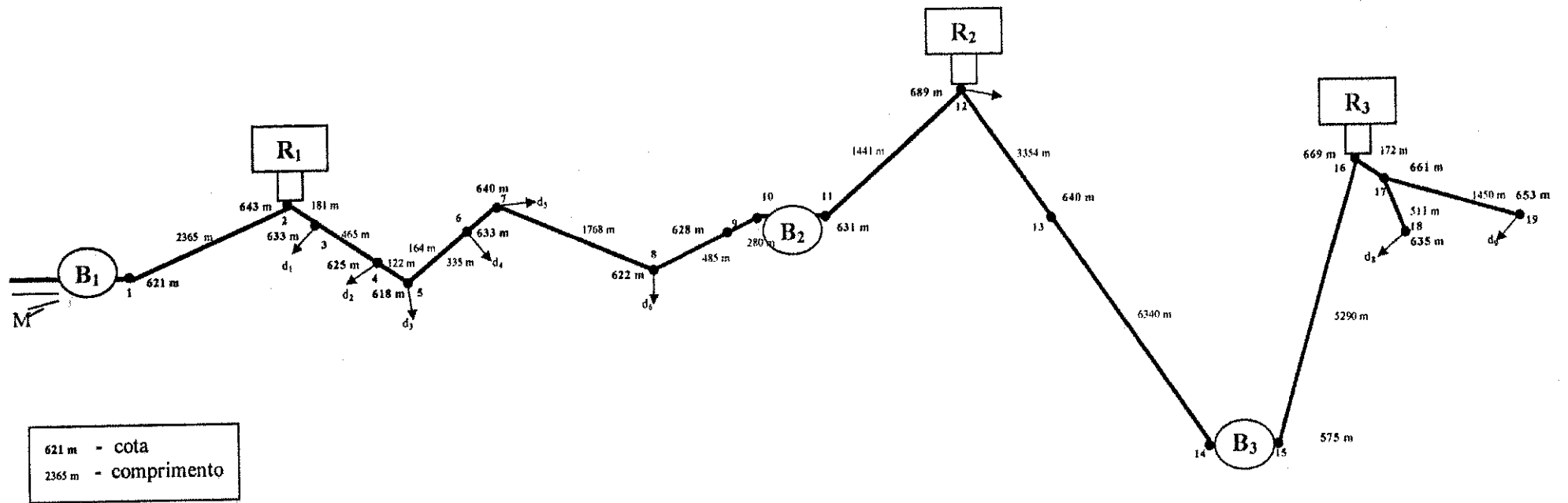


Figura 3.4 – Sistema adutor utilizado

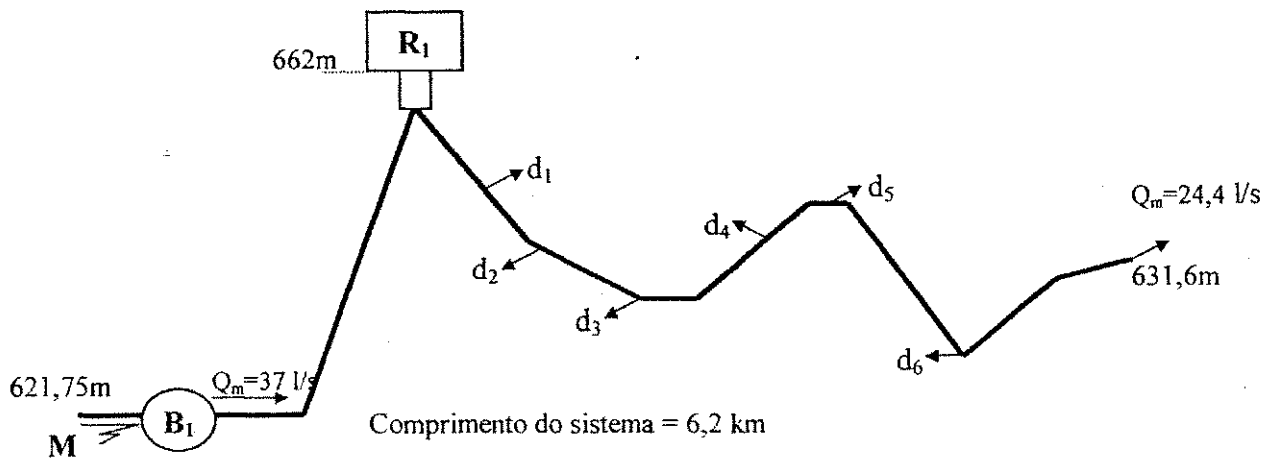


Figura 3.5 – Primeira parte do sistema adutor

A vazão de 16,4 l/s segue por gravidade até a estação de bombeamento B₃ (Estação Elevatória 9, localizada no Sítio Arruda, Pocinhos) que é bombeada para o reservatório de distribuição R₃ (Reservatório R-22, localizado no município de Pocinhos). Parte dessa vazão, cerca de 4 l/s, abastece o povoado de Nova Brasília, pertencente ao município de Pocinhos, e uma vazão média de 12,3 l/s abastece a cidade de Pocinhos (Figura 3.6).

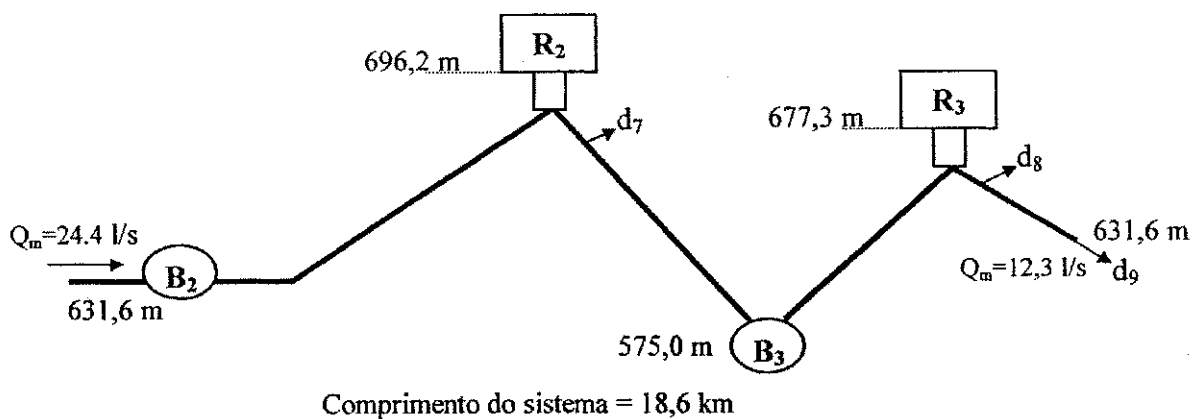


Figura 3.6 – Segunda parte do sistema adutor

A tubulação do sistema desde o trecho 1 até o trecho 10 é de ferro dúctil, enquanto que do trecho 11 ao 16 o material da tubulação é PVC. Os coeficientes de rugosidade de Hazen-Williams (C) utilizados neste estudo foram 100 para tubos de ferro dúctil e 150 para tubos de PVC. A Tabela 3.3 contém todos os trechos com seus respectivos diâmetros e comprimentos, como também o coeficiente (C). Os diâmetros utilizados no programa foram os diâmetros nominais.

A Tabela 3.4 mostra os dados referentes aos reservatórios de distribuição do sistema utilizado.

Tabela 3.3– Dados dos trechos do sistema

Trecho	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	Coefficiente
1	200	2.365	100
2	250	181	100
3	250	465	100
4	250	122	100
5	250	335	100
6	250	164	100
7	250	1.768	100
8	250	485	100
9	200	280	100
10	200	1.441	100
11	150	3.354	150
12	150	6.340	150
13	150	5.290	150
14	100	172	150
15	75	511	150
16	150	1.450	150

Tabela 3.4 – Dados dos reservatórios (CAGEPA, 2000)

Ordem	Reservatório	Capacidade (m ³)	Cotas do N.A. (m)		Localização	Tipo
			Máxima	Mínima		
Manancial	R-09	39.000	554,00	548,50	Santa Rosa	Apoiado
1	R-13	250	664,40	661,40	Serrotão	Elevado
2	R-14	300	701,70	696,20	São J. da Mata	Elevado
3	R-22	200	681,20	677,30	Pocinhos/ETA	Elevado

A Figura 3.7 mostra de forma esquemática, para a entrada de dados no programa, o sistema adutor estudado. Os dados relativos aos trechos encontram-se na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Dados dos trechos para a entrada no programa

Trecho	Nó		Diâmetro (mm)	Comprimento (m)
	Inicial	Final		
1	1	2	500	1
2	2	3	-	Bomba
3	3	4	200	2.365
4	4	5	250	181
5	5	6	250	465
6	6	7	250	122
7	7	8	250	335
8	8	9	250	164
9	9	10	250	1.768
10	10	11	250	485
11	11	12	200	280
12	12	13	200	1
13	13	14	-	Bomba
14	14	15	200	1.441
15	15	16	150	1
16	16	17	150	1.836
17	17	18	150	1.518
18	18	19	150	6.340
19	19	20	150	1
20	20	21	-	Bomba
21	21	22	150	5.290
22	22	23	100	172
23	23	24	75	511
24	23	25	150	1.450
104	4	104	250	1
112	12	112	200	1
115	15	115	150	1
119	19	119	150	1
122	22	122	100	1

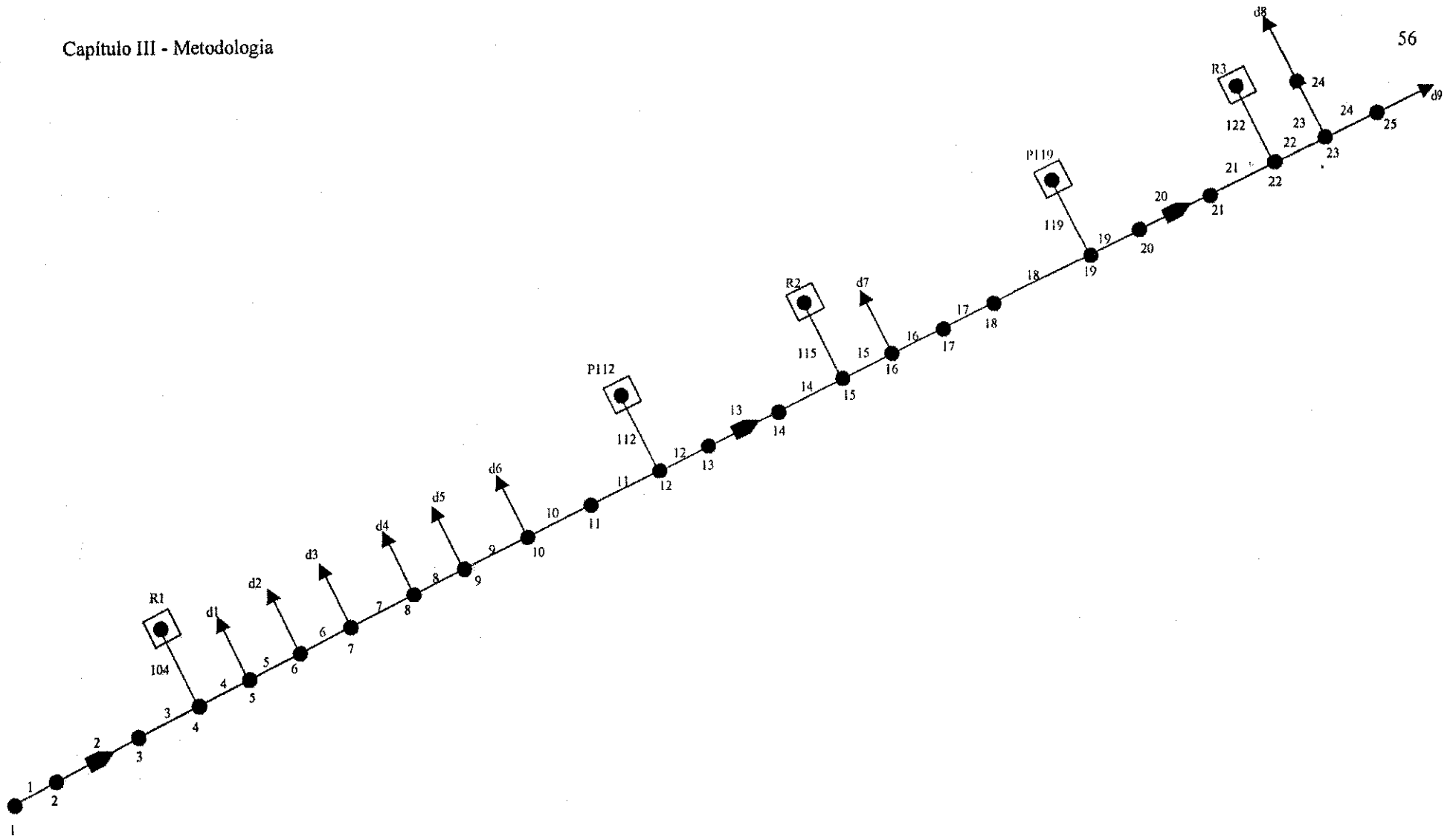


Figura 3.7 – Sistema adutor (Esquema)

Na Figura 3.8, mostra-se o padrão típico adotado para a variação diária na demanda de água para os anéis de distribuição (d_i).

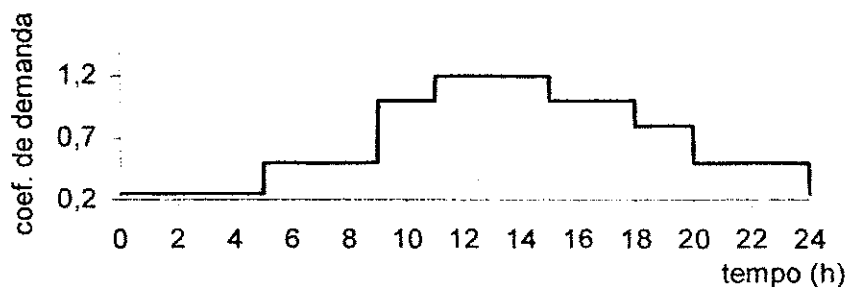


Figura 3.8 - Curva de demanda horária para 24 horas (o coeficiente de demanda multiplica a demanda média diária para a derivação).

As tarifas de energia elétrica oferecidas pela concessionária de energia elétrica local, CELB, são: convencional, horo-sazonal azul e horo-sazonal verde. As tarifas adotadas pela CAGEPA nos seus sistemas de bombeamento são a convencional ou a horo-sazonal azul.

Na tarifa convencional o custo da energia é o mesmo durante todo o período, 24 horas, enquanto que na tarifa horo-sazonal azul tem-se custos diferentes para os períodos ponta (17 às 20 horas) e fora de ponta (20 às 17 horas), e ainda são consideradas as estações *seca* e *úmida*. Neste estudo, para o cálculo do custo na tarifa horo-sazonal, considerou-se a estação *seca*. Os valores das tarifas oferecidas pela CELB encontram-se em anexo (Tabelas A1a, A1b, A1c e A1d).

Todas as tarifas são calculadas em termos de dois fatores: consumo (kWh) e fator de demanda máxima mensal (kW). De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2000), o fator de demanda máxima mensal é a maior demanda de potência ativa, verificada por medição, integralizada no intervalo de 15 minutos durante o período de faturamento (mensal, no caso), expressa em kW; e o consumo de energia é o valor

efetivamente medido, totalizado durante o período de faturamento (mensal), expresso em kWh.

O custo elétrico total mensal para cada bomba é calculado como o custo do fator de demanda máxima mensal mais o custo de consumo mensal (obtido multiplicando-se o custo total diário por 30 dias) (Equação 3.10):

$$C_{mes} = 30 \times E_{dia} \times Tarifa_c + D \times Tarifa_d \quad (eq. 3.10)$$

onde: C_{mes} = custo elétrico total mensal (R\$)

E_{dia} = energia consumida nas 24 horas de simulação da operação (kWh)

$Tarifa_c$ = tarifa do consumo (R\$/kWh)

D = fator de demanda máxima mensal (kW)

$Tarifa_d$ = tarifa do fator de demanda máxima (R\$/kW)

A demanda é calculada como a potência instantânea consumida, enquanto que consumo é a sua integração no tempo. O tempo de operação é obtido durante a simulação, enquanto a potência é determinada utilizando a equação 3.11:

$$P = \frac{9,81}{\eta} Q.H_m. \quad (eq.3.11)$$

Onde a vazão (Q) é dada em litros por segundo (l/s), a altura manométrica (H_m) é fornecida em metros (m), η é o rendimento e a potência é dada em watts.

Este calculo é efetuado, no programa WADISO, para as duas tarifas (convencional e horo-sazonal azul), obtendo-se ao final da simulação os dois valores correspondentes. O custo total mensal com energia elétrica do sistema estudado é o somatório dos custos energéticos das três estações de bombeamento. No caso particular do sistema adutor utilizado, a tarifa atualmente adotada pela CAGEPA é a convencional.

O valor, para a CAGEPA, do custo médio final de energia elétrica referente a 1 m³ de água produzido é de aproximadamente R\$ 0,20 (Cavalcanti, 2000a). As tarifas de água cobradas pela companhia ao consumidor encontram-se na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Tarifas de água (Cavalcanti, 2000b)

Volume (m ³)	Tarifa (R\$)		
	Residencial	Comercial	Industrial
0 - 10	7,32	13,07	15,83
11 - 20	0,94/m ³	2,27/m ³	2,53/m ³
21 - 30	1,25/m ³	2,27/m ³	2,27/m ³
31 - 45	1,47/m ³	2,27/m ³	2,27/m ³
> 45	1,92/m ³	2,27/m ³	2,27/m ³

3.3 – ESTRATÉGIA DE OPERAÇÃO DAS BOMBAS

As bombas (B_i), neste trabalho, terão como estratégia de operação os níveis dos reservatórios de distribuição R_i , a jusante de cada uma delas, ou seja, deve-se determinar o nível do reservatório para o qual a bomba deve ser desligada e o nível para o qual a bomba deve ser ligada. Estes dois níveis de referência (“nível-liga”, “nível-desliga”) definem a regra de operação para cada bomba.

Estes níveis devem proporcionar a operação mais eficiente, em termos econômicos, dos sistemas de bombeamento. Como o agendamento de bombas é um problema multi-critério, o custo de energia elétrica não deve ser o único critério utilizado na escolha de uma melhor agenda: as demandas de água devem ser atendidas de forma satisfatória, as implicações da operação das bombas sobre seu custo de manutenção devem ser consideradas, como também as formas de utilização e combinação.

Aqui, adotou-se dois critérios para definir a melhor operação:

- a) menor custo mensal de energia elétrica das bombas;

- b) menor número de acionamentos/desligamentos das bombas no período de 24 horas, o que reduzirá o custo de manutenção.

Considerou-se também duas restrições:

- a) intervalo entre um desligamento e um acionamento subsequente deve ser maior que 30 minutos, recomendado pelos operadores do sistema para aumentar a vida útil do conjunto motobomba.
- b) deve haver atendimento pleno às demandas volumétricas de água e pressões nas derivações.

Vale ressaltar que o modelo de simulação não foi calibrado efetivamente com dados do sistema adutor real. Por exemplo, os coeficientes da equação de Hazen-Williams foram estimados a partir dos materiais dos tubos, e a curva de demanda horária (Figura 3.8) foi estimada, pois não há dados sobre a real curva do sistema. Assim, o sistema simulado neste trabalho, apesar de inspirado no sistema real, não pode ser considerado sua reprodução fiel.

CAPÍTULO IV

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a aplicação da metodologia apresentada no Capítulo III ao sistema adotado, os níveis de acionar e desligar cada bomba devem estar no intervalo entre a mínima e a máxima cotas do reservatório, obedecendo à condição de que o “nível-liga” deve ser menor do que o “nível-desliga”. Arbitrou-se o nível médio dos reservatórios como nível inicial para todas as simulações.

A partir das considerações acima, seguiu-se para o processo de simulações, que foram realizadas seguindo as seguintes etapas:

- a) Utilizando-se inicialmente apenas a primeira parte do sistema:
- com um único reservatório, os níveis para acionar e desligar a estação de bombeamento foram escolhidos, combinatoriamente, de 30 em 30 cm.
 - algumas simulações apresentaram erros numéricos na rotina de balanceamento; essas simulações foram descartadas.
 - conferiu-se, através de cálculos manuais, a veracidade das simulações, não se verificando erros.
 - adquiriu-se sensibilidade do comportamento hidráulico do sistema.

b) Utilizando-se o sistema completo:

- dada a ampliação do sistema não foi mais possível realizar a enumeração exaustiva para a escolha dos níveis de controle.
- com base na sensibilidade do comportamento hidráulico adquirida na experiência anterior, foram testadas várias combinações de níveis, analisando-se o comportamento do sistema.
- várias simulações também apresentaram problemas numéricos na rotina de balanceamento, sendo então descartadas.
- ao final do processo 43 simulações foram selecionadas.

