UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

MODELO DE OPERAÇÃO
PARA CENTROS DE CONTROLE DE
SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA
ESTUDO DE CASO:
SISTEMA ADUTOR METROPOLITANO DE SÃO PAULO

Rosmeiry Vanzella Vicente

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, para concorrer ao Título de Mestre, pelo curso de Pós-Graduação em Engenharia.

Área de concentração:
Engenharia Hidráulica.

São Paulo
2005

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

**MODELO DE OPERAÇÃO
PARA CENTROS DE CONTROLE DE
SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA
ESTUDO DE CASO:
SISTEMA ADUTOR METROPOLITANO DE SÃO PAULO**

Rosmeiry Vanzella Vicente

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo,
para concorrer ao Título de Mestre, pelo
curso de Pós-Graduação em Engenharia.

Área de concentração:
Engenharia Hidráulica

Orientador: Prof. Dr. Kamel Zahed Filho

**São Paulo
2005**

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de março de 2006.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Vicente, Rosmeiry Vanzella

Modelo de operação para centros de controle de sistema de abastecimento de água. Estudo de caso: sistema adutor / R.V. Vicente. -- ed.rev. -- São Paulo, 2006.

140 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária.

1.Abastecimento de água – São Paulo (SP) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária II.t.

*Aos meus pais, e irmãos, pelo amor, carinho, compreensão,
amizade e, acima de tudo, por compartilhar os bons e
maus momentos desde o início desta caminhada.*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de externar os meus mais sinceros agradecimentos ao Prof. Dr. Kamel Zahed Filho, orientador deste trabalho, pela paciência, dedicação, incentivo, por muitas idéias e por ter dado total apoio ao desenvolvimento deste projeto.

A Sabesp, todos os meus superiores ao longo deste estudo, que permitiram minha frequência às aulas e o uso das informações para realização deste trabalho, meu agradecimento.

Ao Prof. Dr. Edmundo Koelle pelo incentivo e amizade na realização do trabalho.

Ao Prof. Dr. Alberto Francato pelo incentivo e por muitas idéias na realização do trabalho.

A minha amiga Viviana Borges, uma amiga de todas as horas. Meus sinceros agradecimentos pelo incentivo e por toda a ajuda prestada.

Ao meu amigo Victor Ganem Neto pela atenção e por toda a ajuda prestada.

Aos meus pais e meus irmãos agradeço o apoio, o incentivo, a torcida e a confiança.

Aos meus familiares e amigos agradeço a amizade e a compreensão pelas minhas ausências.

Meus agradecimentos a João Antônio Santos de Araújo, Luiz Henrique do Nascimento, Cristina Secco, Cláudio Rodrigues, Silvio Siqueira, Alexandre Tassoni, Lourival Aposto, Acir Martins por toda a ajuda prestada.

A Denise Abbade e Mauro Sánchez pelo auxílio na parte de programação.

A todos aqueles que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

Sumário

RESUMO

ABSTRACT

APRESENTAÇÃO

RESUMO EXECUTIVO

1. OBJETIVO.....	1
2. INTRODUÇÃO.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3.1. Modelos Otimizadores.....	12
3.2. Modelos de Previsão de Demanda.....	24
3.3. Modelos Simuladores.....	28
4. SISTEMA TARIFÁRIO DE ENERGIA.....	36
5. METODOLOGIA.....	43
6. COLETA E CONSISTÊNCIA DOS DADOS.....	46
6.1. Sistema Adutor Metropolitano – SAM.....	46
6.2. Demanda de Água.....	51
6.3. Sistema de Controle Operacional do SAM.....	53
6.4. Curvas de Consumo.....	68
6.5. Dados Operacionais e Cadastrais do Sistema.....	71
6.6. Resultados da Calibração.....	88
7. MODELO DE PREVISÃO DE CONSUMO ESCOLHIDO.....	92
7.1. Premissas do Modelo.....	92
7.2. Equacionamento.....	92
8. MODELO DE SIMULAÇÃO ESCOLHIDO.....	98

9. MODELO DE OTIMIZAÇÃO UTILIZADO.....	101
10. INTERFACES DESENVOLVIDAS.....	106
11. RESULTADOS.....	112
12. CONCLUSÕES.....	127
13. PROPOSIÇÕES.....	131
14. BIBLIOGRAFIA	132
ANEXO A	140
ANEXO B	140

LISTA DE FIGURAS

Tabela 4.1	Classificação dos Subgrupos por Tensão de Energia Elétrica.....	36
Figura 4.2	THS VERDE A4 - Demanda, Ultrapassagem e Consumo.....	40
Figura 4.3	THS AZUL A4 - Demanda, Ultrapassagem e Consumo.....	40
Figura 4.4	Convencional A4 - Demanda, Ultrapassagem e Consumo.....	40
Figura 4.5	Consumo e Gastos por Classe de Tensão na Sabesp - (fonte: Sabesp - 2004d).....	42
Figura 4.6	Consumo e Gastos por Classe de Tensão na Adução - (fonte: Sabesp – 2004d)	42
Figura 5.1	Esquema das etapas do trabalho.....	45
Figura 6.1	SITUAÇÃO ADMINISTRATIVA DOS SISTEMAS DE ÁGUA DA RMSP Sistemas Integrado e Isolados da Região Metropolitana de São Paulo.....	47
Figura 6.2	Área de Influência dos Sistemas Produtores da Região Metropolitana de São Paulo.....	48
Figura 6.3	Esquema de Topologia da Rede.....	56
Figura 6.4	Esquema – Detalhamento do caminho que as informações (Sabesp/CPD) percorrem até a nuvem Frame Relay	57
Figura 6.5	LPs (múltiplos pares) Telefônica, Modems Sabesp (ECTs).....	60
Figura 6.6	LPs (múltiplos pares) Telefônica, Modems Sabesp (Conc).....	61
Figura 6.7	LPs Telefônica, Modems Telefônica.....	61
Figura 6.8	Transição Modems Sabesp-Telefônica.....	61
Figura 6.9	LPs Telefônica e New Bridge.....	62
Figura 6.10	Diagrama esquemático de toda a rede WSCOA - Fonte Sabesp - Relatório Sistema TCP/IP no WSCOA (Anexo).....	65
Figura 6.11	Esquema de funcionamento do “Novo” SCOA.....	66
Figura 6.12	Curvas de consumos médios, mínimos e máximos do setor Jaçanã.....	69

Figura 6.13	Curvas de consumos semanais do setor Itaquera.....	70
Figura 6.14	Curvas de consumos semanais adimensionais do setor Itaquera.....	70
Figura 6.15	Gráfico de valores de K1, K2 e K3 atingidos ou superados em cada frequência (0 a 100%) do setor Itaim Paulista.....	71
Figura 6.16	Fluxograma - Consistência dos Dados Operacionais do SCOA.....	75
Figura 6.17	Topologia do Sistema Alto Tietê.....	79
Figura 6.18	Topologia do Sistema Alto Tietê – Coeficientes de rugosidade.....	88
Figura 7.1	Fluxograma de cálculo do algoritmo de previsão de demandas.....	93
Figura 7.2	Diagrama explicativo.....	94
Figura 7.3	Diagrama explicativo.....	95
Figura 7.4	Diagrama explicativo.....	95
Figura 7.5	Fluxograma de implementação da previsão.....	96
Figura 7.6	Gráfico Consumo X Previsão.....	97
Figura 8.1	Tela do modelo WaterCad.....	99
Figura 8.2	Vista do modelo do sistema Alto Tietê utilizado no WaterCad, com detalhamento das estações elevatórias e boosteres do sistema.....	100
Figura 9.1	Modelo de Otimização da Operação do SAM Idealizado.....	101
Figura 10.1	Banco de dados do SCOA extraídos do servidor de dados históricos do SCOA - HDS	106
Figura 10.2	Tela da interface SCOA x Simulador.....	107
Figura 10.3	Tela do banco de dados ORACLE – cálculo da previsão do consumo....	108
Figura 10.4	Dados de Previsão de Consumo.....	109
Figura 10.5	Esquema integração das interfaces com os modelos.....	111
Figura 11.1	Gráfico do consumo previsto x consumo medido do reservatório Itaim Paulista – 26/03/2005 a 31/03/2005.....	113

