

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Cynthia Santos
Andrade E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 23/06/99.

Paulo de Barros Correia
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

**Conservação de Energia Elétrica em
Sistemas Públicos de Abastecimento de
Água: Otimização Operacional da Rede de
Macapá**

27/99

Autora : Cynthia Santos Andrade
Orientador: Paulo de Barros Correia

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENERGIA**

**Conservação de Energia Elétrica em
Sistemas Públicos de Abastecimento de
Água: Otimização Operacional da Rede de
Macapá**

Autora : Cynthia Santos Andrade

Orientador: Paulo de Barros Correia

Curso: Planejamento de Sistemas Energéticos

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Campinas, 1999

S.P. - Brasil



919089

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	UNICAMP
V.	Ex.
TOMPO BC	39 346
PRIO.	229/99
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	29/10/99
N.º CPD	

CM-00136595-7

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

An24c

Andrade, Cynthia Santos

Conservação de energia elétrica em sistemas públicos de abastecimento de água: otimização operacional da rede de Macapá. / Cynthia Santos Andrade.--Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientador: Paulo de Barros Correia
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Energia elétrica - Conservação. 2. Abastecimento de água. 3. Otimização matemática. 4. Estações de bombeamento. I. Correia, Paulo de Barros. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENERGIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

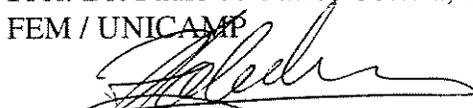
**Conservação de Energia Elétrica em
Sistemas Públicos de Abastecimento de
Água: Otimização Operacional da Rede de
Macapá**

Autora : **Cynthia Santos Andrade**

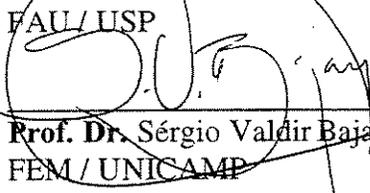
Orientador: **Paulo de Barros Correia**



Prof. Dr. Paulo de Barros Correia, Presidente
FEM / UNICAMP



Prof. Dr. Ricardo Toledo Silva
FAU / USP



Prof. Dr. Sérgio Valdir Bajay
FEM / UNICAMP

Campinas, 23 de junho de 1999.

Dedicatória

Aos meus pais: Percival e Elizabeth, por todo apoio e incentivo que sempre me deram;

aos meus irmãos: Luciano, Leandro e Thays.

À minha família como um todo: tios, avós e primos; que sempre estiveram presentes e unidos.

Agradecimentos

Ao Prof. Paulo de Barros Correia pela orientação neste trabalho.

À Unicamp, em particular à Área Interdisciplinar de Planejamento de Sistemas Energéticos, por minha admissão e pelo conhecimento adquirido.

À todos os professores e colegas de departamento, que contribuíram direta e indiretamente na realização deste trabalho.

Ao companheiro Leandro Nunes de Castro pelas sugestões no decorrer do trabalho e pelo carinho na convivência diária.

Ao CNPQ pelo suporte financeiro.

À Deus, por me dar a chance de cumprir uma missão neste planeta.

Resumo

ANDRADE, Cynthia Santos. *Conservação de Energia Elétrica em Sistemas Públicos de Abastecimento de Água: Otimização Operacional da Rede de Macapá*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1999.78 p. Dissertação (Mestrado)

Este trabalho apresenta um modelo para otimizar a operação diária do bombeamento em sistemas urbanos de abastecimento de água, visando minimizar o consumo e o custo da energia elétrica. O modelo realiza análises espacial e temporal do sistema, otimizando a operação de chaveamento das bombas em um horizonte de programação diário discretizado em intervalos de três horas. Ele utiliza um algoritmo especializado, denominado SCODA, que possui uma formulação de Programação Linear em Redes Generalizadas. Uma aplicação do modelo de otimização é realizada na rede pública de água da CAESA (Companhia de Água e Esgoto do Amapá) em Macapá, apresentando também uma análise paramétrica do custo da energia em relação à variação do limite mínimo admissível de água nos reservatórios. Estes limites mínimos de armazenagem são tomados como uma medida de segurança da rede; quanto maior o volume armazenado menor o risco do sistema em situação emergencial. Devido a indisponibilidade de dados da rede de água de Macapá, também é implementado um modelo de simulação operacional para representar o comportamento atual do sistema. Os resultados dos modelos de simulação e otimização são comparados.

Palavras-chave

Conservação de Energia Elétrica, Abastecimento de Água, Otimização, Bombeamento

Abstract

ANDRADE, Cynthia Santos. *Electrical Energy Conservation in Water Supply Systems: Operational Optimization of Macapá's Network*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1999.78 p. Dissertação (Mestrado)

This work presents a model to optimize the daily operational strategy of pumping in water supply systems with the objective of minimizing the electrical energy use and cost. The model performs spatial and temporal analyses on the system to optimize the pumps' switching, considering a daily horizon of programming with discrete intervals of three hours. The optimization model uses the SCODA algorithm, which implements a formulation of Linear Programming in Generalized Networks. It is applied to the public water supply network of CAESA (Amapá Company of Water and Drain) in Macapá. It also performs a parametrical analysis for the energy cost with relation to variations in the minimum storage limit allowed for the water reservoirs. These limits are taken as a security measure of the network; the risk of water shortage decreases if the minimum limit of storage increases. Due to the lack of enough operational data about the CAESA system, an operational simulation model was developed to represent the real behavior of the system. The results from the simulation and optimization model are compared.

Keywords

Electrical Energy Conservation, Water Supply, Optimization, Pumping

Índice

Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	iv
1 - Introdução	1
1.1 Revisão de Literatura	3
1.1.1 Técnicas de Otimização	4
1.2 Organização do Texto	7
2 - Conservação de Energia Elétrica em Sistemas de Saneamento	9
2.1 Introdução	9
2.2 Situação Brasileira	10
2.3 Visão de Negócio para o Consumidor Final	11
2.4 O Setor de Saneamento no Brasil	13
2.4.1 Conservação de Energia Elétrica	14
2.5 Considerações Finais	15
3 - Sistemas Públicos de Abastecimento de Água	17
3.1 Introdução	17
3.2 Componentes	17
3.2.1 Captação	18
3.2.2 Adutoras	18
3.2.3 Tratamento	19
3.2.4 Armazenagem	20
3.2.5 Distribuição	20
3.2.6 Estações de Bombeamento	21
3.2.6.1 Bombas Centrífugas	22

3.2.6.2 Associação de Bombas	25
3.3 Perdas de água	27
4 - Modelo de Otimização	29
4.1 Definições	29
4.1.1 Problema de Otimização	30
4.2 Modelo de Otimização do Abastecimento de Água de Macapá	31
4.3 Configuração da Rede Principal de água da CAESA em Macapá	34
4.3.1 Características do Sistema	37
5 - Resultados	43
5.1 Simulação Operacional	43
5.1.1 Resultados do Modelo de Simulação	45
5.2 Resultados do Modelo de Otimização	47
5.2.1 Caso Base: Tarifa Única	47
5.2.2 Caso Horosazonal: Tarifa de Referência	51
6 - Conclusões	59
Referências Bibliográficas	62
Apêndice A	67

Lista de Figuras

	Pág.
3.1 – Sistema urbano de abastecimento de água	17
3.2 – Típica curva característica de bomba	24
3.3 – Combinação das curvas características da bomba e do encanamento	25
3.4 – Curvas características de bombas em paralelo	26
3.5 – Combinação das curvas das bombas em paralelo e do encanamento	26
4.1 – <i>Layout</i> do sistema de abastecimento de água de Macapá	35
4.2 – Sistema principal de abastecimento de água de Macapá	35
4.3 – Comportamento normalizado da demanda de água	38
4.4 - Vazão × Altura manométrica do conjunto de bombas de recalque	40
4.5 - Vazão × Potência dos bombeamentos de recalque	41
5.1 – Variação do bombeamento – Caso Base	48
5.2 – Comportamento da armazenagem – Caso Base	48
5.3 – <i>Tradeoff</i> do Caso Horosazonal	52
5.4 – Variação do bombeamento – Caso Horosazonal	52
5.5 – Comportamento da armazenagem – Caso Horosazonal	53
5.6 - <i>Tradeoff</i> do Caso Horosazonal, Lim. Mín. = 30%	54
5.7 - <i>Tradeoff</i> do Caso Horosazonal, Lim. Mín. = 50 %	55
5.8 - <i>Tradeoff</i> do Caso Horosazonal, Lim. Mín. = 80 %	56
5.9 - <i>Tradeoff</i> Custo × Nível de Armazenagem	58

Lista de Tabelas

	Pág.
4.1 – Demanda média diária em cada ponto de distribuição	37
4.2 – Porcentagem de demanda em cada intervalo	37
4.3 – Limites máximos admissíveis de água nas captações	38
4.4 – Limites máximos admissíveis de água nos recalques	39
4.5 – Capacidade de armazenamento dos reservatórios	39
4.6 – Consumo específico de energia nas captações	40
4.7 – Consumo específico do recalque ETAM → R2	41
4.8 - Consumo específico do recalque ETAM → R1	42
4.9 - Consumo específico do recalque ETAM → D1	42
4.10 – Tarifa horosazonal de referência	42
5.1 – Resultados do Caso Base	47
5.2 – Resultados do Caso Base com armazenagem mínima = 30 %	49
5.3 – Resultados do Caso Base com armazenagem mínima = 50 %	49
5.4 – Resultados do Caso Base com armazen. mín. = 50 % e duplicada	49
5.5 – Resultados do Caso Base com armazenagem mínima = 80 %	49
5.6 – Resultados do Caso Base com armazen. mín. = 80 % e duplicada	50
5.7 – Resultados do Caso Horosazonal	51
5.8 – Resultados do Caso Horosazonal, lim. mín. = 30 %	54
5.9 – Resultados do Caso Horosazonal, lim. mín. = 50 %	55
5.10 – Resultados do Caso Horosazonal, lim. mín. = 50 %, armazen. duplicado	55
5.11 – Resultados do Caso Horosazonal, lim. mín. = 80 %	56
5.12 – Resultados do Caso Horosazonal, lim. mín. = 80 %, armazen. duplicado	56

Capítulo 1

Introdução

Nos últimos tempos, a aplicação de medidas que visam conservar energia nas instalações industriais e comerciais vem consolidando um caráter de investimento rentável. Os empresários estão passando a enxergar nesta prática uma forma de redução dos custos, dado que em muitos processos o insumo energia elétrica possui um peso significativo nos gastos totais de produção. Mesmo as concessionárias de distribuição de energia elétrica, que em tese deveriam ser contra uma ação que venha a reduzir a arrecadação, estão atentando para à importância da implantação de programas de GLD (Gerenciamento do Lado da Demanda), como forma de postergar vultosos investimentos em novas obras. A antiga idéia de crescimento da economia, aliado ao aumento indiscriminado do consumo de energéticos, vem sendo bastante questionada por se mostrar inviável para a sustentação do planeta.

No setor público brasileiro, algumas medidas estão sendo tomadas no sentido de se utilizar de forma eficaz a energia elétrica, mas o foco da ação governamental incide basicamente sobre a iluminação pública. No segmento de abastecimento de água, que, nas pequenas cidades, está entre os maiores consumidores de eletricidade, e é responsável por cerca de 25% do consumo de energia elétrica no setor público, empreendimentos na área de conservação ainda são incipientes. Medidas de conservação de energia aplicadas a estes sistemas trariam reduções nos gastos públicos e o uso racionalizado deste insumo, além de um alívio para o sistema elétrico brasileiro como um todo, principalmente no horário de *rush*, que em muitos casos é coincidente nos sistemas elétrico e de suprimento de água.

Genericamente, os sistemas públicos de abastecimento de água são compostos por: captações, adutoras, reservatórios, estações de bombeamento e rede de distribuição. Cerca de 80% do consumo total de energia elétrica nestes sistemas se destina ao bombeamento (Oliver & Putnam, 1997). As bombas são utilizadas para o incremento da energia da água para a condução a lugares distantes ou elevados.

Na rede de distribuição de água, algumas medidas operacionais podem ser tomadas de forma a reduzir o consumo de energia elétrica por m³ de água bombeada. Entre estas medidas encontra-se: o aumento da eficiência das bombas, composições eficientes das combinações de bombas e o chaveamento das bombas de maneira otimizada. As duas primeiras opções representam melhorias pontuais e produzem uma diminuição considerável no consumo de energia, seja através da melhoria da eficiência dos equipamentos ou a escolha adequada do conjunto de bombas a ser instalado. Em compensação, estas medidas exigem investimentos de capital e tem limitada capacidade de melhorias.

Por sua vez, o chaveamento eficiente das bombas implica na escolha da melhor operação do liga-desliga das máquinas de forma a se consumir o mínimo de energia elétrica no abastecimento de água, sem prejuízo do fornecimento aos consumidores. Um plano eficaz de conservação de energia nos sistemas urbanos de abastecimento de água deveria abranger ambos os procedimentos, a otimização de cada estação de bombeamento e a otimização da operação do conjunto, enquanto a relação custo-benefício fosse positiva, a fim de se explorar as possibilidades de redução do consumo de energia elétrica.

Este trabalho enfoca a conservação de energia em sistemas públicos de abastecimento de água sob a ótica da otimização do chaveamento das bombas, realizada através de um modelo de otimização. Este procedimento se viabiliza devido à existência dos reservatórios na rede de distribuição de água, que dão flexibilidade operacional ao sistema (Andrade & Correia, 1999). Pelo fato de enxergar a rede como um todo, espacial e temporalmente, a otimização das operações de bombeamento consiste em uma medida global que tem a grande vantagem de não necessitar de investimentos na aquisição de novas máquinas.

O modelo de otimização utiliza o algoritmo SCODA (Correia, 1988), que possui uma formulação de Programação Linear, realizando a otimização por grafos através do método *Simplex* para redes generalizadas. A elaboração do modelo foi direcionada para aplicação no sistema da

CAESA (Companhia de Água e Esgoto do Amapá), em Macapá, que tem como captação principal o rio Amazonas. A otimização operacional do sistema analisado é realizada no curto prazo (24 horas), e como resultado obtém-se a configuração ótima do liga-desliga das bombas visando minimizar tanto o consumo quanto os gastos com energia elétrica do sistema. A solução de compromisso entre os dois objetivos a serem minimizados, consumo e gastos, é obtida através do método dos pesos. O período de análise é dividido em oito intervalos, de três horas cada, e as restrições do problema são o balanço de fluxo nos nós e os limites físicos operacionais do sistema.

A avaliação do modelo de otimização é realizada através da comparação dos resultados obtidos, a partir do mesmo, com os resultados de uma simulação operacional realizada no sistema de Macapá. Devido a indisponibilidade de alguns dados, a operação do sistema de Macapá foi simulada, com restrições compatíveis com as que foram utilizadas pelo modelo de otimização, de forma que fosse realizada uma avaliação coerente dos resultados. Desta forma, o modelo de otimização foi avaliado face a uma simulação operacional, que, em se tratando de eficiência, já estaria superior à atual gestão operacional da companhia. Os resultados desta comparação apontam o potencial de energia elétrica a ser conservada que existe no sistema de água de Macapá através da adoção da política operacional adequada das bombas, gerada a partir do modelo de otimização.

O processamento do modelo de otimização pode ser feito supondo-se diversas situações e observando como o sistema se comporta em relação a cada uma, o que permite ao operador do sistema um maior conhecimento da sua rede, sendo esta uma característica muito importante nos momentos de decisão. Uma das possibilidades, abordadas no presente trabalho, é a realização de uma análise paramétrica a fim de verificar a variação do custo da eletricidade em relação ao aumento do nível de segurança da rede, representado pelo limite mínimo de água admissível nos reservatórios. Para cada nível de segurança, o modelo fornece o custo da energia elétrica associado, gerando um *tradeoff* Segurança \times Custo do sistema.

1.1 – Revisão de Literatura

O cenário que se apresentava nos estudos de otimização dos sistemas de abastecimento de água a uma década atrás correspondia a uma situação onde já havia muita pesquisa na área mas pouca aplicação a sistemas reais. Atualmente, esta situação ainda não se reverteu, mas o número de sistemas de abastecimento de água no mundo que tiveram a operação de suas bombas otimizada vem

aumentando. Diversos estudos vem sendo desenvolvidos em todo o mundo, com mais ênfase na Europa, em Israel e, mais recentemente nos Estados Unidos. No Brasil, tem-se trabalhado com menor intensidade nesta área. Há um desinteresse das companhias de abastecimento de água no que concerne à conservação de energia elétrica, pois, além de ser um insumo relativamente barato, a principal preocupação da administração das empresas é garantir o suprimento de água à população, independente do custo, o que já consiste em uma tarefa complexa, visto as atuais condições de funcionamento das empresas.

Um outro agravante que se observa é a escassez de pessoal qualificado, de forma a possibilitar uma comunicação clara entre os pesquisadores que desenvolvem os modelos e os operadores dos sistemas. Para a geração de um modelo eficaz de otimização que se aproxime ao máximo da realidade faz-se necessário uma troca contínua de informações entre as partes envolvidas. Os encarregados da operação dos sistemas devem fornecer aos modeladores as características hidráulicas da rede, os procedimentos adotados para o controle das bombas e demais particularidades. Por sua vez, os pesquisadores devem capacitar os operadores a interpretarem de forma correta as informações geradas à partir do modelo, visando tirar o máximo proveito dos resultados obtidos.

1.1.1 – Técnicas de Otimização

A possibilidade de aplicação de técnicas de otimização em sistemas de abastecimento de água são as mais variadas. Não existe um modelo ideal e único, que possa ser aplicado indistintamente a qualquer caso. O uso de uma ou outra metodologia depende das características de cada rede.

Uma técnica bastante utilizada na otimização operacional de sistemas de água é a programação linear. Em 1988 Jowwit *et al.* apresentaram um modelo de otimização das operações de bombeamento baseado em programação linear (PL) para o controle em tempo real das bombas. O modelo é auxiliado por um simulador capaz de calcular as pressões e vazamentos no sistema. Estimativas apontaram para uma redução de 10% no consumo de energia elétrica nos sistemas de abastecimento de água analisados. Prosseguindo com a pesquisa, Jowwit & Germanopoulos (1992) fizeram uma aplicação do modelo de programação linear em um sistema de água do Reino Unido, obtendo um potencial de redução de 15,7% do consumo de energia elétrica deste sistema.

Diba *et al.* (1995) apresentaram um modelo de otimização que emprega duas ferramentas principais de análise: algoritmo de grafos e PL. A modelagem por grafos é utilizada para produzir a representação matemática da rede de distribuição e o procedimento de programação linear se encarrega de encontrar a operação ótima das bombas. Os resultados indicaram que a combinação das metodologias resulta em uma ferramenta muito versátil para a solução de problemas de larga escala. Na mesma época, Sun *et al.* (1995) também apresentaram um modelo de otimização da operação das bombas que faz uso do método de grafos aliado a PL, dando enfoque à redução do tempo de execução do modelo; os resultados mostraram que o modelo proposto era de 11 a 117 vezes mais rápido que os códigos tradicionais de PL. O algoritmo SCODA, utilizado na formulação do modelo de otimização da rede de água de Macapá, também faz uso da junção do método de grafos e programação linear, o que faz com que o modelo possua um tempo de execução bastante reduzido.