As Tabelas 4.1a, 4.1b e 4.1c contêm os resultados das 43 simulações selecionadas, apresentando os níveis de acionamento e desligamento para cada bomba, com seu respectivo tempo de funcionamento, custo energético mensal nas tarifas convencional e horo-sazonal azul, além do número de intervalos em que cada bomba permaneceu ligada no período de 24 horas. As simulações atendem às distribuições de vazões e pressões, porém observa-se uma grande variabilidade operacional do sistema, principalmente no que diz respeito ao número de intervalos com bomba ligada, que aumenta à medida que o intervalo entre os níveis de acionamento e desligamento diminui.

Para os casos em que não houve bombeamento no horário de pico (17 às 20 horas) o cálculo do custo mensal de energia na tarifa horo-sazonal azul foi realizado considerando-se que não seria contratada energia nesse período.

A partir da consideração anterior e tendo como base os dois critérios adotados (menor custo mensal de energia elétrica das bombas e menor número de acionamentos/desligamentos das bombas no período de 24 horas), cinco simulações foram identificadas como as melhores, as simulações 1, 5, 8, 17 e 21. Em quatro destas cinco simulações, os menores custos com energia elétrica foram observados na tarifa horo-sazonal azul; apenas na simulação 1 obteve-se o menor custo na tarifa convencional (Tabela 4.2). Estes resultados comprovam que o melhor momento para acionar a bomba é quando o nível do reservatório aproxima-se do mínimo (nível próximo a zero), enquanto

que para desligar é quando este se aproxima do máximo (próximo ao nível máximo de cada reservatório).

Observa-se ainda da Tabela 4.2 que, dentre as cinco melhores simulações, a variação nos custos com energia elétrica não foi considerável, principalmente entre as simulações 5, 17 e 21. Em tais simulações as bombas 1 e 2 não operaram no horário de pico.

O custo elétrico total mensal para cada bomba é calculado multiplicando-se o custo de consumo total diário por 30, mais o custo de demanda, que é calculado utilizando o valor da maior demanda registrada no mês. Este cálculo é efetuado para as duas tarifas (convencional e horo-sazonal azul), obtendo-se ao final da simulação os dois valores correspondentes. O custo total mensal com energia elétrica do sistema é o somatório dos custos energéticos das três estações de bombeamento.

O intervalo adequado de pressões adotado no estudo foi: mínima de 15 mca ($\pm 10\%$) máxima de 50 mca ($\pm 10\%$), baseado em valores adotados pela CAGEPA para que o sistema opere de forma satisfatória.

Tabela 4.1a - Resultados das simulações do sistema adutor, bomba 1

Simulação	Reservatório 1		Duração (h)	Custo Mensal (RS)		Nº de intervalos com bomba ligada
	"Nível liga" (m)	"Nível desliga" (m)		Tarifa		
				Convencional	HSA	
1	0,3	2,7	7,35	4.446,82	5.930,24	5
2	0,3	1,5	7,45	4.490,28	6.698,09	8
3	0,3	1,5	8,06	4.781,29	5.944,69	9
4	0,3	1,5	8,14	4.809,60	5.964,55	9
5	0,3	2,4	8,08	4.791,30	3.033,53	6
6	0,6	1,8	7,73	4.624,57	6.279,60	9
7	0,6	1,5	7,68	4.604,94	7.033,99	10
8	0,6	2,7	7,62	4.581,82	2.916,17	6
9	0,6	2,1	8,18	4.837,93	6.132,39	8
10	1,5	2,7	8,22	4.851,57	6.092,83	9
11	1,5	2,4	7,92	4.703,82	5.980,53	11
12	0,9	2,4	7,65	4.581,81	5.984,61	7
13	0,9	2,4	8,11	4.798,88	6.151,06	8
14	0,9	2,4	8,11	4.802,04	6.120,04	8
15	0,3	2,7	9,62	5.037,94	6.038,12	6
16	0,9	2,1	8,36	4.915,01	6.280,25	10
17	0,3	2,4	8,22	4.861,73	3.073,38	6
18	0,6	2,4	7,45	4.496,92	6.066,74	6
19	0,6	2,4	8,22	4.852,82	6.186,18	7
20	0,6	2,4	7,80	4.668,71	5.968,75	8
21	0,6	2,4	8,05	4.781,09	3.027,86	6
22	0,6	2,4	7,7	4.614,54	5.902,13	7
23	0,6	2,4	8,03	4.763,75	6.136,39	7
24	0,6	2,4	8,34	4.910,95	6.232,69	7
25	0,6	2,4	7,37	4.458,52	6.061,34	6
26	0,6	2,4	7,54	4.538,77	6.083,89	6
27	0,9	2,4	8,16	4.825,60	6.123,56	8
28	0,9	2,4	8,21	4.850,45	6.121,73	8
29	0,9	2,4	8,11	4.800,52	6.086,12	8
30	0,9	2,4	8,46	4.964,44	6.066,56	9
31	1,2	2,4	8,34	4.915,35	6.132,80	9
32	0,9	2,4	7,66	4.596,39	6.149,28	8
33	0,9	2,4	8,24	4.857,10	6.042,90	8
34	0,9	2,4	8,21	4.845,34	6.085,96	8
35	0,9	2,4	7,99	4.740,60	6.044,22	8
36	1,2	2,4	8,42	4.939,25	6.288,42	10
37	1,2	2,4	8,11	4.802,43	6.120,26	10
38	1,2	2,4	7,59	4.563,34	6.013,11	8
39	1,2	2,4	8,3	4.888,34	6.127,45	9
40	1,2	2,4	9,3	4.883,16	6.026,06	10
41	1,2	2,4	8,48	4.976,34	6.122,59	9
42	1,2	2,4	7,86	4.686,34	6.139,17	9
43	0,3	2,7	8,4	4.933,18	6.032,49	6

Tabela 4.1b - Resultados das simulações do sistema adutor, bomba 2

Simulação	Reservatório 2		Duração (h)	Custo Mensal (R\$)		Nº de inter- valos com bomba ligada
	"Nível liga" (m)	"Nível desliga" (m)		Tarifa		
				Convencional	HSA	
1	0,3	5,2	9,40	1.326,91	1.558,40	2
2	0,3	5,2	9,56	1.343,98	1.581,04	2
3	0,3	4,6	10,75	1.480,14	953,46	3
4	0,3	4,9	10,86	1.492,42	960,47	3
5	0,3	4,9	10,79	1.545,43	955,99	3
6	0,6	4,9	10,21	1.418,25	1.746,51	3
7	0,6	4,9	10,28	1.426,51	1.725,94	3
8	0,3	2,7	9,28	1.379,42	1.622,15	4
9	0,6	4,6	10,57	1.460,52	1.659,01	4
10	2,7	5,2	10,85	1.492,10	1.662,86	5
11	0,3	2,7	9,83	1.375,26	1.802,42	5
12	0,9	4,9	9,77	1.368,93	1.647,59	3
13	0,9	4,9	10,54	1.456,36	1.680,97	4
14	1,2	4,6	10,91	1.498,09	1.670,53	4
15	0,3	4,6	11,19	1.529,74	984,11	3
16	0,9	4,6	11,21	1.531,61	1.742,09	4
17	0,3	4,6	11,10	1.582,62	976,97	3
18	0,6	4,3	9,43	1.330,08	1.654,20	3
19	0,6	4,3	10,57	1.459,37	1.658,36	4
20	0,6	4,3	10,53	1.455,37	1.662,11	4
21	0,9	4,9	11,03	1.571,75	970,35	3
22	0,9	4,9	9,84	1.376,60	1.590,87	3
23	0,9	4,9	10,59	1.462,34	1.682,33	4
24	1,2	4,6	10,92	1.499,49	1.680,21	4
25	1,2	4,6	9,54	1.342,55	1.661,63	3
26	1,2	4,9	9,70	1.361,06	1.666,83	3
27	0,6	4,3	10,58	1.460,03	1.684,00	3
28	0,6	4,3	10,56	1.458,13	1.657,67	4
29	0,6	4,3	10,48	1.449,42	1.661,71	4
30	0,9	4,9	10,94	1.501,14	1.623,06	3
31	1,2	4,9	10,75	1.480,69	1.670,36	4
32	1,2	4,6	9,60	1.348,77	1.656,05	4
33	1,2	4,6	10,82	1.487,15	1.654,55	4
34	1,2	4,6	10,92	1.498,79	1.669,01	4
35	1,2	4,9	10,87	1.493,50	1.687,94	3
36	0,6	4,3	10,79	1.485,22	1.717,80	4
37	0,6	4,3	10,64	1.466,35	1.662,29	4
38	0,9	4,9	9,74	1.365,42	1.639,09	3
39	0,9	4,9	10,63	1.466,52	1.680,38	4
40	1,2	4,6	10,84	1.490,70	1.653,70	4
41	1,2	4,6	10,95	1.503,87	1.669,97	4
42	1,2	4,9	9,68	1.358,77	1.670,79	3
43	1,5	5,2	11,29	1.541,70	1.692,31	3

Tabela 4.1c - Resultados das simulações do sistema adutor, bomba 3

Simulação	Reservatório 3		Duração (h)	Custo Mensal (R\$)		Nº de intervalos com bomba ligada
	"Nível liga" (m)	"Nível desliga" (m)		Tarifa		
				Convencional	HSA	
1	0,3	3,7	11,53	1.200,76	1.338,38	2
2	0,3	3,7	11,62	1.209,43	1.351,27	2
3	0,3	3,0	12,53	1.288,30	1.550,27	3
4	0,3	3,0	12,48	1.284,00	1.559,87	3
5	0,3	3,0	12,48	1.444,55	1.557,92	3
6	0,6	3,0	11,77	1.222,34	1.421,06	3
7	0,6	3,0	11,82	1.226,81	1.430,42	3
8	0,3	3,7	11,63	1.361,81	1.518,51	2
9	0,6	2,7	12,76	1.308,84	1.360,74	4
10	1,8	3,7	12,56	1.291,06	1.382,19	4
11	1,8	3,7	12,73	1.305,76	1.376,78	4
12	0,3	3,4	12,54	1.289,16	1.355,33	3
13	1,2	3,4	13,29	1.354,69	1.402,42	4
14	0,6	3,4	12,84	1.315,45	1.368,59	3
15	0,9	3,7	13,36	1.360,79	932,20	3
16	0,9	3,7	13,32	1.356,91	1.353,74	3
17	0,9	3,7	13,20	1.513,28	1.538,36	3
18	0,3	3,4	12,58	1.293,19	1.357,42	3
19	0,9	3,0	13,02	1.330,83	1.377,50	4
20	1,2	3,4	13,29	1.355,26	1.401,57	4
21	0,6	3,4	12,84	1.479,82	1.538,54	3
22	0,3	3,4	12,49	1.285,49	1.353,31	3
23	1,2	3,4	13,03	1.355,91	1.403,19	4
24	0,6	3,4	12,84	1.315,98	1.369,85	3
25	0,3	3,4	12,51	1.287,09	1.353,95	3
26	0,3	3,4	12,50	1.285,85	1.353,17	3
27	0,6	3,4	12,79	1.311,49	1.379,43	3
28	0,9	3,0	13,05	1.333,60	1.380,94	4
29	1,2	3,4	13,31	1.356,59	1.404,62	4
30	0,6	3,4	12,76	1.308,76	1.377,89	3
31	0,9	3,0	13,02	1.331,67	1.383,34	4
32	0,3	3,4	12,59	1.294,25	1.356,90	3
33	0,9	3,0	13,02	1.330,99	1.381,90	4
34	1,2	3,4	13,28	1.354,14	1.401,58	4
35	0,6	3,4	12,72	1.305,26	1.379,09	3
36	0,6	3,4	12,89	1.319,80	1.365,18	3
37	1,2	3,4	13,27	1.353,47	1.396,82	4
38	0,3	3,4	12,49	1.285,23	1.353,42	3
39	1,2	3,4	13,23	1.349,31	1.394,72	4
40	0,6	3,4	12,77	1.309,69	1.383,31	3
41	1,2	3,4	13,27	1.353,47	1.399,34	4
42	0,3	3,4	12,42	1.285,49	1.353,34	3
43	0,9	3,7	13,17	1.343,82	1.369,40	3

Tabela 4.2 - Resultados das simulações do sistema adutor

Simulação	Total diário das três bombas (h)	Custo Mensal Total (R\$)	
		Tarifa	
		Convencional	HSA
1	28,28	6.974,49	8.827,02
2	28,63	7.043,69	9.630,40
3	31,34	7.549,73	8.448,42
4	31,48	7.586,02	8.484,89
5	31,35	7.781,28	5.547,44
6	29,71	7.265,16	9.447,17
7	29,78	7.258,26	10.190,35
8	28,53	7.323,05	6.056,83
9	31,51	7.607,29	9.152,14
10	31,63	7.634,73	9.137,88
11	30,48	7.384,84	9.159,73
12	29,96	7.239,90	8.987,53
13	31,94	7.609,93	9.234,45
14	31,86	7.615,58	9.159,16
15	34,17	7.928,47	7.954,43
16	32,89	7.803,53	9.376,08
17	32,52	7.957,63	5.588,71
18	29,46	7.120,19	9.078,36
19	31,81	7.643,02	9.222,04
20	31,62	7.479,34	9.032,43
21	31,92	7.832,66	5.536,75
22	30,03	7.276,63	8.846,31
23	31,65	7.582,00	9.221,91
24	32,10	7.726,42	9.282,75
25	29,42	7.088,16	9.076,92
26	29,74	7.185,68	9.103,89
27	31,53	7.597,12	9.186,99
28	31,82	7.642,18	9.160,34
29	31,90	7.606,53	9.152,45
30	32,16	7.774,34	9.067,51
31	32,11	7.727,71	9.186,50
32	29,85	7.239,41	9.162,23
33	32,08	7.675,24	9.079,35
34	32,41	7.698,27	9.156,55
35	31,58	7.539,36	9.111,25
36	32,10	7.744,27	9.371,40
37	32,02	7.622,25	9.179,37
38	29,82	7.213,99	9.005,62
39	32,16	7.704,17	9.202,55
40	32,91	7.683,55	9.063,07
41	32,70	7.833,68	9.191,90
42	29,96	7.330,60	9.163,30
43	32,86	7.818,70	9.094,20

4.1 – ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES

A seguir são analisadas as cinco melhores simulações. A partir dos níveis de “liga” e “desliga” considerados nos reservatórios, no início de cada simulação (0 hora), para controlar cada bomba, verificou-se o comportamento dos níveis dos reservatórios para o horizonte de 24 horas; a quantidade de intervalos em que cada bomba permaneceu ligada, como também o seu custo total; e ainda a variação de pressões durante a operação do sistema. Arbitrou-se o nível médio dos reservatórios como nível inicial para todas as simulações.

4.1.1 – Operação das Bombas

Na simulação 1 foi considerado o nível mínimo no reservatório R_1 para acionamento 0,3 m e máximo para desligamento 2,7 m; no reservatório R_2 , nível mínimo para acionamento 0,3 m e máximo para desligamento 5,2 m; e no reservatório R_3 , nível mínimo para acionamento 0,3 m e máximo para desligamento 3,7 m. Obtém-se o menor tempo de funcionamento diário das três bombas (28,28 h). A Figura 4.1 mostra a variação dos níveis dos reservatórios de distribuição 1, 2 e 3, para o período das 24 horas de simulação.

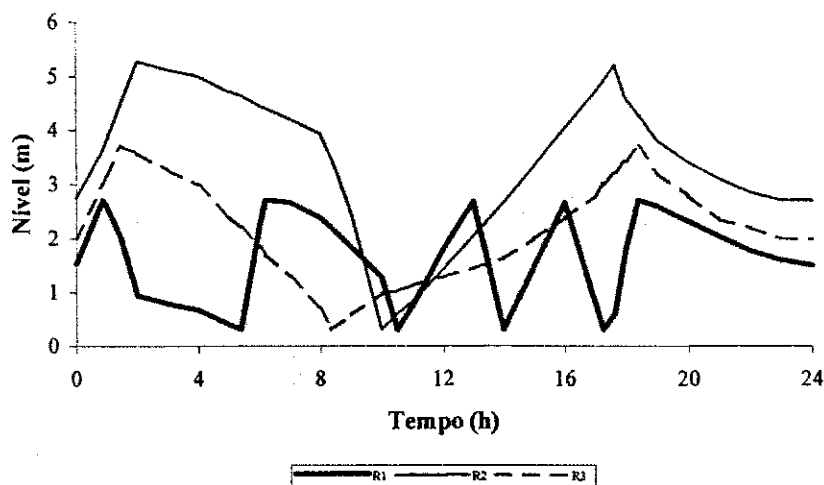


Figura 4.1 – Variação dos níveis dos reservatórios, simulação 1

Os números de intervalos em que as bombas 1, 2 e 3 permaneceram ligadas, para o período de 24 horas, foram 5, 2 e 2, respectivamente. As variações dos intervalos de operação das bombas, como também seus custos com consumo, nas tarifas convencional e horo-sazonal azul, encontram-se na Tabela 4.3. Observa-se também nesta tabela que houve bombeamento no horário de pico nas três bombas. Então considerou-se que houve contrato de energia elétrica para o período de pico na tarifa horo-sazonal azul.

Tabela 4.3 – Variação dos intervalos com bomba ligada, simulação 1

Bombas	Tempo (h)		Δt	Custo de Consumo (R\$)	
	Ligou	Desligou		Convencional	H.S.A
1	0,00	0,88	0,88	13,6	7,65
	5,38	6,19	0,81	12,42	6,99
	10,51	12,95	2,44	37,62	21,17
	14,00	16,14	2,14	32,95	18,55
	17,28	18,36	1,08	16,61	19,66
	Total Diário				113,20
2	0,00	1,84	1,84	6,99	3,93
	10,08	17,64	7,56	28,63	17,62
	Total Diário				35,62
3	0,00	1,47	1,47	4,25	2,39
	8,34	18,40	10,06	29,18	18,94
	Total Diário				33,43

O custo total mensal na tarifa convencional foi de R\$ 6.974,49 e na horo-sazonal azul R\$ 8.827,02 (Tabela 4.4). Verifica-se ainda na tabela que, devido ao bombeamento no horário de pico, com conseqüente contratação de energia para esse período, na tarifa horo-sazonal azul, os custos com as demandas foram elevados, o que gerou um aumento considerável no custo mensal total na tarifa.

Tabela 4.4 – Custo mensal com energia elétrica para operação de bombas, simulação 1

Bomba	Tarifa	Custo (R\$)		Total
		Consumo	Demanda	
1	Convencional	3.396,00	1.050,82	4.446,82
	HSA	2.220,60	3.709,64	5.930,24
2	Convencional	1.068,60	258,31	1.326,91
	HSA	646,50	911,90	1.558,40
3	Convencional	1.002,90	197,86	1.200,76
	HSA	639,90	698,48	1.338,38
Custo Total Mensal Tarifa Convencional (R\$)				6.974,49
Custo Total Mensal Tarifa HSA (R\$)				8.827,02

Para o caso da simulação 5, foi considerado o nível mínimo no reservatório R_1 para acionamento 0,3 m e máximo para desligamento 2,4 m; no reservatório R_2 , nível mínimo para acionamento 0,3 m e máximo para desligamento 4,9 m; e no reservatório R_3 , nível mínimo para acionamento 0,3 m e máximo para desligamento 3,0 m. Obtém-se um tempo de funcionamento diário das três bombas de 31,35 horas. A Figura 4.2 mostra a variação dos níveis dos reservatórios de distribuição 1, 2 e 3, para o período das 24 horas de simulação.

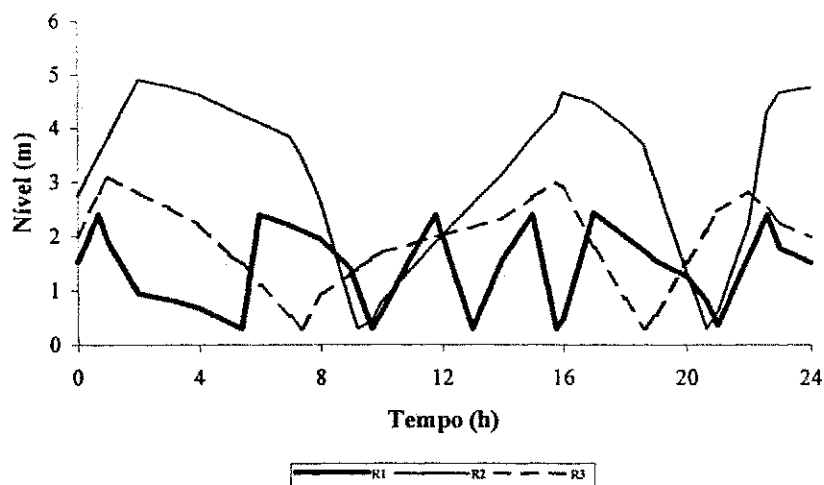


Figura 4.2 – Variação dos níveis dos reservatórios, simulação 5

A Tabela 4.5 mostra as variações dos intervalos de operação das três bombas, como também seus custos diários, nas tarifas convencional e horo-sazonal azul. Os números de intervalos em que as bombas 1, 2 e 3 permaneceram ligadas no período de 24 horas foram 6, 3 e 3, respectivamente. Verifica-se um aumento de um intervalo em cada bomba, comparando-se com a quantidade de intervalos obtidas na simulação 1, fato que comprova que com a diminuição do intervalo dos níveis para acionar e desligar cada bomba há um aumento na quantidade de intervalos com bomba ligada.