Figura 11.2	Esquema hidráulico do sistema Alto Tietê (Fonte: Sabesp – Apresentação “Otimização da Operação do Sistema Alto Tietê” MACC-2005).....	115
Figura 11.3	Esquema hidráulico – Booster Poá.....	116
Figura 11.4	Esquema hidráulico – EEA Itaquaquecetuba – Arujá.....	118
Figura 11.5	Oscilação do reservatório Guaianazes com uma operação real do booster Guaianazes – 17/04/2005.....	119
Figura 11.6	Oscilação do reservatório Guaianazes com uma operação do booster Guaianazes fornecida pelo otimizador – 17/04/2005.....	119
Figura 11.7	Guaianazes OPERAÇÃO REAL.....	120
Figura 11.8	Guaianazes OPERAÇÃO OTIMIZADA.....	121
Figura 11.9	Oscilação dos níveis dos reservatórios Itaquaquecetuba, Arujá, Vila Industrial e Pinheirinho com uma operação real da EEA Itaquaquecetuba – Arujá e do booster Poá – 17/04/2005.....	122
Figura 11.10	EEA Itaquaquecetuba – Arujá - OPERAÇÃO REAL.....	123
Figura 11.11	Volume bombeado pelo booster Poá e pela EEA Itaquaquecetuba - Arujá - Operação REAL.....	124
Figura 11.12	Volume bombeado pelo booster Poá e pela EEA Itaquaquecetuba - Arujá - Operação OTIMIZADA.....	124
Figura 11.13	EEA Itaquaquecetuba – Arujá - OPERAÇÃO OTIMIZADA.....	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	THS AZUL – Eletropaulo / Resolução ANEEL 165/04 – 2004.....	41
Tabela 4.2	THS VERDE - Eletropaulo / Resolução ANEEL 165/04 – 2004.....	41
Tabela 4.3	Convencional - Eletropaulo / Resolução ANEEL 165/04 – 2004.....	41
Tabela 6.1	Capacidade dos reservatórios do sistema Alto Tietê.....	81
Tabela 6.2	Dimensões das adutoras do sistema Alto Tietê (resumo).....	82
Tabela 6.3	Dados cadastrais das válvulas telecomandadas nas entradas dos reservatórios do sistema Alto Tietê.....	83
Tabela 6.4	Pontos de demanda de água na representação do sistema Alto Tietê.....	83
Tabela 6.5	Curvas características das bombas por booster/EEA.....	84
Tabela 6.6	Vazão média diária, por ponto de medição, dos setores de abastecimento do Sistema Alto Tietê, de janeiro a abril de 2005.....	86
Tabela 6.7	Demanda média diária dos setores de abastecimento do Sistema Alto Tietê, de janeiro a abril de 2005.....	86
Tabela 6.8	Dados Utilizados para Calibração – Reservatórios.....	87
Tabela 6.9	Pressão observada e pressão calculada às 6:00h do dia 17/04/2005.....	89
Tabela 6.10	Pressão observada e pressão calculada às 15:00h do dia 17/04/2005.....	89
Tabela 6.11	Pressão observada e pressão calculada às 6:00h do dia 18/04/2005.....	90
Tabela 6.12	Pressão observada e pressão calculada às 20:00h do dia 19/04/2005.....	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIEst - Alarme da estação SCOA

BAC - Booster Alto Tietê / Cantareira

BL - Bloqueio acionado pelo CCO

CADOP - Cadastro de dados operacionais

CCO - Centro de Controle Operacional

CIMWater - Projeto da União Européia

CSC - Cross - Switch Controller

CSV - Extensão de aplicativo com leitura do tipo texto

EEA – Estação Elevatória de Água Tratada

EEAB – Estação Elevatória de Água Bruta

ELETROPAULO - Eletricidade de São Paulo S.A.

EPANET - Aplicativo computacional (modelo de simulação)

ERT - Estação remota de telemetria

ESC - Erro de escala

Est - Número da estação SCOA

ETA - Estação de Tratamento de Água

FRAME RELAY - Protocolo que executa as funções básicas de enlace e rede (modelo OSI), de forma simplificada e sem a preocupação com a recuperação de erros. É um protocolo que utiliza os benefícios da fibra óptica e da alta qualidade dos meios digitais.

INTRAGOV - É uma infra-estrutura única de comunicação, em implantação, que cobrirá todo o Estado, podendo ser compartilhada por diferentes órgãos públicos. Oferece os seguintes serviços: acesso a aplicações e bancos de dados distribuídos; transmissão de dados, voz e imagens, em alta velocidade e com total segurança.

GDAD - Gerência de dados

GENOCOP - Aplicativo computacional (modelo otimização)

GERP - Gerência de execução dos processos

GIDAP - Aplicativo computacional (modelo de previsão)

GIMPOS - Aplicativo computacional (modelo otimização)

GINAS - Aplicativo computacional (modelo de simulação)

GIPAS - Aplicativo computacional (programação de operação de bomba)

H2ONET - Aplicativo computacional (modelo de simulação)

HDS - Histórico de dados do SCOA

IRA - Índice de Regularidade da Adução

LP - Linha privada

LT - Linha telefônica

MA - Manutenção

MDC - Técnica de previsão baseada em análise de série temporal

OptQuest - Aplicativo computacional (modelo otimização)

PIPE2000 - Aplicativo computacional (modelo de simulação)

PLC - Programação Lógica Controlada

PL/SQL – Oracle Corporation's Procedural Language Extension to SQL – Linguagem de programação proprietária do Oracle.

Pointer - Aplicativo computacional (modelo otimização)

PROTOCOLO - Conjunto de regras e formatos (semânticos e sintáticos) que determinam o comportamento de comunicação de diversas entidades, na execução de funções.