Outra técnica muito empregada na abordagem de sistemas de abastecimento de água é a programação dinâmica (PD). Em 1988 Coulbeck *et al.* fizeram uso desta formulação, e o estudo realizado indicou um potencial de redução de 10% no consumo de energia nas redes de distribuição de água analisadas. Também utilizando PD, Ormsbee *et al.* (1989) apresentaram um modelo que determina a trajetória ótima do nível de água armazenada nos reservatórios, fazendo uma aplicação do mesmo no sistema urbano de água de Washington, D.C , Estados Unidos; este estudo apresentou um potencial de redução de 6,7% no consumo de energia do dado sistema. Outros estudos que fizeram uso de programação dinâmica foram: Zessler & Shamir (1989); Lansey & Awumah (1994) e Nittivattananon *et al.* (1996). Estes últimos desenvolveram um modelo de otimização em tempo real do bombeamento, fazendo uma aplicação na rede de abastecimento de água da cidade de Pittsburgh, EUA. Os resultados apontaram um potencial de redução de 20% nos gastos com energia elétrica.

A grande limitação do uso de programação dinâmica na otimização das operações de bombeamento é a capacidade reduzida quanto ao número de variáveis de estado, dificultando sua aplicação a grandes sistemas com muitas variáveis. No caso de sistemas de distribuição de água, as variáveis de estado são os volumes dos reservatórios, o que dificulta o emprego desta metodologia em sistemas de porte considerável.

O controle ótimo da operação das bombas nos sistemas de abastecimento de água também se complica devido à não-linearidade das variáveis de decisão. Visando incorporar as não-linearidades

encontradas nos sistemas de água, em 1991 Brion & Mays apresentaram um modelo de otimização do bombeamento baseado em programação não-linear (PNL); o modelo de otimização interage com um simulador hidráulico, que é usado para resolver implicitamente as equações de conservação de fluxo e de energia do sistema. Uma modelagem também não-linear foi realizada por Ostfeld & Shamir (1993), que resolveram o problema de encontrar o ponto ótimo de operação das bombas com um modelo que emprega o algoritmo do Lagrangiano Projetado. Seguindo a mesma idéia, Percia *et al.* (1997) apresentaram um modelo para operação ótima das bombas, o qual foi aplicado ao sistema de abastecimento de água de Arava, Israel, conseguindo uma economia de US\$ 120.000,00 por ano nos gastos operacionais da rede local.

Técnicas de programação multiobjetivo que despontaram na década de 60 trouxeram a possibilidade dos modeladores trabalharem com mais de um objetivo na otimização das operações de bombeamento de sistemas de abastecimento de água. O modelo de otimização apresentado por Crawley & Dandy (1993) possui dois objetivos: maximizar o rendimento do sistema analisado a um dado nível de confiabilidade e minimizar os gastos com bombeamento. Uma aplicação do modelo foi feita no sistema de Adelaide, Austrália, e os testes preliminares indicaram uma redução de 5% a 10% nos gastos atuais com energia elétrica. Partindo da mesma formulação, Ko *et al.* (1997) idealizaram um modelo de otimização que possui três objetivos principais: (1) minimizar os gastos com energia elétrica no bombeamento, (2) minimizar o número de chaveamentos das bombas e (3) maximizar a confiabilidade do sistema.

Os modelos com formulação multiobjetivo dão ao decisor liberdade quanto à escolha do ponto de operação a ser adotado, fazendo-se necessário que o operador do sistema esteja bem consciente sobre quais são as prioridades da operação. No modelo de otimização da rede de Macapá é realizada uma análise multiobjetivo considerando dois objetivos a serem minimizados: o consumo e o custo da energia elétrica.

Conforme mencionado anteriormente, os problemas de otimização das operações de bombeamento devem ser tratados de forma particular; a escolha da formulação do problema se dá de acordo com a configuração do sistema a ser otimizado. O cuidado a ser tomado na aplicação de modelos de otimização é que, justamente pelo fato de serem representações matemáticas da situação real, os mesmos devem ser corretamente interpretados. Tem que se ter em mente que a utilidade dos

modelos não depende somente da exatidão dos resultados, mas também da adequação dos mesmos à situação real.

1.2 – Organização do Texto

Esta dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos e um apêndice, da seguinte forma:

Capítulo 1 - Introdução

Promove uma introdução ao assunto, destacando as motivações para o desenvolvimento do estudo proposto, a metodologia empregada e faz um breve apanhado de trabalhos que tenham abordado questões semelhantes, visando a contextualização do estudo realizado.

Capítulo 2 - Conservação de Energia Elétrica nos Sistemas de Saneamento

Traz uma discussão sobre a conservação de energia elétrica, passando pelo conceito, justificativa e ações que estão sendo implementadas pelo governo brasileiro, dando um enfoque sobre a questão do uso racional de eletricidade nos sistemas urbanos de saneamento.

Capítulo 3 - Sistemas Públicos de Abastecimento de Água

Discute a função dos sistemas de água, modo de operação e descrição das características e comportamento dos principais componentes destes sistemas.

Capítulo 4 - Modelo de Otimização

Neste capítulo é apresentado o modelo de otimização operacional desenvolvido para o sistema urbano de abastecimento de água da cidade de Macapá; passando, primeiramente, de uma forma sucinta, pelos conceitos de “pesquisa operacional” e “otimização”.

Capítulo 5 - Resultados

Apresentação dos resultados obtidos através do modelo de otimização do sistema principal de água da CAESA em Macapá, e dos resultados de uma simulação operacional realizada com o intuito de servir de base comparativa na avaliação do modelo de otimização.

Capítulo 6 - Conclusão

Efetua-se uma análise geral dos resultados obtidos e elabora-se propostas para estudos futuros.

Apêndice A

Apresenta a estrutura dos arquivos de entrada e saída de dados do modelo de otimização.

Capítulo 2

Conservação de Energia Elétrica nos Sistemas de Saneamento

Este capítulo dedica-se a analisar a conservação de energia elétrica, passando pelo conceito, justificativa e ações que estão sendo implementadas pelo governo brasileiro. Com um enfoque no setor de saneamento, com suas particularidades, busca-se a análise da viabilidade e o impacto da aplicação de medidas de conservação de energia elétrica neste segmento.

2.1 – Introdução

Com o passar do tempo, a produção de energia elétrica torna-se cada vez mais onerosa, aumentando a infra-estrutura requerida desde a unidade geradora, seja ela hidráulica, com a construção de grandes represas; ou térmica, com a utilização, entre outros, de derivados de petróleo. Antes de chegar ao consumidor final, ainda é necessário todo suporte de transmissão e distribuição. Tudo isto tem um alto custo, pago pela sociedade, seja na construção, ou na manutenção do sistema. O que se tem observado é que o consumo de eletricidade, de uma maneira global, vem apresentando taxas significativas de crescimento, bem como um aumento relativo nas despesas das diversas classes de consumidores. Considerando estes elevados investimentos, toda e qualquer ação que resulte na diminuição do aporte de recursos necessários para a expansão do setor, sem que haja comprometimento da confiabilidade do sistema e que também contribua para a redução nas despesas com energia elétrica por parte dos consumidores, deve ser incentivada.

Daí surge o conceito de *conservação de energia elétrica*, que é bastante abrangente, sendo adotado para caracterizar, de uma maneira geral, as ações que tenham como objetivo o aumento da eficiência na utilização da eletricidade. A medida primária e mais comum de conservação de energia

elétrica é o combate ao desperdício. Combater o desperdício significa melhorar a forma de se utilizar a energia, sem abrir mão do conforto e das vantagens que ela proporciona. Significa diminuir o consumo, reduzindo custos, sem perder a eficiência e a qualidade dos serviços.

Genericamente, as principais razões que justificam o combate ao desperdício de energia elétrica, além da economia direta no consumo, são (PROCEL, 1998):

- consciência contra o desperdício, que faz com que a população viva de uma forma mais racional;
- redução dos custos para o setor elétrico, para os consumidores e para o país, conforme já mencionado;
- postergação ou redução dos investimentos do governo na expansão do sistema elétrico;
- aumento da produtividade e da competitividade;
- maior garantia e melhores condições de atendimento ao mercado consumidor de energia elétrica;
- melhoria da eficiência de processos e equipamentos;
- minimização do impacto ambiental causado pelas instalações de geração, transmissão e distribuição de energia.

Para os países desenvolvidos e em desenvolvimento com produção abundante e barata de combustíveis fósseis, a preocupação com a eficiência energética é na maioria das vezes motivada pelo último item abordado acima: o aspecto ambiental. A emissão de poluentes nestes países atingiu, pelas próprias condições de desenvolvimento, níveis muito mais preocupantes que nos demais (MME, 1998).

2.2 - Situação Brasileira

No Brasil, a grande motivação para a implementação de ações de conservação de energia elétrica reside na escassez de recursos para a expansão do parque gerador. Estima-se (Bahia, 1998) que para atender ao atual ritmo de crescimento do consumo, nos próximos cinco anos, o setor elétrico precisará investir aproximadamente trinta bilhões de dólares em novas centrais de geração e linhas de transmissão. O estabelecimento de ações voltadas para a eficiência energética permitiriam reduzir a demanda de eletricidade e, conseqüentemente, implicariam na postergação dos investimentos.

A falta de recursos suficientes para se investir na expansão do parque gerador foi um grande motivador para a atual reestruturação, privatização e descentralização das atividades do setor elétrico, que vêm ocorrendo desde o início dos anos 90. Com as concessionárias de energia elétrica nas mãos do setor privado, cabe ao governo, através do órgão regulador, o papel de fazer com que os novos donos do setor atentem para o grande potencial existente na utilização racional da eletricidade. A primeira ação neste sentido foi a obrigação, estabelecida nos contratos de concessão das distribuidoras, de investimento em programas de conservação de energia elétrica. O texto dos contratos diz: *“A concessionária deverá apresentar anualmente programa de incremento à eficiência no uso e na oferta da energia elétrica, contemplando a aplicação de, no mínimo, 1% da receita anual, sendo que deste montante, pelo menos 1/4 deve ser vinculado a ações ligadas ao uso final”*; cabendo à ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, criada em 1996 pela Lei 9427, a aprovação e fiscalização da execução dos programas elaborados pelas concessionárias.

Ao governo cabe, ainda, criar articulações e levar a “bandeira” da conservação para os demais segmentos de consumo, além de corrigir determinadas imperfeições do mercado, seja através da informação aos consumidores, da legislação e normalização, da concessão de incentivos, ou do estímulo à produção de bens eficientes.

O PROCEL é o programa do governo brasileiro responsável pelo combate ao desperdício de energia elétrica. Este programa foi instituído em 1985, sendo implementado no ano seguinte. Até o início da década de 90 teve uma participação ainda tímida no cenário brasileiro. Somente a partir de 1994 é que se iniciou um processo de revitalização do programa.

De acordo com estudos do PROCEL, o custo médio da energia conservada em 1995 ficou na faixa de R\$ 10/MWh, portanto cerca de 20% do custo marginal de expansão do setor elétrico, que é de R\$ 45/MWh (apenas geração). Estes valores demonstram que a implantação de medidas que visam conservar energia elétrica representa, além de aspectos sócio-políticos e culturais, uma fonte rentável de investimentos.

2.3 – Visão de Negócio para o Consumidor Final

O combate ao desperdício de energia é igualmente um negócio de interesse econômico para os consumidores, concessionárias e fabricantes de equipamentos.

Para o consumidor final, a racionalização da energia elétrica consiste em fazer com que cada kWh consumido em seu estabelecimento resulte no máximo de benefícios para o mesmo. Na visão empresarial, isto significaria reduzir o consumo mensal de energia elétrica, e, conseqüentemente, os custos, sem reduzir, entretanto, a qualidade dos seus bens ou o conforto dos serviços oferecidos.

A conservação, ou o uso racional, de energia tornou-se uma importante ferramenta utilizada pelas empresas na busca do aumento de eficiência e produtividade. Reduções concretas de até 20% no consumo já foram obtidas por aquelas que adotaram em sua prática diária os princípios de eliminação de desperdícios.

Entretanto, ainda é muito comum o desperdício de energia elétrica, que de uma forma geral é fruto de um processo de aculturação técnica, nascida pela falta de preocupação com os custos decorrentes da implantação e operação de projetos, concebidos exclusivamente sob critérios técnicos. A avaliação econômica de soluções definidas em projeto é matéria importante e que vem ganhando cada dia mais espaço na concepção de grandes empreendimentos, cuja premissa de evitar desperdícios, tanto na implantação quanto na fase de operação, passou a ser uma questão de sobrevivência das empresas e da sociedade em geral (Lima & David, 1996).

A fase inicial de um programa de conservação de energia elétrica, independente da sua abrangência, corresponde ao perfeito conhecimento da instalação consumidora a ser estudada. Esta fase corresponde à elaboração de um diagnóstico energético, ou seja, uma radiografia da instalação, de modo a estabelecer os fluxos da energia e dos desperdícios, a fim de determinar as soluções mais adequadas para diminuir estes últimos, tendo em vista, ainda, a redução dos custos associados ao consumo de energia elétrica.

O programa de conservação deve estar atento para o grande potencial de redução a ser obtido apenas com a operação adequada dos equipamentos. Todo tipo de instalação existente ou projetada pode e deve ser diagnosticada sob a ótica da racionalidade operativa. A inserção de tecnologias mais eficientes no mercado é um processo que vem ocorrendo gradativamente e requer grandes investimentos na modernização do sistema produtivo. Dessa forma, deve-se garantir primeiramente

que os equipamentos atualmente em uso operem de forma adequada e sofram uma correta manutenção.

2.4 - O Setor de Saneamento no Brasil

As atividades de captação, tratamento, transporte e distribuição de água, bem como as inerentes ao esgotamento sanitário, têm a energia elétrica como principal insumo (Efficientia, 1998). No setor de saneamento, os gastos com eletricidade representam 10% dos custos totais de exploração (SNIS, 1996). Excluindo-se a despesa com pessoal próprio, os gastos com energia elétrica chegam a 25% dos custos de operação do setor de água e esgoto (Andrade & Correia, 1999). Em termos de consumo nacional de energia elétrica, o setor de saneamento é responsável por aproximadamente 3% do consumo total, percentual similar ao destinado à iluminação pública.

O setor de saneamento tem estruturação regionalizada, com base nas companhias estaduais e serviços municipais. No Brasil, este setor teve, num mesmo período – nos últimos 25/30 anos - um crescimento qualitativo diferenciado do setor elétrico, condicionado por fatores políticos, econômicos, conjunturais e estruturais. A partir do redirecionamento das metas prioritárias do governo, em 1979, a área de saneamento básico foi relegada a outro plano, basicamente devido ao segundo choque mundial do petróleo. Este fato aliado às demandas populacionais crescentes e à atual conjuntura econômica do país fazem com que, por um lado, não sejam atendidas as necessidades básicas de saneamento da população, acarretando grandes carências, principalmente na região Nordeste; e por outro, entravam a melhoria da eficiência dos sistemas existentes, gerando índices de desperdício de água na ordem de 45% do produzido¹, que representam uma perda R\$ 2,29 bilhões por ano para a nação (Efficientia, 1998). O desperdício de água incorre diretamente em perdas de energia elétrica, e faz com que a questão do controle das perdas d'água seja um fator correlato fundamental de conservação energética.

A expansão dos sistemas de água e esgoto requer vultosos investimentos. No estágio atual, 90% das áreas urbanas são abastecidas por água e só 48% por coleta de esgoto (MPO, 1998), sendo

¹ Este índice de perdas leva em conta as parcelas referentes às perdas físicas e não-físicas (faturamento), definidas na seção 3.3 deste trabalho. Estudos do setor demonstram que as perdas não-físicas podem representar 50% ou mais das perdas totais do sistema.

que o investimento requerido por unidade consumidora em esgoto é bem superior ao requerido para água. A expansão dos sistemas de saneamento visa atender basicamente a população mais pobre das periferias urbanas e municípios de menor porte, que ainda não dispõe deste tipo de serviço.

A intenção do governo é que este setor seja também incluído no processo de privatizações, com a transferência das responsabilidades das funções dos serviços públicos de interesse local, para os municípios ou empresas privadas (Efficientia, 1998). Este fato abre um questionamento quanto ao interesse dos investidores privados na promoção da universalização dos serviços de água e esgoto. Com as regiões mais rentáveis já exploradas, não se enxerga motivações, além de possíveis imposições legais, que levariam os donos das empresas a investirem na expansão da rede nas áreas mais carentes da população. Os recursos privados podem vir a auxiliar o setor de saneamento básico, mas no fechamento de tais acordos, privatização total ou parcerias, o governo deve estar atento para que os interesses públicos prevaleçam e sejam atendidos.

2.4.1 – Conservação de Energia Elétrica

Em uma primeira análise, a questão da eficiência energética no setor de saneamento passa pelo processo de mudanças estruturais, considerando o relativo atraso tecnológico decorrente da falta de investimentos nos últimos anos.

Hoje em dia, as empresas de saneamento, de um modo geral, têm ações de conservação de energia aplicadas tão somente à correção de fator de potência, decorrentes de multas contratuais nas faturas de eletricidade ou, em alguns casos, apenas o controle contábil das contas de energia elétrica (Efficientia, 1998).

Algumas estratégias importantes e eficientes para se obter o uso racional de eletricidade no setor de saneamento seriam:

- implementação e difusão de novas tecnologias e equipamentos energeticamente eficientes;
- otimização operacional, o que necessitaria, em consequência, a setorização das redes e o desenvolvimento de tecnologias de supervisão, controle e gerenciamento de dados (SCADAs -

Supervisory Control and Data Acquisition), que no Brasil, devido à redução no volume de investimentos no setor, tiveram os avanços tecnológicos inibidos; e

– manutenção adequada das máquinas.

A avaliação econômica, operacional e de impacto de cada uma das medidas supracitadas deve ser feita através da análise de diversos parâmetros de avaliação e com o acompanhamento do índice de consumo específico (kWh/m³ (de água ou esgoto)).

Para que estas medidas possam ser implementadas, é necessário que haja uma articulação institucional e o aporte de recursos permitindo ações coordenadas de efficientização energética e o combate ao desperdício, além da regularização da inadimplência do setor de saneamento para com as concessionárias de energia elétrica, o que já se encontra em processo de negociação. Um outro requisito de importância vital para o sucesso de um programa eficaz de conservação de eletricidade no setor de água e esgoto é o treinamento e qualificação do pessoal técnico da área.

Ações que merecem destaque na atualidade são: a assinatura de um Protocolo de Cooperação do MME - Ministério de Minas e Energia com o MPO - Ministério de Planejamento e Orçamento e a criação do Programa Nacional de Controle de Desperdício de Água (PNCDA). O governo vem despertando para a importância da sinergia dos ganhos para a sociedade com a associação dos programas de combate ao desperdício de água e de energia elétrica, dado que qualquer ação em um dos dois programas acarreta conseqüente ganho no outro.

2.5 – Considerações Finais

A conservação da energia elétrica possui muitos benefícios para a população como um todo, constituindo-se em uma fonte virtual de produção, sendo a mais barata e limpa que existe. Para as concessionárias de energia elétrica, permite a postergação da necessidade de investimentos e recentemente, com a assinatura dos novos contratos, representa também o cumprimento da lei. Para os consumidores finais, o maior benefício direto consiste na redução da conta de energia elétrica.

Os sistemas de água e esgoto encontram-se entre os grandes consumidores de energia elétrica e têm nesta um dos principais insumos. Este segmento vem passando por uma série de dificuldades

para atender as necessidades da população; isto faz com que as medidas de conservação de energia elétrica sejam relegadas a um segundo plano. O que se observa atualmente, no setor de saneamento, é a ausência de uma política institucionalizada de conservação de energia, como também a falta de treinamento das equipes técnicas das empresas de saneamento no que diz respeito a um conceito atualizado sobre o uso racional de energia elétrica.