Observa-se que na simulação 5 não houve bombeamento no horário de pico nas estações 1 e 2. Portanto, foi considerado que não houve contrato de energia elétrica na tarifa horo-sazonal azul, no horário das 17 as 20 horas, em tais estações de bombeamento. Os custos totais com energia elétrica no sistema, nas tarifas convencional e horo-sazonal azul, foram de R\$ 7.781,28 e R\$ 5.547,44, respectivamente (Tabela 4.6). Verifica-se que a não contratação de energia no horário de pico diminuiu consideravelmente o custo na tarifa horo-sazonal azul.

Tabela 4.5 – Variação dos intervalos com bomba ligada, simulação 5

Bombas	Tempo (h)		Δt	Custo de Consumo (R\$)	
	Ligou	Desligou		Convencional	H.S.A
1	0	0,68	0,68	10,55	5,94
	5,41	6,08	0,67	10,42	5,86
	9,69	11,80	2,11	32,66	18,38
	12,74	14,77	2,03	31,27	17,60
	15,76	16,78	1,02	15,62	8,79
	21,04	22,60	1,56	24,11	13,57
Total Diário				124,63	70,14
2	0,00	1,45	1,45	5,74	3,23
	9,23	16,13	6,90	27,19	15,31
	20,64	23,08	2,44	9,62	5,41
Total Diário				42,55	23,95
3	0,00	0,98	0,98	3,19	1,80
	7,37	15,88	8,51	27,78	15,63
	18,62	21,60	2,98	9,76	8,30
Total Diário				40,73	25,73

Tabela 4.6 – Custo mensal com energia elétrica para operação de bombas, simulação 5

Bomba	Tarifa	Custo (R\$)		Total
		Consumo	Demanda	
1	Convencional	3.738,90	1.052,40	4.791,30
	HSA	2.104,20	929,33	3.033,53
2	Convencional	1.276,50	268,93	1.545,43
	HSA	718,50	237,49	955,99
3	Convencional	1.221,90	222,65	1.444,55
	HSA	771,90	786,02	1.557,92
Custo Total Mensal Tarifa Convencional (R\$)				7.781,28
Custo Total Mensal Tarifa HSA (R\$)				5.547,44

Os níveis dos reservatórios considerados na simulação 8 para controle das bombas foram, para o reservatório R₁ nível mínimo para acionamento 0,6 m e máximo 2,7 m; no reservatório R₂, nível mínimo para acionamento 0,3 m e máximo para desligamento 2,7 m; e no reservatório R₃, nível mínimo para acionamento 0,3 e máximo para desligamento 3,7 m. O tempo total diário de funcionamento das três bombas foi de 28,53 horas. A Figura 4.3 mostra o comportamento dos níveis dos reservatórios 1, 2 e 3, responsáveis pelo controle das bombas, para o período de simulação de 24 horas.

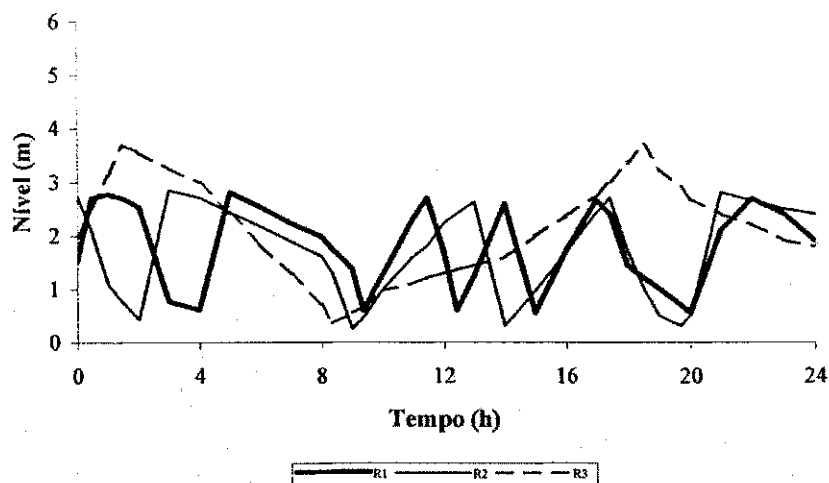


Figura 4.3 – Variação dos níveis dos reservatórios, simulação 8

As variações dos intervalos de operação das três bombas, como também os seus custos nas tarifas convencional e horo-sazonal azul encontram-se na Tabela 4.7. Os números de intervalos que as bombas 1, 2, e 3 permaneceram ligadas foram 6, 4 e 2, respectivamente. Observa-se que na bomba 2 houve um aumento no número de intervalos em que a bomba permaneceu ligada, comparando-se com as demais simulações consideradas; em contrapartida houve uma queda no número de intervalos em que a bomba 3 permaneceu ligada.

Verifica-se que apenas na estação de bombeamento 1 não houve operação no horário de pico; portanto apenas em tal estação não considerou-se contrato de energia elétrica, tarifa horo-sazonal azul, para o período. Os custos totais com energia elétrica para as duas tarifas foram de R\$ 7.323,05, tarifa convencional, e R\$ 6.056,83, tarifa horo-sazonal azul (Tabela 4.8).

Tabela 4.7 – Variação dos intervalos com bomba ligada, simulação 8

Bombas	Tempo (h)		Δt	Custo de Consumo (R\$)	
	Ligou	Desligou		Convencional	H.S.A
1	0,00	0,45	0,45	6,92	3,90
	4,04	4,75	0,71	10,97	6,17
	9,37	11,47	2,1	32,43	18,25
	12,42	13,57	1,15	17,80	10,02
	14,98	16,94	1,96	30,29	17,05
	20,00	21,24	1,24	19,24	10,84
	Total Diário			117,65	66,23
2	1,95	2,90	0,95	3,81	2,15
	8,96	12,94	3,98	15,83	8,91
	14,13	17,44	3,31	13,20	8,51
	19,90	20,93	1,03	4,09	2,55
	Total Diário			36,93	22,12
3	0,00	1,47	1,47	4,80	2,70
	8,34	18,53	10,19	33,19	21,78
	Total Diário			37,99	24,48

Tabela 4.8 – Custo mensal com energia elétrica para operação de bombas, simulação 8

Bombas	Tarifa	Custo (R\$)		Total
		Consumo	Demanda	
1,00	Convencional	3.529,50	1.052,32	4.581,82
	HSA	1.986,90	929,27	2.916,17
2,00	Convencional	1.107,90	271,52	1.379,42
	HSA	663,60	958,55	1.622,15
3,00	Convencional	1.139,70	222,11	1.361,81
	HSA	734,40	784,11	1.518,51
Custo Total Mensal Tarifa Convencional (R\$)				7.323,05
Custo Total Mensal Tarifa HSA (R\$)				6.056,83

Para a simulação 17 foi considerado o nível mínimo no reservatório R₁ para acionamento 0,3 m e máximo para desligamento 2,4 m; no reservatório R₂, nível mínimo para acionamento 0,3 m e máximo para desligamento 4,6 m; e no reservatório R₃, nível mínimo para acionamento 0,9 m e máximo para desligamento 3,7 m. Obteve-se um tempo de funcionamento diário das três bombas de 32,52 horas. A Figura 4.4 mostra a variação dos níveis dos reservatórios 1, 2, e 3, para o período das 24 horas de simulação.

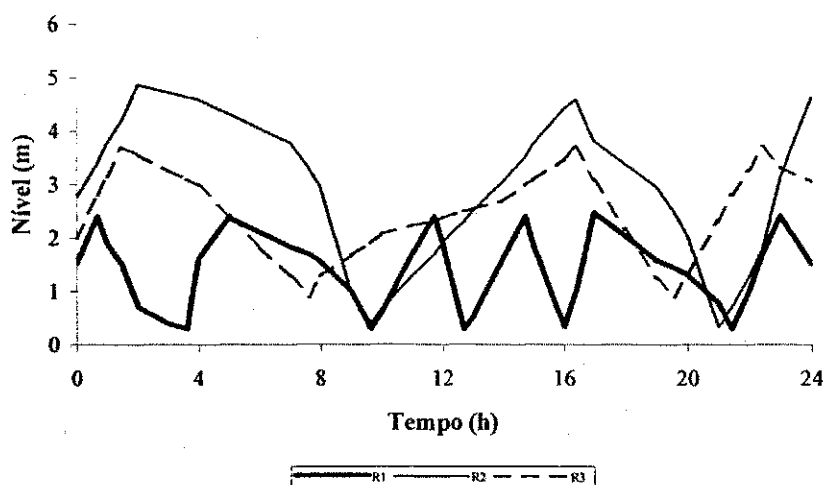


Figura 4.4 – Variação dos níveis dos reservatórios, simulação 17

Na Tabela 4.9 têm-se as variações dos intervalos de operação das três bombas, e ainda o custo diário correspondente. Os números de intervalos em que as bombas 1, 2 e 3 permaneceram ligadas para as 24 horas foram 6, 3 e 3, respectivamente.

Assim como na simulação 5, não houve operação das estações de bombeamento 1 e 2 no período de pico; logo, não considerou-se contrato de energia elétrica na tarifa horo-sazonal azul para o período. Os custos totais com energia elétrica nas três estações, nas tarifas convencional e horo-sazonal, foram R\$ 7.957,63 e R\$ 5.588,71, respectivamente (Tabela 4.10).

Tabela 4.9 – Variação dos intervalos com bomba ligada, simulação 17

Bombas	Tempo (h)		Δt	Custo de Consumo (R\$)	
	Ligou	Desligou		Convencional	H.S.A
1	0,00	0,68	0,68	10,55	5,94
	3,61	4,30	0,69	10,70	6,02
	9,65	11,76	2,11	32,67	18,39
	12,71	14,74	2,03	31,36	17,65
	15,73	16,83	1,1	16,95	9,54
	21,44	23,04	1,6	24,75	13,93
	Total Diário				126,98
2	0,00	1,70	1,70	6,70	3,77
	9,39	16,24	6,85	27,02	15,21
	21,04	23,60	2,56	10,07	5,67
	Total Diário				43,79
3	0,00	1,47	1,47	4,78	2,69
	7,62	16,48	8,86	28,91	16,27
	19,56	22,43	2,87	9,34	6,15
	Total Diário				43,03

Tabela 4.10 – Custo mensal com energia elétrica para operação de bombas, simulação 17

Bombas	Tarifa	Custo (R\$)		Total
		Consumo	Demanda	
1	Convencional	3.809,40	1.052,33	4.861,73
	HSA	2.144,10	929,28	3.073,38
2	Convencional	1.313,70	268,92	1.582,62
	HSA	739,50	237,47	976,97
3	Convencional	1.290,90	222,38	1.513,28
	HSA	753,30	785,06	1.538,36
Custo Total Mensal Tarifa Convencional (R\$)				7.957,63
Custo Total Mensal Tarifa HSA (R\$)				5.588,71

Na simulação 21 foi considerado o nível mínimo no reservatório R1 para acionamento 0,6 m e máximo para desligamento 2,4 m; no reservatório R2, nível mínimo para acionamento 0,9 m e máximo para desligamento 4,9 m; e no reservatório R3, nível mínimo para acionamento 0,6 m e máximo para desligamento 3,4 m. O tempo diário total de funcionamento das três bombas foi de 29,42 horas. A variação dos níveis dos reservatórios para o período de simulação (24 horas) encontra-se na Figura 4.5.

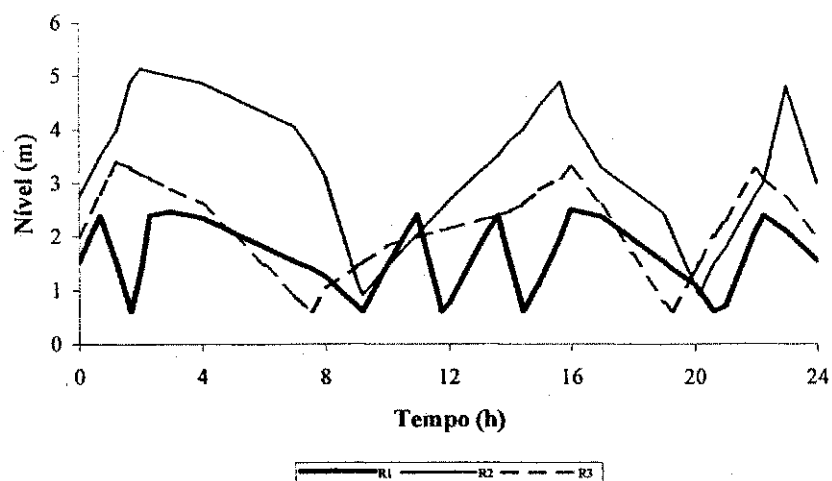


Figura 4.5 – Variação dos níveis dos reservatórios, simulação 21

Os números de intervalos em que as bombas 1, 2 e 3 permaneceram ligadas no período das 24 horas foram 6, 3 e 3, respectivamente. As variações dos intervalos de operação das bombas, com seus respectivos custos de consumo, nas tarifas convencional e horo-sazonal azul, estão discriminados na Tabela 4.11. Também observa-se que não houve bombeamento no horário de pico nas estações 1 e 2, portanto não houve contratação de energia para o período.

Para a simulação 21 o custo total mensal na tarifa convencional foi de R\$ 7.832,66 e na horo-sazonal azul R\$ 5.536,75 (Tabela 4.12).

Tabela 4.11 – Variação dos intervalos com bomba ligada, simulação 21

Bombas	Tempo (h)		Δt	Custo de Consumo (R\$)	
	Ligou	Desligou		Convencional	H.S.A
1	0,00	0,68	0,68	10,54	5,93
	1,71	2,30	0,59	9,13	5,14
	9,20	10,97	1,77	27,26	15,34
	11,78	13,60	1,82	28,07	15,80
	14,44	16,00	1,56	23,97	13,49
	20,63	22,27	1,64	25,33	14,26
Total Diário				124,30	69,96
2	0,00	1,67	1,67	6,58	3,70
	9,16	15,68	6,52	25,68	14,45
	20,13	22,96	2,83	11,18	6,29
Total Diário				43,44	24,44
3	0,00	1,22	1,22	3,99	2,24
	7,54	16,30	8,76	28,60	16,10
	19,25	22,11	2,86	9,32	6,76
Total Diário				41,91	25,10

Tabela 4.12 – Custo mensal com energia elétrica para operação de bombas, simulação 21

Bombas	Tarifa	Custo (R\$)		Total
		Consumo	Demanda	
1	Convencional	3.729,00	1.052,09	4.781,09
	HSA	2.098,80	929,06	3.027,86
2	Convencional	1.303,20	268,55	1.571,75
	HSA	733,20	237,15	970,35
3	Convencional	1.257,30	222,52	1.479,82
	HSA	753,00	785,54	1.538,54
Custo Total Mensal Tarifa Convencional (R\$)				7.832,66
Custo Total Mensal Tarifa HSA (R\$)				5.536,75

Constata-se que entre as cinco simulações a variação dos custos totais foi pequena. À exceção da simulação 1, os menores custos foram registrados na tarifa horo-sazonal azul, sendo a simulação 21 a que apresentou o menor custo mensal total, seguida das simulações 5 e 17 com pequena diferença. A simulação 8 apresentou um custo de aproximadamente 10% superior ao registrado na simulação 21, enquanto que na simulação 1 este acréscimo foi cerca de 26%, comparando-se o valor total na simulação 1, na tarifa convencional, com o valor final da simulação 21, na tarifa horo-sazonal azul.

Não observa-se variação entre as cinco simulações quanto ao número de intervalos com bomba ligada; apenas a simulação 1 apresentou, para cada bomba, um intervalo a menos com as bombas operando, comparando-se com as demais.

Para garantir um ciclo de operação diário, os níveis iniciais dos reservatórios deveriam ser os mesmos ao final das 24 horas. No caso das cinco simulações analisadas anteriormente, as simulações 1, 8 e 21 atendem essa garantia. Para a simulação 5, o reservatório 2, que controla a bomba 2, apresentou um nível final mais elevado em relação ao nível inicial adotado, fato que pode alterar o ciclo diário de operação. O mesmo ocorreu na simulação 7, para os reservatórios 2 e 3, que controlam as bombas 2 e 3, respectivamente.

Concluindo, são satisfatórios os resultados obtidos com as simulações da rede a partir do controle das bombas pelos níveis dos reservatórios. As demandas de água foram atendidas de forma satisfatória, além de se verificar uma redução considerável no tempo de operação das bombas.

Segundo Ribeiro (2001) o tempo médio diário de operação da B₁ (estação elevatória 3) é de 16,35 horas, enquanto que o tempo médio diário obtido com as cinco simulações foi de 7,86 horas, aproximadamente 50% a menos que o valor real atual. Com relação à B₂ (estação elevatória 4) o tempo médio diário de operação atual é de 16,75 horas, e o valor médio obtido foi de 10,32 horas, cerca de 38% inferior. O tempo médio diário de operação da B₃ (estação elevatória 9), obtido a partir das cinco simulações, foi de 12,34 horas. Não era disponível na CAGEPA tempo de operação atual da B₃ (elevatória 9, localizada na cidade de Pocinhos). De acordo com Ribeiro (2001), o tempo de operação diário da B₃ é aproximadamente igual ao da B₂. Os custos atuais não puderam ser calculados porque a distribuição do bombeamento ao longo do dia não foi fornecida pela CAGEPA.

As comparações acima não devem ser levadas em conta com rigor, pois o sistema simulado não corresponde exatamente ao sistema real, como argumentado na seção 3.2, o modelo de simulação não foi calibrado com dados do sistema real.

Vale salientar que o bombeamento não foi otimizado, pois o único critério utilizado para controle das bombas foi o de níveis de referência dos reservatórios. Para se obter um controle ótimo, provavelmente seria necessário que a operação fosse controlada também pelo tempo, onde uma das restrições a serem implementadas seria o não bombeamento no horário de pico (17 às 20 horas).

Os custos das simulações foram acima analisados considerando que, para os casos em que as bombas não operassem no horário de pico, o valor da demanda contratada para esse período seria zero. No entanto, caso opte-se pela tarifa convencional, as cinco melhores seriam as simulações 1, 2, 8, 18 e 25, tendo como base os dois critérios adotados. As simulações 1 e 8 nos dois casos estão entre as melhores, e foram analisadas anteriormente; as demais simulações - 2, 18 e 25 - também atendem às distribuições de

vazões e pressões, e apresentaram custos mensais totais, na tarifa convencional, de R\$ 7.043,69, R\$ 7.120,19 e R\$ 7.088,16, respectivamente.

4.1.2 – Análise das Pressões

As Tabelas 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17 contêm as pressões nos nós de distribuição para as simulações 1, 5, 8, 17 e 21, respectivamente. Como pode ser observado, as pressões encontram-se dentro do intervalo considerado aceitável, entre 15 mca ($\pm 10\%$) e 50 mca ($\pm 10\%$), para que sejam atendidos todos os pontos de distribuição da rede. As pressões para as cinco simulações, em todos os nós da rede, também foram consideradas satisfatórias e encontram-se em anexo neste trabalho (Tabelas A2, A3, A4, A5 e A6). As variações de pressões em todos os nós da rede, para as simulações 2, 18, e 25, encontram-se também em anexo nesse trabalho (Tabelas A7, A8 e A9).

A partir da análise do comportamento das pressões, em todos os nós da rede, para as cinco simulações selecionadas, optou-se pela seleção dos nós considerados mais relevantes para uma análise mais detalhada das pressões.

Selecionou-se a derivação 5 (d_5), devido a sua altitude, cota mais elevada (640,0 m) com relação as demais derivações na distribuição em marcha, primeira parte do sistema, para mostrar o comportamento das pressões ao longo das 24 horas, para as cinco simulações, e pôde-se observar a partir das Figuras 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10 que as pressões no período são satisfatórias, variando de aproximadamente 15 mca até 30 mca, mantendo-se dentro do intervalo adequado considerado nesse estudo. Verifica-se também a partir das figuras que no horário de maior consumo, 9 às 17 horas, as pressões são inferiores. Apenas na simulação 8 (Figura 4.8) observa-se um comportamento diferente das demais simulações, o que está relacionado com os níveis iniciais do reservatório, a montante da distribuição 5, considerados para controlar a estação de bombeamento.