QL - Qualificador do dado SCOA

R01 - Câmara 1 do reservatório

R02 - Câmara 2 do reservatório

R03 - Câmara 3 do reservatório

RA - Reservatório de Adução

RMSP - Região Metropolitana de São Paulo

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

SAM - Sistema Adutor Metropolitano

SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition

SCOA - Sistema de Controle Operacional da Adução

SDS - Servidor de dados do SCOA

Seg - Alarme de segurança patrimonial da estação SCOA

SQL - Linguagem de programação

SynerGEE - Aplicativo computacional (modelo de simulação)

TX – Transmissão de dados

URT – Unidade Remota de Telemetria

Visual Basic - Linguagem de programação

WaterCAD - Aplicativo computacional (modelo de simulação)

WaterCIME - Projeto da União Européia

Windows - Aplicativo computacional (sistema operacional)

WinPipes - Aplicativo computacional (modelo de simulação)

WSS - Water Software System

LISTA DE SÍMBOLOS

—	-	valor mínimo
—	-	valor máximo
α	-	Coefficiente de relação entre valores previstos e observados
B	-	Situação de bomba (ligada ou desligada)
B	-	Bomba
C	-	Coefficiente de rugosidade da fórmula de Hazen-Williams
E	-	Medição não válida
F	-	Vazão de entrada do reservatório em l/s
i	-	index de reservatórios
j	-	index de estações elevatórias
J	-	Número da estação elevatória
K1	-	Coefficiente de vazão do dia de maior consumo
K2	-	Coefficiente de vazão da hora de menor consumo
K3	-	Coefficiente de vazão da hora de maior consumo
MIN FO	-	Função objetivo de minimização
P	-	Pressão medida a montante da válvula de controle em mH2O
R	-	Nível d' água no reservatório, em metros
S	-	Substituição de dado automático pela informação passada manualmente
t	-	Tempo
t	-	index de intervalo de tempo
ΔT	-	Intervalo de tempo
T	-	Nível d' água na torre, em metros
TR	-	Erro de transmissão da linha telefônica
V	-	Posição da válvula de controle em %
Vol (t)	-	Volume do reservatório ao longo do tempo
Qj (t)	-	Vazão da estação elevatória ao longo do tempo
Y01	-	Consumo calculado pelo SCOA
Y01F	-	Consumo previsto, em l/s
Y	-	Consumo calculado, em l/s
Z	-	Variável calculada em função de valores de outros pontos SCOA

RESUMO

VICENTE, R. V. **Modelo de operação para centros de controle de sistemas de abastecimento de água - estudo de caso: sistema adutor metropolitano de São Paulo.** 2005. 140 p. Dissertação Mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

O presente trabalho propõe um modelo de operação sustentado por um sistema de suporte à decisão para operar a distribuição de água em tempo real atendendo a condições / restrições hidráulicas com o mínimo custo de energia elétrica. O atendimento às condições / restrições hidráulicas são avaliadas por um modelo simulador hidráulico previamente montado e calibrado. O conjunto de resultados avaliados pelo modelo de simulação hidráulica é analisado por um modelo de otimização proposto com solução de programação linear. As condições de operação em tempo real geram a necessidade de alimentação de informações operacionais automáticas a qualquer momento e com curto espaço de tempo – menor que horário. Para uma operação otimizada, previamente analisada por um modelo de simulação hidráulica cria uma condição critérios para uma previsão do consumo a ser atendido nas próximas horas. Um refinamento desses critérios são utilizados em um modelo de previsão de demanda de água que prevê e checka seus resultados de forma dinâmica. O modelo de operação proposto cria uma interface entre todos esses sistemas. Essa interface é testada e avaliada a partir de um estudo de caso aplicado no Sistema Adutor Metropolitano de São Paulo. A eficiência do modelo de operação proposto é apresentada tendo como resultado uma redução no custo de energia elétrica.

Palavra-chave: modelo, previsão de demanda de água, otimizador, operação, abastecimento de água

ABSTRACT

VICENTE, R. V. **Model of operation for control centers of systems of water supply - a case study: Sao Paulo Water Mains System.** 2005. 140 p. Dissertação Mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

This assignment considers an operation model supported by decision support systems to operate the water supply systems in real time, considering the hydraulic conditions while achieving some performance goals, in this case, reducing electricity costs (minimization of pumping costs) the attempt of the hydraulic constraints are evaluated by an hydraulic simulator previously calibrated. The set of results are analyzed by an optimization model which uses a linear programming. The operation conditions in real time requires automatic feeding operational information shortly at any time (less than an hour) for an optimized operation, previously analyzed by a hydraulic simulation model with creates condition criteria of consumption within following hours. These criteria are refined according to a demand prediction model that dynamically previews and checks the consumption results. This proposed model creates an interface between all these systems. This interface is tested and evaluated according to a study of the São Paulo's metropolitan area, "Sistema Alto Tietê". The efficiency of this proposed model is presented having reductions in the electric energy costs.

Key words: operational model, water demand prediction model, optimization, operation, water supply

APRESENTAÇÃO

Rosmeiry Vanzella Vicente é engenheira Civil, formada em 1992 pela Faculdade de Engenharia Civil da Universidade de Campinas, UNICAMP. Iniciou seus trabalhos na área de saneamento – projetos e, desde 1997, atua na área de recursos hídricos trabalhando na Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – SABESP no Departamento de Desenvolvimento Técnico Operacional.

Nesta área os estudos eram focados para a otimização da operação dos componentes do Sistema Adutor Metropolitano – SAM. Este contato proporcionou uma visão global de sistema de abastecimento público, com enfoque à complexidade do sistema de adução de uma grande metrópole. Nessa época, tomou familiaridade com modelos matemáticos utilizados para a avaliação de implementação de sistemas adutores, participando do processo de escolha do modelo matemático de simulação hidráulica mais adequado à empresa, promovido pela divisão responsável pelo desenvolvimento operacional do sistema adutor da região metropolitana.

Alguns conceitos técnicos da área de planejamento foram obtidos no Departamento de Planejamento Técnico Integrado, da mesma empresa, cujo foco é o planejamento estratégico e em alguns casos tático para o sistema de abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo - RMSP.

No Departamento de Controle do Abastecimento, tomou contato com a operação diária realizada pelo Centro de Controle da Operação – CCO, que possibilitou o conhecimento do quanto é grande o custo com energia na operação de um sistema adutor, justificando a disponibilidade de uma equipe extremamente qualificada para a melhoria da eficiência operacional.

Apesar do volume de informações fornecido pelas áreas da SABESP, um aprofundamento na área de Recursos Hídricos fez-se necessário, culminando no ingresso no curso de Mestrado da Universidade de São Paulo. Este curso estabeleceu um amadurecimento na área e proporcionou o acréscimo de conceitos de outras áreas de estudo.

A pesquisa mostra que o tema escolhido vem ao encontro do direcionamento da evolução de sistemas de controle operacional e o estudo de caso demonstra que pode ser aplicado para o sistema adutor metropolitano de São Paulo.

RESUMO EXECUTIVO

VICENTE, R. V. **Modelo de operação para centros de controle de sistemas de abastecimento de água - estudo de caso: sistema adutor metropolitano de São Paulo.** 2005. 139 p. Dissertação Mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

O aumento dos níveis de urbanização e, conseqüentemente, o aumento dos níveis de demanda, tem tornado a operação de muitos sistemas de abastecimento uma tarefa progressivamente complexa, principalmente nas grandes cidades.

A falta de planejamento e manutenção adequados, associados à escassez de recursos financeiros, vem reduzindo a eficiência dos sistemas de abastecimento de água. Os efeitos podem ser sentidos pelas empresas diante dos altos índices de perdas no sistema, associados principalmente à alta pressão de trabalho das redes assim como o aumento significativo do consumo energético. O custo operacional de energia elétrica elevado justifica investimentos para aumentar a eficiência do sistema, sem a perda da qualidade dos serviços.

Os custos de energia elétrica são muito concentrados na adução, pois estão associados aos custos de bombeamento.