O governo enxerga na privatização, ou na venda de parte das ações do setor, a solução dos problemas do saneamento no Brasil. De fato, os recursos privados podem vir a alavancar grandes obras necessárias aos sistemas de água e esgoto, mas o momento é de incertezas. Espera-se que a privatização do setor de saneamento, fato aparentemente irremediável, implique em melhorias e universalização dos serviços, apesar de que os acontecimentos do final de 1998 questionarem a competência do governo neste sentido. Na tentativa de privatização da CEDAE - Companhia Estadual de Água e Esgoto, do Rio de Janeiro, veio a público um comportamento aparentemente nada ético do governo estadual no desenrolar do processo. Isto faz com que torne-se difícil crer que a ação dos governantes possa realmente garantir que a participação do capital privado no setor de saneamento venha, de fato, ao encontro dos anseios públicos.

Capítulo 3

Sistemas Públicos de Abastecimento de Água

Neste capítulo é feita uma descrição das características e comportamento dos principais componentes dos sistemas públicos de abastecimento de água.

3.1 - Introdução

A função dos sistemas públicos de abastecimento de água é captar a água na fonte, tratá-la e realizar sua posterior distribuição aos consumidores. Estes sistemas devem fornecer água potável, em quantidade suficiente, a qualquer instante e sob pressão adequada, nos diversos pontos de consumo da comunidade que servem.

3.2 - Componentes

Genericamente, os sistemas de abastecimento de água são compostos por: captação, condução/armazenamento da água bruta, tratamento, armazenamento/distribuição da água tratada. A Figura 3.1 apresenta o *layout* típico de um sistema urbano de água.

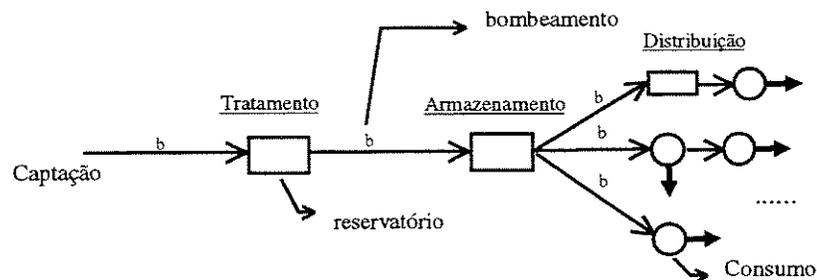


Figura 3.1 - Sistema urbano de abastecimento de água

3.2.1 - Captação

De acordo com a terminologia e definições do Projeto de Normas Brasileiras P-NB-589/77, *captação* é o conjunto de estruturas e dispositivos montados junto ao *manancial* para a tomada de água destinada a um sistema de abastecimento. A expressão *manancial* designa a fonte de onde é retirada a água para o abastecimento público, podendo ser um rio, um lago, uma nascente ou poço proveniente de lençol freático ou profundo. Em muitas regiões do Brasil, a captação de rios tem sido a forma mais usual de utilização das águas dos mananciais de superfície para o abastecimento de cidades.

Os elementos componentes de uma captação em rio compreendem essencialmente (Netto *et al.*, 1973):

- barragens ou vertedores para a manutenção do nível ou regularização da vazão;
- órgãos de tomada d'água com dispositivos para impedir a entrada de materiais flutuantes ou em suspensão na água;
- dispositivos para controlar a entrada de água;
- canais ou tubulações de interligação;
- poços de tomadas das bombas.

3.2.2 - Adutoras

Adutoras são condutos constituintes de sistemas de abastecimento de água, destinados a ligar as fontes de abastecimento de água bruta às estações de tratamento, ou os condutos ligando estações de tratamento a reservatórios de distribuição. São canalizações de importância vital em sistemas de abastecimento de água, principalmente quando constituídas de uma só linha o que é comum na maioria dos casos. Uma interrupção qualquer que venham a sofrer afeta de maneira significativa o abastecimento de água à população.

Uma das classificações das adutoras se dá conforme a energia utilizada para a movimentação da água, podendo ser:

- por gravidade, em que a energia disponível para a movimentação da água é a energia potencial determinada pela diferença de altura entre as extremidades do conduto. A adução por gravidade pode ser feita em conduto forçado ou em conduto livre (aqueduto), sendo o conduto livre admitido apenas para o transporte da água bruta, que vai receber tratamento;
- por recalque, em que a água é impelida através da tubulação pelo trabalho de bombas;
- mista, constituída de um trecho com escoamento por gravidade, seguido de outro por recalque.

3.2.3 - Tratamento

O tratamento da água visa eliminar certas impurezas e corrigir algumas impropriedades, que a tornam inadequada para determinado fim ou uso doméstico (Dacach, 1975). O principal motivo que justifica o tratamento da água é a proteção da saúde pública, mas alguns outros podem ser citados (Babbit *et al.*, 1973):

- estéticos: para a remoção do gosto, odor, cor e turbidez;
- econômicos: abrandamento para minimizar os custos de lavanderia;
- industriais: para o preparo de água para caldeiras (por exemplo);
- outras razões, como para uso em piscinas, redução da corrosão ou para combater o bócio e a fluorose.

Entre os métodos mais utilizados para o tratamento dos abastecimentos públicos de água estão:

- sedimentação (simples ou com coagulação), que é o fenômeno pelo qual as partículas em suspensão tendem a descer sob a ação da gravidade, em alguns casos utilizando coaguladores para que o processo ocorra de maneira mais rápida e eficaz;
- filtração, através de tanques com areia em que a água se move de forma a purificar-se, sendo coada de forma a impedir que as partículas maiores que os vazios da areia atravessem o filtro;
- desinfecção, destina-se a exterminar, através de desinfetantes, os germes patogênicos porventura existentes na água;
- aeração, proporciona contato do ar com a água, afim de que seja efetivada a dissolução, o desprendimento de gases, ou a oxidação de compostos inconvenientes;

– fluoreção, que consiste na aplicação de flúor na água para a proteção dos dentes, principalmente das crianças.

Além destes métodos tem-se: a remoção de ferro, manganês e outros minerais; o abrandamento; a prevenção de gostos e odores e a correção da corrosão.

3.2.4 – Armazenagem

Após o tratamento, a água pode ser acumulada em um reservatório de armazenagem próximo ao local da estação de tratamento. Do armazenamento a água é bombeada para um ou mais reservatórios elevados, em adutoras por recalque, de onde, por gravidade, é levada aos centros populacionais consumidores.

Os reservatórios permitem o estoque da água para o atendimento das flutuações ou variações de consumo, a regularização das pressões na rede e o suprimento de água nas demandas de emergência da cidade. Em caso de acidentes, em órgãos do sistema de captação-tratamento ou em certos trechos da própria rede, os reservatórios mantêm a continuidade do abastecimento à rede de distribuição. Na operação dos reservatórios deve também ser previsto um volume de água para combate à incêndios, contribuindo para a segurança e economia da comunidade (Netto *et al.*, 1973).

3.2.5 - Distribuição

Dentre as diversas etapas que compõem o abastecimento de água, a distribuição é a que apresenta maior grau de complexidade, uma vez que o consumo é, por natureza, aleatório e sazonal, não só em termos de variações ao longo do dia, como também devido às variações das estações do ano (Santana, 1999).

A rede de distribuição de água é constituída por um conjunto de condutos assentes nas vias públicas, junto aos edifícios, com a função de conduzir a água para os prédios e pontos de consumo público (Martins, 1968). As pressões na rede devem ser suficientes para atender aos consumidores e à demanda de incêndio.

Os condutos da rede de distribuição dividem-se em: principais e secundários. Os condutos principais, também chamados de troncos, possuem os maiores diâmetros e são responsáveis pela alimentação dos condutos secundários. Estes, por sua vez, são de menor diâmetro e estão imediatamente em contato com os prédios a serem abastecidos.

O traçado das redes de distribuição pode ser classificado como em (Babbit *et al.*, 1973):

- anel ou circuitos;
- malha;
- árvore;

Os nomes são descritos da maneira pela qual os condutos principais estão dispostos no plano. A maioria das redes de distribuição contém aspectos de cada tipo de traçado, embora a rede em malha predomine especialmente nas grandes cidades. Verifica-se também a combinação de traçados, onde a rede interna da cidade malhada e circundada por um traçado em anel.

Na rede malhada, ou em malha, os condutos são conectados de modo que vários sejam ligados a um mesmo nó. Uma das grandes vantagens deste tipo de traçado é a continuidade de abastecimento nos casos de rompimento, falhas ou paradas para manutenção, através de caminhos alternativos. A grande desvantagem desta configuração é a maior dificuldade de determinação de rompimento nas tubulações.

3.2.6 - Estações de bombeamento

As estações de bombeamento compreendem um conjunto de edifícios, máquinas, equipamentos e aparelhos para elevação da água, bruta ou tratada, de um ponto a outro dos sistemas de suprimento de água. Fazem parte das estações de bombeamento:

- motores, que fornecem energia mecânica;
- bombas, que transformam energia mecânica em energia cinética e potencial de pressão que permitem a elevação da água;
- poço de sucção (quando necessário) e tubulações de sucção, de manobra e de recalque;

- máquinas e aparelhos necessários à operação, controle e segurança.

Por questões de segurança, devem existir bombas auxiliares prontas para o acionamento em casos de pane ou necessidade de manutenção, além de garantir uma rotatividade de funcionamento que prolongue a vida útil das mesmas (Santana, 1999).

O bombeamento é utilizado em várias partes do sistema público de abastecimento de água, seja na captação dos mananciais de superfície ou poços, no recalque a pontos distantes ou elevados na distribuição, ou, ainda, no reforço da capacidade de adução dos dutos. As bombas fornecem energia à água, sendo esta energia aproveitada sob a forma cinética, proporcionando um acréscimo de velocidade, ou, ainda, sob a forma de energia potencial, na condução da água a um ponto mais elevado.

A maior parcela da energia elétrica consumida nos sistemas de suprimento de água, cerca de 80%, se destina ao bombeamento (Oliver & Putnam, 1997).

3.2.6.1 - Bombas centrífugas

No bombeamento dos sistemas urbanos de abastecimento de água há um predomínio quase total das bombas centrífugas. Este tipo de bomba é um dispositivo que eleva um líquido pela força centrífuga criada pelo rotor, girando numa carcaça fechada. Durante a operação, o líquido entra numa direção normal no plano no qual gira o rotor, a direção do fluxo é então alterada em 90° e a água é jogada para a periferia pela força centrífuga resultante da revolução do rotor (Macintyre, 1987).

Algumas vantagens que justificam o uso de bombas centrífugas no abastecimento de água são:

- necessidade de espaço relativamente pequeno;
- movimento rotativo ao invés de recíproco;
- adaptabilidade a mecanismos de alta velocidade, tais como motores elétricos;
- baixo custo inicial;
- mecanismo, operação e reparo simples;

- características que podem ser alteradas mudando-se o rotor;
- vida longa;
- segurança contra danos pela alta pressão, por possuírem limitação máxima de pressão.

A caracterização de uma bomba centrífuga se dá através da *vazão de bombeamento* e da *altura manométrica total* capaz de ser produzida pela bomba a essa vazão. Outras grandezas também consideradas são: *altura estática de sucção e de descarga*, *rotação*, *potência absorvida* e a *eficiência* da bomba, definidas a seguir:

- *vazão de bombeamento* é o volume de água a ser elevado na unidade de tempo e a determinada altura manométrica;
- *altura manométrica total* é a soma das alturas estáticas (sucção e descarga) com as perdas localizadas e por atrito que ocorrem nas peças e tubulações, quando se recalca a uma determinada vazão;
- *altura estática de sucção* é o desnível geométrico entre o nível de água no poço de sucção e a linha de centro da bomba;
- *altura estática de descarga* é o desnível geométrico entre a linha de centro da bomba e o nível de água do reservatório de descarga;
- *rotação* é caracterizada pela velocidade que a máquina de acionamento imprime à bomba; no caso de motor elétrico, essa velocidade é função direta da frequência ou ciclagem da corrente e número de pólos que o motor possui;
- *eficiência* é a relação existente entre os valores equivalentes à potência hidráulica da bomba devido à elevação da água e a potência exigida pela mesma do motor numa determinada condição de funcionamento;

A *potência* absorvida pela bomba é determinada, em CV, através da equação 3.1.

$$P = \frac{\gamma Q H_{\text{man}}}{75\eta} \quad (3.1)$$

Sendo :

γ - peso específico da água em kgf / m^3 ;

Q - vazão em m^3/s ;

H_{man} - altura manométrica em m;

η - eficiência da bomba.

As bombas centrífugas são máquinas que podem trabalhar à mesma rotação sob diferentes condições de vazão e de altura manométrica, existindo uma interdependência bem definida entre esses valores. A chamada *curva característica da bomba* permite relacionar graficamente vazão de bombeamento com a altura manométrica. Curvas podem ser igualmente traçadas relacionando a vazão de bombeamento com a potência absorvida, ou com o rendimento, ou ainda com a altura estática de sucção sendo todas elas válidas para uma determinada rotação. As curvas características de uma bomba são obtidas através de ensaios diretos ou efetuados em modelos reduzidos. A Figura 3.2 apresenta uma curva característica típica.

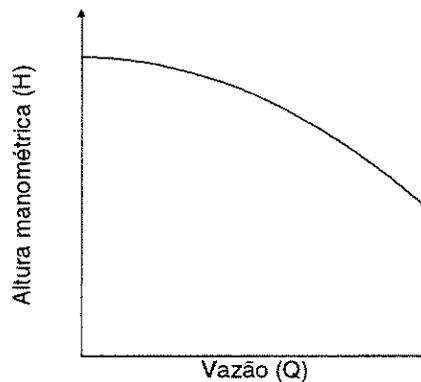


Figura 3.2 - Típica curva característica de bomba

Dois pontos de maior interesse na curva característica de uma bomba são: a descarga nominal da bomba e o *shutoff head*. A descarga nominal da bomba é a vazão na qual a bomba opera na eficiência máxima e *shutoff head* é a altura manométrica de saída da bomba com zero de vazão (Mays & Tung, 1992).

A *curva característica do encanamento* fornece os valores de perda de carga devido ao atrito da água com as paredes internas da tubulação correspondentes a cada valor de vazão. Essa curva é obtida calculando-se as perdas de carga nas tubulações para várias vazões de escoamento somadas à altura geométrica. A perda de carga em um encanamento é também função da rugosidade do tubo. Com o passar do tempo as paredes dos condutos vão se tornando mais rugosas, devido à corrosões e

incrustações, de modo que as perdas de carga tendam a aumentar, para a mesma vazão de escoamento.

A interseção da curva característica da bomba com a curva característica do encanamento fornece o ponto de operação da bomba. Conforme apresentado na Figura 3.3.

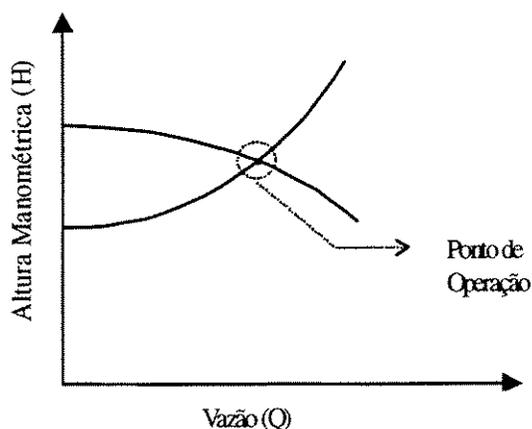


Figura 3.3 - Combinação das curvas características da bomba e do encanamento

3.2.6.2 - Associação de bombas

As bombas centrífugas podem ser associadas em série ou em paralelo. A associação em série de bombas é feita quando se deseja aumentar a altura manométrica, ou a pressão de descarga; e a associação em paralelo é realizada como o intuito de aumentar a vazão d'água da instalação.

A associação de bombas em paralelo consiste na ligação em que por uma mesma tubulação afluam as vazões de duas ou mais bombas funcionando simultaneamente. Deve-se preferencialmente associar bombas iguais em paralelo a fim de evitar correntes secundárias, no sentido das bombas de maior potência para as bombas de menor (Macintyre, 1987). A curva característica da associação é obtida somando-se para cada valor de altura manométrica, as abcissas Q (vazão) de cada bomba, conforme apresentado na Figura 3.4.

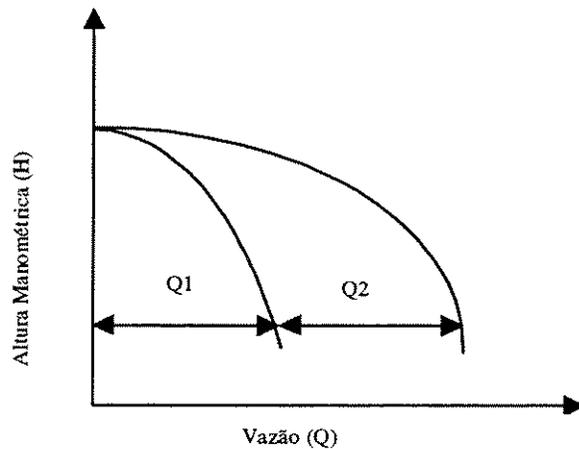


Figura 3.4 - Curvas características das bombas em paralelo

Para se saber as exatas condições de funcionamento da associação em paralelo de bombas é necessário que se conheça a curva característica do encanamento. Devido às perdas de carga no encanamento, a vazão de saída de n bombas em paralelo é menor que n vezes a vazão de uma bomba funcionando isoladamente e em análogas condições. Se as curvas características das bombas forem pouco inclinadas e se o encanamento indicar acentuada perda de carga, a associação em paralelo não apresentará vantagem apreciável no aumento de descarga d'água, o que pode ser observado através da Figura 3.5. Além disso, cada bomba irá trabalhar com vazão muito abaixo do seu valor nominal, o que poderá vir a causar aquecimento excessivo e cavitação, que é um fenômeno de erosão das pás da bomba.

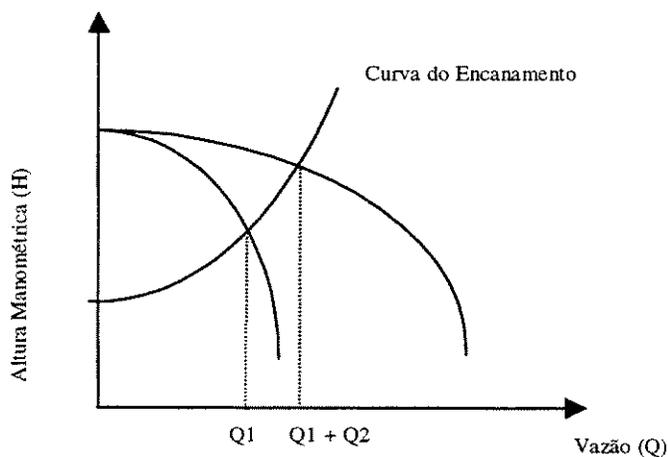


Figura 3.5 - Combinação das curvas características das bombas em paralelo e do encanamento

3.3 - Perdas de água

Perdas de água existem em todas as partes dos sistemas de abastecimento, desde a captação até a rede de distribuição, podendo se classificarem como perdas físicas e não-físicas.

As perdas físicas originam-se de vazamentos, tanto em decorrência da operação, como por existência de rompimentos, corrosão ou fracas conexões na tubulação. Estas perdas são diretamente proporcionais ao comprimento da tubulação e variam de acordo com o material utilizado.

As perdas não-físicas advêm de ligações clandestinas ou não cadastradas, hidrômetros parados ou que submedem, fraudes, etc.