Tabela 4.13 – Pressões nos nós de distribuição, simulação 1

Hora	Pressão (mca)								
	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅	d ₆	d ₇	d ₈	d ₉
0	27,9	32,0	38,1	21,1	16,6	21,8	15,7	42,2	25,9
1	29,3	34,0	40,1	23,8	19,3	25,2	17,0	42,9	26,5
2	28,6	36,1	42,9	28,6	24,8	38,8	18,4	43,5	27,2
3	28,6	36,1	42,9	28,6	24,8	38,8	17,7	42,9	26,5
4	27,9	36,1	42,9	27,9	24,1	38,8	17,7	42,9	26,5
5	27,9	35,4	42,2	27,9	24,1	38,1	17,7	40,1	23,8
6	29,9	37,4	44,2	29,3	26,1	40,1	17,7	39,5	23,1
7	29,9	37,4	44,2	29,9	26,1	40,8	17,0	38,8	21,1
8	29,9	37,4	44,2	29,9	26,1	40,1	17,0	38,1	20,4
9	29,3	36,7	43,5	28,6	25,5	39,5	15,7	29,9	15,0
10	28,6	36,1	42,9	28,6	24,8	38,8	13,6	30,6	15,7
11	26,5	30,6	36,7	19,7	15,2	20,4	13,6	25,9	13,6
12	27,9	32,0	37,4	21,1	16,6	21,1	14,3	25,9	14,3
13	28,6	32,7	38,8	21,8	17,3	22,5	15,0	25,9	14,3
14	26,5	30,6	36,7	19,7	15,2	20,4	15,7	26,5	15,0
15	27,2	32,0	38,1	21,1	16,6	22,5	16,3	31,3	15,7
16	28,6	33,3	38,8	22,5	18,0	23,1	17,0	32,0	16,3
17	27,2	31,3	37,4	21,1	16,6	21,8	17,7	32,0	16,3
18	29,3	36,7	43,5	29,3	25,5	39,5	17,7	36,7	18,4
19	29,9	37,4	44,2	29,9	26,1	40,1	16,3	36,1	17,7
20	29,9	37,4	44,2	29,9	26,1	40,1	16,3	40,1	23,1
21	29,3	37,4	43,5	29,3	25,5	40,1	15,7	39,5	22,5
22	29,3	36,7	43,5	29,3	25,5	39,5	15,7	38,8	21,8
23	28,6	36,7	43,5	28,6	24,8	39,5	15,7	38,8	21,8
24	28,6	36,7	43,5	28,6	24,8	39,5	15,0	40,8	23,1

Tabela 4.14 – Pressões nos nós de distribuição, simulação 5

Hora	Pressões (mca)								
	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅	d ₆	d ₇	d ₈	d ₉
0	27,9	32,0	38,1	21,1	15,7	19,7	15,7	44,9	27,2
1	28,6	33,3	39,5	23,1	17,7	24,5	17,0	45,6	27,9
2	28,6	36,1	42,9	28,6	23,8	38,8	17,7	45,6	27,9
3	28,6	36,1	42,9	28,6	23,8	38,8	17,7	44,9	27,2
4	27,9	36,1	42,9	27,9	23,1	38,8	17,7	44,9	27,2
5	27,9	35,4	42,2	27,9	23,1	38,1	17,0	42,2	23,8
6	29,3	37,4	44,2	29,3	24,5	40,1	17,0	41,5	23,1
7	29,3	37,4	44,2	29,3	24,5	40,1	17,0	40,8	22,5
8	29,3	36,7	43,5	29,3	24,5	40,1	15,7	41,5	23,1
9	28,6	36,1	42,9	28,6	23,8	38,8	13,6	33,3	14,3
10	26,5	31,3	36,7	20,4	15,0	21,1	13,6	34,0	15,0
11	27,2	32,0	37,4	21,1	15,0	21,1	14,3	29,3	12,9
12	27,9	32,0	38,1	21,1	15,7	21,8	15,0	29,3	13,6
13	26,5	30,6	36,7	19,7	14,3	20,4	15,7	29,9	13,6
14	27,2	32,0	37,4	21,1	15,7	21,8	16,3	29,9	13,6
15	27,9	32,7	38,1	21,8	16,3	22,5	17,0	34,7	15,0
16	26,5	31,3	37,4	20,4	15,0	21,8	17,7	34,7	15,7
17	29,9	37,4	44,2	29,3	24,5	40,1	17,7	34,0	14,3
18	29,3	36,7	43,5	29,3	24,5	39,5	17,0	36,7	17,0
19	29,3	36,7	43,5	28,6	23,8	39,5	15,7	36,7	17,0
20	28,6	36,1	42,9	28,6	23,8	39,5	14,3	42,2	23,8
21	26,5	31,3	37,4	21,1	15,7	21,8	13,6	42,9	24,5
22	27,9	32,7	38,8	22,5	17,0	23,1	15,0	42,9	24,5
23	27,9	33,3	38,8	23,1	17,0	23,8	17,7	42,9	24,5
24	28,6	36,7	43,5	28,6	23,8	39,5	17,7	44,9	27,2

Tabela 4.15 – Pressões nos nós de distribuição, simulação 8

Hora	Pressões (mca)								
	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅	d ₆	d ₇	d ₈	d ₉
0	27,9	32,0	38,1	21,1	15,0	19,7	13,6	42,2	25,9
1	29,9	38,1	44,9	29,9	24,5	40,8	13,6	42,9	26,5
2	28,6	34,0	40,1	23,8	24,5	24,5	15,7	43,5	27,2
3	27,9	36,1	42,9	27,9	22,5	38,8	17,7	42,9	26,5
4	27,9	36,1	42,9	27,9	22,5	38,8	17,7	42,9	26,5
5	29,9	38,1	44,9	29,9	24,5	40,8	17,7	40,1	23,1
6	29,9	37,4	44,2	29,9	24,5	40,1	17,0	39,5	22,5
7	29,9	37,4	44,2	29,3	24,5	40,1	17,0	38,8	21,8
8	29,3	36,7	43,5	29,3	23,8	40,1	16,3	38,1	21,1
9	27,2	32,0	37,4	21,1	15,0	21,1	15,7	29,9	15,7
10	27,2	31,3	37,4	21,1	15,0	21,8	16,3	30,6	16,3
11	27,9	32,0	38,1	21,8	15,0	21,8	16,3	25,9	12,9
12	27,2	31,3	37,4	21,1	14,3	21,1	17,0	25,9	12,9
13	28,6	36,1	42,9	27,9	22,5	38,8	17,7	25,9	13,6
14	29,9	37,4	44,2	29,3	23,8	40,1	15,7	26,5	13,6
15	26,5	31,3	36,7	20,4	14,3	21,1	16,3	31,3	18,4
16	27,9	32,0	38,1	21,8	15,0	21,8	17,0	32,0	19,1
17	28,6	32,7	38,8	15,0	16,3	23,1	17,7	32,0	18,4
18	28,6	36,7	42,9	28,6	23,1	39,5	17,0	36,7	23,8
19	28,6	36,1	42,9	27,9	23,1	38,8	15,7	36,7	23,8
20	27,2	32,0	38,1	21,8	15,0	22,5	15,7	40,1	27,2
21	29,3	37,4	44,2	29,3	23,8	40,1	17,7	39,5	26,5
22	29,9	37,4	44,2	29,9	24,5	40,8	17,7	39,5	26,5
23	29,9	37,4	44,2	29,9	24,5	40,1	17,0	38,8	25,2
24	29,9	37,4	44,2	29,9	24,5	40,1	17,0	40,8	27,9

Tabela 4.16 – Pressões nos nós de distribuição, simulação 17

Hora	Pressões (mca)								
	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅	d ₆	d ₇	d ₈	d ₉
0	27,9	32,0	38,1	21,1	16,3	21,1	15,7	42,2	25,9
1	28,6	33,3	39,5	23,1	17,0	24,5	17,0	42,9	26,5
2	27,9	35,4	42,2	27,9	23,1	38,8	17,7	43,5	27,2
3	27,9	35,4	42,2	27,9	23,1	38,8	17,7	42,9	26,5
4	29,3	36,7	43,5	29,3	25,2	39,5	17,7	42,9	26,5
5	29,9	37,4	44,2	29,9	31,3	40,1	17,0	40,1	23,1
6	29,3	37,4	44,2	29,3	24,5	40,1	17,0	39,5	22,5
7	29,3	36,7	43,5	29,3	24,5	39,5	17,0	38,8	21,8
8	29,3	36,7	43,5	28,6	24,5	39,5	15,7	38,8	21,8
9	28,6	36,1	42,9	27,9	16,3	38,8	14,3	31,3	17,0
10	26,5	31,3	36,7	20,4	15,0	21,1	13,6	31,3	17,0
11	27,9	32,0	37,4	21,1	15,0	21,1	14,3	27,2	13,6
12	27,9	32,0	38,1	21,1	15,7	21,8	15,0	27,2	13,6
13	26,5	30,6	36,7	19,7	14,3	20,4	15,7	27,2	13,6
14	27,2	32,0	37,4	21,1	15,7	21,8	15,7	27,2	14,3
15	27,9	32,7	38,1	21,8	16,3	22,5	16,3	32,7	17,0
16	26,5	31,3	37,4	20,4	15,0	21,8	17,0	32,7	17,0
17	29,9	37,4	44,2	29,3	24,5	40,1	17,0	32,7	17,0
18	29,3	36,7	43,5	29,3	24,5	40,1	16,3	35,4	19,1
19	29,3	36,7	43,5	28,6	23,8	39,5	15,7	34,7	18,4
20	28,6	36,7	42,9	28,6	23,8	39,5	15,0	38,8	23,8
21	28,6	36,1	42,9	28,6	23,8	38,8	13,6	40,1	25,2
22	27,2	32,0	38,1	21,8	16,3	22,5	14,3	40,8	24,5
23	28,6	33,3	39,5	23,1	17,7	24,5	16,3	40,8	24,5
24	28,6	36,7	43,5	28,6	23,8	39,5	17,7	42,9	27,2

Tabela 4.17 – Pressões nos nós de distribuição, simulação 21

Hora	Pressões (mca)								
	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅	d ₆	d ₇	d ₈	d ₉
0	27,9	32,0	38,1	21,1	16,3	21,1	15,7	40,8	23,8
1	28,6	33,3	39,5	23,1	18,4	25,9	17,0	41,5	24,5
2	29,3	36,7	43,5	29,3	25,2	39,5	17,7	41,5	25,2
3	29,9	37,4	44,2	29,9	25,9	40,8	17,7	41,5	25,2
4	29,9	37,4	44,2	29,9	25,9	40,1	17,7	40,8	25,2
5	29,3	37,4	44,2	29,3	25,2	40,1	17,7	38,1	21,1
6	29,3	36,7	43,5	29,3	25,2	39,5	17,0	37,4	20,4
7	29,3	36,7	43,5	28,6	24,5	39,5	17,0	37,4	20,4
8	28,6	36,1	42,9	28,6	24,5	39,5	16,3	37,4	20,4
9	27,9	35,4	42,2	27,9	23,8	38,1	14,3	29,3	14,3
10	27,2	32,0	38,1	21,1	16,3	21,8	14,3	29,9	14,3
11	26,5	30,6	38,1	21,8	16,3	21,8	15,0	25,2	13,6
12	27,9	32,0	36,7	20,4	15,0	21,1	15,7	25,2	13,6
13	27,2	32,0	38,1	21,1	16,3	21,8	16,3	25,9	13,6
14	27,2	32,0	37,4	21,1	16,3	21,8	17,0	25,9	13,6
15	29,9	38,1	37,4	21,1	16,3	22,5	17,0	30,6	15,7
16	29,9	37,4	44,2	29,9	25,9	40,8	17,0	31,3	15,7
17	29,3	36,7	44,2	29,3	25,2	40,1	16,3	30,6	19,7
18	28,6	36,7	43,5	29,3	25,2	39,5	15,7	33,3	17,0
19	28,6	36,1	43,5	28,6	24,5	39,5	15,7	32,7	16,3
20	27,2	32,0	42,9	28,6	24,5	39,5	14,3	37,4	21,8
21	28,6	33,3	38,1	21,8	17,0	22,5	15,0	38,8	23,1
22	28,6	36,1	39,5	23,1	18,4	23,8	15,7	39,5	23,8
23	28,6	36,1	42,9	28,6	24,5	38,8	17,7	38,8	23,1
24	28,6	36,1	42,9	28,6	24,5	38,8	17,7	40,8	25,9

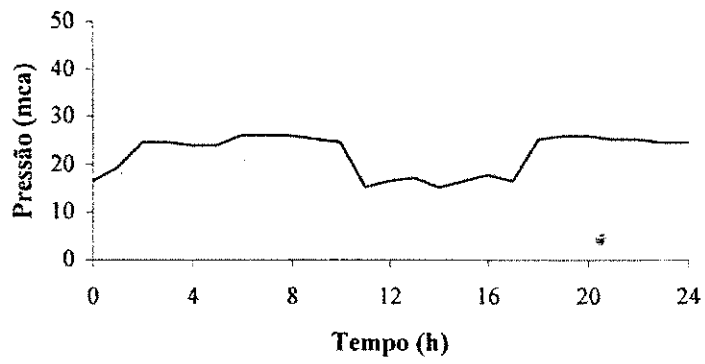


Figura 4.6 – Pressões em d_5 , simulação 1

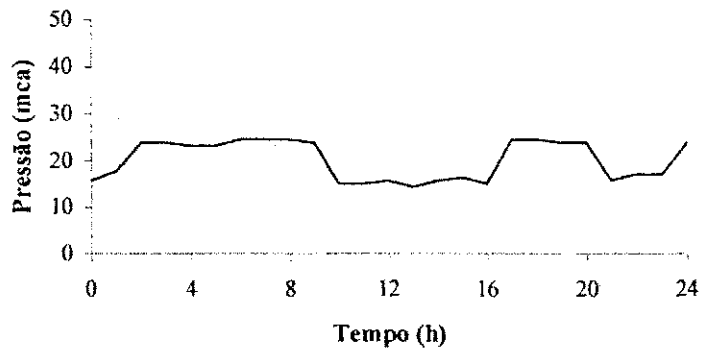


Figura 4.7 – Pressões em d_5 , simulação 5

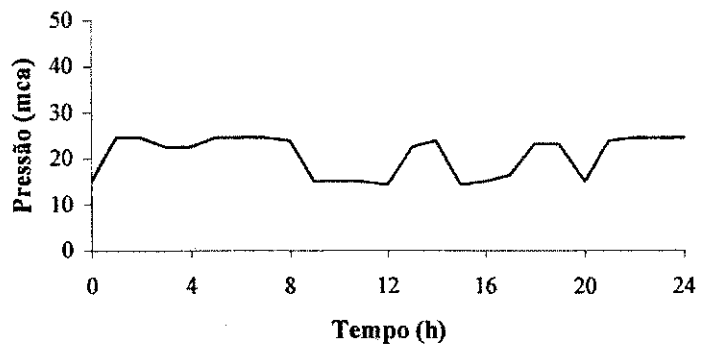
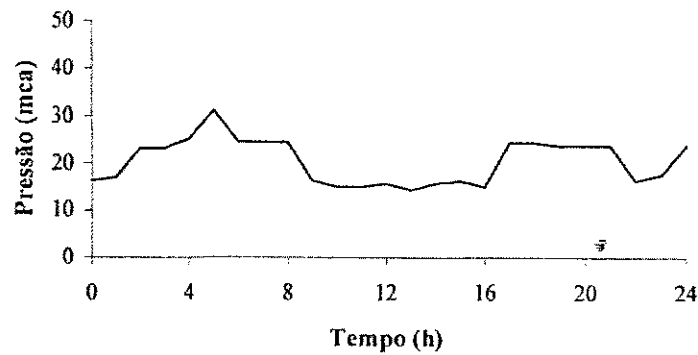
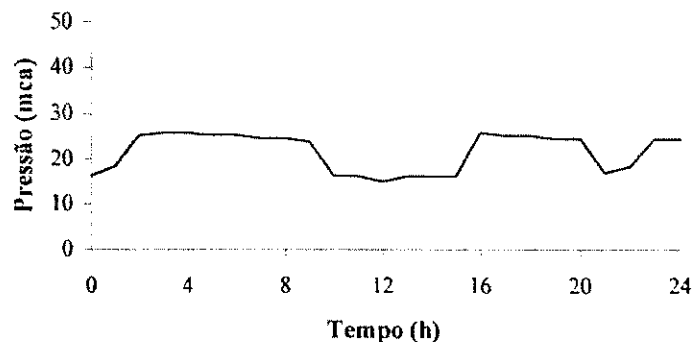


Figura 4.8 – Pressões em d_5 , simulação 8

Figura 4.9 – Pressões em d_5 , simulação 17Figura 4.10 – Pressões em d_5 , simulação 21

As Figuras 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15 mostram o comportamento das pressões na derivação 7 (d_7) que é responsável pelo abastecimento d'água no distrito de São José da Mata, e encontra-se na cota 689,0 m. Pode-se observar que a variação das pressões ao longo do dia na derivação, para as cinco simulações, foi pequena, o que é justificado pelo fato que a derivação 7 encontra-se no "pé" do reservatório 2. Das 10 horas ao meio dia na simulação 1 (Figura 4.11) as pressões registradas foram inferiores a 15 mca, porém a diferença foi pequena, variando de 4,7% a 9,3%, que pode-se considerar aceitável. Nas simulações 5, 17 e 21 (Figuras 4.12, 4.14 e 4.15) as mesmas variações foram observadas, porém no horário das 9 às 11 horas da manhã. Na simulação 8 (Figura 4.13) observa-se que houve pressões inferiores a 15 mca apenas no início da simulação, 0 a 1 hora.

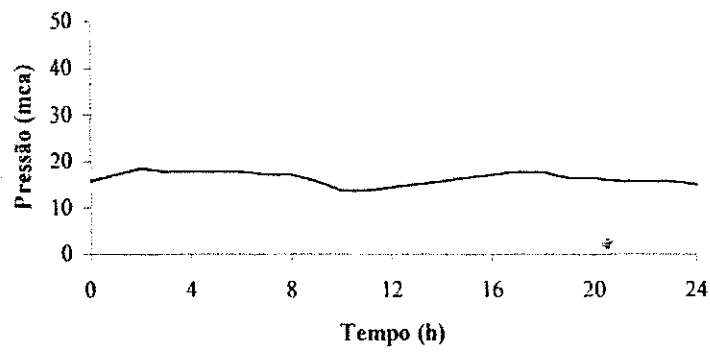


Figura 4.11 – Pressões em d₇, simulação 1

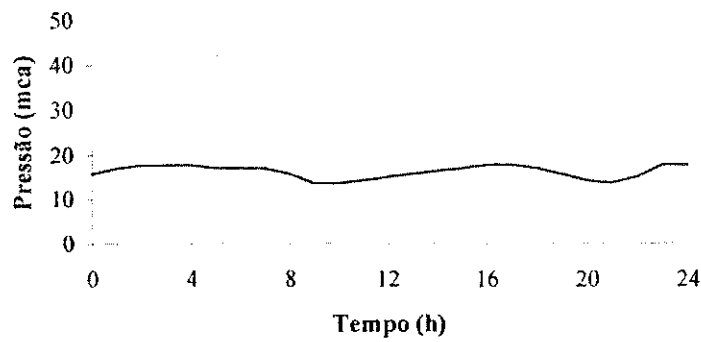


Figura 4.12 – Pressões em d₇, simulação 5

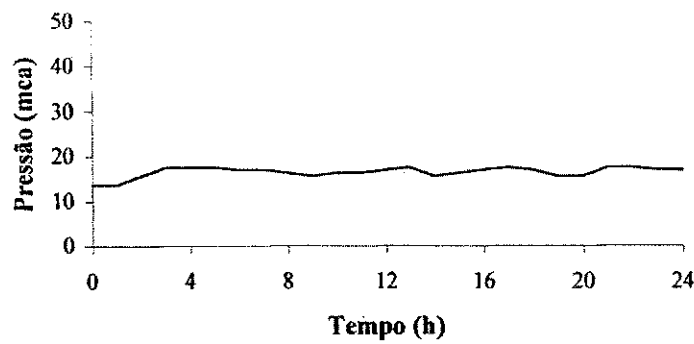
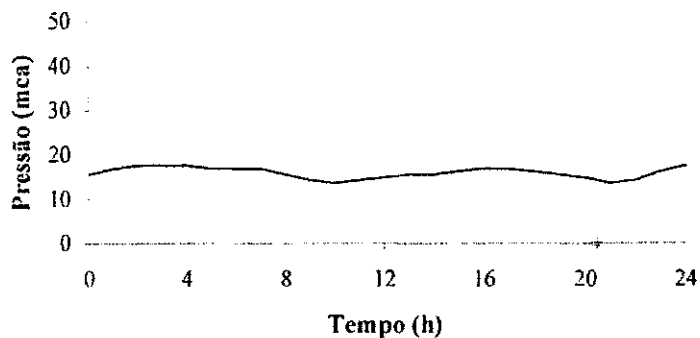
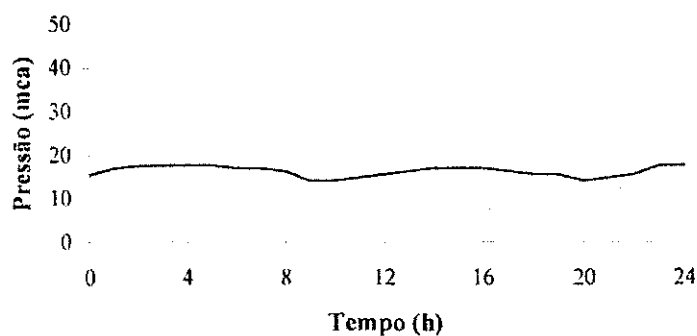


Figura 4.13 – Pressões em d₇, simulação 8

Figura 4.14 – Pressões em d₇, simulação 17Figura 4.15 – Pressões em d₇, simulação 21

A derivação 8 é responsável pelo fornecimento de água a um bairro da cidade de Pocinhos, e está localizada a cota 635,0 m. Observa-se a partir das Figuras 4.16, 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20 que as pressões na derivação encontram-se superiores a 25 mca.