Segundo Zahed (1990), a busca de uma operação automática visa obter uma maior confiabilidade e eficiência nos resultados. Em países desenvolvidos, observa-se o desenvolvimento de operações automáticas, com o uso de modelos simuladores e otimizadores. A fronteira atual consiste no desenvolvimento de sistemas baseados em experiências vividas no controle e integrados ao sistema de suporte à decisão.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo apresentar um modelo de operação que utiliza técnicas de simulação e otimização, estruturado na forma de um problema de programação linear, para a definição das políticas operacionais ótimas em um sistema de distribuição de água, tendo como objetivo principal a redução do consumo de energia

elétrica, através da minimização dos de bombeamento, observando as condições iniciais de reservação do sistema.

O modelo operacional proposto é composto por uma ferramenta de otimização de controle integrada com um sistema de controle supervisorio – SCADA, um modelo de previsão de demandas de água e um modelo simulador hidráulico. Este modelo é aplicado a um sistema de abastecimento de água tendo como objetivo a determinação das políticas operacionais que minimizem o consumo de energia elétrica associada às operações de bombeamento de água realizadas por estações de bombeamento do tipo booster e elevatórias. São consideradas as influências das condições iniciais do sistema (os níveis dos reservatórios) para a obtenção de políticas operacionais que conduzam a um menor consumo de energia elétrica por parte da estação tipo booster.

A figura 1 mostra esquematicamente a seqüência de passos idealizados para a realização do trabalho.

Figura 1 – Esquema das etapas do trabalho.

Na primeira parte do trabalho, foram feitas a coleta, o tratamento e a consistência: a) dos dados operacionais da Sabesp tais como, dados do

SCOA, a depuração desses dados foi feita utilizando linguagem PL-SQL em um banco de dados ORACLE; b) dos estudos hidráulicos da produção e operação; c) da topologia da rede adutora obtida de mapas do SAM em formato de shapes - ARCVIEW em coordenadas georeferenciadas (UTM), topologia essa associada a dados referentes aos tubos (comprimento, diâmetro e material), conexões com outros tubos e equipamentos do sistema e também dados de altimetria.

O atendimento as condições / restrições hidráulicas foram avaliadas por um modelo simulador hidráulico previamente montado e calibrado. O conjunto de resultados avaliados pelo modelo de simulação hidráulica foi analisado por um modelo de otimização proposto com solução de programação linear.

As condições de operação em tempo real geram a necessidade de alimentação de informações operacionais automáticas a qualquer momento e com curto espaço de tempo – menor que horário.

Devido à natureza do problema físico e do grau de complexidade do equacionamento do problema, optou-se por utilizar ferramentas simples, mas não menos eficazes para aplicação ao problema, sendo escolhida a programação linear como módulo de otimização, o WaterCad como módulo de simulação hidráulica e o modelo de previsão de demandas baseado em série de Fourier como módulo de previsão.

A análise dos dados operacionais coletados durante o desenvolvimento deste trabalho mostrou a essencialidade dos critérios utilizados na consistência dos dados utilizados pela interface e pelos modelos.

O algoritmo de previsão de demandas, já implantado na operação, mostra uma boa performance na velocidade de execução dos cálculos, gerando valores bastante próximos aos valores de consumo calculados pelo SCOA.

A interrupção na transmissão dos dados do campo para o SCOA, por até 6 horas, não interfere significativamente na qualidade dos dados previstos, como pode ser observado na figura 2.

Figura2 - Gráfico do consumo previsto x consumo medido do reservatório Itaim Paulista – 26/03/2005 a 31/03/2005

Para a simulação hidráulica, em tempo extensivo de 24 horas, utilizando os dados de consumo previstos em cada um dos pontos de demanda representados no modelo, as condições iniciais do SCOA (nível de reservatório, estado da bomba, vazões medidas), e os controles lógicos de operação das bombas o tempo de execução é em média de 45 minutos.

No booster Guaianazes, onde o modelo otimizador foi testado, o modelo encontrou uma solução factível com um custo menor de energia

elétrica. A operação real apresentou custo de \$ 2.001 e o modelo de otimização \$1.589, uma redução de 25%. Esse resultado foi obtido através da melhor utilização da capacidade do reservatório, diminuindo o tempo de utilização das bombas no horário de ponta, onde o custo da energia elétrica é o dobro do preço. Nota-se também que o número de acionamentos de bombas aumentou.

No caso da EEA Itaquaquecetuba, fica evidente que a otimização passa por adequações físicas como a duplicação da adutora entre o trecho da derivação do SAM para Itaim até o reservatório de Itaquaquecetuba. As condições do sistema são controláveis, pois pode-se reduzir a vazão de entrada dos reservatórios, porém não são otimizáveis, pois não se pode aumentar a vazão aduzida para os reservatórios Itaim e Itaquaquecetuba.

O modelo otimizador desenvolvido nem sempre apresentou resultados factíveis. Isso decorre do fato do modelo otimizador utilizado não incluir todas as restrições hidráulicas reais. Assim, deixa-se aberto a possibilidade de outros modelos que possam atingir melhores resultados.

Através do modelo desenvolvido foi possível implantar um modelo de operação para o planejamento da operação diária de um sistema urbano de abastecimento de água. A estrutura proposta permitiu integrar um sistema SCADA com um modelo simulador hidráulico, um modelo de previsão de demandas de água e um modelo de otimização. Este trabalho de pesquisa conseguiu viabilizar a implantação de um modelo de operação nas condições do Centro de Controle Operacional da Sabesp.

1. OBJETIVO

Este estudo tem como objetivos principais a proposição e a implantação parcial de um modelo de operação em tempo real de um sistema adutor complexo.

Entende-se aqui por modelo de operação, a estrutura composta por banco de dados operacionais de adução com dados históricos e também adquiridos em tempo real, modelos matemáticos de simulação de redes hidráulicas, modelos de previsão de consumos de água agregados por setor de abastecimento (área atendida por um reservatório de distribuição) e modelos de otimização.

A premissa básica deste estudo é fornecer uma base de programação matemática que permita a interface dos três modelos entre si e com os bancos de dados.

Serão utilizados alguns modelos matemáticos disponíveis, mas não será objeto deste estudo a análise de performance destes modelos ou a busca por melhores modelos. A estrutura que será proposta deverá permitir a substituição de qualquer um destes modelos por outro, mantendo a mesma organização proposta neste estudo.

O modelo de otimização, aqui utilizado, estará voltado à redução do consumo de energia elétrica, confiabilidade operacional, atendimento pleno à demanda de água e controle das pressões no sistema adutor.

A metodologia aqui proposta será avaliada em um estudo de caso, que é o Sistema Adutor Metropolitano de São Paulo – SAM.

A intenção deste estudo é que, ao seu final, seja fornecido um modelo de operação que seja sustentado por um sistema de suporte à decisão.

A mesma estrutura, quando todos os modelos matemáticos estiverem com uma calibração refinada, com uma função objetivo de otimização refinada (aqui restrita ao consumo de energia) e quando os dados obtidos de campo tiverem uma alta confiabilidade, poderá ser utilizada para um sistema de operação automático, com supervisão de controladores.

2. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, com o decréscimo da disponibilidade da quantidade de água per capita, dada em função do crescimento da população e da degradação dos mananciais, torna-se cada vez mais primordial a utilização consciente do uso dos recursos hídricos. A água não deve ser desperdiçada nem poluída para que não se atinja a situação de esgotamento ou de deterioração da qualidade das reservas atualmente disponíveis.