A redução das perdas de água constitui uma importante medida de conservação de água e energia elétrica nos sistemas de saneamento. No caso das perdas não-físicas, a redução destas permite o aumento da receita, melhorando o desempenho financeiro das empresas de saneamento, além da contribuição indireta na ampliação da oferta efetiva, dado que induz à redução dos desperdícios por força da aplicação da tarifa aos volumes efetivamente consumidos (SNPSA, 1998).

A estimativa das perdas deve ser feita através da comparação entre o volume de água transferido de um ponto do sistema e o volume de água recebido em um ou mais pontos do sistema situados a jusante do ponto de transferência (PNCDA, 1998).

Constata-se no país, uma carência de dados estatísticos referentes aos serviços de suprimento de água; isto se deve às dificuldades de controle e deficiência de medição nos sistemas de abastecimento. As companhias não sabem ao certo o quanto de água é jogada fora diariamente.

O SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, ligado ao Ministério do Planejamento e Orçamento (MPO), editou, em abril de 1998, um documento intitulado: “Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto – 1996”. Neste documento, faz-se a tentativa de traçar um perfil das empresas brasileiras de saneamento. Em se tratando da perda estimada de água nos sistemas, as empresas estaduais de saneamento estariam perdendo aproximadamente 41% de toda água explorada, sendo que este número leva em consideração as perdas físicas e não-físicas. Fato igualmente alarmante são detectados nas empresas municipais, em que, quase todos os níveis de

perdas totais apresentaram-se superiores a 40%, com casos mais preocupantes como Juazeiro/BA em que as perdas chegam a 67,5% e Uberlândia/MG (64,5%).

Capítulo 4

Modelo de Otimização

Este capítulo apresenta o modelo de otimização operacional desenvolvido para o sistema urbano de abastecimento de água da cidade de Macapá; passando primeiramente e de forma sucinta, pelos conceitos de “pesquisa operacional” e “otimização”.

4.1 – Definições

A otimização de sistemas ou processos é um assunto que vem despertando o interesse dos homens desde a pré-história. Todas as decisões que tomamos hoje, seja na nossa vida profissional ou pessoal, usualmente tem o objetivo de otimizar alguns fatores desejáveis. Apesar disto, o uso científico de técnicas quantitativas específicas em processos de decisões só emergiu recentemente.

Durante a II Guerra Mundial o governo britânico requisitou cientistas de várias disciplinas para resolverem problemas operacionais de guerra; daí consolidou-se um novo ramo da ciência: a *pesquisa operacional*, que tem na *otimização* sua principal vertente. Um fator de importância vital para a crescente utilização destes estudos foi o desenvolvimento dos computadores, importantes não somente na resolução dos modelos de otimização, mas também na influência direta no nosso modo de pensar sobre problemas complexos.

Murty (1995) define: “*Pesquisa operacional é um ramo da ciência que trabalha com o uso de técnicas para a otimização do desempenho dos sistemas*”. É um método científico que fornece aos decisores uma base quantitativa e racional para a escolha entre opções, especialmente aquelas que tratam da alocação de recursos.

A crescente especialização dos trabalhadores, desde a Revolução Industrial, faz com que os decisores das empresas possuam relativa autonomia, valores e objetivos próprios e uma visão limitada do processo de produção como um todo. Estas restrições fazem com que, na maioria das vezes, as decisões tomadas por um gerente setorial representem o melhor para um segmento em particular, mas não o melhor global para a empresa. Neste contexto, as técnicas de otimização são utilizadas para que os recursos sejam alocados de maneira eficiente e os objetivos da empresa sejam alcançados.

4.1.1 – Problema de otimização

O processo de resolução de um problema de otimização se inicia com a observação cuidadosa, formulação do problema e posterior construção matemática (modelagem) que resgata a essência abstrata do problema real. Segundo Murty (1995), os passos da Pesquisa Operacional para otimizar algum sistema são:

- identificação das variáveis de decisão;
- construção de um modelo matemático da operação do sistema e objetivos a serem alcançados;
- resolução do modelo, encontrando uma solução matemática ótima;
- análise de sensibilidade para a verificação da “robustez” do modelo;
- implementação da solução ótima; feitos os ajustes para a aplicação real da solução matemática encontrada. Caso seja concluída a inviabilidade da aplicação, todas as fases devem ser retomadas para a remodelagem do problema.

Um modelo pode ser definido como uma descrição esquemática do sistema em consideração. De acordo com Sakarovitch (1971), a construção do modelo consiste na extração da realidade complexa de um problema e sua representação adequada de acordo com as propostas a serem consideradas.

A elaboração do modelo é uma etapa trabalhosa, exigindo que sejam definidos: o sistema, as variáveis de decisão e a escolha do que razoavelmente pode ser desprezado. É muito importante que o decisor não se esqueça que, na grande maioria das vezes, o modelo não é uma representação exata dos elementos reais do problema, o que implica que as soluções obtidas pelo mesmo devam ser

ajustadas, quando necessário, para a aplicação ao sistema real. Isto exige do decisor um verdadeiro entendimento dos resultados do modelo e o funcionamento do seu sistema de trabalho.

4.2 – Modelo de Otimização do Abastecimento de Água de Macapá

As técnicas de otimização, aplicadas como auxílio à tomada de decisões, pressupõem a colocação de um problema que admite várias soluções alternativas que podem ser avaliadas com um critério de decisão. No caso específico do abastecimento de água de Macapá, o problema de decisão que se coloca é o seguinte:

Qual o regime diário de operação das bombas do sistema capaz de atender à demanda prevista com um mínimo consumo, e/ou custo, de eletricidade?

Este problema pode ser tratado de diversas formas, dependendo das características do problema. O método de programação dinâmica é bastante aplicado em problemas onde o número de variáveis de estados seja reduzido. No caso de sistemas de distribuição de água, as variáveis de estado são os volumes dos reservatórios, o que dificulta o emprego desta metodologia em sistemas do porte da rede de Macapá.

O modelo de otimização operacional do sistema de água de Macapá utiliza o código computacional SCODA, desenvolvido por Correia (1988), que implementa um método de programação linear especializado para grafos. Algoritmos de otimização em grafo generalizados são especializações de programação linear para redes. Estes algoritmos permitem abordar problemas de porte considerável em termos do número de variáveis e restrições com recursos computacionais modestos, tais como microcomputadores (Correia, 1997).

No modelo de otimização de Macapá, a configuração da rede é fixada, sendo conhecidas suas conexões, as capacidades das adutoras, dos reservatórios e as demandas. O problema consiste em determinar os fluxos através da rede, em cada intervalo de tempo e também entre intervalos subsequentes. As adutoras representam conexões em um mesmo intervalo de tempo, enquanto os reservatórios acoplam intervalos subsequentes, caracterizando um problema típico de controle de estoque, neste caso a água acumulada nos reservatórios.

Os nós do grafo estão associados aos pontos de captação, aos reservatórios e aos pontos de consumo, e os arcos do grafo correspondem às adutoras e a quantidade de água armazenada nos reservatórios de um intervalo de análise para outro, que representam os acoplamentos temporais.

A operação do modelo de otimização do sistema Macapá é programada dentro de um horizonte de planejamento no curto prazo (24 horas) discretizado em oito intervalos, de três horas cada.

A Equação 4.1 apresenta a função objetivo do modelo de otimização, tendo-se como intuito minimizar o consumo de energia elétrica nobombeamento do sistema de água de Macapá.

$$\min f(x) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^B c_i^t x_i^t \quad i, t \in Z \quad (4.1)$$

onde:

c_i^t consumo específico da bomba i no intervalo t (kWh/m³);

x_i^t quantidade de água bombeada pela bomba i em t (m³);

T número de intervalos;

B número de bombas.

As restrições do modelo são o balanço de fluxo nos nós da rede e os limites operacionais dos elementos do sistema, como, por exemplo, as capacidades mínima e máxima das adutoras e dos reservatórios.

O balanço de fluxo (ou massa) de um nó estabelece que a quantidade de água que entra em um nó deve ser igual a quantidade que sai do mesmo. A Equação 4.2 representa o balanço de fluxo em um determinado nó (j) para um dado intervalo de análise.

$$\sum_{(j,m) \in K_j^+} x_{mj} - \sum_{(j,n) \in K_j^-} x_{jn} = b_j \quad (4.2)$$

onde:

x_{mj} quantidade de água que entra no nó j a partir do arco mj (m³);

K_j^+ conjunto de arcos que entram no nó j ;

x_{jn} quantidade de água que sai do nó j através do arco jn (m^3);

K_j^- conjunto de arcos que saem do nó j ;

b_j demanda do nó j (m^3).

Um carácter multiobjetivo pode ser dado ao problema de operação da rede de abastecimento de água de Macapá, considerando a minimização de duas funções-objetivo: o consumo e o custo da energia elétrica. O conflito entre os dois objetivos é quantificado através da curva de *tradeoff*, traçada no espaço dos objetivos. A escolha destes dois objetivos a serem minimizados se dá no sentido de investigar a ponderação dos interesses da companhia de água, que deseja diminuir seus custos operacionais, com os interesses da sociedade e da concessionária de energia, na redução no consumo de energia elétrica e modulação da carga da companhia de água.

As técnicas de otimização para problemas multiobjetivo podem ser classificadas em duas categorias: aquelas que procuram estabelecer o conjunto de todas as soluções não-dominadas¹, deixando o processo de escolha aos decisores; e outras que incluem as preferências para estabelecer diretamente soluções ótimas (Goicoechea *et al.*, 1982). Neste trabalho utiliza-se o Método dos Pesos (Steuer, 1989), que se encaixa na primeira categoria.

Quando o número de objetivos é reduzido, particularmente quando se considera apenas dois objetivos, o método dos pesos oferece uma forma atraente para gerar a curva de *tradeoff* do problema. Neste caso, o processo de obtenção das soluções não-dominadas fica reduzido a uma parametrização na função de um problema com um único objetivo (Balachandran *et al.*, 1981).

O problema multiobjetivo da rede de água de Macapá possui duas funções-objetivo: a primeira função, consumo de energia elétrica, é representada por c_1 e a segunda função, custo da energia elétrica, é representada por c_2 . Dado que o custo da energia elétrica, neste caso, é calculado como o consumo de energia multiplicado pela tarifa cobrada pela companhia de eletricidade, a função c_2 dois pode ser escrita em função de c_1 , da seguinte forma:

¹ Uma solução factível x^1 de um problema multiobjetivo é dita não-dominada se, a partir dela, não for possível melhorar simultaneamente todas funções-objetivo.

$$C_2 = T \times C_1 \quad (4.3)$$

onde T é a tarifa de eletricidade (R\$/KWh).

Os pesos (λ) relativos a cada uma das funções-objetivo podem variar de 0 a 1 de forma que sempre: $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$.

A função composta, resultante da parametrização das duas funções-objetivo do problema da rede de água de Macapá, pode ser escrita da seguinte forma:

$$\min f(x) = \lambda_1 c_1 + \lambda_2 c_2 = \lambda_1 c_1 + (1 - \lambda_1)(T \times c_1) = (\lambda_1 + T(1 - \lambda_1))c_1 \quad (4.4)$$

Portanto, representada somente por variáveis de uma das funções-objetivo, a função composta do problema se resume a Equação 4.5.

$$\min f(x) = (\lambda_1 + T(1 - \lambda_1))c_1 \quad (4.5)$$

A equação acima é utilizada como função objetivo do modelo na análise multiobjetivo do sistema principal de abastecimento de água em Macapá.

O modelo de otimização fornece ainda a possibilidade de se realizar uma análise paramétrica do custo da energia elétrica em relação a variação do limite mínimo admissível de água armazenada nos reservatórios principais. Este limite mínimo de armazenagem é tomado como uma medida de segurança da rede; quanto maior o volume armazenado menor o risco do sistema em situação emergencial. A curva de *tradeoff*, gerada a partir do modelo, quantifica o custo ótimo do bombeamento em relação a cada nível de armazenagem do sistema. De posse desta curva, a companhia de água tem mais subsídios para a escolha do ponto de operação de sua preferência, no qual o sistema deve operar.

4.3 – Configuração da Rede Principal de água da CAESA em Macapá

A CAESA - Companhia de Água e Esgoto do Amapá é responsável pelo abastecimento de água tratada à população de Macapá. A Figura 4.1 apresenta um *layout* do sistema principal de

abastecimento de água da cidade, onde a captação principal é feita através do Rio Amazonas, e os sistemas periféricos possuem pequena capacidade de captação, armazenagem e distribuição de água.

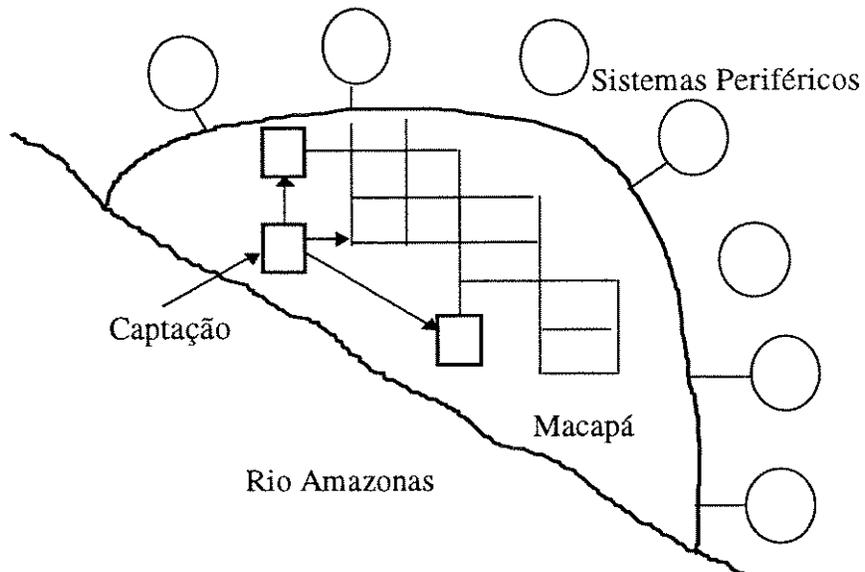


Figura 4.1 - Layout do sistema de abastecimento de água em Macapá

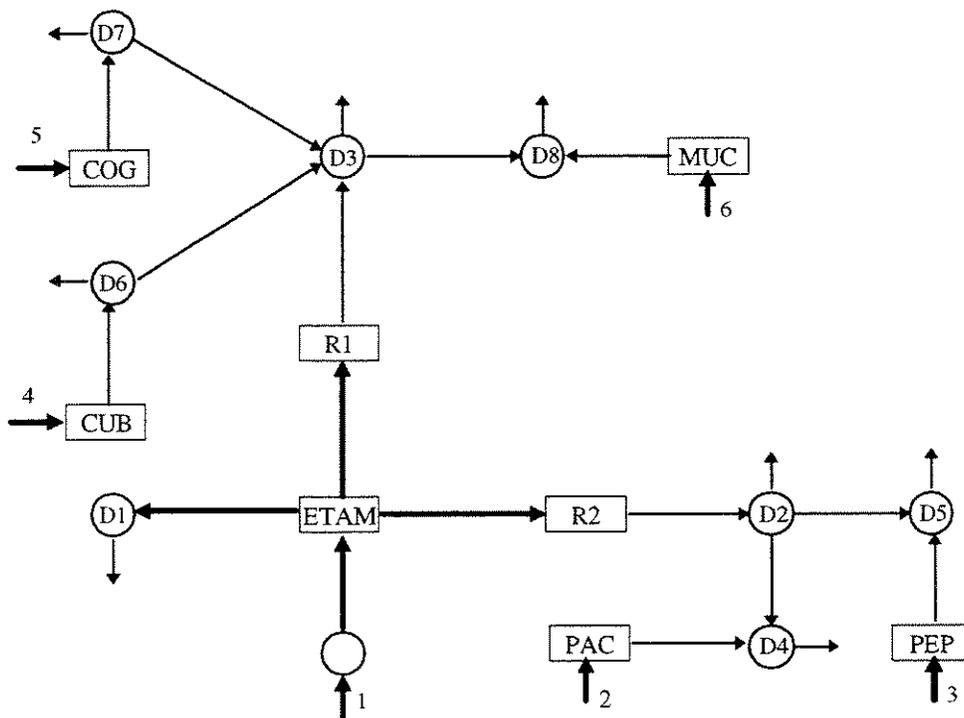


Figura 4.2 - Sistema principal de abastecimento de água em Macapá

A Figura 4.2 apresenta um esquema topológico do sistema principal de suprimento de água de Macapá, onde são destacadas as captações, reservatórios e rede de distribuição. Esta rede foi utilizada na elaboração do modelo de otimização.

Os traços mais fortes da Figura 4.2 representam os arcos em que a condução da água se realiza através do auxílio de bombas, que são as captações e recalques. Ainda na Figura 4.2, a distribuição de água foi agrupada por pontos, identificados pela letra D seguida de um algarismo. Os reservatórios foram nomeados de forma a facilitar a identificação de cada um, e excluindo-se os dois grandes reservatórios centrais R1 e R2, os demais se identificam pela abreviação do nome original de cada região de distribuição de água que compõe o sistema principal de Macapá, citadas a seguir:

- ETAM: Estação Central – Amazonas;
- PAC: Sistema Pacoval;
- PEP: Sistema Perpétuo Socorro;
- CUB: Sistema Cuba do Asfalto;
- COG: Sistema Congós;
- MUC: Sistema Muca.

Sintetizando as informações obtidas a partir da Figura 4.2, o sistema urbano principal de água em Macapá possui:

- 6 captações (bombeamento captação / reservatório), numeradas de 1 a 6;
- 3 adutoras por recalque (bombeamento reservatório / reservatório), ETAM→R2, ETAM→R1 e ETAM→D1;
- 13 condutos de distribuição por gravidade (reservatório / distribuição);
- 8 reservatórios de distribuição;
- 8 pontos de distribuição (concentração do consumo);
- 1 decantador.

4.3.1 – Características do Sistema

Todos os dados relativos ao comportamento das demandas de água e limites operacionais do sistema de água em Macapá foram fornecidos pela CAESA.

Demandas de água

As demandas diárias de água em cada ponto de distribuição do sistema principal de abastecimento de água de Macapá se apresentam na Tabela 4.1. Estas demandas foram obtidas, junto a CAESA, através de estimativas levando em consideração as demandas históricas do sistema.

Distribuição	Demanda média diária m ³)
D1	4845
D2	5521
D3	6981
D4	1500
D5	3200
D6	4200
D7	3600
D8	1000

Tabela 4.1 - Demanda média diária em cada ponto de distribuição

Intervalo	Horário	Porcentagem de demanda
1	04:00 – 07:00 hs	0.06
2	07:00 – 10:00 hs	0.15
3	10:00 - 13:00 hs	0.14
4	13:00 - 16:00 hs	0.17
5	16:00 - 19:00 hs	0.21
6	19:00 - 22:00 hs	0.19
7	22:00 - 01:00 hs	0.06
8	01:00 - 04:00 hs	0.02

Tabela 4.2 - Porcentagem de demanda em cada intervalo

As demandas diárias de cada ponto de distribuição de água foram discretizadas em intervalos de 03 horas considerando uma curva típica de consumo. A Tabela 4.2 mostra o comportamento desta curva típica, através desta tabela, observa-se que historicamente o maior percentual de consumo de água no sistema de Macapá encontra-se no intervalo das 16:00 às 22:00 hs, intervalos 6 e 7. Estes intervalos englobam o horário de “pico” do sistema elétrico, fazendo com que durante algum período de tempo o horário de *rush* do sistema elétrico e de água coincidam. Este comportamento da curva

de demanda de água de Macapá não pode ser generalizado para todo país, pois devido à existência de reservatórios prediais na maioria das instalações brasileiras, o horário de pico do abastecimento de água é um pouco deslocado do sistema elétrico.