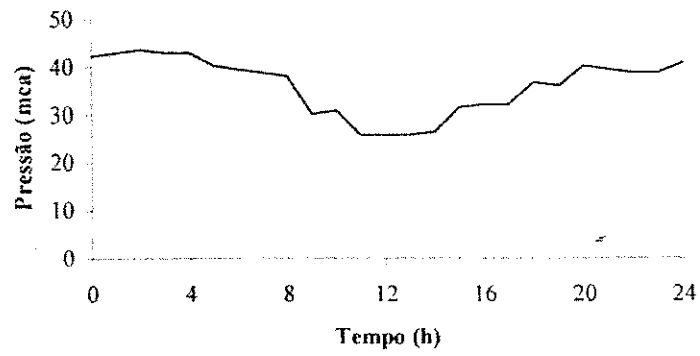


Figura 4.16 – Pressões em d_8 , simulação 1

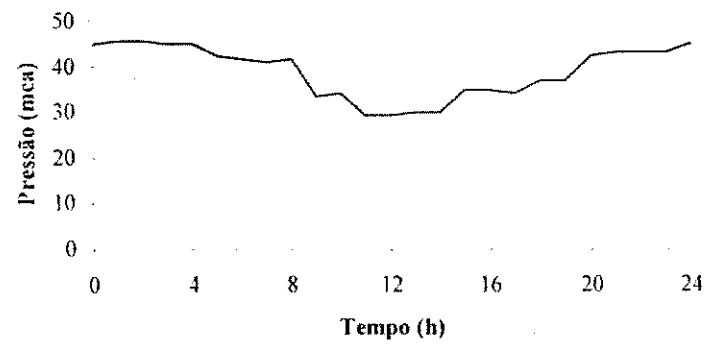


Figura 4.17 – Pressões em d_8 , simulação 5

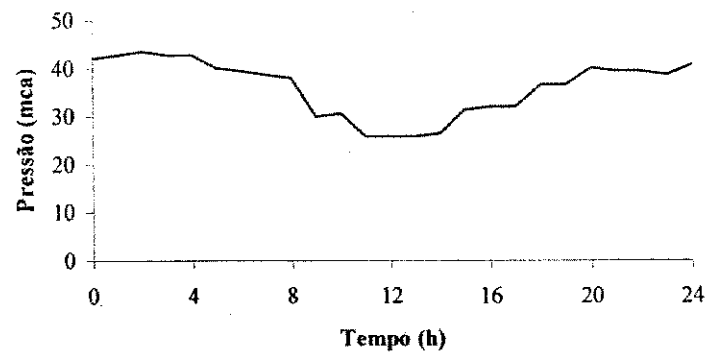
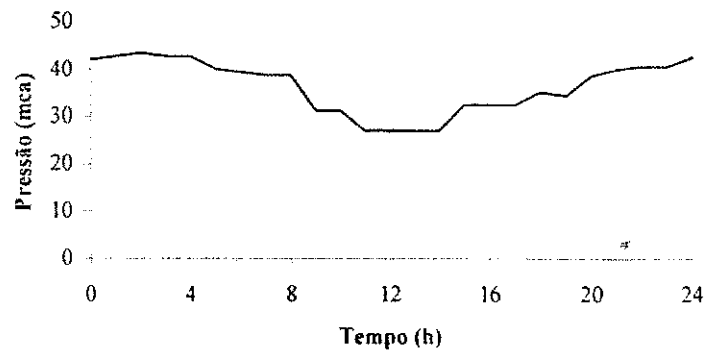
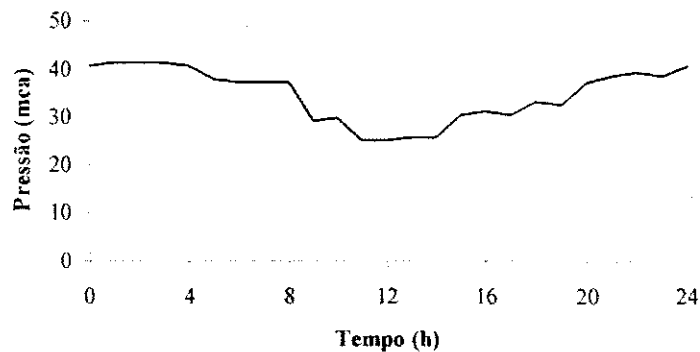


Figura 4.18 – Pressões em d_8 , simulação 8

Figura 4.19 – Pressões em d_8 , simulação 17Figura 4.20 – Pressões em d_8 , simulação 21

A derivação 9 transporta a vazão que irá fornecer água a um reservatório localizado dentro da cidade de Pocinhos, que é responsável pelo abastecimento de água da cidade. As Figuras 4.21, 4.22, 4.23, 4.24 e 4.25 mostram o comportamento das pressões na derivação ao longo do dia. Verifica-se que das 11 às 13 horas na simulação 1 (Figura 4.21) as pressões registradas foram inferiores a 15 mca, porém com uma variação pequena, de 4,7% a 9,3% inferior ao limite mínimo adotado, variação considerada aceitável. Nas simulações 5, 8, e 17 (Figuras 4.22, 4.23 e 4.24) as mesmas variações foram observadas, porém num intervalo de tempo um pouco maior, das 11 às 14 horas, enquanto que na simulação 21 (Figura 4.25) o intervalo de tempo com pressões inferiores a 15 mca foi de 5 horas, das 9 às 14 horas.

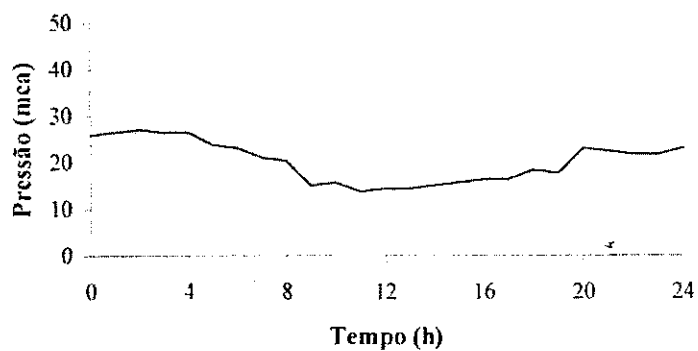


Figura 4.21 – Pressões em d₉, simulação 1

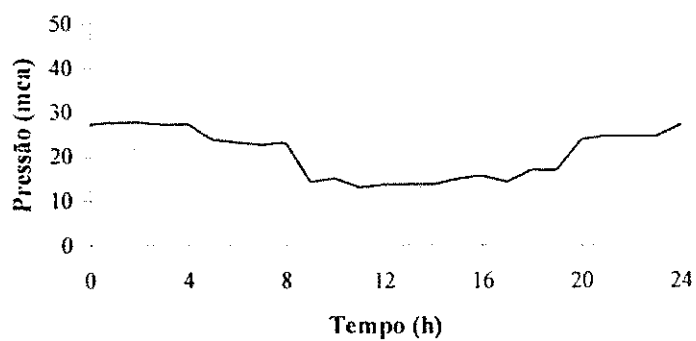


Figura 4.22 – Pressões em d₉, simulação 5

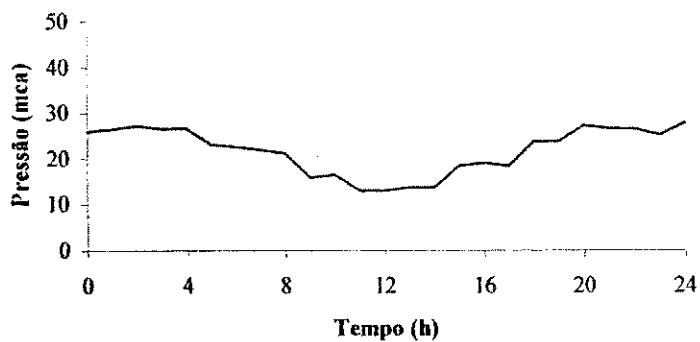
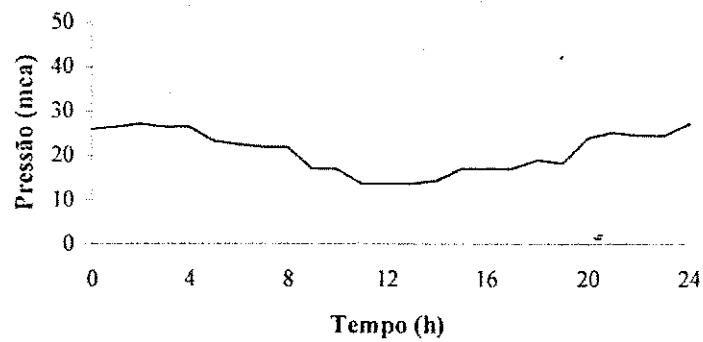
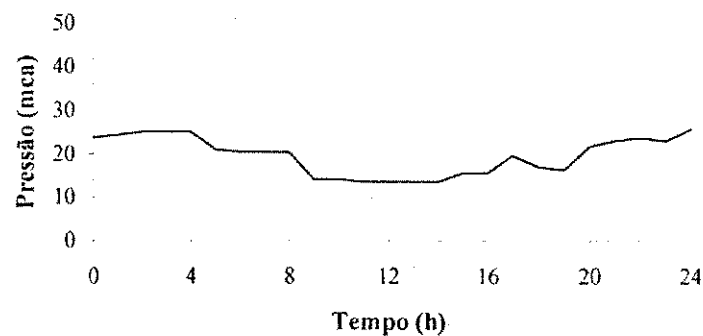


Figura 4.23 – Pressões em d₉, simulação 8

Figura 4.24 – Pressões em d_9 , simulação 17Figura 4.25 – Pressões em d_9 , simulação 21

Nos nós 13 e 14, que precedem a bomba 3, observou-se pressões elevadas, em torno de 60 mca para o nó 13 e 122 mca para o nó 14 (Figuras 4.26 a 4.35), fato atribuído à grande diferença de altitude nessa artéria do sistema, cerca de 121 m; o reservatório a montante (R_2) encontra-se a uma cota de 696,2 m e a bomba a jusante (B_3) a uma cota de 575 m (Figura 3.3). Segundo Figueiredo (2000), o problema com pressões elevadas nesse trecho da rede é constatado *in loco*, onde constantemente ocorrem vazamentos decorrentes de tais pressões.

Tal problema pode ser solucionado com a instalação de válvulas redutoras de pressão (VRP) na artéria, que atuam nos períodos críticos, reduzindo as pressões a valores desejados. As válvulas seriam instaladas nos trechos 11 e 12, que constituem a

artéria. Deve-se então determinar qual o local mais adequado para a instalação das válvulas, o que está fora do escopo deste trabalho. Encontram-se na literatura estudos relacionados a instalação e uso de válvulas de redução de pressão em redes de distribuição de água, como é o caso de Gratão e Porto (2000) e Jowitt e Xu (1990), entre outros.

As Figuras 4.26, 4.27, 4.28, 4.29 e 4.30 mostram a variação de pressões, para as cinco simulações, no nó 13, localizado a jusante do trecho 11, e as Figuras 4.31, 4.32, 4.33, 4.34 e 4.35 a variação de pressões para o nó 14, situado a jusante do trecho 12.

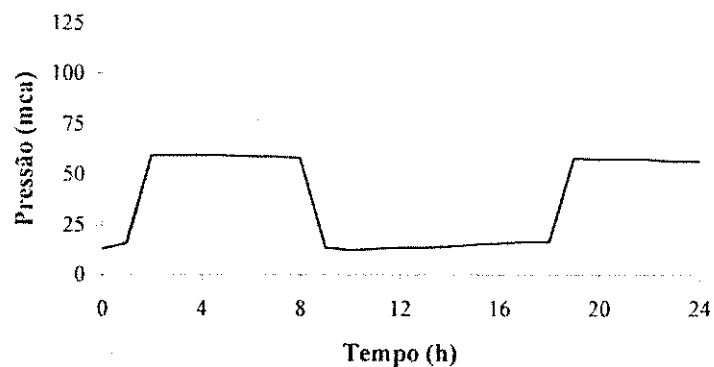


Figura 4.26 – Pressões no nó 13, simulação 1

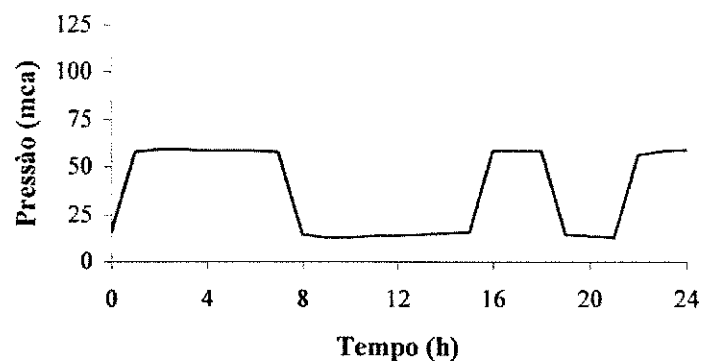


Figura 4.27 – Pressões no nó 13, simulação 5

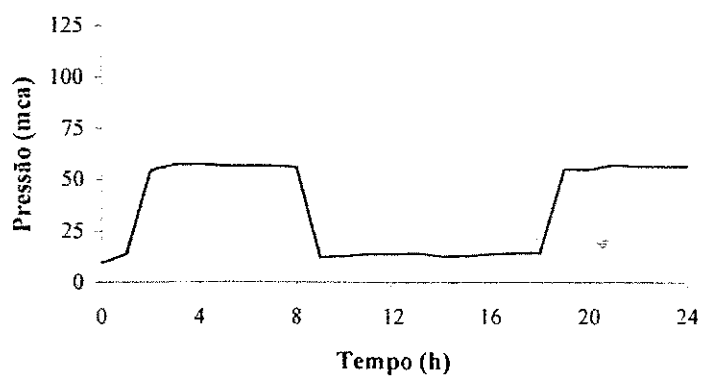


Figura 4.28 – Pressões no nó 13, simulação 8

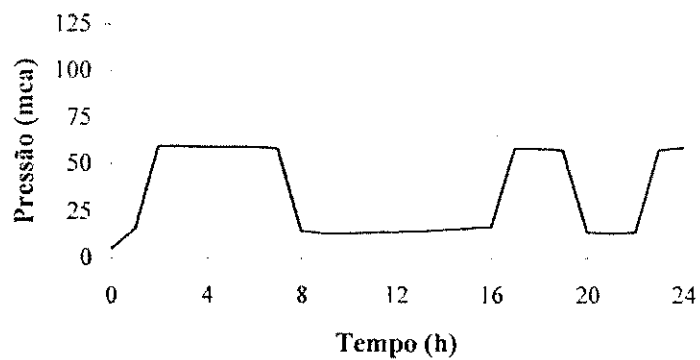


Figura 4.29 – Pressões no nó 13, simulação 17

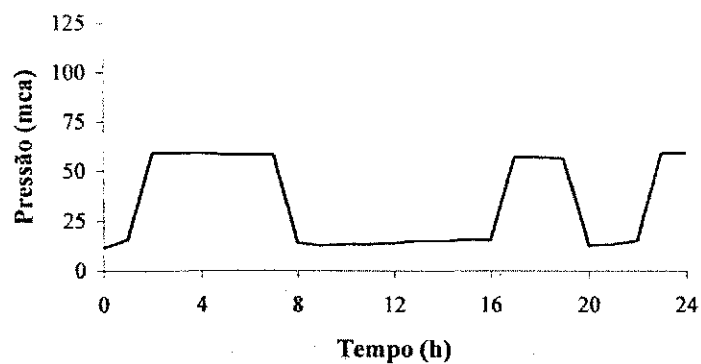


Figura 4.30 – Pressões no nó 13, simulação 21

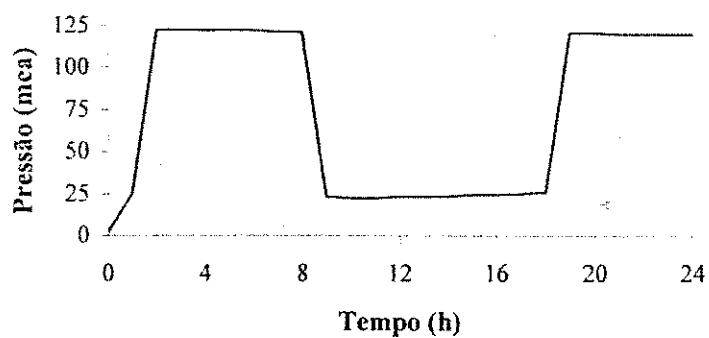


Figura 4.31 – Pressões no nó 14, simulação 1

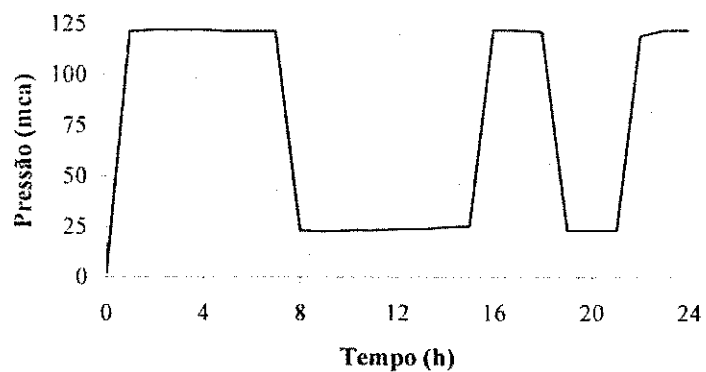


Figura 4.32 – Pressões no nó 14, simulação 5

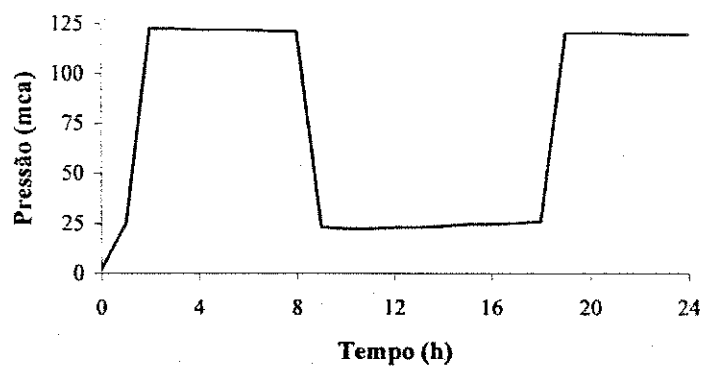


Figura 4.33 – Pressões no nó 14, simulação 8

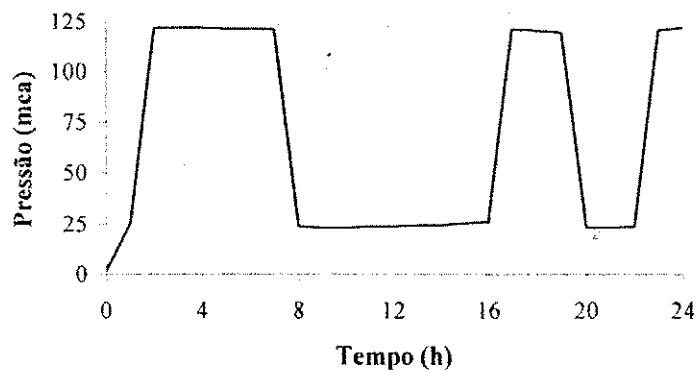


Figura 4.34 – Pressões no nó 14, simulação 17

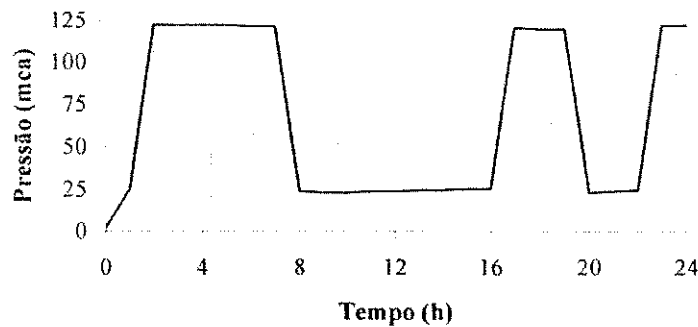


Figura 4.35 – Pressões no nó 14, simulação 21

4.2 - DIFICULDADES ENCONTRADAS NO WADISO

Um dos principais problemas encontrados durante a pesquisa foi a implementação do sistema adutor no programa WADISO. O programa é mau documentado, o que dificulta o entendimento de problemas quanto a entrada e saída de dados. Devido a estas dificuldades, optou-se por dividir a rede em partes. Inicialmente implementou-se a primeira parte da rede (Figura 3.4), e após conseguir simular e entender a operação dessa primeira parte, acrescentou-se a segunda parte (Figura 3.5). Só então foi possível realizar uma análise do sistema adutor completo.