Para as empresas responsáveis pelo abastecimento de água das grandes metrópoles, conciliar o atendimento à demanda com a disponibilidade hídrica é tarefa ainda mais complicada, uma vez que as estações de tratamento de água (ETA) e as fontes de abastecimento superficial estão cada vez mais distantes dos centros de consumo, agravada pelos altos custos de adução, distribuição e qualidade da água bruta.

Além das condições básicas de potabilidade da água fornecida, as empresas de saneamento devem procurar atingir a melhor qualidade do serviço prestado, como a confiabilidade no atendimento e o menor custo final para beneficiar o usuário cliente.

Segundo Cabrera (1997), para que se consiga bons resultados em planejamento de recursos hídricos, deve-se conciliar: uma boa ação política, conhecimento adequado de ferramentas de engenharia e uma coordenação entre as duas atuações, ou seja:

- Base de dados histórica;

- Sistemas de suporte à decisão;
- Arcabouços institucional e legal;
- Articulação entre instituições;
- Ações descentralizadas, integradas e participativas;
- Conhecimento / acesso a fontes de financiamento.

A falta de planejamento e manutenção adequados, associados à escassez de recursos financeiros, vem reduzindo a eficiência dos sistemas de abastecimento de água. Os efeitos podem ser sentidos pelas empresas diante dos altos índices de perdas no sistema, associados principalmente à alta pressão de trabalho das redes assim como o aumento significativo do consumo energético, uma vez que, manobras operacionais tendem a compensar o funcionamento deficiente do sistema. O custo operacional de energia elétrica elevado justifica investimentos para aumentar a eficiência do sistema, sem a perda da qualidade dos serviços.

As empresas de saneamento estão enfrentando novos desafios, tentando alcançar uma operação eficiente do sistema de abastecimento de água urbano, atendendo a uma multiplicidade de aspectos no âmbito da gestão operacional. Isto evidencia a necessidade do desenvolvimento de ferramentas de auxílio à tomada de decisão. A tomada de decisão faz parte do nosso cotidiano e consiste na identificação do problema e na busca da melhor solução, mas, definir quando e quais medidas deverão ser tomadas e associar o custo e o benefício proporcionados é uma tarefa árdua.

Segundo Zahed (1990), a busca de uma operação automática visa obter uma maior confiabilidade e eficiência nos resultados. Na operação automática, procura-se incorporar os conhecimentos do homem a uma metodologia formal e

aliviá-lo das tarefas repetitivas, permitindo, com isso, o uso de seu intelecto para analisar criticamente a operação e introduzir novos conceitos e idéias. O operador passa a atuar como supervisor do sistema. Quando a operação não é automática, os critérios de operação não são explícitos, variando de acordo com a experiência e o comportamento de cada operador.

Nos últimos anos, as companhias de saneamento têm investido largamente na automação de seus sistemas de abastecimento de água, com obtenção de dados por telemetria e comandos à distância. Em países desenvolvidos, observa-se o desenvolvimento de operações automáticas, com o uso de modelos simuladores e otimizadores. A fronteira atual consiste no desenvolvimento de sistemas baseados em experiências vividas no controle e integrados ao sistema de suporte à decisão.

Os serviços de infra-estrutura são fundamentais para a otimização dos resultados operacionais. É necessária a padronização de procedimentos, não somente com a implementação de softwares cadastrais e de mapeamento, mas também com a documentação da rotina da empresa para que se tenha uma memória documentada de todo o sistema. A documentação deve existir desde a concepção dos projetos até as reformas e reestruturações do sistema para atender à demanda. Com a padronização, se ganha a possibilidade de implementação de regras operacionais otimizadas do sistema, pois se conseguem dados confiáveis para a modelagem e viabilidade de implementação de um sistema de suporte à decisão.

Embora o tamanho e a complexidade dos sistemas de abastecimento de água variem drasticamente, todos têm o mesmo propósito, entregar água ao

consumidor. Os sistemas de abastecimento de água tratada são divididos em sistema de captação de água bruta, tratamento, adução e distribuição. O sistema de adução consiste em componentes projetados para transportar grandes quantidades de água, geralmente entre a estação de tratamento de água (ETA) e os reservatórios setoriais. Consumidores individuais, geralmente, não são atendidos diretamente pelo sistema adutor. Desta forma, a ocorrência de pequenas falhas no sistema adutor, pode afetar um grande número de pessoas. Os custos de energia elétrica são muito concentrados na adução, pois estão associados aos custos de bombeamento. Portanto, “pequenas melhorias” na operação do sistema de adução têm um impacto em confiabilidade e custos.

Esses fatores motivaram a proposição do presente trabalho, enfocando o desenvolvimento e a adaptação de técnicas de simulação e otimização que permitam a obtenção de políticas operacionais em tempo real, mais eficazes para os sistemas de adução de água,

O modelo operacional proposto é composto por uma ferramenta de otimização de controle integrada com um sistema de controle supervisão – SCADA, um modelo de previsão de demandas de água e um modelo simulador hidráulico.

A previsão de demanda de água é um passo fundamental para que se possa obter uma política de operação do sistema de abastecimento, principalmente para operações em tempo real.

O modelo previsional de demanda tem como objetivo prever o consumo de água de uma cidade, de uma região ou de um setor de abastecimento em um futuro próximo. Esta tarefa é importante para se alimentar os modelos de otimização com

um cenário com alta probabilidade de ocorrência nas próximas horas. Os principais fatores associados à definição do consumo são o nível sócio-econômico dos consumidores, os tipos de consumidores (residencial, comercial, industrial etc), os tipos de usos e ocupação do solo (urbano, rural, adensamento), as características das instalações hidráulicas individuais, o método de medida de consumo, o preço da água, o dia da semana, a estação do ano, dias especiais (feriados, eventos, desastres), e as condições climáticas.

Os problemas de otimização apresentam uma estrutura clássica, onde se procura maximizar ou minimizar uma *função objetivo*, respeitando uma ou mais equações conhecidas por restrições. O grupo de variáveis de decisão define como o sistema será operado, ou seja, define como serão as manobras nas válvulas, o funcionamento do conjunto de bombas, os níveis de água dos reservatórios etc.

O algoritmo de otimização, ao resolver o problema matemático, visa encontrar, dentro das soluções factíveis, a solução ótima, ou seja, solução que atinja o ótimo, respeitando os critérios pré-estabelecidos. Além disso, é intrínseco que qualquer modelo de otimização contenha um modelo de simulação do sistema.

Os modelos de simulação são especialmente importantes devido à complexidade da topologia da rede, da dinâmica de crescimento e mudanças que ocorrem no sistema que exigem a máxima verossimilhança com o sistema real.

As simulações em geral são utilizadas para vários propósitos, tais como:

- Planos diretores de abastecimento de água;
- Estudos de proteção contra incêndio;
- Investigação sobre a qualidade da água;
- Gerenciamento de energia elétrica;

- Projetos de novos sistemas de abastecimento
- Operação diária (programação diária da operação, treinamento dos controladores, procedimentos de emergência).

A simulação é utilizada neste trabalho para avaliar respostas do sistema submetido a eventos sob um grande número de condições e restrições em uma operação em tempo real.