A Figura 4.3 apresenta os dados da Tabela 4.2 normalizados em função da maior demanda do dia.

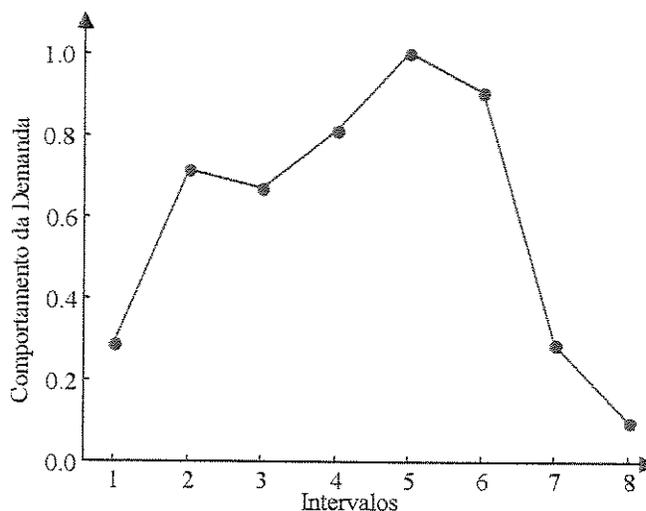


Figura 4.3 – Comportamento normalizado da demanda de água

Limites operacionais

Dentre os limites operacionais do sistema, estão as vazões máxima e mínima nas captações, adutoras por recalque e nos condutos de distribuição. As Tabelas 4.3 e 4.4 apresentam os limites máximos admissíveis de vazão d'água nas captações e nas adutoras por recalque (denominadas simplesmente de *recalques*).

Captação	Vazão máxima (m ³ /h)
1	1620
2	100
3	200
4	200
5	200
6	200

Tabela 4.3 - Limites máximos admissíveis de água nas captações

Recalque	Vazão máxima (m ³ /h)
ETAM→R2	612
ETAM→R1	414
ETAM→D1	662

Tabela 4.4 - Limites máximos admissíveis de água nos recalques

Conforme já mencionado, a captação 1 é feita diretamente do Rio Amazonas, sendo a grande responsável pelo suprimento do sistema principal de água de Macapá.

Para os condutos de distribuição por gravidade, os limites máximos de vazão d'água são idênticos e possuem o valor de 1000 m³/h.

A Tabela 4.5 apresenta a capacidade de armazenagem de água nos reservatórios; através da mesma, observa-se que no sistema principal de água de Macapá há alguma capacidade de armazenagem em apenas três reservatórios (ETAM, R1 e R2), enquanto que nos sistemas periféricos esta capacidade é irrelevante. É importante ressaltar que a baixa capacidade de armazenagem, em alguns pontos da rede de suprimento de água, limita a flexibilidade operacional do sistema.

Reservatório	Capacidade (m ³)
ETAM	6000
R2	1000
R1	1000
PAC	100
PEP	100
CUB	100
COG	100
MUC	100

Tabela 4.5 - Capacidade de armazenamento dos reservatórios

Consumo Específico de Energia Elétrica do Bombeamento

Apresenta-se na Tabela 4.6 o consumo específico de energia elétrica no bombeamento das captações.

O consumo específico de cada bomba foi calculado de acordo com as características das máquinas. Considerando todas as bombas trabalhando com a vazão nominal, o consumo específico de cada uma foi obtido através da divisão da potência da bomba (kW) por sua vazão nominal (m³/h).

Captação	Consumo específico (kWh/m ³)
ETAM	0.1612
PAC	0.5000
PEP	0.5000
CUB	0.5000
COG	0.5000
MUC	0.5000

Tabela 4.6 - Consumo específico de energia das captações

As estações de bombeamento dos recalques que partem do reservatório ETAM possuem três bombas iguais operando em paralelo. Devido as perdas de carga no encanamento, a vazão de descarga não é linearmente proporcional ao número de bombas em operação. Conforme visto no Capítulo 3 deste trabalho, o ponto em que cada associação de bombas (uma, duas ou três) opera é obtido através da interseção da curva característica da associação com a curva da perda de carga do encanamento.

O sistema de água de Macapá não possui medição e monitoramento da rede necessários para a determinação da curva de perda de carga do encanamento, deste modo foi necessário se estimar a dimensão das perdas e o comportamento da referida curva. Os valores utilizados foram revisados por especialistas da própria companhia de água de Macapá.

A Figura 4.4 apresenta os valores, utilizados no modelo, correspondentes às parcelas de vazões de cada associação de bombas. A primeira curva característica de bomba refere-se a operação de apenas uma bomba, a segunda representa o resultado da associação de duas bombas em paralelo e por fim a terceira refere-se a situação da operação simultânea das três bombas.

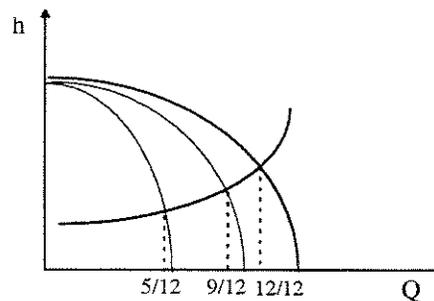


Figura 4.4 - Vazão x Altura Manométrica do conjunto de bombas de recalque

Tomando a vazão total das três bombas operando em paralelo como referência, a Figura 4.4 mostra que duas bombas em paralelo produziram juntas 9/12 desta vazão, e apenas uma bomba operando seria responsável por 5/12 da vazão total.

A Figura 4.5 apresenta o gráfico de Potência × Vazão dos conjuntos de bombeamento dos recalques, utilizando as proporções de vazão supracitadas.

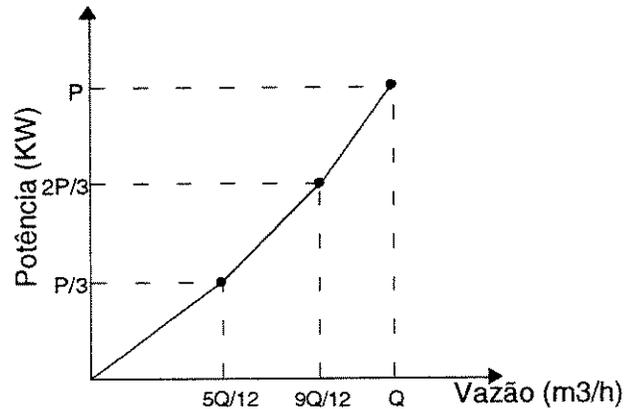


Figura 4.5 - Vazão × Potência dos bombeamentos de recalque

Pelo gráfico da Figura 4.5 observa-se que o consumo específico de energia do conjunto de bombas não é constante, e sim varia de acordo com a quantidade de bombas em operação, sendo menor para o uso de uma bomba e maior no caso de se ter as três bombas em operação. Tem-se, portanto, um comportamento linear por partes da eficiência energética dos bombeamentos de recalque. Este fato sugere um procedimento para reduzir o consumo de eletricidade: acumular água nos reservatórios quando a demanda for baixa, procurando evitar, desta forma, a operação simultânea das três bombas no horário de pico do sistema elétrico. O modelo desenvolvido busca exatamente otimizar este procedimento, minimizando o consumo de energia elétrica do sistema.

As Tabelas 4.7, 4.8 e 4.9 apresentam os valores de consumo específico de energia elétrica obtidos para o funcionamento linear por partes do conjunto de bombas dos recalques.

ETAM → R2 Nº de bombas	E (kWh/m ³)
1	0.2486
2	0.3108
3	0.4144

Tabela 4.7 - Consumo específico do recalque ETAM → R2

ETAM → R1 N° de bombas	E (kWh/m ³)
1	0.3315
2	0.4144
3	0.5525

Tabela 4.8 - Consumo específico do recalque ETAM → R1

ETAM → D1 N° de bombas	E (kWh/m ³)
1	0.0888
2	0.1110
3	0.1480

Tabela 4.9 - Consumo específico do recalque ETAM → D1

Tarifa de Energia Elétrica

A CAESA paga à concessionária de energia elétrica local uma tarifa única de R\$ 59,45/MWh, independente do horário de funcionamento das bombas.

Uma tarifa horosazonal de referência foi formulada, a fim de avaliar o comportamento do modelo face a esta prática tarifária. Esta tarifa de referência foi calculada com base na tarifa única que a CAESA paga à ELETRONORTE e proporcionalmente à *tarifa verde/A4 período úmido* cobrada pela CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz), mantidas as proporções entre o custo da energia elétrica na ponta e fora dela (Andrade & Correia, 1998a). O uso da *tarifa verde* se aplica à sistemas que possuem alta capacidade de modulação da carga, derivando daí a escolha deste tipo de tarifa para a análise do sistema de água de Macapá. Os valores da tarifa de referência encontram-se na Tabela 4.10.

Período	Tarifa (R\$/MWh)
Fora de ponta	28,28
Ponta	299,55

Tabela 4.10 - Tarifa horosazonal de referência

No Apêndice A encontram-se detalhados os arquivos exemplo de entrada e saída de dados do modelo de otimização.

Capítulo 5

Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através do modelo de otimização do sistema principal de água da CAESA em Macapá, e também a descrição dos resultados de uma simulação operacional realizada com o intuito de servir de base comparativa na avaliação do modelo.

5.1 - Simulação Operacional

O modelo de otimização do abastecimento de água de Macapá trabalha de forma a obter um regime diário de operação das bombas que minimize, de forma ponderada, o consumo e o custo da energia elétrica na rede. Para a avaliação comparativa do modelo de otimização faz-se necessário que os resultados advindos do mesmo sejam confrontados com os valores de consumo e custo da energia elétrica no sistema derivados da atual regra de operação.

A companhia de água de Macapá possui apenas o controle histórico dos valores dos consumos anuais de energia elétrica do seu sistema, não estando estes valores discretizados em parcelas destinadas aos vários fins como iluminação e bombeamento. Para a realização da avaliação do modelo de otimização, seria necessário o conhecimento do consumo médio diário de energia elétrica destinado particularmente às bombas. Outro agravante para um estudo comparativo é o fato do modelo de otimização trabalhar apenas com a parte principal do sistema de água de Macapá, e a companhia não possuir os dados de consumo de energia elétrica setorizados.

Desta forma, a análise comparativa dos resultados do modelo de otimização é dificultada devido à restrição de dados que representem adequadamente o funcionamento atual do sistema

analisado. Procurando contornar este problema, em busca de uma avaliação coerente, desenvolveu-se um modelo de simulação que visa representar o comportamento atual da operação do sistema de água de Macapá. Para a construção do modelo de simulação operacional utilizou-se algumas políticas freqüentemente adotadas no meio, levando em conta todas considerações feitas no modelo de otimização.

As regras adotadas na simulação operacional do sistema de Macapá foram as seguintes:

- os reservatórios devem iniciar e terminar o dia completamente cheios,
- os sistemas periféricos (pequenos reservatórios) são operados de forma independente, ou seja toda a demanda de água destas partes são supridas pela captação e tratamento relacionados a cada um deles.
- cada vez que o nível de água armazenada nos reservatórios esteja abaixo de 50% de sua capacidade total o operador toma a decisão de enchê-lo novamente.

Na última regra citada acima fez-se também uma variação onde considerou-se o limite mínimo permitido de armazenagem em 80% da capacidade máxima de cada reservatório.

Acredita-se que a política adotada no modelo de simulação seja mais eficiente que a atualmente feita pela companhia (Andrade & Correia, 1998b).

No estudo de simulação o período diário foi dividido em oito intervalos de três horas cada, semelhante ao procedimento adotado no modelo de otimização. A execução da simulação foi manual, feita através dos seguintes passos:

- 1) tomou-se a representação topológica do sistema principal de abastecimento de água de Macapá nos oito intervalos diários analisados,
- 2) para cada intervalo, os dados de entrada se referiam as demandas diárias em cada ponto de distribuição,
- 3) respeitando os limites operacionais do sistema e seguindo as metodologias adotadas, obteve-se os valores de consumo de água em cada ponto da rede de abastecimento,

4) os valores relativos aos bombeamentos foram posteriormente lançados em uma planilha do *software Excel*[®], de modo a se obter os respectivos consumo e gastos diários com energia elétrica no sistema.

O modelo de simulação foi utilizado com os dois limites mínimos de armazenagem nos reservatórios (50% e 80% da capacidade total de cada um). No uso de um maior limite mínimo de armazenamento, o nível de segurança na rede de suprimento de água aumenta, pois na ocorrência de uma emergência tem-se água armazenada para o atendimento. Em contrapartida perde-se volume de manobra nos reservatórios, exigindo trabalho constante das bombas, mesmo nos horários em que a energia elétrica é mais onerosa.

5.1.1 – Resultados do Modelo de Simulação Operacional

Limite mínimo de 50% da capacidade de armazenagem

Na primeira simulação, o limite mínimo admissível de água adotado para os reservatórios foi igual a 50% da capacidade máxima de cada um. Os valores obtidos de consumo e custos diário com energia, utilizando a tarifa única que a CAESA paga à ELETRONORTE, de R\$ 59,45 / MWh, encontram-se à seguir:

Energia (kWh) = 14.909

Custo (R\$) = 886

Utilizando a tarifa horosazonal de referência (Tabela 4.10) os valores obtidos foram:

Energia (kWh) = 14.909

Custo (R\$) = 1161

O aumento da capacidade de armazenagem dos reservatórios traz mais flexibilidade operacional para o sistema, desta forma a simulação é também efetuada levando-se em consideração de que a capacidade de armazenagem dos reservatórios fosse duplicada. Os resultados obtidos foram:

- Uso da tarifa única:

Energia (kWh) = 14.765

Custo (R\$) = 877

- Uso da tarifa horosazonal de referência

Energia (kWh) = 14.765

Custo (R\$) = 1.054

Limite mínimo de 80% da capacidade de armazenagem

Neste caso, o limite mínimo de armazenagem nos reservatórios principais é de 80% da capacidade máxima de cada um. Os resultados obtidos foram processados na planilha do *software Excel*[®] de forma a se ter os valores de consumo e custo da energia elétrica no sistema CAESA em Macapá, sob estas condições.

Considerando a tarifa única que a companhia de água paga à ELETRONORTE, os valores obtidos encontram-se à seguir:

Energia (kWh) = 14.320

Custo (R\$) = 851

Como o uso da tarifa horosazonal de referência (Tabela 5.10) os valores obtidos foram:

Energia (kWh) = 14.320

Custo (R\$) = 1.145

Considerando, como no caso anterior, que a capacidade de armazenagem dos reservatórios fosse duplicada, obtém-se:

- Uso da tarifa única:

Energia (kWh) = 14.687

Custo (R\$) = 873

- Uso da tarifa horosazonal de referência

$$\text{Energia (kWh)} = 14.687$$

$$\text{Custo (R\$)} = 1.246$$

Mais adiante, estes dados são utilizados para a avaliação comparativa dos resultados obtidos através do modelo de otimização.

5.2 – Resultados do Modelo de Otimização

5.2.1 – Caso Base: Tarifa Única

Utilizando-se a tarifa única de energia elétrica que a CAESA paga à ELETRONORTE, o modelo de otimização foi executado e os resultados obtidos, referentes ao consumo de energia elétrica diário nas bombas e custo da energia elétrica que seria consumida pelo sistema, apresentam-se na Tabela 5.1.

Consumo (kWh)	14.042
Custo (R\$)	835

Tabela 5.1 – Resultados Caso Base

No caso da operação com uma tarifa única de energia elétrica, as duas funções-objetivo não são conflitantes, não justificando, conseqüentemente, a realização de uma análise multiobjetivo.

A Figura 5.1 mostra o comportamento da captação ETAM, do Rio Amazonas, derivado do modelo de otimização, e dos recalques ETAM→R2, ETAM→R1 e ETAM→D1, numerados respectivamente como 1, 2 e 3.

A Figura 5.2 fornece informações quanto ao comportamento da variação no nível de água armazenado nos três grandes reservatórios (ETAM, R1 e R2).

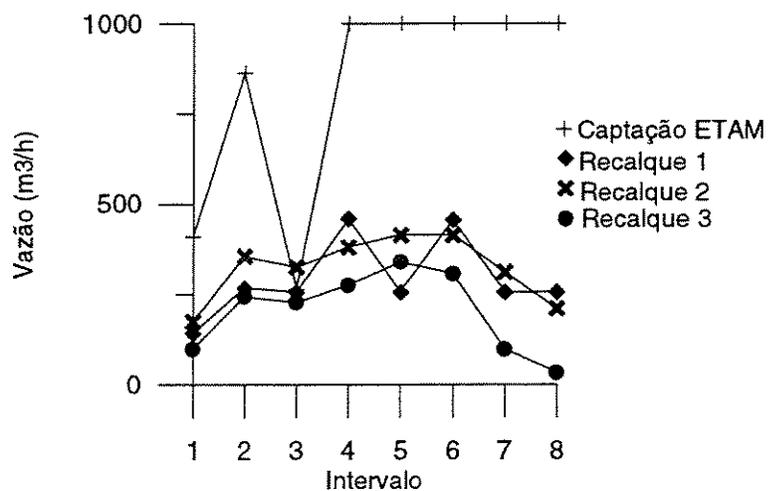


Figura 5.1 - Variação do bombeamento - Caso Base

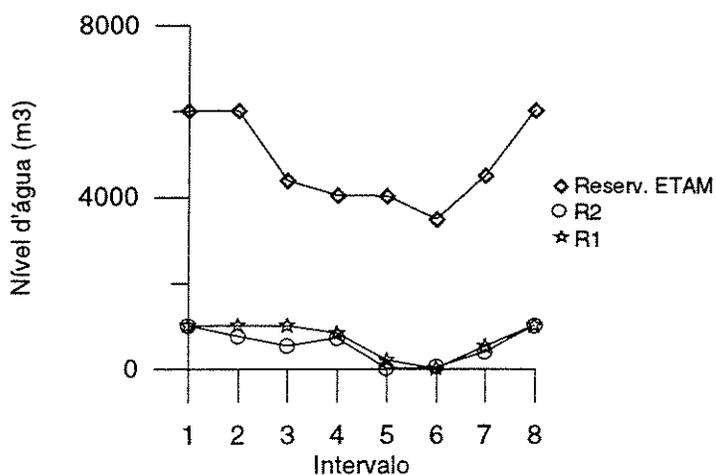


Figura 5.2 - Comportamento da armazenagem - Caso Base

Variação do Nível de Segurança

A fim de se estabelecer uma curva de *tradeoff* entre uma medida de segurança e custo, do sistema CAESA, fez-se a execução do modelo de otimização com algumas variações no limite mínimo admissível de água armazenada nos reservatórios. A quantidade mínima de água armazenada na operação do sistema pode fornecer uma medida de segurança de tal sistema perante alguma emergência.

No primeiro caso, o modelo de otimização foi utilizado com a consideração de que fosse permitido aos grandes reservatórios (ETAM, R1 e R2) esvaziarem até atingirem 30% de sua capacidade nominal. Para este caso os resultados obtidos encontram-se na Tabela 5.2.

Consumo (kWh)	14.073
Custo (R\$)	836

Tabela 5.2 – Resultados Caso Base com Armazenagem Mínima = 30%

Fazendo com que o limite mínimo admissível de água armazenado nos grandes reservatórios fosse estabelecido em 50% de sua capacidade máxima, a execução do modelo apresentou os valores de consumo e custo de energia elétrica apresentados na Tabela 5.3.