O programa apresenta restrições quanto a estrutura de entrada de dados para representação da rede. É o caso, por exemplo, da representação dos reservatórios de distribuição e das bombas.

Para a representação de um reservatório é necessário criar um trecho fictício para que o nó de localização do reservatório não faça parte da artéria principal da rede, pois caso o reservatório encha ou esvazie o programa o desconecta do sistema, o que resultará em problemas na sua operação, com conseqüente interrupção da simulação. A Figura 4.36 mostra as formas correta e incorreta da representação de um reservatório.

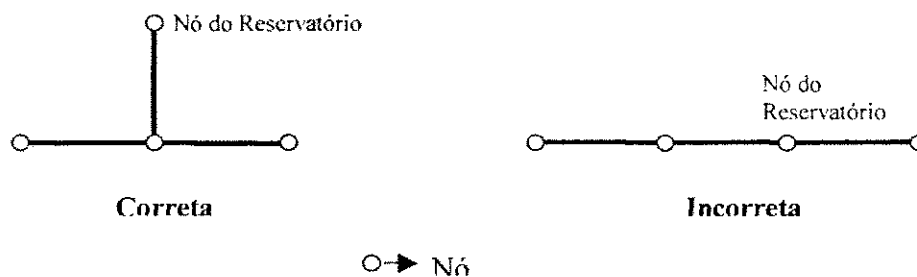
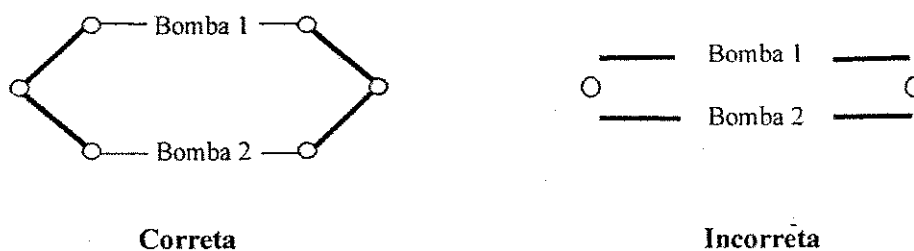


Figura 4.36 – Formas correta e incorreta para representação de reservatórios
(Walski *et al.*, 1990)

No caso de bombas em paralelo, as formas correta e incorreta para a representação encontram-se na Figura 4.37. Para o caso da rede estudada, a estação de bombeamento 1, que é constituída por duas bombas iguais em paralelo, quando representada da forma sugerida pelo programa não completava as 24 horas de simulação por problemas numéricos na rotina de balanceamento. Após várias tentativas para solucionar o problema, optou-se por substituir as duas bombas em paralelo por uma bomba equivalente. Tal artifício permitiu a simulação completa da rede. A substituição foi realizada de forma simplificada, mantendo-se a altura manométrica das bombas originais e duplicando-se a sua vazão.



○ → Nó

Figura 4.37 – Formas correta e incorreta para inserir bombas em paralelo

(Walski *et al.*, 1990)

4.3 – DIRETRIZES PARA A FORMULAÇÃO DE UM SAD

Verificou-se, neste trabalho, que a utilização de um modelo de simulação computacional combinado com critérios de avaliação da eficiência da operação de sistemas de bombeamento em redes de abastecimento de água é uma estratégia adequada e simples para o controle operacional desses sistemas. Esta estratégia pode ser incorporada a sistemas de controle automático de redes, em conjunto com modelos de monitoramento e previsão de demandas em tempo real.

Em conjunto com a simulação da rede, surge a necessidade de uma outra ferramenta para análise dos resultados e para apoiar a tomada de decisão para operação das bombas, o que tem se chamado de Sistema de Apoio a Decisão (SAD). Durante a elaboração deste trabalho, foi possível identificar algumas características desejáveis para tal sistema:

- 1) Gráficos da linha piezométrica em toda a rede

O gráfico da linha piezométrica permite acompanhar o comportamento das pressões em tempo real, detectando quando os seus valores estiverem fora do intervalo considerado, permitindo assim uma solução em tempo real do problema.

2) Alerta quando as restrições adotadas são violadas:

O alerta quanto à violação das restrições, além de induzir a uma manobra corretiva imediata por parte do operador, induz também a uma análise e correção da estratégia adotada que gerou tal problema.

3) Variação dos níveis dos reservatórios de distribuição ao longo do dia

Considerando-se que as bombas do sistema sejam controladas pelos níveis dos reservatórios, o acompanhamento da variação desses níveis permite verificar se os níveis de acionar e desligar cada bomba estabelecidos na estratégia de operação estão sendo cumpridos, como também, se as demandas de água a jusante de cada reservatório serão atendidas, a partir da observação do volume armazenado.

4) Análise horária para as 24 horas seguintes de operação

Ao final de cada hora, a realização da simulação das 24 horas seguintes de operação permite ao sistema operar com maior segurança, sendo possível avaliar se a estratégia de operação adotada será mantida ou se haverá alguma alteração. Em casos de interrupção do abastecimento, seja para manutenção preventiva ou corretiva, permitirá a análise do comportamento do sistema e identificará qual a melhor estratégia de operação a ser adotada.

5) Ferramenta de otimização

O programa computacional que realiza a simulação da rede funcionaria como uma sub-rotina de uma ferramenta de otimização, para auxiliar na busca de estratégias ótimas de operação, como por exemplo na determinação dos níveis dos reservatórios a

serem adotados para o controle das bombas. Algoritmos genéticos poderiam ser utilizados como método de otimização.

6) Formulação das decisões através de regras

A representação das estratégias de operação no SAD poderia ser a base de regras. A extração das regras poderia ser realizada utilizando simulações de diversos cenários de operação e agendamento de bombas; e também entrevistas com operadores de sistemas de abastecimento. Os sistemas difusos (“Fuzzy Systems”) são bastante adequados a esta tarefa, de formulação e avaliação de regras.

CAPÍTULO V

5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A metodologia desenvolvida neste trabalho auxilia a operação de sistemas de abastecimento de água, determinando estratégias de bombeamento, que atendam às demandas de água de forma satisfatória, e considerem as implicações da operação das bombas sobre seu custo de manutenção e de consumo de energia elétrica. A análise do sistema adutor foi realizada com apoio do modelo de simulação computacional WADISO. Definiram-se estratégias de operação baseadas nos níveis dos reservatórios de distribuição, a jusante de cada estação de bombeamento, ou seja, consistem nos níveis dos reservatórios que determinam os momentos de ligar e desligar cada bomba durante um período de 24 horas.

Os resultados obtidos permitem comprovar 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.

A utilização combinada de um modelo de simulação computacional com critérios de avaliação da eficiência da operação de bombas em sistemas de abastecimento de água mostrou-se um procedimento metodológico adequado e simples para a análise e o controle

operacional desses sistemas. Este procedimento pode ser incorporado a sistemas de controle automático de redes, em conjunto com sistemas de monitoramento e modelos de previsão de demandas em tempo real.

O trabalho desenvolvido nesta pesquisa mostrou que a utilização de um modelo de simulação de redes, para auxiliar de forma mais eficaz na operação, deve evoluir para o uso de uma ferramenta mais complexa, para se alcançar um controle automático e de maior eficiência. Esta ferramenta representaria o processo de tomada de decisão que, aliado ao modelo de simulação computacional, seria capaz de avaliar os impactos das estratégias de operação adotadas. Identificou-se neste trabalho algumas características importantes que a ferramenta de apoio deve apresentar para auxiliar no processo de tomada de decisão na operação de redes, que são: gráficos da linha piezométrica em toda a rede e da variação dos níveis dos reservatórios de distribuição ao longo do dia, alerta quando as restrições adotadas são violadas, capacidade de análise horária para as 24 horas seguintes de operação, ferramenta de otimização, e um sistema de representação das decisões a base de regras. Recomenda-se para trabalho futuro o desenvolvimento do SAD, baseado nestas considerações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALPEROVITS, E.; SHAMIR, U., Design of Optimal Water Distribution Systems. *Water Resources Research*, Vol. 13, Nº 6, p. 885-900, New York, NY, USA, 1977.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica, *Resolução 456* de 29/11/2000.
- AZEVEDO NETO, J. M.; ALVAREZ, G. A., *Manual de Hidráulica*, Vol. I, 7ª Edição. Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, SP, 1991.
- BARBOSA, P. S. F.; FRANCATO, A. L.; ALMEIDA, R., Algoritmos de Otimização para a Operação em Tempo Real de Sistemas Urbanos de Abastecimento de Água. *Anais do XIX Congresso Latino-americano de Hidráulica*, Tomo I, Córdoba, Argentina, 2000.
- BRAILEY, D.; JACOBS, A., Energy Management in the Waterworks Industry. *Journal National of England Water Works Association*, Vol. 94, Nº 3, p. 216-226, 1980. (*apud Ormsbee et al.*, 1989).
- BRAZ, H. M., Cálculo do Custo de Energia Elétrica no Modelo WADISO. Campina Grande, 2000. (Não publicado).
- BRION, L. M.; MAYS, L. W., Methodology for Optimal Operation of Pumping Stations in Water Distribution Systems. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 117, Nº 11, p. 1551-1569, New York, NY, USA, 1991.

- BURGI, P. H., Change in Emphasis for Hydraulic Research at Bureau of Reclamation. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124, N° 7, p. 658-661, New York, NY, USA, 1999.
- CABRERA, E., Uso Eficiente del Agua, Directrices y Herramientas. *Efficient Use Rationale On Water, Guidelines and Tools*, EURO Water, Valencia, Espanha, 1997. (apud Barbosa et al., 2000).
- CAGEPA, Companhia de Água e Esgotos da Paraíba. *Gerência Regional da Borborema, Divisão de Manutenção – DMAN*, 2000.
- CAVALCANTI, A. F., *Custo de Energia para Bombeamento na CAGEPA em Relação ao Preço da Água*, CAGEPA, Campina Grande, PB, 2000a. (Comunicação Pessoal).
- CAVALCANTI, A. F., *Tarifas de Água Cobradas pela CAGEPA*, CAGEPA, Campina Grande, PB, 2000b. (Comunicação Pessoal).
- CLINGENPEEL, W. H., Optimizing Pump Operating Cost. *Journal of American Water Works Association*, Vol. 75, N° 10, p. 502-509, 1983.
- COSGRIFF, G. O.; FORTE, P. E.; KENNEDY, M. A.; RUSSEL, J. V.; SMITH, R. D.; WEST, A. K., Interactive Computer Modeling, Monitoring, and Control of Melbourne's Water Supply System. *Water Resources Research*, Vol. 21, N° 2, p. 123-129, New York, NY, USA, 1985.
- CRAWLEY, P. D.; DANDY, G. C., Optimal Operation of Multiple-Reservoir System. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 119, N° 1, p. 1-17, New York, NY, USA, 1993.
- EPP, R.; FOWLER, A. G., Efficient Code for Steady-State Flows in Networks. *Journal of Hydraulic Division*, ASCE, Vol. 96, N°1, p. 43-56, New York, NY, USA, 1970.

- FIGUEIREDO, F. P. F. S., *Divisão de Manutenção-DMAN, CAGEPA*, Campina Grande, PB, 2000. (Comunicação Pessoal).
- FRANCATO, A. L.; BARBOSA, P. S. F., Operação Otimizada de Sistemas Urbanos de Abastecimento. *IV Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa – IV SILUSBA*, Coimbra, Portugal, 1999. (Em CD-ROM).
- FRANCATO, A. L.; BARBOSA, P. S. F.; SOLIANI, R., Um Modelo de Programação Não Linear para a Otimização da Operação de Sistemas Hidroelétricos. *XIX Congresso Latino-americano de Hidráulica*, Tomo I, p. 675-684. Córdoba, Espanha, 2000. (Em CD-ROM).
- GRATÃO, U.; PORTO, R. M., Análise de Desempenho de Válvulas de Pressão em uma Rede de Distribuição de Água. *V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, Vol. 1, p. 609-618, Natal, RN, 2000. (Em CD-ROM).
- HAMBERG, D.; SHAMIR, U., Schematic Models for Distribution Systems Design I: Combination Concept. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 114, N° 2, p. 129-162, New York, NY, USA, 1988.
- HWANG, N. H. C., *Fundamentos de Sistemas de Engenharia Hidráulica*. Prentice/Hall do Brasil, Rio de Janeiro, RJ, 1981.
- JARRIGE, P. A., Optimal Control of Water Distribution Networks. Technical Survey and Practical Applications, *In: Water Supply Systems State of the Art and Future Trends* by E. Cabrera and F. Martinez, Valencia, Spain, p. 319-329, 1993. (*apud* Francato e Barbosa, 1999).
- JOLLAND, G.; COHEN, G., Optimal Control of Water Distribution Network by Two Multilevel Methods. *Water Resources Research*, Vol. 16, p. 83-88, New York, NY, USA, 1980.

- JOWITT, P. W.; XU, C., Optimal Valves Control in Water-Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 116, N° 4, p. 455-472, New York, NY, USA, 1990.
- JOWITT, P. W.; GERMANOPOULOS, G., Optimal Pump Scheduling in Water-Supply Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 118, N° 4, p. 406-422, New York, NY, USA, 1992.
- KRAVOSAC, A. C. B.; SCOPIATO, G.; ELIAS FILHO, G.; COURA, S. P.; HAGUIUDA, C., A Automação de Processos em Instalação de Saneamento Básico Otimizando Procedimentos de Operação para Redução dos Gastos com Energia Elétrica, Operação e Manutenção. *XX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1999*. (Em CD-ROM).
- LANNUZEL, P.; ORTOLANO, L., Evaluation of Heuristic Program for Scheduling Treatment Plant Pumps. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 115, N° 4, p. 457-471, New York, NY, USA, 1989.
- LANSEY, K. E.; AWUMAH, K., Optimal Pump Operations Considering Pump Switches. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 120, N° 1, p. 17-35, New York, NY, USA, 1994.
- LANSEY, K. E.; DUAN, N.; MAYS, L. W.; TUNG, Y., Water Distribution System Design Under Uncertainties. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 115, N° 10, p. 1401-1419, New York, NY, USA, 1989.
- LANSEY, K. E.; MAYS, L. W., Optimization Model for Water Distribution System Design. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 115, N° 5, p. 630-645, New York, NY, USA, 1989.
- LEAL, A. F. *Estudo Comparativo de Métodos de Otimização de Redes Malhadas Pressurizadas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 1995.

- LEÓN, C.; MARTÍN, S.; ELENA, J. M.; LUQUE, J. EXPLORE – Hybrid Expert Systems for Water Networks Management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 126, N° 2, p. 65-74, New York, NY, USA, 2000.
- LITTLE, K. W.; McCRODDEN, B. J., Minimization of Raw Water Pumping Cost Using MILP. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 115, N° 4, p. 511-522, New York, NY, USA, 1989.
- NITIVATTANANON, V.; SADOWSKI, C. E.; QUIMPO, R. G., Optimization of Water Supply System Operation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 122, N° 5, p. 374-384, New York, NY, USA, 1996.
- ORMSBEE, L. E.; LANSEY, K. E., Optimal Control of Water Supply Pumping Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 120, N° 2, p. 237-252, New York, NY, USA, 1994.
- ORMSBEE, L. E.; REDDY, S. L., Nonlinear Heuristic for Pump Operations. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 121, N° 4, p. 302-309, New York, NY, USA, 1995.
- ORMSBEE, L. E.; WALSKI, T. M.; CHASE, D. V.; SHARP, W. W., Techniques for Improving Energy Efficiency at Water Supply Pumping Stations. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 113, N° 4, p. 348-364, New York, NY, USA, 1987.
- ORMSBEE, L. E.; WALSKI, T. M.; CHASE, D. V.; SHARP, W. W., Methodology for Improving Pump Operation Efficiency. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 115, N° 2, p. 148-164, New York, NY, USA, 1989.
- ORMSBEE, L. E.; WOOD, D. J., Hydraulic Design Algorithms for Pipe Networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 112, N° 12, p. 1195-1207, New York, NY, USA, 1986.

- PEZESHK, S.; HELWEG, O. J., Adaptive Search Optimization in Reducing Pump Operating Costs. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 122, N° 1, p. 57-63, New York, NY, USA, 1996.
- RIBEIRO, M. H., *Divisão de Manutenção-DMAN, CAGEPA*, Campina Grande, PB, 2001. (Comunicação Pessoal).
- SANTANA, G. C.; SOARES, S., Otimização da Operação de Sistemas de Abastecimento de Água. *Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Vol. 2, p. 547-554. ABRH. Vitória, ES, 1997. (Em CD-ROM).
- SANTANA, G. C., Otimização da Operação de Sistemas de Distribuição de Água Abastecidos por Bombeamento e Reservatórios de Regularização. *Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, UNICAMP*, Campinas, 184 p, 1999.
- SHAMIR, U.; HOWARD, C. D. D., Water Distribution Systems Analysis. *Journal of Hydraulic Division*, ASCE, Vol. 94, N°1, p. 219-234, New York, NY, USA, 1968.
- SILVA, F. G. B.; GRATÃO, U.; SANTOS, A.; REIS, L. F. R.; PORTO, R. M.; CHAUDHRY, F. H., Controle Operacional em Sistema de Distribuição de Água para Abastecimento Visando o Controle de Perdas: Experiência em Sub-Setores da Cidade de São Carlos, SP. *V Simpósio do Curso de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental da EESC-USP*, São Paulo, SP, 1999. (Em CD-ROM).
- TARQUIN, A. J.; DOWDY J., Optimal Pump Operation in Water Distribution. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 115, N°2, p. 158-168, New York, NY, USA, 1989.
- ULANICKI, B.; RANCE, J.P.; DAVIS, D.; CHEN, S., Computer-Aided Optimal Pump Selection for Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 119, N° 5, p. 542-562, New York, NY, USA, 1993.

- WALSKI, T. M.; BRILL, E. D.; GESSLER, J.; GOULTER, I. C. et al., Battle of the Network Models: Epilogue. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 113, N°2, p. 191-203, New York, NY, USA, 1987.
- WALSKI, T. M.; GESSLER, J.; SJOSTROM, J. W., *Water Distribution Systems: Simulation and Sizing*. Lewis Publishers, Michigan, USA, 1990.
- WOOD, D. J.; CHARLES, C., Hydraulic Network Analysis Using Linear Theory. *Journal of Hydraulic Division*, ASCE, Vol. 98, N°7, p. 1157-1170, New York, NY, USA, 1972.
- YEH, W.; BECKER, L.; HUA, S. Q.; WEN, D. P.; LIU, J. M., Optimization of Real-Time Hydrothermal System Operation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 118, N°6, p. 636-653, New York, NY, USA, 1992.
- YU, G.; POWELL, R. S.; STERLING, M. J. H., Optimized Pump Scheduling in Water Distribution Systems, *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 83, N°3, p. 463-488, 1994. (*apud* Santana, 1999).
- ZESSLER, U.; SHAMIR, U., Optimal Operation of Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 115, N°6, p. 735-752, New York, NY, USA, 1989.