A simulação difere da otimização por não apresentar natureza otimizante, mas sim descritiva. A procura por uma solução ótima não é objetivo direto da simulação, uma vez que ela é extraída a partir de um grupo de possíveis resultados e variáveis de decisão.

O modelo de simulação deve ser calibrado e validado através de resultados particulares, conhecidos pelas respectivas variáveis de entrada, para verificar a concordância entre o fenômeno ou processo modelado e o real. Isto exige todo um trabalho de infra-estrutura de apoio para a obtenção dessa confiabilidade:

- Pitometria
 - Determinação das curvas características das bombas por meio de ensaios;
 - Coeficiente de rugosidade das tubulações;
- Cadastro
 - Topografia – traçado e cotas;
 - “As Built’s” confiáveis;
- Medições
 - Medidores de vazão e pressão adequados;
 - Níveis de reservatórios confiáveis;

- Garantia da transmissão dos dados de telemetria através de tecnologias cada vez mais confiáveis;
- Equipe capacitada

Desta forma, o modelo operacional não encerra a solução de um sistema automatizado, mas deve ser inserido em um contexto de uma nova estrutura organizacional que facilite seu desempenho.

O resultado do trabalho é a otimização do processo, o que possibilita a redução do custo operacional com aumento da confiabilidade do sistema, tendo como conseqüências a redução do gasto financeiro pelo consumidor final, melhoria da qualidade de vida e universalização do abastecimento.

3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

A preocupação com o dimensionamento econômico de sistemas de abastecimento de água, remonta à década de quarenta, onde o processo de urbanização se acelerou. Santana (1992), comenta que, na década de setenta, intensificaram-se as aplicações, utilizando técnicas de otimização, consolidando o uso de recursos computacionais e idéias sobre a simulação e otimização de redes de abastecimento de água.

A década de oitenta foi caracterizada pela consolidação das metodologias. Walski et al. (1987), propuseram a alguns autores da área de modelos de simulação hidráulica que resolvessem um sistema de rede hidráulica hipotética, cada um a seu modo e verificou que a utilização de diferentes algoritmos e metodologias, na resolução do mesmo problema apresentou diferentes soluções otimizadas, com a mesma ordem de grandeza, aceitável, em função de múltiplos ótimos locais.

A década de noventa caracterizou-se pela sofisticação de algoritmos, que buscavam a consolidação teórica para as soluções adotadas, mas sem o surgimento de soluções práticas finais (Goulter, 1992).

O aumento dos níveis de urbanização nas ultimas décadas e a conseqüente demanda por água potável tornou a operação dos sistemas de abastecimento bastante complexa. O custo da interferência urbana é muitas vezes maior que o próprio custo da rede. Assim, o envelhecimento do sistema adutor e de distribuição é acentuado pela falta de possibilidade de intervenção nesse meio,

comparado a uma manutenção, por exemplo, em uma elevatória que é construída para facilitar isso.

O custo operacional nos sistemas de abastecimento público é algo que merece atenção especial por parte dos administradores desses sistemas. Segundo Clingenpeel (1983), muitas empresas de saneamento gastam com energia elétrica 50% (ou mais) dos custos operacionais, dos quais mais de 95% podem ser associados aos custos de bombeamento. Portanto, mesmo uma pequena redução no consumo de energia representa uma economia monetária razoável.

A participação da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - Sabesp representa 2,2% do consumo total de energia elétrica do Estado de São Paulo (Sabesp, 2003). Dos valores gastos com energia elétrica dentro da Sabesp, 1% representa o gasto do setor administrativo (luminárias, microcomputadores, telefones, fax etc), 11% no setor de esgoto (estações elevatórias de esgoto, por exemplo) e 88% no setor de água (boosteres, elevatórias, equipamentos telecomandados etc).

Portanto, há a necessidade do uso de ferramentas de modelagem matemática, tanto para o dimensionamento - elaboração de novos projetos, quanto para a otimização, readequação e operação dos sistemas existentes. O foco desse trabalho é a operação.

3.1. Modelos Otimizadores

A busca pela operação eficiente de redes hidráulicas para o abastecimento é desenvolvida em vários países, devido principalmente à escassez de recursos hídricos e aos altos custos de energia elétrica.

O projeto europeu WATERNET (2001), desenvolvido entre 1996 e 1998, tem como propósito auxiliar o gerenciamento e otimizar o funcionamento de sistemas de abastecimento de água. Ele propõe um sistema de gerenciamento inteligente, onde os principais objetivos são a minimização dos custos de produção de água, a redução do consumo de energia e a garantia de um fornecimento contínuo de água de boa qualidade, através de um sistema de aprendizado.

É chamado sistema de aprendizado por múltiplos paradigmas, por possibilitar a aquisição de conhecimento através de vários paradigmas da Inteligência Artificial, tão diversos como redes neurais, sistemas especialistas e raciocínio baseado em casos. Ele contém diversos algoritmos de aprendizado e auxilia a tomada de decisões através da análise de casos já resolvidos no passado.

O projeto WATERNET é composto de vários subsistemas:

- Sistemas de Supervisão – monitora o estado atual da rede;
- Subsistema de Gerenciamento da Informação Distribuída – permite que estações remotas comuniquem-se entre si e com a unidade central;
- Subsistema de Otimização – elabora estratégias para melhor aproveitamento dos dispositivos do sistema (bombas, válvulas etc);
- Subsistema de Monitoração da Qualidade da Água – monitora a qualidade da água;

- Subsistema de Modelagem e Simulação – realiza simulações do comportamento da rede;
- Subsistema de Aprendizado – mantém a comunicação com todos os sistemas, armazenando conhecimento e propondo soluções para problemas que possam surgir.

O sistema acima citado, incluindo a ferramenta de otimização, foi desenvolvido no contexto de um projeto de pesquisa europeu para ser aplicado em sistemas de abastecimento de água. O projeto WATERNET apresenta dificuldade para ser encontrado ou mesmo para obter detalhes que permitam melhor entendimento e utilização das técnicas.

No contexto do projeto de pesquisa europeu (WATERNET, ESPRIT IV, no. 22186), foi desenvolvido o trabalho de Cembrano et al. (2000) que traz uma formulação interessante do problema. Os autores desenvolveram uma ferramenta de otimização de controle integrada com um sistema de controle supervisão que pudesse ser utilizado por uma classe grande de utilidades da água. O sistema inclui um modelo da predição das demandas futuras, baseado em um número de valores passados. Esse modelo da predição da demanda é obtido utilizando a metodologia indutiva fuzzy do raciocínio (Lopez, Cembrano e Cellier, 1996). O modelo de otimização para operação de sistemas de abastecimento de água, faz uso do método generalizado do gradiente reduzido para programação não linear (NLP) e procedimentos iterativos. A rotina de otimização utilizada é o GAMS/CONOPT (GAMS, 1997).

O modelo acima foi aplicado em um estudo de caso para o sistema de abastecimento da cidade de Sintra, Portugal, tendo como objetivo minimizar os

custos de energia elétrica no bombeamento. No estudo de caso, é imposta uma condição de que os volumes finais nos reservatórios devem ser os mesmos que os iniciais. Essa condição é importante quando se espera uma operação contínua do sistema. No entanto, outros parâmetros deveriam ser considerados, tais como número de acionamentos de bombas, tempo entre os acionamentos, número de manobras em válvulas, para atender às necessidades do gerenciamento de uma rede de abastecimento de água.