Consumo (kWh)	14.085
Custo (R\$)	837

Tabela 5.3 – Resultados Caso Base com Armazenagem Mínima = 50%

Com a duplicação da capacidade de armazenagem dos reservatórios, mantendo-se o limite mínimo de armazenagem em 50% da capacidade, os resultados obtidos encontram-se à seguir (Tabela 5.4).

Consumo (kWh)	13.957
Custo (R\$)	830

Tabela 5.4 – Resultados Caso Base com Armaz. Mín. = 50% e duplicada

Por fim, fez-se a execução do modelo de otimização considerando o limite mínimo de armazenagem nos grandes reservatórios em 80% da capacidade máxima deles, sendo que os resultados encontram-se apresentados na Tabela 5.5.

Consumo (kWh)	14.106
Custo (R\$)	838

Tabela 5.5 – Resultados Caso Base com Armazenagem Mínima = 80%

Como no caso anterior, considera-se que a capacidade de armazenagem do sistema fosse duplicada, mantendo-se o limite mínimo de armazenagem em 80% do total, os resultados obtidos neste caso encontram-se na Tabela 5.6.

Consumo (kWh)	13.992
Custo (R\$)	832

Tabela 5.6 – Resultados Caso Base, Armaz. Mín. = 80% e duplicada

Avaliação dos Resultados

A verificação da utilidade do modelo de otimização se faz através da comparação entre os resultados obtidos a partir do mesmo e os resultados do modelo de simulação, realizado com o fim de representar o comportamento real da operação da companhia de água de Macapá.

Considerando que o limite mínimo admissível de água nos reservatórios seja equivalente a 50% da capacidade de cada um, a operação de acordo com o modelo traria, em relação aos resultados do modelo de simulação, reduções no consumo e no custo da energia elétrica da ordem de 5.5%. Semelhante potencial de redução foi obtido na consideração feita em que a capacidade de armazenagem dos reservatórios fosse duplicada.

Fazendo com que o limite mínimo admissível de água armazenada no sistema CAESA de água em Macapá seja igual a 80% da capacidade máxima do sistema, os resultados obtidos pelo modelo de otimização trazem uma redução, no consumo e gasto com energia elétrica, de aproximadamente 1,5%. Considerando que a capacidade de cada reservatório fosse duplicada, a redução é de aproximadamente 4,7% tanto no consumo quanto nos gastos com eletricidade.

A partir destes resultados observa-se que um potencial maior de redução no consumo e nos gastos com energia elétrica, comparando com os resultados do modelo de simulação, é alcançado no caso onde o limite mínimo admissível de água nos reservatórios é igual a 50% da capacidade máxima dos mesmos. Isto se deve ao fato do sistema de água, neste caso, possuir uma maior flexibilidade operacional dos reservatórios, de modo que o modelo pudesse utilizá-los de forma mais eficiente. Estes resultados não constituem, de forma alguma, uma recomendação para que a companhia opere

neste ou naquele nível de segurança. O que os resultados fornecem é uma visão de quanto custaria para a companhia a transição entre os níveis de segurança, no caso da utilização da tarifa única de energia elétrica.

Deve ser ressaltado que a avaliação dos resultados provenientes do modelo de otimização foi feita através da comparação com resultados de uma simulação, que estaria, em se tratando de eficácia, muito superior à atual gestão operacional da companhia de água de Macapá. Assim, acredita-se que a redução real de consumo e custo de energia elétrica a ser obtida com a utilização do modelo, adaptado às condições reais, seria superior aos valores apresentados. Em compensação, a redução de aproximadamente 5% apresentada já seria bastante desejável. Considerando que em 1996 a companhia de água de Macapá teve um gasto de R\$ 480.327,00 com energia elétrica, uma economia de mais de R\$ 24.000,00 (5%), advinda apenas de uma adequada operação da maquinaria existente, deve ser bem recebida pela empresa.

5.2.2 - Caso Horosazonal: Tarifa de Referência

Com a utilização da tarifa horosazonal de referência a execução do modelo de otimização foi feita através de uma análise multiobjetivo, com o uso do método dos pesos para a busca das curvas de *tradeoff* Consumo \times Custo da Energia Elétrica no sistema de água de Macapá.

O primeiro caso refere-se ao uso do modelo de otimização utilizando a tarifa horosazonal de referência, sem o estabelecimento de limites mínimos admissíveis de armazenagem nos reservatórios. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 5.7.

Consumo (kWh)	14.042	14.095	14.113
Custo (R\$)	888	824	816

Tabela 5.7 – Resultados Caso Horosazonal

O primeiro par de resultados da Tabela 5.7 refere-se a execução do modelo dando prioridade para a minimização do consumo de energia elétrica, enquanto o terceiro, e último, par refere-se ao caso em que se prioriza a minimização dos custos da energia.

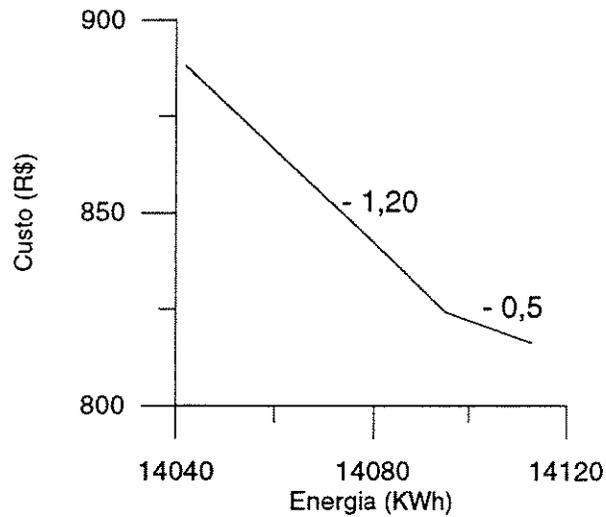


Figura 5.3 - Tradeoff do Caso Horosazonal

A Figura 5.3 apresenta o traçado da curva de *tradeoff* deste caso, com seus coeficientes de inclinação. Se o estudo for realizado pela empresa de energia elétrica na busca de economia de energia, provavelmente esta recomendará à companhia de água operar no primeiro ponto da curva, onde o consumo de energia elétrica é menor. Em contrapartida, se o interesse da companhia de água é a minimização dos custos, então ela deve optar por operar no último ponto do *tradeoff*.

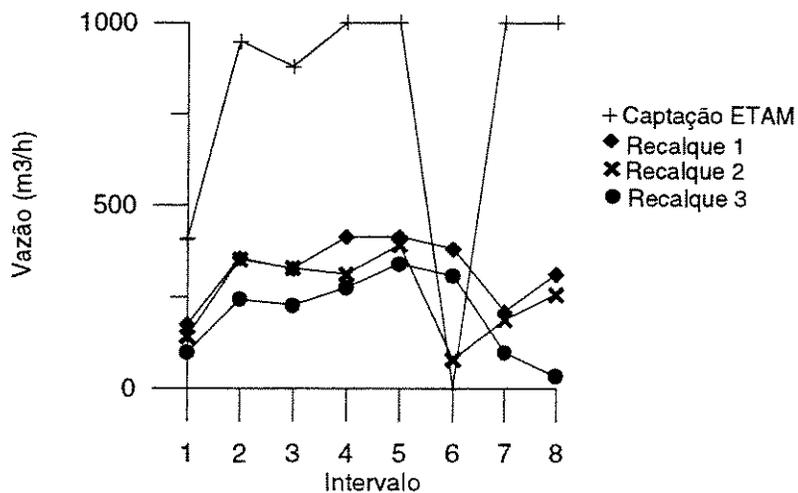


Figura 5.4 - Variação do bombeamento - Caso Horosazonal

A Figura 5.4 apresenta o comportamento da captação principal, ETAM, e dos bombeamentos de recalque deste caso, onde, novamente, os recalques ETAM→R2, ETAM→R1 e ETAM→D1, foram numerados como 1, 2 e 3 respectivamente.

O comportamento do nível de água armazenado nos grandes reservatórios encontra-se plotado na Figura 5.5.

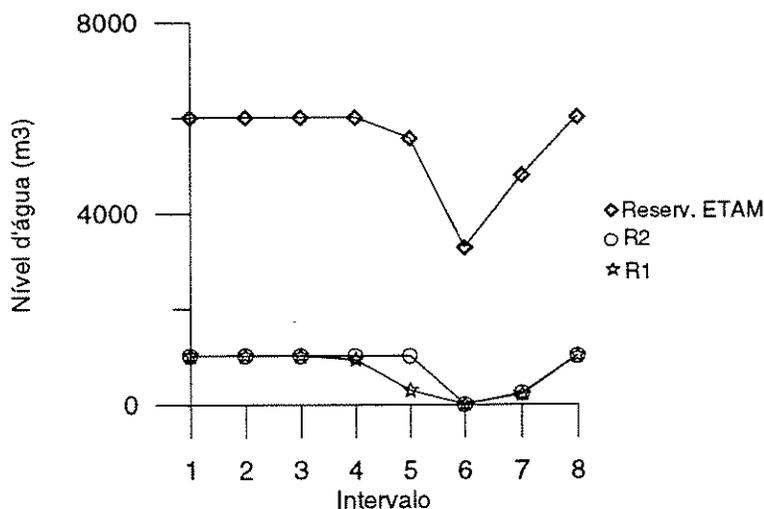


Figura 5.5 - Comportamento da armazenagem - Caso Horosazonal

Uma comparação entre os traçados das curvas dos bombeamentos e dos reservatórios no uso do modelo de otimização, utilizando respectivamente a tarifa única (Figura 5.1) de energia elétrica e uma tarifa horosazonal (Figura 5.4), ajuda na compreensão sobre a metodologia de operação adotada pelo modelo. No caso em que se utiliza a tarifa horosazonal de referência, observa-se que no intervalo 6, em que a tarifa de energia é muito mais cara, o bombeamento na captação ETAM e no recalque 2 atingem seus valores mínimos. Ou seja, neste intervalo o modelo faz com que estes bombeamentos não operem, utilizando a água anteriormente armazenada nos reservatórios, o que pode ser confirmado através de uma análise na Figura 5.5. Por esta figura, observa-se que o modelo faz com que o nível de água nos grandes reservatórios do sistema principal de água de Macapá se mantenha no máximo, para que no horário em que a tarifa de energia elétrica é alta, a água armazenada possa ser utilizada, minimizando o bombeamento neste intervalo.

Variação do Nível de Segurança

Como no caso base, com a utilização da tarifa horosazonal de referência também é realizada uma análise do comportamento do consumo e gastos com energia elétrica relativo à variação da segurança do sistema, medido através do limite mínimo admissível de armazenagem nos grandes reservatórios.

O primeiro caso analisado corresponde à execução do modelo de otimização considerando que seja permitido aos grandes reservatórios (ETAM, R1 e R2) esvaziarem até atingirem 30% de sua capacidade nominal. Para este caso os resultados obtidos referentes a consumo e gastos com energia elétrica encontram-se na Tabela 5.8.

Consumo (kWh)	14.073	14.105	14.127
Custo (R\$)	904	861	851

Tabela 5.8 – Resultados Caso Horosazonal, Lim. Mín. = 30%

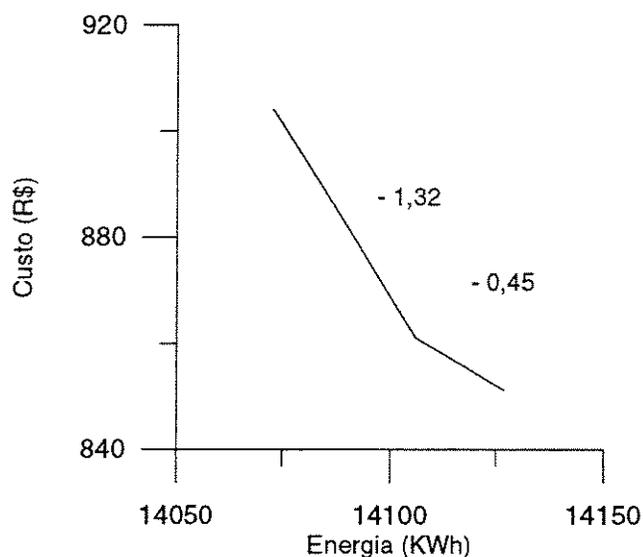


Figura 5.6 - Tradeoff do Caso Horosazonal, Lim. Mín. = 30%

A curva de *tradeoff* deste caso, com os respectivos coeficientes de inclinação, encontra-se apresentada na Figura 5.6.

Fazendo com que o limite mínimo admissível de água armazenado nos grandes reservatórios seja mantido em 50% da capacidade máxima, a execução do modelo com a utilização da tarifa horosazonal de referência gerou os valores de consumo e custo de energia elétrica apresentados na Tabela 5.9.

Consumo (kWh)	14.085	14.090	14.106
Custo (R\$)	923	902	878

Tabela 5.9 – Resultados Caso Horosazonal, Lim. Mín. = 50%

A Figura 5.7 apresenta a curva de tradeoff referente aos dados da Tabela 5.9.

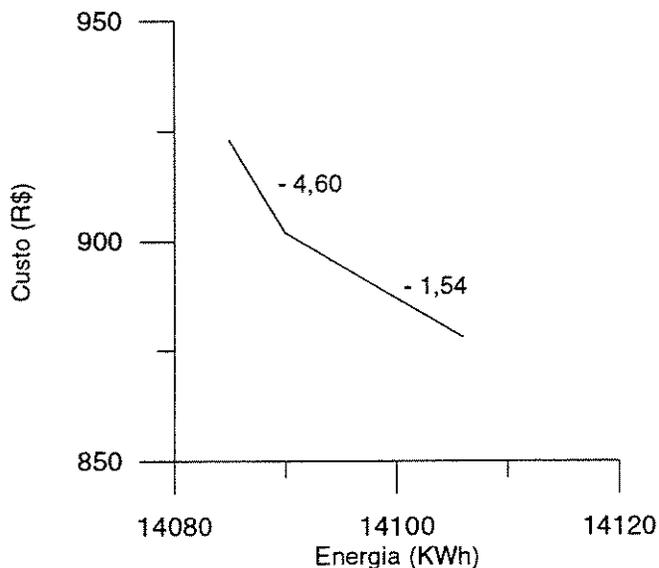


Figura 5.7 - Tradeoff do Caso Horosazonal, Lim. Mín. = 50%

Utilizando a tarifa horosazonal de referência o modelo de otimização foi também executado considerando que a capacidade de armazenagem dos reservatórios fosse duplicada. Para o caso em que o limite mínimo admissível de armazenagem nos reservatórios é de 50% da capacidade máxima, os resultados obtidos encontram-se na Tabela 5.10.

Consumo (kWh)	13.957	14.106	14.182
Custo (R\$)	820	749	656

Tabela 5.10 – Resultados Caso Horosazonal, Armazenagem duplicada, Lim. Mín. = 50%

Finalmente, realiza-se a execução do modelo considerando o limite mínimo de armazenagem nos grandes reservatórios em 80% da capacidade de cada um. Os resultados encontram-se apresentados na Tabela 5.11, com a curva de *tradeoff* plotada na Figura 5.8.

Consumo (kWh)	14.106	14.109	14.122
Custo (R\$)	1029	1015	995

Tabela 5.11 – Resultados Caso Horosazonal, Lim. Mín. = 80%

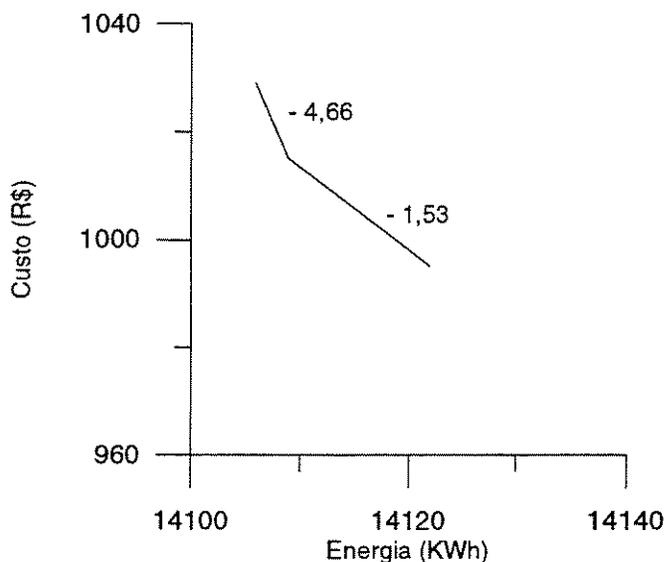


Figura 5.8 - Tradeoff do Caso Horosazonal, Lim. Mín. = 80%

Mantendo-se o limite mínimo de armazenagem em 80% da capacidade do sistema, mas considerando que a capacidade de armazenamento dos reservatórios fosse duplicada, os resultados obtidos através do modelo de otimização foram os seguintes (Tabela 5.12) :

Consumo (kWh)	13.992	14.024	14.163
Custo (R\$)	849	785	705

Tabela 5.12 – Resultados Caso Horosazonal, Armazenagem duplicada, Lim. Mín. = 80%

Avaliação dos Resultados

A fim de avaliar a funcionalidade do modelo de otimização, no uso de tarifas com variação horária, os resultados obtidos através do mesmo são comparados com os valores resultantes do

modelo de simulação operacional, tomada como a representação da operação real do sistema de abastecimento de água de Macapá.

O uso da tarifa horosazonal de referência permite que seja feita, para cada nível mínimo de armazenagem, uma análise multiobjetivo entre as funções de consumo e custo de energia elétrica. Considerando que o limite mínimo admissível de água nos reservatórios seja equivalente a 50% da capacidade de cada um, a operação de acordo com o modelo de otimização traria, em relação aos resultados do modelo de simulação, reduções no consumo de energia elétrica na ordem de 5.5%, enquanto nos custos a redução varia de 20 a 24%. Considerando que a capacidade de armazenagem fosse duplicada, a redução nos custos da energia elétrica chega a quase 38%.

Fazendo com que o limite mínimo admissível de água armazenada no sistema CAESA de água em Macapá seja igual a 80% da capacidade máxima do sistema, e utilizando a tarifa de referência, os resultados obtidos do modelo de otimização proporcionam uma redução no consumo de eletricidade da ordem de 1,3%, enquanto a redução nos custos varia de 10 a 13%. Considerando que a capacidade de armazenagem do sistema de água de Macapá fosse duplicada, os resultados do modelo de otimização apontam para uma redução nos custos da eletricidade de até 43%, em relação ao resultado da simulação operacional.

No uso de uma tarifa com variação horária, o que se observa é que o modelo tem uma capacidade maior de redução de custos. Conforme discutido anteriormente, definido o horário onde a tarifa de energia elétrica é mais cara, o modelo adota uma política de operação que faz com que as bombas minimizem os trabalhos nestes horários, utilizando a água armazenada ao longo do dia nos reservatórios.

Outro fato observado é que, quanto maior a capacidade de armazenagem maior a eficácia do modelo face a operação manual. Quando se duplica a capacidade de armazenagem dos reservatórios, as reduções nos custos da energia elétrica advindas do modelo de otimização atingem valores extraordinários. Isto se deve ao aumento da flexibilidade do modelo em dispor de volume de manobra suficiente para que a operação das bombas possa ser feita com a maior eficiência possível.

O modelo de otimização também pode ser utilizado como uma ferramenta eficaz para o conhecimento da rede de água. Os resultados obtidos da variação do nível de segurança permite que

seja traçada uma curva de *tradeoff* Nível Mínimo de Armazenagem × Custo do sistema (Figura 5.9), sendo o nível mínimo de armazenagem dos grandes reservatórios tomado como uma medida de segurança da rede. Para a elaboração da curva tomou-se o valor mínimo de custo referente a cada nível de segurança.