ANEXO I

Tabela A1a – Tarifa convencional de energia (CELB, 2000)

TARIFA CONVENCIONAL		
SUBGRUPO	DEMANDA	CONSUMO
	(R\$/kW)	(R\$/MWh)
A2 (88 A 138 kV)	12,81	32,24
A3 (69kV)	13,82	34,76
A3a (30kV A 44kV)	4,79	70,16
A4 (2,3kV A 25kV)	4,96	72,74
AS (Subterrâneo)	7,33	76,13
B1-RESIDENCIAL		140,58
B1-RESIDENCIAL BAIXA RENDA		
Consumo mensal até 30 kWh		49,21
Consumo mensal de 31 a 100 kWh		84,34
Consumo mensal de 101 a 140 kWh		126,53
B2-RURAL		82,73
B2-COOPERATIVA DE ELETRIFICAÇÃO RURAL		58,44
B2-SEERVIÇO DE IRRIGAÇÃO		76,09
B3-DEMAIS CLASSES		131,97
B4-ILUMINAÇÃO PÚBLICA		
B4a-Rede de Distribuição		68,01
B4b-Bulbo da Lâmpada		74,65
B4c-Nível de IP acima do padrão		110,56

Tabela A1b – Tarifa horo-sazonal de energia – demanda (CELB, 2000)

TARIFA HORO-SAZONAL AZUL		
SEGMENTO HORÁRIO SUBGRUPO	DEMANDA (R\$/kW)	
	PONTA	FORA DE PONTA
	17:00 - 20:00	
A1 (230 Kv ou mais)	7,52	1,56
A2 (88 A 138 kV)	8,08	1,86
A3 (69kV)	10,84	2,96
A3a (30kV A 44kV)	12,66	4,23
A4 (2,3kV A 25kV)	13,13	4,38
AS (Subterrâneo)	13,74	6,73

Tabela A1c – Tarifa horo-sazonal de energia – consumo (CELB, 2000)

TARIFA HORO-SAZONAL AZUL		
SEGUIMENTO SAZONAL SUBGRUPAL	CONSUMO (R\$/MWh)	
	PONTA	
	SECA	ÚMIDA
A1 (230 Kv ou mais)	42,79	37,42
A2 (88 A 138 kV)	45,33	42,28
A3 (69kV)	51,36	45,54
A3a (30kV A 44kV)	83,06	76,88
A4 (2,3kV A 25kV)	86,12	79,7
AS (Subterrâneo)	90,13	83,41
	FORA DA PONTA	
	SECA	ÚMIDA
A1 (230 Kv ou mais)	30,27	35,74
A2 (88 A 138 kV)	32,48	29,8
A3 (69kV)	35,38	30,54
A3a (30kV A 44kV)	39,50	34,93
A4 (2,3kV A 25kV)	40,94	36,18
AS (Subterrâneo)	42,84	37,87

Tabela A1d – Tarifa horo-sazonal de energia – demanda (CELB, 2000)

TARIFA HORA-SAZONAL AZUL		
SEGUIMENTO HORO-SAZONAL SUBGRUPAL	DEMANDA (R\$/kW)	
	PONTA	FORA DA PONTA
	SECA OU ÚMIDA	SECA OU ÚMIDA
A1 (230 Kv ou mais)	27,86	5,85
A2 (88 A 138 kV)	29,92	6,84
A3 (69kV)	40,18	10,97
A3a (30kV A 44kV)	42,6	14,2
A4 (2,3kV A 25kV)	39,39	13,13
AS (Subterrâneo)	41,24	20,13

Tabela A2– Pressão nos nós da rede, simulação 1

Hora	Pressões(m.c.a)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	156,5	19,1	27,9	32,0	38,1	21,1	16,6	21,8	14,3
1	43,5	20,4	29,3	34,0	40,1	23,8	19,3	25,2	17,0
2	40,1	19,1	28,6	36,1	42,9	28,6	24,8	38,8	33,3
3	40,1	18,4	28,6	36,1	42,9	28,6	24,8	38,8	33,3
4	39,5	18,4	27,9	36,1	42,9	27,9	24,1	38,8	32,7
5	39,5	18,4	27,9	35,4	42,2	27,9	24,1	38,1	32,7
6	156,5	19,7	29,9	37,4	44,2	29,3	26,1	40,1	34,7
7	41,5	20,4	29,9	37,4	44,2	29,9	26,1	40,8	34,7
8	41,5	20,4	29,9	37,4	44,2	29,9	26,1	40,1	34,7
9	40,8	19,7	29,3	36,7	43,5	28,6	25,5	39,5	34,0
10	40,1	19,1	28,6	36,1	42,9	28,6	24,8	38,8	33,3
11	155,8	18,4	26,5	30,6	36,7	19,7	15,2	20,4	15,0
12	156,5	19,7	27,9	32,0	37,4	21,1	16,6	21,1	15,0
13	41,5	20,4	28,6	32,7	38,8	21,8	17,3	22,5	14,3
14	155,8	18,4	26,5	30,6	36,7	19,7	15,2	20,4	14,3
15	156,5	19,1	27,2	32,0	38,1	21,1	16,6	22,5	14,3
16	156,5	20,4	28,6	33,3	38,8	22,5	18,0	23,1	15,0
17	40,1	18,4	27,2	31,3	37,4	21,1	16,6	21,8	14,3
18	156,5	19,7	29,3	36,7	43,5	29,3	25,5	39,5	34,0
19	41,5	20,4	29,9	37,4	44,2	29,9	26,1	40,1	34,7
20	41,5	19,7	29,9	37,4	44,2	29,9	26,1	40,1	34,7
21	40,8	19,7	29,3	37,4	43,5	29,3	25,5	40,1	34,0
22	40,8	19,7	29,3	36,7	43,5	29,3	25,5	39,5	34,0
23	40,8	19,1	28,6	36,7	43,5	28,6	24,8	39,5	33,3
24	40,1	19,1	28,6	36,7	43,5	28,6	24,8	39,5	33,3

Tabela A2 – Pressão nos nós da rede, simulação 1 (continuação)

Pressões(m.c.a)									
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
2,0	83,0	15,7	12,9	2,0	132,0	15,0	21,8	42,2	25,9
9,5	87,1	17,0	15,7	25,2	146,3	15,7	23,1	42,9	26,5
29,9	67,4	18,4	59,2	122,5	102,1	16,3	23,1	43,5	27,2
29,3	67,4	17,7	59,2	122,5	102,1	15,7	23,1	42,9	26,5
29,3	67,4	17,7	59,2	121,8	102,1	15,7	23,1	42,9	26,5
29,3	66,7	17,7	59,2	121,8	101,4	15,0	21,1	40,1	23,8
30,6	66,7	17,7	58,5	121,8	100,7	14,3	20,4	39,5	23,1
31,3	66,7	17,0	58,5	121,1	100,0	14,3	19,7	38,8	21,1
31,3	66,0	17,0	57,8	121,1	99,3	13,6	19,7	38,1	20,4
29,9	64,6	15,7	13,6	23,1	144,3	13,6	15,0	29,9	15,0
29,9	62,6	13,6	12,2	22,5	144,3	13,6	14,3	30,6	15,7
4,8	83,0	13,6	12,9	22,5	144,3	13,6	12,9	25,9	13,6
6,1	83,7	14,3	13,6	23,1	144,3	14,3	13,6	25,9	14,3
6,8	84,4	15,0	13,6	23,1	144,9	14,3	13,6	25,9	14,3
5,4	84,4	15,7	14,3	23,8	144,9	14,3	13,6	26,5	15,0
6,8	85,7	16,3	15,0	24,5	145,6	15,0	16,3	31,3	15,7
7,5	86,4	17,0	15,7	24,5	145,6	15,0	17,0	32,0	16,3
6,8	86,4	17,7	16,3	25,2	146,3	15,7	17,0	32,0	16,3
30,6	66,7	17,7	16,3	25,9	147,0	16,3	19,7	36,7	18,4
31,3	66,0	16,3	57,8	120,4	102,1	15,7	19,7	36,1	17,7
31,3	65,3	16,3	57,2	120,4	101,4	15,0	21,1	40,1	23,1
30,6	65,3	15,7	57,2	119,8	100,7	15,0	20,4	39,5	22,5
30,6	65,3	15,7	57,2	119,8	100,0	14,3	20,4	38,8	21,8
29,9	64,6	15,7	56,5	119,8	100,0	13,6	19,7	38,8	21,8
29,9	64,6	15,0	56,5	119,8	99,3	13,6	20,4	40,8	23,1

Tabela A3 – Pressão nos nós da rede, simulação 5

Hora	Pressões(m.c.a)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	156,5	19,1	27,9	32,0	38,1	21,1	15,7	19,7	13,6
1	40,8	19,7	28,6	33,3	39,5	23,1	17,7	24,5	16,3
2	40,1	19,1	28,6	36,1	42,9	28,6	23,8	38,8	33,3
3	40,1	18,4	28,6	36,1	42,9	28,6	23,8	38,8	33,3
4	39,5	18,4	27,9	36,1	42,9	27,9	23,1	38,8	32,7
5	39,5	18,4	27,9	35,4	42,2	27,9	23,1	38,1	32,7
6	156,5	19,7	29,3	37,4	44,2	29,3	24,5	40,1	34,0
7	41,5	19,7	29,3	37,4	44,2	29,3	24,5	40,1	34,0
8	40,8	19,1	29,3	36,7	43,5	29,3	24,5	40,1	34,0
9	40,1	18,4	28,6	36,1	42,9	28,6	23,8	38,8	33,3
10	155,8	19,7	26,5	31,3	36,7	20,4	15,0	21,1	15,0
11	156,5	19,7	27,2	32,0	37,4	21,1	15,0	21,1	15,0
12	40,8	18,4	27,9	32,0	38,1	21,1	15,7	21,8	15,7
13	155,8	19,1	26,5	30,6	36,7	19,7	14,3	20,4	15,0
14	41,5	19,1	27,2	32,0	37,4	21,1	15,7	21,8	15,7
15	40,8	19,7	27,9	32,7	38,1	21,8	16,3	22,5	16,3
16	155,8	18,4	26,5	31,3	37,4	20,4	15,0	21,8	17,0
17	41,5	20,4	29,9	37,4	44,2	29,3	24,5	40,1	34,0
18	40,8	19,7	29,3	36,7	43,5	29,3	24,5	39,5	34,0
19	40,8	19,1	29,3	36,7	43,5	28,6	23,8	39,5	33,3
20	40,1	19,1	28,6	36,1	42,9	28,6	23,8	39,5	33,3
21	39,5	18,4	26,5	31,3	37,4	21,1	15,7	21,8	14,3
22	156,5	19,7	27,9	32,7	38,8	22,5	17,0	23,1	15,7
23	40,8	19,7	27,9	33,3	38,8	23,1	17,0	23,8	16,3
24	40,1	19,1	28,6	36,7	43,5	28,6	23,8	39,5	33,3

Tabela A3 – Pressão nos nós da rede, simulação 5 (continuação)

Pressões(m.c.a)									
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
2,0	83,0	15,7	15,8	2,0	132,0	15,7	22,5	44,9	27,2
8,8	86,4	17,0	57,8	121,1	102,1	16,3	23,8	45,6	27,9
29,9	67,4	17,7	59,2	121,8	101,4	16,3	23,1	45,6	27,9
29,3	67,4	17,7	59,2	121,8	101,4	15,7	23,1	44,9	27,2
29,3	66,7	17,7	58,5	121,8	101,4	15,7	23,1	44,9	27,2
29,3	66,7	17,0	58,5	121,1	100,7	15,0	21,1	42,2	23,8
30,6	66,7	17,0	58,5	121,1	100,0	14,3	20,4	41,5	23,1
30,6	66,0	17,0	57,8	121,1	99,3	13,6	19,7	40,8	22,5
30,6	65,3	15,7	14,3	23,1	144,3	14,3	20,4	41,5	23,1
29,9	63,3	13,6	12,9	22,5	144,3	15,0	16,3	33,3	14,3
5,4	83,7	13,6	12,9	23,1	144,3	15,0	17,0	34,0	15,0
6,1	83,7	14,3	13,6	23,1	144,9	15,0	14,3	29,3	12,9
6,1	84,4	15,0	13,6	23,8	144,9	15,7	15,0	29,3	13,6
5,4	84,4	15,7	14,3	23,8	145,6	15,7	15,0	29,9	13,6
6,1	85,1	16,3	15,0	24,5	145,6	15,7	15,0	29,9	13,6
7,5	85,7	17,0	15,7	25,2	146,3	16,3	17,7	34,7	15,0
6,8	85,7	17,7	58,5	121,8	101,4	16,3	17,7	34,7	15,7
30,6	66,7	17,7	58,5	121,8	100,7	15,0	17,0	34,0	14,3
30,6	66,7	17,0	58,5	121,1	100,0	14,3	17,7	36,7	17,0
29,9	65,3	15,7	14,3	23,1	144,3	14,3	17,7	36,7	17,0
29,9	64,0	14,3	13,6	23,1	144,9	15,0	21,1	42,2	23,8
6,1	83,7	13,6	12,9	23,1	144,9	15,7	21,8	42,9	24,5
7,5	85,1	15,0	56,5	119,1	101,4	16,3	22,5	42,9	24,5
8,8	87,1	17,7	58,5	121,8	101,4	15,7	21,8	42,9	24,5
29,9	67,4	17,7	59,2	121,8	100,7	15,7	22,5	44,9	27,2

Tabela A4 – Pressão nos nós da rede, simulação 8

Hora	Pressões(m.c.a)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	156,5	19,1	27,9	32,0	38,1	21,1	15,0	19,7	12,9
1	41,5	20,4	29,9	38,1	44,9	29,9	24,5	40,8	34,7
2	41,5	20,4	28,6	34,0	40,1	23,8	24,5	24,5	16,3
3	40,1	18,4	27,9	36,1	42,9	27,9	22,5	38,8	33,3
4	39,5	18,4	27,9	36,1	42,9	27,9	22,5	38,8	32,7
5	41,5	20,4	29,9	38,1	44,9	29,9	24,5	40,8	34,7
6	41,5	20,4	29,9	37,4	44,2	29,9	24,5	40,1	34,7
7	41,5	19,7	29,9	37,4	44,2	29,3	24,5	40,1	34,7
8	40,8	19,7	29,3	36,7	43,5	29,3	23,8	40,1	34,0
9	40,1	19,1	27,2	32,0	37,4	21,1	15,0	21,1	13,6
10	156,5	19,1	27,2	31,3	37,4	21,1	15,0	21,8	14,3
11	156,5	19,7	27,9	32,0	38,1	21,8	15,0	21,8	14,3
12	40,8	19,1	27,2	31,3	37,4	21,1	14,3	21,1	14,3
13	156,5	19,1	28,6	36,1	42,9	27,9	22,5	38,8	32,7
14	41,5	20,4	29,9	37,4	44,2	29,3	23,8	40,1	34,0
15	155,8	18,4	26,5	31,3	36,7	20,4	14,3	21,1	13,6
16	156,5	19,7	27,9	32,0	38,1	21,8	15,0	21,8	14,3
17	41,5	20,4	28,6	32,7	38,8	15,0	16,3	23,1	15,7
18	40,1	19,1	28,6	36,7	42,9	28,6	23,1	39,5	33,3
19	40,1	19,1	28,6	36,1	42,9	27,9	23,1	38,8	33,3
20	155,8	18,4	27,2	32,0	38,1	21,8	15,0	22,5	14,3
21	156,5	19,7	29,3	37,4	44,2	29,3	23,8	40,1	34,0
22	41,5	20,4	29,9	37,4	44,2	29,9	24,5	40,8	34,7
23	41,5	20,4	29,9	37,4	44,2	29,9	24,5	40,1	34,7
24	41,5	19,7	29,9	37,4	44,2	29,9	24,5	40,1	34,7

Tabela A4 – Pressão nos nós da rede, simulação 8 (continuação)

Pressões(m.c.a)									
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
2,0	83,0	13,6	9,5	2,0	132,0	14,3	21,1	42,2	25,9
31,3	63,3	13,6	13,6	23,8	145,6	15,0	22,5	42,9	26,5
8,2	84,4	15,7	54,4	117,7	102,1	15,7	22,5	43,5	27,2
29,3	65,3	17,7	57,2	119,8	102,1	15,0	22,5	42,9	26,5
29,3	65,3	17,7	57,2	119,8	102,1	15,0	22,5	42,9	26,5
31,3	64,6	17,7	56,5	119,8	101,4	14,3	20,4	40,1	23,1
31,3	64,6	17,0	56,5	119,1	100,7	13,6	19,7	39,5	22,5
30,6	64,0	17,0	56,5	119,1	100,0	13,6	19,1	38,8	21,8
30,6	64,0	16,3	55,8	119,1	99,3	12,9	19,1	38,1	21,1
5,4	83,0	15,7	12,2	22,5	143,6	12,9	14,3	29,9	15,7
6,1	83,7	16,3	12,9	22,5	144,3	12,9	15,0	30,6	16,3
6,1	84,4	16,3	13,6	23,1	144,3	12,9	12,9	25,9	12,9
6,1	84,4	17,0	13,6	23,1	144,9	13,6	12,9	25,9	12,9
29,3	64,6	17,7	14,3	23,8	144,9	13,6	13,6	25,9	13,6
30,6	63,3	15,7	12,9	23,1	144,3	13,6	13,6	26,5	13,6
5,4	83,7	16,3	12,9	23,1	144,9	14,3	15,7	31,3	18,4
6,1	84,4	17,0	13,6	23,8	145,6	14,3	16,3	32,0	19,1
7,5	85,1	17,7	14,3	24,5	145,6	15,0	16,3	32,0	18,4
29,9	64,0	17,0	14,3	24,5	146,3	15,7	19,1	36,7	23,8
29,3	63,3	15,7	55,1	117,7	102,1	15,0	19,1	36,7	23,8
6,8	83,7	15,7	55,1	117,7	101,4	15,0	20,4	40,1	27,2
30,6	65,3	17,7	57,2	119,8	100,7	14,3	20,4	39,5	26,5
31,3	64,6	17,7	56,5	119,8	100,7	13,6	19,7	39,5	26,5
31,3	64,6	17,0	56,5	119,1	100,0	12,9	19,1	38,8	25,2
31,3	64,6	17,0	56,5	119,1	99,3	12,9	20,4	40,8	27,9

Tabela A5 – Pressão nos nós da rede, simulação 17

Hora	Pressões(m.c.a)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	156,5	19,1	27,9	32,0	38,1	21,1	16,3	21,1	11,6
1	40,8	19,7	28,6	33,3	39,5	23,1	17,0	24,5	16,3
2	39,5	18,4	27,9	35,4	42,2	27,9	23,1	38,8	32,7
3	39,5	18,4	27,9	35,4	42,2	27,9	23,1	38,8	32,7
4	156,5	19,1	29,3	36,7	43,5	29,3	25,2	39,5	34,0
5	41,5	20,4	29,9	37,4	44,2	29,9	31,3	40,1	34,7
6	40,8	19,7	29,3	37,4	44,2	29,3	24,5	40,1	34,0
7	40,8	19,7	29,3	36,7	43,5	29,3	24,5	39,5	34,0
8	40,8	19,1	29,3	36,7	43,5	28,6	24,5	39,5	34,0
9	40,1	19,1	28,6	36,1	42,9	27,9	16,3	38,8	32,7
10	155,8	18,4	26,5	31,3	36,7	20,4	15,0	21,1	13,6
11	156,5	19,7	27,9	32,0	37,4	21,1	15,0	21,1	13,6
12	40,8	19,7	27,9	32,0	38,1	21,1	15,7	21,8	14,3
13	155,8	18,4	26,5	30,6	36,7	19,7	14,3	20,4	13,6
14	156,5	19,1	27,2	32,0	37,4	21,1	15,7	21,8	14,3
15	40,8	19,7	27,9	32,7	38,1	21,8	16,3	22,5	15,0
16	155,8	18,4	26,5	31,3	37,4	20,4	15,0	21,8	14,3
17	41,5	20,4	29,9	37,4	44,2	29,3	24,5	40,1	34,0
18	40,8	19,7	29,3	36,7	43,5	29,3	24,5	40,1	34,0
19	40,8	19,1	29,3	36,7	43,5	28,6	23,8	39,5	33,3
20	40,1	19,1	28,6	36,7	42,9	28,6	23,8	39,5	33,3
21	40,1	19,1	28,6	36,1	42,9	28,6	23,8	38,8	33,3
22	156,5	19,1	27,2	32,0	38,1	21,8	16,3	22,5	14,3
23	156,5	20,4	28,6	33,3	39,5	23,1	17,7	24,5	16,3
24	40,1	19,1	28,6	36,7	43,5	28,6	23,8	39,5	33,3

Tabela A5 – Pressão nos nós da rede, simulação 17 (continuação)

Pressões(m.c.a)									
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
2,0	83,0	15,7	4,8	2,0	132,0	15,0	21,1	42,2	25,9
8,8	86,4	17,0	15,7	25,2	146,3	15,7	22,5	42,9	26,5
29,3	67,4	17,7	59,2	121,8	102,1	16,3	22,5	43,5	27,2
29,3	66,7	17,7	59,2	121,8	102,1	15,7	22,5	42,9	26,5
30,6	66,7	17,7	58,5	121,8	102,1	15,7	22,5	42,9	26,5
31,3	66,7	17,0	58,5	121,1	101,4	15,0	20,4	40,1	23,1
30,6	66,7	17,0	58,5	121,1	100,7	14,3	19,7	39,5	22,5
30,6	66,0	17,0	57,8	121,1	100,0	14,3	19,1	38,8	21,8
29,9	65,3	15,7	14,3	23,8	144,9	14,3	19,7	38,8	21,8
29,3	63,3	14,3	12,9	23,1	144,9	14,3	15,7	31,3	17,0
5,4	83,7	13,6	12,9	23,1	144,9	15,0	15,7	31,3	17,0
5,4	83,7	14,3	13,6	23,8	144,9	15,0	13,6	27,2	13,6
6,1	84,4	15,0	13,6	23,8	145,6	15,0	13,6	27,2	13,6
5,4	84,4	15,7	14,3	24,5	145,6	15,0	13,6	27,2	13,6
6,1	85,1	15,7	15,0	24,5	145,6	15,7	14,3	27,2	14,3
7,5	85,7	16,3	15,7	25,2	146,3	15,7	17,0	32,7	17,0
6,8	85,7	17,0	16,3	25,9	147,0	16,3	17,0	32,7	17,0
30,6	66,0	17,0	57,8	121,1	102,1	15,7	17,0	32,7	17,0
30,6	66,0	16,3	57,8	120,4	100,7	15,0	17,7	35,4	19,1
29,9	65,3	15,7	57,2	119,8	100,0	13,6	17,0	34,7	18,4
29,9	64,6	15,0	13,6	23,1	144,9	14,3	19,7	38,8	23,8
29,9	62,6	13,6	12,9	23,1	144,9	15,0	20,4	40,1	25,2
6,8	84,4	14,3	13,6	23,8	145,6	15,7	21,1	40,8	24,5
8,8	86,4	16,3	57,2	120,4	102,1	15,7	21,1	40,8	24,5
29,9	66,7	17,7	58,5	121,8	102,1	15,7	22,5	42,9	27,2