León et al. (2000) apresentam o desenvolvimento de um sistema especialista híbrido chamado Explore e sua aplicação no gerenciamento do sistema de adução da cidade de Sevilha – Espanha. Esse sistema tem como objetivo principal garantir o atendimento à demanda de água, reduzindo os custos de energia elétrica. As maiores dificuldades encontradas foram: a falta de informação nos procedimentos de gerenciamento do sistema de adução; o caráter dinâmico da rede de adução; um sistema tarifário de energia complexo e as dificuldades na previsão de demandas. O Explore utiliza uma combinação de métodos heurísticos e algoritmos matemáticos para a otimização do sistema. Para a previsão de demanda, o sistema especialista utiliza uma série de dados históricos e assume que a demanda de qualquer dia é a mesma que do mesmo dia da semana anterior, um método simples, mas que introduz erros acumulativos na previsão. Em Sevilha, segundo os autores, o protótipo testado obteve um resultado de cerca de 25% de economia nos custos de energia elétrica sobre a operação anterior.

Boulos et al. (sem data) desenvolveram um modelo de otimização, utilizando algoritmo genético para obtenção de uma política otimizada de bombeamento, com mínimo custo de energia elétrica, atendendo às condições

hidráulicas do sistema num horizonte de 24 horas utilizando o modelo H2ONET Scheduler. A *função objetivo* do modelo é minimizar os custos de energia, satisfazendo requisitos hidráulicos (pressão mínima e máxima nos nós, velocidade nos tubos, nível dos reservatórios, número máximo de liga-desliga de bombas) do sistema. O modelo operacional foi testado em um grande numero de sistemas de distribuição de água e se mostrou eficiente na redução dos custos de energia por bombeamentos.

Willians & Coulbeck (1987), desenvolveram um sistema de controle de abastecimento em Wolverhampton – Inglaterra. O projeto tinha por objetivo melhorar economicamente a performance de operação desse sistema de abastecimento de água. Para tal, foi revista sua concepção, o que resultou num novo zoneamento da área; foi implantado um sistema de controle operacional centralizado através de um controle remoto de monitoramento e supervísório; e foi feito uso de recursos computacionais para análise e gerenciamento do sistema. Ao modelo de simulação hidráulico adotado – GINAS, os autores acoplaram modelos computacionais de previsão de demanda – GIDAP e o modelo de otimização de bombas – GIMPOS, desenvolvidos para esse estudo. O projeto foi considerado arrojado e bem sucedido, e tem sido discutido por estudiosos após sua publicação.

O modelo acima citado é utilizado em redes operadas pelas empresas Severn Trent Water, Thames Water e Yorkshire Water – Reino Unido, atendendo a mais de dez milhões de consumidores. Esse trabalho teve continuidade através do desenvolvimento do projeto WaterCIME (WSS – 2004), que envolveu um consórcio entre oito entidades de cinco países europeus. As pesquisas da WSS têm como foco principal o desenvolvimento de tecnologias de otimização para solucionar

problemas de controle operacional e de pressão em sistemas de abastecimento, e o resultado é o modelo de suporte à decisão conhecido por FINESSE. O projeto WaterCIME apresenta dificuldade para ser encontrado ou mesmo para obter detalhes que permitam melhor entendimento e utilização das técnicas. A equipe de desenvolvimento aparentemente não tem interesse em divulgação, apesar de propor comercialização.

Na tentativa de redução de custos operacionais em um sistema de abastecimento de água para Durban, África do Sul, Biscos et al. (2002) testaram um modelo de otimização que utiliza um algoritmo de programação inteira e programação não linear (MINLP). Devido às características do sistema de adução quanto ao projeto, a capacidade de reservação e curvas de demanda, observou-se que a solução ótima do sistema não implica em redução dos custos de energia.

Na busca de se alcançar uma operação ótima de sistemas de distribuição de água, Righetto (2001) apresenta uma metodologia que envolve parâmetros relacionados com o consumo de energia, confiabilidade operacional, satisfação quanto ao atendimento à demanda e controle de pressões nodais. O modelo é composto por um modelo hidráulico baseado no método das características e um modelo de otimização baseado em algoritmo genético. Apesar da eficácia do modelo e sua flexibilidade de incorporar características desejáveis à operação do sistema, o tempo de processamento para simular um período de 24 horas é muito grande, o que inviabiliza aplicações em tempo real.

Venturini (1997) apresenta uma metodologia que visa subsidiar a obtenção de soluções do problema de operação dos sistemas públicos de abastecimento de água. O algoritmo proposto permite minimizar as vazões bombeadas, que

corresponde ao principal custo na operação de um sistema de abastecimento. O problema de otimização é formulado em programação linear (PL), o Método Simplex de DANTZIG (1963), utilizando o software MINOS, Versão 5.1, em conjunto com um algoritmo iterativo para contornar a não-linearidade do sistema. A metodologia visa a redução das vazões bombeadas satisfazendo às restrições de conservação da massa, conservação da energia e a manutenção dos níveis máximos e mínimos de pressões e velocidades na rede, para um dado padrão de demanda, considerando as bombas com rotação fixa. O modelo foi testado em uma rede hipotética para um intervalo de tempo do horizonte de operação.

Francato e Barbosa (1999) desenvolveram uma metodologia de obtenção da operação ótima de uma rede de distribuição de água em período extensivo (24 horas), tendo como objetivo a minimização dos gastos com energia elétrica, através da minimização das vazões bombeadas. A metodologia tem como base a utilização de um algoritmo de programação linear (PL) baseado no Método Simplex (de DANTZIG -1963). Utiliza o software MINOS 5.1, e um procedimento iterativo, para contornar as não-linearidades presentes nas equações que regem o sistema e, calcular o fator de atrito pela expressão de Colebrook-White.

A metodologia foi aplicada a uma rede hipotética de pequeno porte estudada por Venturini (1997), visando minimizar as vazões bombeadas atendendo a todas as restrições operacionais. Os resultados permitiram analisar os comportamentos das vazões, pressões, rotação da bomba e aberturas das válvulas, ao longo de um horizonte de 24 horas. A utilização do procedimento iterativo mostrou-se eficiente e convergente, demonstrando ser possível a aplicação da programação linear.

O modelo proposto por Almeida (2001) é um modelo hidráulico de otimização, como define o próprio autor, em período extensivo, estruturado na forma clássica dos problemas de otimização determinística restrita. Para a solução do modelo proposto, foram utilizados dois algoritmos de programação não linear associados a um algoritmo de programação inteira. São eles: (a) o algoritmo do Gradiente Reduzido Generalizado (ABADIE e CARPENTIER, 1969) associado ao algoritmo BRANCH and BOUND; (b) o algoritmo da Lagrangeana Projetada (MURTAGH e SAUNDERS, 1982) associado ao algoritmo BRANCH and BOUND.

O modelo foi avaliado em um sistema real, o Subsistema Adutor Metropolitano Alça Leste da cidade de São Paulo, e os resultados evidenciaram a viabilidade da utilização de uma estrutura baseada em um problema de programação não-linear inteira mista para representar os componentes de um sistema de abastecimento de água e suas respectivas características de operação.