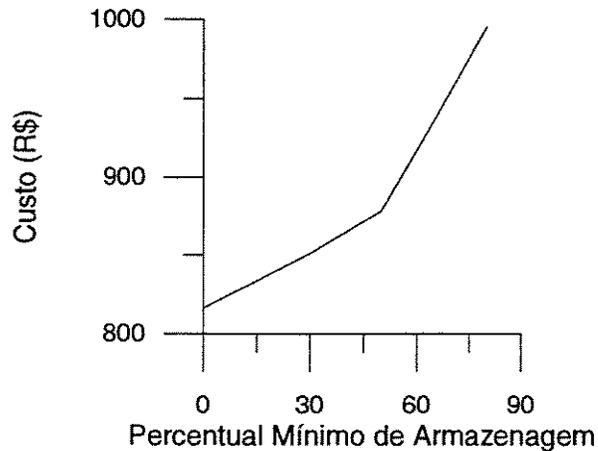


Figura 5.9 - Tradeoff Nível Mínimo de Armazenagem × Custo

O conhecimento da variação dos custos, em relação a uma medida de segurança do sistema, fornece subsídios para a companhia realizar uma análise custo-benefício com o intuito de escolher o ponto da curva em que o sistema será operado.

Capítulo 6

Conclusões

No decorrer do trabalho algumas conclusões foram sendo sumariamente apresentadas. Este capítulo destina-se a fazer uma síntese das mesmas, além de trazer mais algumas considerações julgadas oportunas.

Tanto na elaboração do modelo de otimização quanto na avaliação de seus resultados, o grande obstáculo enfrentado foi a limitação de dados reais da rede de Macapá. Na fase de elaboração do modelo, a falta de dados foi contornada através de estudos efetuados junto ao corpo técnico da CAESA, de forma que os parâmetros necessários e que não encontravam-se disponíveis fossem estimados da melhor forma possível. Um exemplo disto foi a estimativa da curva de perda de carga do encanamento, necessária para a obtenção dos valores de vazão resultantes de cada associação de bombas.

Na fase de avaliação dos resultados do modelo de otimização fizeram-se necessários dados detalhados da rede, como, por exemplo, o consumo de energia elétrica destinado particularmente às bombas. Na falta de meios de se obter estes dados, o artifício utilizado foi a elaboração de um modelo de simulação que representasse o comportamento real da operação do sistema. Na elaboração do modelo de simulação foram consideradas todas as restrições adotadas pelo modelo de otimização, de forma a possibilitar uma avaliação coerente dos resultados.

Com o uso da tarifa única que a CAESA paga à ELETRONORTE, o maior potencial de redução do consumo de energia elétrica, em relação aos resultados da simulação, foi obtido considerando-se o limite mínimo dos reservatórios igual a 50% da capacidade máxima de cada um. Isto deve-se fato de que neste caso o sistema possui maior flexibilidade operacional, de forma a

possibilitar que o modelo de otimização utilize a capacidade de manobra dos reservatórios de forma mais eficiente.

Na hipótese de se trabalhar com uma tarifa de eletricidade horosazonal, o que se observou é que tanto para o limite mínimo de 50% dos reservatórios, quanto para 80%, o potencial de redução do consumo de energia elétrica do modelo de otimização se manteve, em relação ao caso em que se utilizou a tarifa única, como era de se esperar. No entanto, a redução nos custos operacionais variou de 10 até 43%, o que aponta para a grande capacidade do modelo de otimização em minimizar os custos no caso de se utilizar uma tarifa com diferenciação horária.

Deve-se, mais uma vez, ressaltar que a avaliação comparativa dos resultados do modelo foi feita em relação a um modelo de simulação operacional que estaria, em se tratando de eficácia, superior a atual gestão operacional da companhia. Portanto, é de se esperar que os resultados advindos do uso do modelo de otimização venham a ser melhores do que os valores apresentados.

Os testes efetuados, em que foram consideradas diversas situações, como o uso de uma tarifa horária e duplicação da capacidade de armazenagem do sistema, assim como os resultados da simulação operacional, foram apresentados à CAESA, de modo que pudessem ser utilizados pela companhia na operação de seu sistema e no planejamento da expansão da rede. Através dos testes é possível se observar quais elementos do sistema (reservatórios, dutos...) que encontram-se “estrangulados”, ou seja, operando todo o tempo no limite máximo de capacidade. Outra possibilidade é a previsão relativa da variação no consumo, e custos, de energia elétrica do sistema resultante da alteração de algumas características dimensionais da rede, ou qual o impacto de um programa de redução das perdas do sistema. O modelo fornece inúmeras possibilidades de avaliação de hipóteses (dimensionais, tarifárias, operacionais) para a escolha da melhor configuração do sistema.

Este trabalho ainda traz a análise da variação do custo da eletricidade em relação ao aumento da capacidade de armazenagem dos reservatórios, adotada como uma medida do nível de segurança da rede de água. Os resultados desta análise fornecem à companhia subsídios para que possa optar, através de uma análise de custo-benefício, qual o limite mínimo de água nos reservatórios mais viável para a empresa. No caso analisado, quando a empresa passa do nível mínimo de água nos

reservatórios de 30% para 80%, há nos custos diários de operação um aumento de aproximadamente 14%.

Mesmo com diversas limitações, o modelo de otimização operacional, elaborado para o sistema público de abastecimento de água de Macapá, mostra-se como uma promissora medida de conservação de energia elétrica do referido sistema, além de uma eficaz ferramenta de conhecimento da rede de água.

Para a companhia de abastecimento de água, o modelo traz a grande vantagem de possibilitar reduções consideráveis nos custos operacionais sem a necessidade de investimentos de capital, como a aquisição ou troca de equipamentos. Toda redução nos custos se origina somente do funcionamento adequado do maquinário já instalado.

Estudos futuros virão no sentido de sofisticar o modelo de otimização, de modo a incorporar alguns parâmetros até então desconsiderados. Entre estes encontra-se o comportamento da pressão na rede através das equações de perda de carga, e as perdas de água nos dutos de distribuição. Para que o modelo incorpore estas variáveis faz-se necessário pelo menos um cadastro completo e atualizado da rede, o que já se observou ser um problema, pois mesmo possuindo um caráter simplificado, o modelo de otimização deparou-se com grandes dificuldades em termos de seus requisitos de dados de entrada.

Neste contexto, o primeiro passo para a implantação de um programa de otimização operacional do sistema de Macapá, como em qualquer outro sistema, passa pela medição e monitoramento adequados do sistema de modo a se obter os dados necessários para uma análise abrangente.

Referências Bibliográficas

- Andrade, C.S, Correia P.B. *O Uso Racional de Energia Elétrica em Sistemas Públicos de Abastecimento de Água, um Estudo de Caso em Macapá*, Anais do III CBPE - Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, São Paulo / SP, junho 1998a.
- Andrade, C.S, Correia P.B. *Otimização do Uso da Energia Elétrica no Abastecimento Público de Água, um Estudo de Caso em Macapá*, Anais do XXX SBPO – Seminário Brasileiro de Pesquisa Operacional, Curitiba / PR, outubro 1998b.
- Andrade, C.S, Correia P.B. *Otimização Operacional de Sistemas Públicos de Abastecimento de Água*, aceito para XV COBEM - Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, a ser realizado em Águas de Lindóia / SP em novembro de 1999.
- Babbitt, H.E., Doland J.J., Cleasby J.L. *Abastecimento de água*. tradução Zadir Castelo Branco. Ed. Edgard Blücher, 1973.
- Bahia, Governo da Bahia/Secretaria de Energia, Transporte e Comunicações *Estratégia de Atuação do Estado da Bahia na Área de Eficiência Energética*, Salvador/BA, 1998.
- Balachandran, V., Srinivasan, V., Thompson, G.L., *Application of the Operator Theory of the Parametric Programming for the Transportation and Generalized Transportation Problems*, Math. Prog. Study, n15, 1981, pp.58-83 citado em Correia, P.B., *Um modelo Multisetorial para otimização do suprimento de energia: eletricidade, gás natural e cogeração com biomassa*, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica, Tese (doutorado), 1988.

- Brion, L.M., Mays, L.W. Methodology for optimal operation of pumping stations in water distribution systems. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 117, nº 11, pp. 1551-1569, Sept./Oct. 1996.
- Correia, P.B. *Um modelo multisetorial para otimização do suprimento de energia: eletricidade, gás natural e cogeração com biomassa*, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica, Tese (doutorado), 1988.
- Correia, P.B., *Modelos de Otimização para Planejamento da Operação e Expansão do Sistema Urbano de Abastecimento de Água de Macapá*, Relatório Técnico Preliminar (Etapa 1), Universidade Estadual de Campinas, abril 1997.
- Coulbeck, B., Brdys, M., Rance, J.P. A hierarchical approach to optimized control of water distribution systems: Part II - Lower-level algorithm *Optimal control applications & Methods*, v. 9, 1988. pp. 109-126.
- Crawley P.D., Dandy G.C. Optimal operation of multiple-reservoir system. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 119, nº 1, Jan./ Feb. 1993. pp. 1-17.
- Diba, A., Louie P.W.F., MAhjouh M., Yeh W.W. Planned operation of large-scale water distribution system. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 121, nº 3, May/June 1995. pp. 260-269.
- Efficientia, Texto Provocativo: Setor de Saneamento, *II Seminário Internacional de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica*, Rio de Janeiro/RJ, outubro 1998.
- Goicoechea, A., Hansen, D. R., Duckstein, L. *Multiobjective Decision Analysis with Engineering and Business Applications*, John Wiley & Sons, New York, 1982 citado em Correia, P.B., *Um modelo multisetorial para otimização do suprimento de energia: eletricidade, gás natural e cogeração com biomassa*, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica, Tese (doutorado), 1988.

- Jowwit, P.W., Garret R.T., Cook S.C., Germanopoulos G. Real-time forecasting and control for water distribution, citado em : Coulbeck, B. & Orr, C. (eds.). *Computer applications in water supply*, v. 2, England: Research Studies Press, 1988. pp. 329-355.
- Jowwit, P.W., Germanopoulos G. Optimal pump scheduling in water supply networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 118, n° 4, July/August 1992. pp. 403-422.
- Ko, S.K., Oh, M.H., Fontane D.G. Multiobjective analyses of service-water transmission. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 123, n° 2, March/April 1997. p. 78-83.
- Lai, C.C. *Unaccounted for water and the economics of leak detection*. Water Supply v.9 (3,4), IR-1 - IR-8, 1991. pp. 260-269.
- Lansey, K.E., Awunah, K. Optimal pump operations considering pump switches. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 120, n° 1, January/February 1994. pp. 17-35.
- Lima, L.C.A. & David, R.S. *Eficiência Energética em Edifícios Públicos – Experiência na Bahia*, Salvador/BA, Maio 1998.
- Macintyre, A.J. *Bombas e instalações de bombeamento*. Ed. Guanabara Koogan S.A. 2° edição, 1987.
- Martins, J.A. *Bombas e Estações Elevatórias utilizadas em Abastecimento de Água*. Faculdade de Higiene e Saúde Pública, Escola Politécnica da USP, 1968.
- Mays, L.W., Tung, Y. *Hydrosystems – Engineering & Management*. Ed. McGraw-Hill, Inc, 1992.
- MME/Comitê de Eficiência Energética *Estratégias para o uso eficiente da energia*, <http://www.mme.gov.br/sen/comite> em 04/12/1998.
- MPO/Ministério do Planejamento e Orçamento *Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 1996*, Brasília/DF, abril 1998.

- Murty, K.G. *Operations research deterministic optimization models*, New Jersey : Prentice Hall, 1995. 581 p.
- Netto, J.M.A., Martins, J.A, Puppi, I.C., Netto, F.B. e Franco, P.N.C. *Planejamento de Sistemas de Abastecimento de Água*; Universidade Federal do Paraná e Organização Pan - Americana de Saúde, 1973.
- Nittivattananon, V., Sadowisk, E.C., Quimpo R.G. Optimization of water supply system operation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 122, n° 5, Sept./Oct. 1996. pp. 374-384.
- Oliver, J., Putnam, C. Energy Efficiency: Learning how to avoid taking a bath on energy costs, *Water/Engineering & Management*, v. 144, July 1997. pp. 22-25.
- 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*, v. 115, n° 2, March 1989. pp. 148-164.
- Ostfeld, A., Shamir, U. Optimal operation of multyquality networks I: steady-state conditions. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 119, n° 6, Nov./Dec. 1993. p. 645-662.
- Percia, C., Oron, G., Mehrez A. Optimal operation of regional system with diverse water quality sources. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 123, n° 2, March/April 1997. pp. 105-115.
- Procel *O que é o Procel*, <http://www.eletronbras.gov.br/procel/index.html> em 02/12/1998
- Santana, G.C. *Otimização da Operação de Sistemas de Distribuição de Água Abastecidos por Bombeamento e Reservatórios de Regularização*, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica, Tese (doutorado), 1999.
- Sakarovitch, M. *Notes on linear programming*, New York: Van Nostrand Reinhold, 1971. 75 p.

SNPSA,1998 *Seminário Nacional de Políticas de Saneamento Ambiental - Síntese das Conclusões*,
<http://www.fase.org.br/sinteses.htm> em 05/07/1999.

Steuer, R.E. *Multiple criteria optimization : theory, computation, and application*, Malabar :
Krieger, 1989. 546 p.

Sun Y., Yeh W.W., Hsu N., Louie, P.W.F. Generalized network algorithm for water supply
system optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 121, n° 5,
Sept./Oct. 1995. pp. 392-398.

Zessler, U., Shamir, U. Optimal Operation of Water Distribution Systems. *Journal of Water
Resources Planning and Management*, v. 115, n° 6, November 1989. pp. 735-751.

Apêndice A

Interfaces do Modelo de Otimização

A.1 - Entrada de Dados

A entrada de dados para a execução do modelo de otimização é feita através de arquivos com extensão *.dat*, conforme apresentado em blocos à seguir.

Rede de Macapá: tarifa ELETRONORTE								(06.07.98)
<i>n_adu</i>	<i>n_cap</i>	<i>n_rec</i>	<i>n_dec</i>	<i>n_dis</i>	<i>n_res</i>	<i>n_int</i>	<i>n_hor</i>	<i>t_tip</i>
13	6	9	1	8	8	8	3	1

Bloco 1.1

A primeira linha do arquivo é livre para o texto de identificação do caso estudado, data da realização do estudo, entre outros. A linha seguinte corresponde a entrada dos dados relativos às características da rede, na qual, de acordo com a ordem apresentada tem-se o número de :

- adutoras,
- captações,
- recalques,
- decantadores,
- distribuições,
- reservatórios,
- intervalos de análise,
- número de horas de cada intervalo e
- finalmente tipo de tarifa de energia elétrica utilizada, que pode variar de 1 à 5.

A especificação do tipo de tarifa fornece a liberdade ao operador para que execute o programa com vários tipos de tarifação. O Bloco 1.2 apresenta uma composição possível destas tarifas.

Tarifas típicas:						
i_int	h_int	t1(cea1)	t2(cea2)	t3(cea3)	t4(cea4)	t5(cea5)
1	4	0.05945	0.02828	0.514	0.223	0.038
2	7	0.05945	0.02828	0.514	0.223	0.038
3	10	0.05945	0.02828	0.514	0.223	0.038
4	13	0.05945	0.02828	0.514	0.223	0.038
5	16	0.05945	0.02828	0.514	0.223	0.038
6	19	0.05945	0.29955	0.650	0.439	0.306
7	22	0.05945	0.02828	0.514	0.223	0.038
8	1	0.05945	0.02828	0.514	0.223	0.038

Bloco 1.2

A primeira coluna do Bloco 1.2 enumera os intervalos de análise, sendo que em um dia, 24 horas, tem-se oito intervalos de três horas cada. A coluna seguinte dá o início de cada intervalo, por exemplo o intervalo 6 começa a partir das 19:00 hs. No exemplo apresentado observa-se (Bloco 1.1) que a tarifa escolhida foi a primeira, tarifa única.

O Bloco 1.3 apresenta um conjunto de variações possíveis do comportamento percentual das demandas diárias de água em cada intervalo. Neste estudo utilizou-se somente a primeira variação, mas o modelo fornece a possibilidade para que seja feita a diferenciação do comportamento do consumo. O estabelecimento de padrões diferenciados de demanda pode ser utilizado para uma representação setORIZADA das diversas regiões da cidade, adotando-se, por exemplo, um comportamento associado a zonas comerciais, outro associado a setores residenciais e assim por diante.

Demandas típicas:						
i_int	h_int	dem1	dem2	dem3	dem4	dem5
1	4	0.06	0.02	0.30	0.04	0.05
2	7	0.15	0.02	0.03	0.04	0.05
3	10	0.14	0.02	0.03	0.04	0.05
4	13	0.17	0.02	0.03	0.04	0.05
5	16	0.21	0.02	0.03	0.04	0.05
6	19	0.19	0.02	0.03	0.04	0.05
7	22	0.06	0.02	0.03	0.04	0.05
8	1	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05

Bloco 1.3

O Bloco 1.4 refere-se a montagem da rede estudada. Sendo dividido entre *adutoras* por gravidade, que não possuem bombas e portanto não consomem energia elétrica; *captações*, que constituem o bombeamento da água das fontes; e *recalques*, bombeamento entre os nós (reservatórios ou pontos de distribuição).

A primeira coluna do Bloco 1.4 fornece a numeração dada a cada componente da rede. A segunda coluna (com exceção das captações) se refere ao nó de origem e a seguinte ao nó de destino, de forma a se definir os arcos orientados do sistema. As colunas seguintes apresentam os limites mínimos e máximos admissíveis de vazão em cada componente e as perdas de água por arco. Estas vazões são medidas em $m^3 / \text{intervalo}$, lembrando-se que cada intervalo de análise tem 3 horas, isto faz com que medida seja $m^3 / 3\text{horas}$. Para as captações e recalques têm-se na última coluna o consumo específico de energia elétrica de cada um (KWh / m^3). Observa-se que cada recalque foi dividido em três, de forma a representar a diferenciação do consumo específico de energia elétrica da associação em paralelo das três bombas, conforme discutido no Capítulo 4.

Adutoras:					
k_ind	n_or	n_de	v_inf	v_sup	p_uni
2	1	2	0.0	1000.0	0.0
6	3	5	0.0	1000.0	0.0
7	4	6	0.0	1000.0	0.0
8	5	8	0.0	1000.0	0.0
9	9	8	0.0	1000.0	0.0
11	10	5	0.0	1000.0	0.0
12	11	10	0.0	1000.0	0.0
14	6	12	0.0	1000.0	0.0
15	13	12	0.0	1000.0	0.0
17	6	14	0.0	1000.0	0.0
18	15	14	0.0	1000.0	0.0
20	6	16	0.0	1000.0	0.0
21	17	16	0.0	1000.0	0.0
Captações:					
k_ind	n_de	v_inf	v_sup	p_uni	c_uni
1	1	0.0	1620.0	0.0	0.1612
10	9	0.0	100.0	0.0	0.5000
13	11	0.0	200.0	0.0	0.5000
16	13	0.0	200.0	0.0	0.5000
19	15	0.0	200.0	0.0	0.5000
22	17	0.0	200.0	0.0	0.5000

Recalques:						
k_ind	n_or	n_de	v_inf	v_sup	p_uni	c_uni
23	2	3	0.0	255.0	0.0	0.2486
3	2	3	0.0	204.0	0.0	0.3108
24	2	3	0.0	153.0	0.0	0.4144
25	2	4	0.0	173.0	0.0	0.3315
4	2	4	0.0	138.0	0.0	0.4144
26	2	4	0.0	103.0	0.0	0.5525
27	2	7	0.0	276.0	0.0	0.0888
5	2	7	0.0	221.0	0.0	0.1110
28	2	7	0.0	166.0	0.0	0.1480

Bloco 1.4

O Bloco 1.5 traz o comportamento médio da demanda de água (m³ / intervalo) em cada ponto de distribuição, enumerados na primeira coluna deste bloco. A última coluna fornece a opção de escolha quanto ao comportamento percentual diário de cada demanda, que conforme já foi dito, somente um padrão, *dem1*, foi adotado (vide Bloco 1.3).