Tabela A6 – Pressão nos nós da rede, simulação 21

Hora	Pressões(m.c.a)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	156,5	19,1	27,9	32,0	38,1	21,1	16,3	21,1	14,3
1	40,8	19,7	28,6	33,3	39,5	23,1	18,4	25,9	17,7
2	156,5	19,1	29,3	36,7	43,5	29,3	25,2	39,5	34,0
3	41,5	20,4	29,9	37,4	44,2	29,9	25,9	40,8	34,7
4	41,5	20,4	29,9	37,4	44,2	29,9	25,9	40,1	34,7
5	40,8	19,7	29,3	37,4	44,2	29,3	25,2	40,1	34,0
6	40,8	19,7	29,3	36,7	43,5	29,3	25,2	39,5	34,0
7	40,8	19,1	29,3	36,7	43,5	28,6	24,5	39,5	34,0
8	40,1	19,1	28,6	36,1	42,9	28,6	24,5	39,5	33,3
9	39,5	18,4	27,9	35,4	42,2	27,9	23,8	38,1	32,7
10	156,5	19,1	27,2	32,0	38,1	21,1	16,3	21,8	14,3
11	155,8	18,4	26,5	30,6	38,1	21,8	16,3	21,8	14,3
12	156,5	19,7	27,9	32,0	36,7	20,4	15,0	21,1	13,6
13	40,8	19,1	27,2	32,0	38,1	21,1	16,3	21,8	14,3
14	156,5	19,1	27,2	32,0	37,4	21,1	16,3	21,8	14,3
15	42,2	20,4	29,9	38,1	37,4	21,1	16,3	22,5	15,0
16	41,5	20,4	29,9	37,4	44,2	29,9	25,9	40,8	34,7
17	40,8	19,7	29,3	36,7	44,2	29,3	25,2	40,1	34,0
18	40,8	19,1	28,6	36,7	43,5	29,3	25,2	39,5	34,0
19	40,1	19,1	28,6	36,1	43,5	28,6	24,5	39,5	33,3
20	155,8	18,4	27,2	32,0	42,9	28,6	24,5	39,5	33,3
21	156,5	19,7	28,6	33,3	38,1	21,8	17,0	22,5	14,3
22	40,1	19,1	28,6	36,1	39,5	23,1	18,4	23,8	15,7
23	40,1	19,1	28,6	36,1	42,9	28,6	24,5	38,8	33,3
24	40,1	19,1	28,6	36,1	42,9	28,6	24,5	38,8	33,3

Tabela A6 – Pressão nos nós da rede, simulação 21 (continuação)

Pressões(m.c.a)									
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
2,0	83,0	15,7	11,6	2,0	84,4	12,2	18,4	40,8	23,8
8,8	86,4	17,0	15,7	25,2	146,3	12,9	19,7	41,5	24,5
30,6	67,4	17,7	59,2	122,5	102,1	16,3	19,7	41,5	25,2
31,3	67,4	17,7	59,2	121,8	101,4	16,3	19,7	41,5	25,2
31,3	67,4	17,7	59,2	121,8	101,4	14,3	19,7	40,8	25,2
30,6	66,7	17,7	58,5	121,8	100,7	14,3	19,1	38,1	21,1
30,6	66,7	17,0	58,5	121,1	100,0	13,6	17,7	37,4	20,4
29,9	66,7	17,0	58,5	121,1	100,0	13,6	16,3	37,4	20,4
29,9	65,3	16,3	14,3	23,8	144,9	13,6	16,3	37,4	20,4
29,3	63,3	14,3	12,9	23,1	144,3	14,3	13,6	29,3	14,3
6,1	84,4	14,3	13,6	23,1	144,9	14,3	14,3	29,9	14,3
6,8	84,4	15,0	13,6	23,8	144,9	15,0	13,6	25,2	13,6
5,4	84,4	15,7	14,3	23,8	145,6	15,0	14,3	25,2	13,6
6,8	85,1	16,3	15,0	24,5	145,6	15,0	14,3	25,9	13,6
6,8	85,7	17,0	15,0	24,5	145,6	15,0	14,3	25,9	13,6
6,8	85,7	17,0	15,7	25,2	146,3	15,7	34,0	30,6	15,7
31,3	66,7	17,0	15,7	25,2	146,3	15,7	15,7	31,3	15,7
30,6	65,3	16,3	57,2	120,4	101,4	15,0	15,0	30,6	19,7
30,6	65,3	15,7	57,2	119,8	100,7	14,3	16,3	33,3	17,0
29,9	64,6	15,7	56,5	119,8	99,3	13,6	15,0	32,7	16,3
29,9	63,3	14,3	12,9	16,3	144,3	13,6	17,0	37,4	21,8
6,8	84,4	15,0	13,6	23,8	144,9	14,3	17,7	38,8	23,1
8,2	85,7	15,7	15,0	24,5	146,3	15,0	18,4	39,5	23,8
29,9	67,4	17,7	59,2	121,8	101,4	15,0	18,4	38,8	23,1
29,9	67,4	17,7	59,2	121,8	101,4	13,6	19,1	40,8	25,9

Tabela A7 – Pressão nos nós da rede, simulação 2

Hora	Pressões(m.c.a)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	156,5	19,1	27,9	32,0	38,1	21,1	15,7	19,7	15,0
1	155,8	18,4	27,2	32,7	38,8	22,5	17,0	23,8	17,7
2	40,1	18,4	28,6	36,1	42,9	28,6	23,8	38,8	35,4
3	40,1	18,4	27,9	36,1	42,9	27,9	23,1	38,8	35,4
4	39,5	18,4	27,9	36,1	42,9	27,9	23,1	38,8	34,7
5	39,5	18,4	27,9	35,4	42,2	27,9	23,1	38,1	34,7
6	42,2	20,4	30,6	38,1	44,9	29,9	25,2	40,8	36,7
7	41,5	20,4	29,9	37,4	44,2	29,9	25,2	40,8	36,7
8	41,5	20,4	29,9	37,4	44,2	29,9	25,2	40,1	36,7
9	40,8	19,7	29,3	36,7	43,5	28,6	24,5	39,5	36,1
10	40,1	19,1	28,6	36,1	42,9	28,6	23,8	38,8	35,4
11	155,8	18,4	26,5	30,6	36,7	19,7	15,0	20,4	15,0
12	40,1	19,1	27,2	31,3	36,7	20,4	15,0	21,1	15,7
13	155,8	18,4	26,5	31,3	36,7	20,4	15,0	21,1	15,7
14	39,5	18,4	26,5	30,6	36,7	20,4	14,3	21,1	15,7
15	156,5	19,1	27,2	32,0	37,4	21,1	15,7	21,8	16,3
16	155,8	17,7	25,9	30,6	36,7	20,4	15,0	21,1	16,3
17	156,5	19,1	27,2	32,0	38,1	21,1	15,7	22,5	17,0
18	39,5	18,4	27,9	35,4	42,2	27,9	23,1	38,1	34,7
19	40,8	19,1	28,6	36,7	43,5	28,6	23,8	39,5	35,4
20	40,1	19,1	28,6	36,1	42,9	28,6	23,8	39,5	35,4
21	40,1	18,4	28,6	36,1	42,9	28,6	23,8	38,8	35,4
22	39,5	18,4	27,9	36,1	42,9	27,9	23,1	38,8	34,7
23	39,5	18,4	27,9	35,4	42,2	27,9	23,1	38,1	34,7
24	40,8	19,7	29,3	36,7	43,5	29,3	24,5	39,5	36,1

Tabela A7 – Pressão nos nós da rede, simulação 2 (continuação)

Pressões(m.c.a)									
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
2,0	83,0	13,6	15,8	2,0	132,0	15,0	21,8	42,2	25,9
8,2	86,4	15,0	15,7	25,2	146,3	15,7	23,1	42,9	26,5
29,9	67,4	16,3	59,2	122,5	102,1	16,3	23,1	43,5	27,2
29,3	67,4	15,7	59,2	122,5	102,1	15,7	23,1	42,9	26,5
29,3	67,4	15,7	59,2	121,8	102,1	15,7	23,1	42,9	26,5
29,3	67,4	15,7	59,2	121,8	101,4	15,0	21,1	40,1	23,1
31,3	66,7	15,7	58,5	121,8	100,7	14,3	20,4	39,5	22,5
31,3	66,7	15,0	58,5	121,1	100,0	14,3	19,7	38,8	21,8
31,3	66,0	15,0	57,8	121,1	99,3	13,6	19,7	38,1	21,1
29,9	64,6	13,6	13,6	23,1	144,3	13,6	15,0	29,9	15,0
29,9	62,6	12,9	12,2	22,5	144,3	13,6	15,7	30,6	14,3
4,8	83,0	12,9	12,9	22,5	144,3	13,6	12,9	25,9	12,9
5,4	83,7	13,6	13,6	23,1	144,3	14,3	13,6	25,9	13,6
5,4	84,4	13,6	13,6	23,1	144,9	14,3	13,6	25,9	13,6
5,4	84,4	14,3	14,3	23,8	144,9	14,3	13,6	26,5	13,6
6,8	85,1	15,0	15,0	24,5	145,6	15,0	16,3	31,3	12,9
6,1	85,7	15,0	15,7	24,5	145,6	15,0	17,0	32,0	13,6
6,8	86,4	15,7	15,7	25,2	146,3	15,7	17,0	32,0	13,6
28,6	67,4	15,7	16,3	25,9	147,0	16,3	19,7	36,7	19,7
29,9	66,0	14,3	57,8	120,4	102,1	15,7	19,7	36,1	19,1
29,9	66,0	14,3	57,8	120,4	101,4	15,0	21,1	40,1	23,8
29,9	65,3	14,3	57,2	120,4	100,7	15,0	21,1	39,5	23,1
29,3	65,3	13,6	57,2	119,8	100,0	14,3	20,4	38,8	21,8
29,3	64,6	13,6	57,2	119,8	100,0	13,6	19,7	38,8	21,8
30,6	64,6	13,6	56,5	119,8	99,3	13,6	20,4	40,8	24,5

Tabela A8 – Pressão nos nós da rede, simulação 18

Hora	Pressões(m.c.a)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	156,5	19,1	27,9	32,0	38,1	21,1	13,6	19,7	14,3
1	40,8	19,7	28,6	33,3	39,5	23,1	15,7	24,5	19,7
2	40,1	19,1	28,6	36,1	42,9	28,6	21,8	38,8	34,7
3	40,1	18,4	28,6	36,1	42,9	28,6	21,8	38,8	34,7
4	39,5	18,4	27,9	36,1	42,9	27,9	21,1	38,8	34,0
5	41,5	20,4	29,9	37,4	44,2	29,9	23,1	40,1	36,1
6	41,5	19,7	29,3	37,4	44,2	29,3	22,5	40,1	35,4
7	40,8	19,7	29,3	36,7	43,5	29,3	22,5	40,1	35,4
8	40,8	19,7	29,3	36,7	43,5	29,3	22,5	39,5	35,4
9	40,1	19,1	28,6	36,1	42,9	27,9	21,8	38,8	34,7
10	155,8	18,4	26,5	31,3	37,4	20,4	12,9	21,1	16,3
11	156,5	19,7	27,9	32,0	37,4	21,1	13,6	21,8	17,0
12	40,8	19,1	27,2	32,0	37,4	21,1	12,9	21,1	17,0
13	156,5	19,1	27,2	31,3	37,4	20,4	12,9	2,0	16,3
14	156,5	19,7	27,9	32,0	38,1	21,8	13,6	90,5	17,7
15	40,1	18,4	26,5	31,3	37,4	21,1	12,9	21,8	17,0
16	41,5	20,4	29,9	37,4	44,2	29,9	23,1	40,1	36,1
17	41,5	19,7	29,3	36,7	43,5	29,3	22,5	40,1	35,4
18	155,8	18,4	26,5	31,3	37,4	21,1	12,9	21,8	17,0
19	156,5	19,7	27,9	32,7	38,8	22,5	14,3	23,1	17,7
20	41,5	20,4	29,9	37,4	44,2	29,9	23,1	40,8	36,1
21	41,5	20,4	29,9	37,4	44,2	29,9	23,1	40,1	36,1
22	40,8	19,7	29,3	37,4	44,2	29,3	22,5	40,1	35,4
23	40,8	19,7	29,3	36,7	43,5	29,3	22,5	39,5	35,4
24	40,8	19,7	29,3	36,7	43,5	29,3	22,5	39,5	35,4

Tabela A8 – Pressão nos nós da rede, simulação 18 (continuação)

Pressões(m.c.a)									
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
2,0	83,0	15,0	4,8	2,0	132,0	15,0	21,8	42,2	25,2
8,8	86,4	16,3	15,7	25,2	146,3	15,7	23,1	42,9	25,9
29,9	66,7	17,0	58,5	121,8	102,1	15,7	23,1	42,9	25,9
29,9	66,7	16,3	58,5	121,1	101,4	15,7	23,1	42,9	25,9
29,3	66,7	16,3	58,5	121,1	101,4	15,0	22,5	42,2	25,9
31,3	66,0	16,3	57,8	121,1	100,7	15,0	21,1	39,5	21,8
30,6	66,0	15,7	57,8	120,4	100,0	14,3	20,4	38,8	21,1
30,6	66,0	15,7	57,8	120,4	100,0	13,6	19,7	38,8	21,1
30,6	65,3	15,7	57,2	120,4	99,3	12,9	19,1	38,1	20,4
29,3	63,3	13,6	12,9	22,5	144,3	13,6	15,0	29,9	17,0
5,4	83,7	13,6	12,9	22,5	144,3	13,6	15,7	30,6	17,7
6,1	84,4	13,6	13,6	23,1	144,3	13,6	12,9	25,9	12,9
6,1	84,4	14,3	13,6	23,1	144,9	14,3	13,6	25,9	13,6
6,1	85,1	15,0	14,3	23,8	144,9	15,0	13,6	26,5	13,6
6,8	85,7	15,7	15,0	23,8	144,9	15,0	13,6	26,5	13,6
6,8	85,7	16,3	15,7	24,5	145,6	15,7	16,3	31,3	18,4
31,3	65,3	15,7	15,0	24,5	145,6	15,7	17,0	32,0	19,1
30,6	63,3	13,6	13,6	23,8	145,6	16,3	17,0	32,0	19,1
6,1	84,4	13,6	55,8	118,4	102,1	16,3	19,7	36,1	21,8
7,5	85,7	16,3	57,8	121,1	101,4	15,7	18,4	35,4	21,1
31,3	66,7	16,3	58,5	121,1	100,7	15,0	20,4	39,5	25,2
31,3	66,0	16,3	57,8	121,1	100,0	14,3	19,7	38,8	23,8
30,6	66,0	15,7	57,8	120,4	99,3	13,6	19,1	38,1	23,1
30,6	64,6	15,0	14,3	23,1	144,3	14,3	19,7	38,8	23,8
30,6	63,3	13,6	12,9	23,1	144,9	15,7	22,5	42,2	27,2

Tabela A9 – Pressão nos nós da rede, simulação 25

Hora	Pressões(m.c.a)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	156,5	19,1	27,9	32,0	38,1	21,1	21,1	19,7	10,9
1	40,8	19,7	28,6	33,3	39,5	23,1	23,1	24,5	16,3
2	156,5	19,1	29,3	36,7	43,5	29,3	29,3	39,5	34,0
3	41,5	20,4	29,9	37,4	44,2	29,9	29,9	40,8	34,7
4	41,5	20,4	29,9	37,4	44,2	29,9	29,9	40,1	34,7
5	40,8	19,7	29,3	37,4	44,2	29,3	29,3	40,1	34,0
6	40,8	19,7	29,3	36,7	43,5	29,3	29,3	39,5	34,0
7	40,8	19,1	29,3	36,7	43,5	28,6	28,6	39,5	34,0
8	40,1	19,1	28,6	36,1	42,9	28,6	28,6	39,5	33,3
9	39,5	18,4	27,9	35,4	42,2	27,9	27,9	38,1	32,7
10	156,5	19,7	27,9	32,0	38,1	21,8	21,8	21,8	13,6
11	40,8	19,7	27,9	32,0	38,1	21,1	21,1	21,8	13,6
12	156,5	19,1	27,2	31,3	37,4	20,4	20,4	21,1	12,9
13	156,5	19,7	27,9	32,0	38,1	21,8	21,8	21,8	14,3
14	40,1	19,1	27,2	31,3	37,4	20,4	20,4	21,1	13,6
15	156,5	19,1	27,9	32,0	38,1	21,8	21,8	22,5	14,3
16	41,5	20,4	29,9	37,4	44,2	29,3	29,3	40,1	34,0
17	40,8	19,1	27,9	32,0	38,1	21,1	21,1	21,8	13,6
18	156,5	19,1	27,2	32,0	38,1	21,8	21,8	22,5	14,3
19	41,5	20,4	29,9	37,4	44,2	29,9	29,9	40,1	34,7
20	41,5	19,7	29,3	37,4	44,2	29,3	29,3	40,1	34,0
21	40,8	19,7	29,3	36,7	43,5	29,3	22,5	40,1	34,0
22	40,8	19,1	29,3	36,7	43,5	29,3	22,5	39,5	34,0
23	40,1	19,1	28,6	36,7	42,9	28,6	28,6	39,5	33,3
24	40,1	19,1	27,9	32,7	38,8	22,5	22,5	23,8	15,0

Tabela A9 – Pressão nos nós da rede, simulação 25 (continuação)

Pressões(m.c.a)									
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
2,0	83,0	14,3	4,8	2,0	132,0	15,7	21,1	42,2	25,9
8,8	86,4	16,3	15,7	25,2	146,3	16,3	22,5	42,9	26,5
30,6	67,4	17,0	59,2	122,5	102,1	16,3	22,5	42,9	26,5
31,3	67,4	17,0	59,2	121,8	101,4	16,3	22,5	42,9	26,5
31,3	67,4	17,0	59,2	121,8	101,4	15,7	21,8	42,2	26,5
30,6	66,7	17,0	58,5	121,8	100,7	15,7	20,4	39,5	22,5
30,6	66,7	16,3	58,5	121,1	100,0	15,0	19,7	38,8	21,8
29,9	66,7	15,0	58,5	121,1	100,0	14,3	19,1	38,8	21,8
29,9	66,0	15,0	57,8	121,1	99,3	13,6	18,4	38,1	21,1
29,3	64,0	14,3	13,6	23,1	144,3	14,3	14,3	29,9	17,0
6,1	84,4	13,6	13,6	23,1	144,3	14,3	15,0	30,6	17,7
6,1	84,4	14,3	13,6	23,1	144,3	14,3	12,9	25,9	13,6
6,1	84,4	15,0	14,3	23,8	144,9	15,0	13,6	25,9	14,3
6,8	85,1	15,0	15,0	23,8	144,9	15,0	13,6	26,5	14,3
6,1	85,7	15,7	15,0	24,5	145,6	15,0	13,6	26,5	14,3
7,5	86,4	16,3	15,7	25,2	145,6	15,7	15,7	31,3	14,3
30,6	65,3	14,3	14,3	24,5	145,6	15,7	16,3	32,0	15,0
6,1	84,4	13,6	13,6	23,8	145,6	16,3	16,3	32,0	15,0
6,8	85,1	15,0	56,5	119,8	102,1	16,3	19,1	36,1	19,7
30,6	66,7	16,3	58,5	121,8	101,4	15,7	17,7	35,4	19,1
30,6	66,7	15,7	58,5	121,1	100,7	15,0	19,7	39,5	22,5
30,6	66,7	15,7	58,5	121,1	100,0	14,3	19,1	38,8	21,8
30,6	66,0	15,7	57,8	121,1	99,3	14,3	18,4	38,1	21,1
29,9	65,3	14,3	14,3	23,1	144,3	14,3	19,1	38,8	21,8
7,5	85,1	13,6	13,6	23,1	144,9	15,7	21,1	42,2	25,9