Distribuição:		
n_ind	d_dia	d_tip
5	5521.0	1
6	6981.0	1
7	4845.0	1
8	1500.0	1
10	3200.0	1
12	4200.0	1
14	3600.0	1
16	1000.0	1

Bloco 1.5

Reservatórios:						
n_ind	a_max	a_inf(%)	a_sup(%)	a_ini(%)	a_fin(%)	p_uni
2	6000.0	0	100	100	100	0.0
3	1000.0	0	100	100	100	0.0
4	1000.0	0	100	100	100	0.0
9	100.0	0	100	100	100	0.0
11	100.0	0	100	100	100	0.0
13	100.0	0	100	100	100	0.0
15	100.0	0	100	100	100	0.0
17	100.0	0	100	100	100	0.0

Bloco 1.6

Finalizando, o Bloco 1.6 apresenta as características dos reservatórios, sendo destacadas a capacidade máxima de armazenamento de cada um, a_{max} medido em m^3 , as porcentagens mínimas e máximas admissíveis de operação, as porcentagens desejáveis de armazenagem no início e fim do dia, como também as perdas associadas a cada reservatório.

A.1.1 – Caso Multiobjetivo

A execução do modelo de otimização com uma tarifa horosazonal possibilita uma análise multiobjetivo, com resolução através do método dos pesos. Neste caso, as funções objetivo consideradas foram o consumo e o custo da energia elétrica.

Para a solução de um problema multiobjetivo pelo método dos pesos, é necessário que se defina uma *função composta*, e neste caso tem-se:

Função-objetivo 1 = consumo de energia elétrica = c_1

Função-objetivo 2 = custo da energia elétrica = $c_2 = T.c_1$ (onde T é a tarifa utilizada)

Pesos (λ) variam de 0 a 1.

Função Composta = $\lambda_1 c_1 + \lambda_2 c_2 = \lambda_1 c_1 + (1-\lambda_1)(T.c_1) = (\lambda_1 + T.(1 - \lambda_1)).c_1$

Portanto, no arquivo de entrada do modelo, a primeira parcela da Função Composta, $(\lambda_1 + T.(1 - \lambda_1))$, entra na coluna das tarifas para que seus valores sejam multiplicados pela equação referente ao consumo de energia elétrica (c_1), sendo que λ varia de 0 a 1, conforme definido no Capítulo 4.

A.2 – Saída de Resultados

Para a apresentação dos resultados gerados, o modelo de otimização cria um arquivo de saída, exemplificado nesta seção.

O primeiro bloco do arquivo de saída fornece as características do caso que foi analisado.

Rede de Macapá: tarifa ELETRONORTE								(06.07.98)	
n_adu	n_cap	n_rec	n_dec	n_dis	n_res	n_int	n_hor	t_tip	
13	6	9	1	8	8	8	3	1	

Bloco 2.1

O Bloco 2.2 apresenta os valores de consumo e custo da energia elétrica resultantes da otimização operacional do sistema pelo modelo de otimização.

ENERGIA:	
Consumo total (kWh):	14042.44
Custo total (R\$):	834.82

Bloco 2.2

Os blocos seguintes trazem o comportamento da adução, condução da água por gravidade, na operação otimizada do sistema. No Bloco 2.3 tem-se os valores dos volumes de água (m³) transportados em cada duto, nos intervalos de análise.

ADUÇÃO													
Volume total (m3)													
1	1230.9	421.3	519.0	90.0	0.0	0.0	192.0	0.0	252.0	40.1	175.9	60.0	0.0
2	2588.9	1053.1	1065.1	225.0	0.0	0.0	480.0	18.0	612.0	0.0	540.0	0.0	150.0
3	791.2	982.9	977.3	210.0	0.0	0.0	448.0	0.0	588.0	0.0	504.0	0.0	140.0
4	3000.0	1193.5	1312.7	255.0	0.0	0.0	544.0	114.0	600.0	12.0	600.0	0.0	170.0
5	3000.0	1474.4	1888.0	315.0	0.0	0.0	672.0	282.0	600.0	140.0	616.0	0.0	210.0
6	3000.0	1333.9	1424.4	285.0	0.0	0.0	608.0	98.0	700.0	0.0	684.0	0.0	190.0
7	3000.0	421.3	418.9	90.0	0.0	0.0	192.0	0.0	252.0	0.0	216.0	0.0	60.0
8	3000.0	140.4	139.6	30.0	0.0	0.0	64.0	0.0	84.0	0.0	72.0	0.0	20.0

Bloco 2.3

Com o intuito de facilitar a busca dos resultados, o Bloco 2.4 traz os valores de vazão (m³/h) e a porcentagem de utilização da capacidade de cada adução, nos oito intervalos.

ADUÇÃO													
Vazão média (m3/h)													
1	410.3	140.42	173.00	30.0	0	0	64.0	0.00	84.00	13.38	58.62	20.00	0.00
2	863.0	351.05	355.05	75.0	0	0	160.0	6.00	204.00	0.00	180.00	0.00	50.0
3	263.7	327.65	325.78	70.0	0	0	149.3	0.00	196.00	0.00	168.00	0.00	46.6
4	1000.0	397.86	437.59	85.0	0	0	181.3	38.00	200.00	4.00	200.00	0.00	56.6
5	1000.0	491.47	629.34	105.0	0	0	224.0	94.00	200.00	46.67	205.33	0.00	70.0
6	1000.0	444.66	474.80	95.0	0	0	202.6	32.67	233.33	0.00	228.00	0.00	63.3
7	1000.0	140.42	139.62	30.0	0	0	64.0	0.00	84.00	0.00	72.00	0.00	20.0
8	1000.0	46.81	46.54	10.0	0	0	21.3	0.00	28.00	0.00	24.00	0.00	6.6

Capacidade usada (%)													
1	41.03	14.04	17.30	3.00	0	0	6.40	0.00	8.40	1.34	5.86	2.00	0.00
2	86.30	35.11	35.51	7.50	0	0	16.00	0.60	20.40	0.00	18.00	0.00	5.00
3	26.37	32.76	32.58	7.00	0	0	14.93	0.00	19.60	0.00	16.80	0.00	4.67
4	100.00	39.79	43.76	8.50	0	0	18.13	3.80	20.00	0.40	20.00	0.00	5.67
5	100.00	49.15	62.93	10.50	0	0	22.40	9.40	20.00	4.67	20.53	0.00	7.00
6	100.00	44.47	47.48	9.50	0	0	20.27	3.27	23.33	0.00	22.80	0.00	6.33
7	100.00	14.04	13.96	3.00	0	0	6.40	0.00	8.40	0.00	7.20	0.00	2.00
8	100.00	4.68	4.65	1.00	0	0	2.13	0.00	2.80	0.00	2.40	0.00	0.67

Bloco 2.4

No Bloco 2.5 tem-se o comportamento do volume de água bombeado nas captações, apresentado por intervalos.

CAPTAÇÃO:						
Volume total (m3)						
1	1230.96	0.00	92.00	252.00	175.86	0.00
2	2588.97	0.00	580.00	600.00	444.00	50.00
3	791.21	0.00	372.00	600.00	600.00	140.00
4	3000.00	0.00	600.00	600.00	600.00	170.00
5	3000.00	0.00	600.00	600.00	600.00	210.00
6	3000.00	0.00	600.00	600.00	600.00	190.00
7	3000.00	0.00	192.00	252.00	216.00	60.00
8	3000.00	0.00	164.00	184.00	172.00	120.00

Bloco 2.6

Ainda relacionado às captações, o Bloco 2.7 traz a vazão média (m³/h) e a porcentagem de utilização da capacidade de cada uma durante os intervalos de análise.

O Bloco 2.8 traz consumo de energia elétrica em cada captação, e o percentual correspondente de cada consumo em relação ao total diário.

CAPTAÇÃO						
Vazão média (m3/h)						
1	410.32	0.00	30.67	84.00	58.62	0.00
2	862.99	0.00	193.33	200.00	148.00	16.67
3	263.74	0.00	124.00	200.00	200.00	46.67
4	1000.00	0.00	200.00	200.00	200.00	56.67
5	1000.00	0.00	200.00	200.00	200.00	70.00
6	1000.00	0.00	200.00	200.00	200.00	63.33
7	1000.00	0.00	64.00	84.00	72.00	20.00
8	1000.00	0.00	54.67	61.33	57.33	40.00

Capacidade usada (%)						
1	25.33	0.00	15.33	42.00	29.31	0.00
2	53.27	0.00	96.67	100.00	74.00	8.33
3	16.28	0.00	62.00	100.00	100.00	23.33
4	61.73	0.00	100.00	100.00	100.00	28.33
5	61.73	0.00	100.00	100.00	100.00	35.00
6	61.73	0.00	100.00	100.00	100.00	31.67
7	61.73	0.00	32.00	42.00	36.00	10.00
8	61.73	0.00	27.33	30.67	28.67	20.00

Bloco 2.7

CAPTAÇÃO:						
Consumo de energia (kWh)						
1	198.43	0.00	46.00	126.00	87.93	0.00
2	417.34	0.00	290.00	300.00	222.00	25.00
3	127.54	0.00	186.00	300.00	300.00	70.00
4	483.60	0.00	300.00	300.00	300.00	85.00
5	483.60	0.00	300.00	300.00	300.00	105.00
6	483.60	0.00	300.00	300.00	300.00	95.00
7	483.60	0.00	96.00	126.00	108.00	30.00
8	483.60	0.00	82.00	92.00	86.00	60.00
Consumo de energia (%)						
1	1.41	0.00	0.33	0.90	0.63	0.00
2	2.97	0.00	2.07	2.14	1.58	0.18
3	0.91	0.00	1.32	2.14	2.14	0.50
4	3.44	0.00	2.14	2.14	2.14	0.61
5	3.44	0.00	2.14	2.14	2.14	0.75
6	3.44	0.00	2.14	2.14	2.14	0.68
7	3.44	0.00	0.68	0.90	0.77	0.21
8	3.44	0.00	0.58	0.66	0.61	0.43

Bloco 2.8

O Bloco 2.9 apresenta o custo (R\$) da energia consumida em cada captação, e a porcentagem deste valor em relação ao custo diário total da eletricidade.

Custo de energia (R\$)						
1	11.80	0.00	2.73	7.49	5.23	0.00
2	24.81	0.00	17.24	17.84	13.20	1.49
3	7.58	0.00	11.06	17.84	17.84	4.16
4	28.75	0.00	17.84	17.84	17.84	5.05
5	28.75	0.00	17.84	17.84	17.84	6.24
6	28.75	0.00	17.84	17.84	17.84	5.65
7	28.75	0.00	5.71	7.49	6.42	1.78
8	28.75	0.00	4.87	5.47	5.11	3.57

Custo de energia (%)

1	1.41	0.00	0.33	0.90	0.63	0.00
2	2.97	0.00	2.07	2.14	1.58	0.18
3	0.91	0.00	1.32	2.14	2.14	0.50
4	3.44	0.00	2.14	2.14	2.14	0.61
5	3.44	0.00	2.14	2.14	2.14	0.75
6	3.44	0.00	2.14	2.14	2.14	0.68
7	3.44	0.00	0.68	0.90	0.77	0.21
8	3.44	0.00	0.58	0.66	0.61	0.43

Bloco 2.9**RECALQUE****Volume total (m3)**

1	421.26	0.00	0.00	519.00	0.00	0.00	290.70	0.00	0.00
2	765.00	32.07	0.00	519.00	414.00	132.15	726.75	0.00	0.00
3	765.00	0.00	0.00	519.00	414.00	44.34	678.30	0.00	0.00
4	765.00	612.00	0.00	519.00	414.00	208.17	823.65	0.00	0.00
5	765.00	0.00	0.00	519.00	414.00	309.00	828.00	189.45	0.00
6	765.00	600.67	0.00	519.00	414.00	309.00	828.00	92.55	0.00
7	765.00	0.00	0.00	519.00	414.00	0.00	290.70	0.00	0.00
8	765.00	0.00	0.00	519.00	106.48	0.00	96.90	0.00	0.00

Bloco 2.10**RECALQUE****Vazão média (m3/h)**

1	140.42	0.00	0.00	173.00	0.00	0.00	96.90	0.00	0.00
2	255.00	10.69	0.00	173.00	138.00	44.05	242.25	0.00	0.00
3	255.00	0.00	0.00	173.00	138.00	14.78	226.10	0.00	0.00
4	255.00	204.00	0.00	173.00	138.00	69.39	274.55	0.00	0.00
5	255.00	0.00	0.00	173.00	138.00	103.00	276.00	63.15	0.00
6	255.00	200.22	0.00	173.00	138.00	103.00	276.00	30.85	0.00
7	255.00	0.00	0.00	173.00	138.00	0.00	96.90	0.00	0.00
8	255.00	0.00	0.00	173.00	35.49	0.00	32.30	0.00	0.00

Capacidade usada (%)

1	55.07	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	35.11	0.00	0.00
2	100.00	5.24	0.00	100.00	100.00	42.77	87.77	0.00	0.00
3	100.00	0.00	0.00	100.00	100.00	14.35	81.92	0.00	0.00
4	100.00	100.00	0.00	100.00	100.00	67.37	99.47	0.00	0.00
5	100.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00	28.57	0.00
6	100.00	98.15	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00	13.96	0.00
7	100.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	35.11	0.00	0.00
8	100.00	0.00	0.00	100.00	25.72	0.00	11.70	0.00	0.00

Bloco 2.11

Os Blocos 2.10 e 2.11 apresentam o comportamento dos recalques, trazendo respectivamente o volume total de água (m³) bombeada, a vazão média (m³/h) e a porcentagem de utilização da capacidade de cada recalque nos oito intervalos.

Consumo de energia (kWh)									
1	104.73	0.00	0.00	172.05	0.00	0.00	25.81	0.00	0.00
2	190.18	9.97	0.00	172.05	171.56	73.01	64.54	0.00	0.00
3	190.18	0.00	0.00	172.05	171.56	24.50	60.23	0.00	0.00
4	190.18	190.21	0.00	172.05	171.56	115.01	73.14	0.00	0.00
5	190.18	0.00	0.00	172.05	171.56	170.72	73.53	21.03	0.00
6	190.18	186.69	0.00	172.05	171.56	170.72	73.53	10.27	0.00
7	190.18	0.00	0.00	172.05	171.56	0.00	25.81	0.00	0.00
8	190.18	0.00	0.00	172.05	44.13	0.00	8.60	0.00	0.00
Consumo de energia (%)									
1	0.75	0.00	0.00	1.23	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00
2	1.35	0.07	0.00	1.23	1.22	0.52	0.46	0.00	0.00
3	1.35	0.00	0.00	1.23	1.22	0.17	0.43	0.00	0.00
4	1.35	1.35	0.00	1.23	1.22	0.82	0.52	0.00	0.00
5	1.35	0.00	0.00	1.23	1.22	1.22	0.52	0.15	0.00
6	1.35	1.33	0.00	1.23	1.22	1.22	0.52	0.07	0.00
7	1.35	0.00	0.00	1.23	1.22	0.00	0.18	0.00	0.00
8	1.35	0.00	0.00	1.23	0.31	0.00	0.06	0.00	0.00

Bloco 2.12

O Bloco 2.12 traz o consumo de energia elétrica (KWh) de cada recalque, e no Bloco 2.13 tem-se o custo da eletricidade utilizada para bombear a água em cada um, e a participação (%) de cada recalque no custo total de energia elétrica do sistema.

O Bloco 2.14 apresenta o comportamento dos reservatórios, trazendo o volume de água (m³) armazenado em cada um nos oito intervalos, assim como a porcentagem de utilização dos mesmos.

RECALQUE									
Custo de energia (R\$)									
1	6.23	0.00	0.00	10.23	0.00	0.00	1.53	0.00	0.00
2	11.31	0.59	0.00	10.23	10.20	4.34	3.84	0.00	0.00
3	11.31	0.00	0.00	10.23	10.20	1.46	3.58	0.00	0.00
4	11.31	11.31	0.00	10.23	10.20	6.84	4.35	0.00	0.00
5	11.31	0.00	0.00	10.23	10.20	10.15	4.37	1.25	0.00
6	11.31	11.10	0.00	10.23	10.20	10.15	4.37	0.61	0.00
7	11.31	0.00	0.00	10.23	10.20	0.00	1.53	0.00	0.00
8	11.31	0.00	0.00	10.23	2.62	0.00	0.51	0.00	0.00

Custo de energia (%)									
1	0.75	0.00	0.00	1.23	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00
2	1.35	0.07	0.00	1.23	1.22	0.52	0.46	0.00	0.00
3	1.35	0.00	0.00	1.23	1.22	0.17	0.43	0.00	0.00
4	1.35	1.35	0.00	1.23	1.22	0.82	0.52	0.00	0.00
5	1.35	0.00	0.00	1.23	1.22	1.22	0.52	0.15	0.00
6	1.35	1.33	0.00	1.23	1.22	1.22	0.52	0.07	0.00
7	1.35	0.00	0.00	1.23	1.22	0.00	0.18	0.00	0.00
8	1.35	0.00	0.00	1.23	0.31	0.00	0.06	0.00	0.00

Bloco 2.13

RESERVATÓRIO								
Volume total (m3)								
1	6000.00	1000.00	1000.00	100.00	0.00	100.00	100.00	100.00
2	6000.00	743.92	1000.00	100.00	100.00	88.00	4.00	0.00
3	4370.57	525.98	1000.00	100.00	24.00	100.00	100.00	0.00
4	4028.75	709.41	828.40	100.00	80.00	100.00	100.00	0.00
5	4004.30	0.00	182.39	100.00	8.00	100.00	84.00	0.00
6	3476.08	31.68	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	4487.38	375.42	514.14	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	6000.00	1000.00	1000.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Capacidade usada (%)								
1	100.00	100.00	100.00	100.00	0.00	100.00	100.00	100.00
2	100.00	74.39	100.00	100.00	100.00	88.00	4.00	0.00
3	72.84	52.60	100.00	100.00	24.00	100.00	100.00	0.00
4	67.15	70.94	82.84	100.00	80.00	100.00	100.00	0.00
5	66.74	0.00	18.24	100.00	8.00	100.00	84.00	0.00
6	57.93	3.17	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	74.79	37.54	51.41	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Bloco 2.14

A.2.1 – Caso Multiobjetivo

Na seção A.1.2 deste apêndice, discutiu-se a forma da entrada de dados no caso de se utilizar o modelo de otimização para a realização de uma análise multiobjetivo. Neste caso utiliza-se um artifício, que faz com que a colunas das tarifas recebam os valores da função composta. Isto faz com que o valor obtido para o custo da energia elétrica no arquivo de saída do modelo de otimização não corresponda ao valor real, dado que o consumo de energia elétrica não é multiplicado pela tarifa de modo a se obter o custo da eletricidade e sim pelo valor da função composta da análise multiobjetivo.

Com o intuito de se obter o valor real do custo da energia elétrica no caso multiobjetivo, o arquivo de saída é convertido em um arquivo do *software Excel*[®], e a partir dos valores de bombeamento das captações e recalques, e da tarifa de eletricidade, a planilha calcula o gasto real com energia elétrica do caso analisado.