POWADIMA (Potable Water Distribution Management - Gestão em Distribuição de Água Potável, 2000/2004) é um projeto desenvolvido pelo Instituto Tecnológico de Israel com o apoio da Escola de Engenharia Civil e Geociências da Universidade de Newcastle – Inglaterra, que pretende desenvolver as ferramentas necessárias para a gestão de redes de abastecimento em tempo real. O problema da otimização é abordado mediante a aplicação de redes neurais e algoritmos genéticos.

A vantagem desta aproximação é a significativa melhoria na eficiência computacional que permite o ajuste ótimo dos controles para as etapas de tempo atual e futura até o horizonte de operação. O procedimento é repetido no próximo intervalo de tempo, seguindo a última atualização obtida do sistema do supervisor

de controle e aquisição de dados (SCADA). No entanto, inicialmente, o sistema de controle resultante seria de uso consultivo à equipe de funcionários operacional, com a possibilidade de controle automático em longo prazo.

O sistema protótipo está sendo aplicado a duas redes de complexidade diferentes, na cidade de Haifa – Israel, e na cidade de Valência – Espanha, e os resultados comparados com o controle manual. O programa de pesquisa foi dividido em sete etapas como segue:

- 1º Etapa: Criou-se um grupo de discussão para definir métodos de trabalho, de procedimentos da qualidade-garantia, de padrões e de exatidão, de critérios de avaliação etc.
- 2º Etapa: Uso de uma rede neural artificial (ANN) para reproduzir o modelo hidráulico de simulação e a aplicação nos dois estudos de caso.
- 3º Etapa: Desenvolvimento de um algoritmo de otimização baseado em algoritmo genético (GA), especificamente para o controle em tempo real.
- 4º Etapa: Combinação do GA com a ANN para cada estudo de caso, para moldar um processo de otimização da distribuição da água.
- 5º Etapa: Extender o processo de controle para incluir as medidas de contingência para falhas de bomba, válvulas etc.
- 6º Etapa: Conclusão do sistema de otimização para cada estudo de caso, através da inclusão de uma previsão de demanda em tempo real.
- 7º Etapa: A avaliação dos benefícios e dos custos associados decorrentes da operação otimizada em tempo real do sistema, definição das exigências do sistema SCADA, e documentação da metodologia aplicada.

O projeto encontra-se em fase de conclusão. A pequena divulgação desse projeto deve-se ao caráter comercial da aplicação, pois sua publicação poderia invalidar a aplicação de patente. O cliente principal visado é a indústria de água. O principal atrativo para essas companhias de água é a possibilidade de reduzir significativamente os custos operacionais, através de um melhor gerenciamento da pressão e da energia do sistema, mas elas necessitarão serem convencidas que os benefícios são reais.

Francato (2002) propôs uma formulação multiobjetivo para o problema do planejamento da operação de um sistema urbano de abastecimento de água. Esse trabalho de pesquisa apresenta uma melhor compreensão sobre os objetivos operacionais considerados relevantes sob a ótica dos gestores de sistemas urbanos de abastecimento de água, à tradução de objetivos (nem sempre explícitos de forma quantitativa) em funções matemáticas de significado prático e com possibilidade de tratamento computacional e uma caracterização do grau de compromisso entre as funções objetivo estudadas, feita através de modelo matemático computacional. Utiliza ferramentas simples para aplicação ao problema, a programação linear como módulo de otimização e o método dos pesos para a abordagem multiobjetivo.

Dada a originalidade e relevância desse trabalho, uma ponderação sobre os níveis de água inicial e final dos reservatórios poderia ser incrementada para uma implementação na operação de um sistema adutor em funcionamento. A abordagem multiobjetivo do problema, juntamente com o grau de detalhamento descrito preenche uma importante lacuna de conhecimento na área.

Em aplicações envolvendo sistemas urbanos de distribuição de água, a otimização de energia tem sido objeto de diferentes estudos. Especificamente, sobre projetos de otimização de redes de abastecimento de água, é possível encontrar um número considerável de artigos. Boas referências para leituras iniciais são os trabalhos de Costa et al. (2001) e Sherali et al. (2001) onde técnicas de “branch and bound” são utilizadas para a solução do problema. Wu & Simpson (2001), Shin and Park (2000), Savic et al (1999), Montesinos & Gonzáles (1998) formularam e solucionaram o problema usando algoritmo genético; Zoppou & Red (2001), Cunha & Sousa (1999) usando técnicas de “Simulated Annealing”. Xu & Goulter (1999) utilizaram técnicas de otimização baseada em lógica Fuzzy. Apesar do grande número de trabalhos recentes sobre o assunto otimização, apenas alguns poucos abordam o problema de uma forma multi-objetivo, ou seja, considerando além da operação ótima de bombeamento, o comportamento dos outros elementos do sistema.

Para a análise dos sistemas, é necessário montar uma estrutura que permita ao decisor uma resolução do problema de maneira lógica e racional. Simonovic (1998) comenta que a aplicação de análises de sistemas deve conter as seguintes etapas:

- Definição do problema;
- Reunião dos dados envolvidos;
- Desenvolvimentos de critérios para avaliação de alternativas;
- Formulação de alternativas;
- Avaliação de alternativas;
- Seleção da melhor alternativa;

- Plano de implementação.

Ormsbee e Lansey (1994) comentam que as restrições para sistemas de abastecimento de água podem ser divididas em três grupos: limitações físicas dos sistemas (capacidade dos reservatórios, capacidade de produção dos mananciais, configuração das bombas etc.); leis físicas (conservação de massa nos nós da rede); e requerimentos externos (definição de demanda, manutenção aceitável nos níveis de pressão dos nós).

Há a necessidade de se avaliar se o sistema é controlável, ou seja, se é possível realizar manobras de operação que permitam controlar o fluxo de vazão (através de variação da abertura de válvulas ou de bombeamentos) e o armazenamento de volumes de água (reservação).

Um sistema controlável pode ser ou não otimizável. O próprio critério ótimo é um termo bastante controvertido, uma vez que a essência dos problemas de operação de sistemas de abastecimento de água é, por natureza, multiobjetivo, onde se pode objetivar, além da minimização dos custos associados ao bombeamento de água, também a minimização dos déficits de atendimento às demandas, a minimização dos vazamentos no sistema através da redução das pressões ou ainda outros critérios de desempenho do sistema. Além disso, os objetivos podem variar no tempo, em função de condições externas ao sistema e também em função da capacidade do mesmo.

Em um sistema com demandas superiores à capacidade de produção, a função objetivo de otimização deve refletir a busca em minimizar e distribuir os déficits de atendimento, utilizando o melhor possível a capacidade de reservação do sistema.

Um sistema onde não há limitações físicas, o problema de otimização se resume no atendimento da demanda de água através da adução da vazão média em cada reservatório setorial.

A reservação possui múltiplas finalidades, dentre elas: assegurar reserva de água para o caso de situações emergenciais; regularizar as pressões de serviço na rede de distribuição, dentro dos limites (máximo e mínimo) adequados; compensar as flutuações de consumo, armazenando os excessos de água nas horas em que a quantidade consumida for menor que a aduzida e, liberando quando a quantidade consumida for maior que a aduzida.

O abastecimento por bombeamento e armazenamento é o método mais interessante, quando não é possível realizar o abastecimento por gravidade, locado estrategicamente, o reservatório recebe os excessos de água dos períodos de menor consumo e funciona como fonte de abastecimento nos períodos de maior consumo.

Este tipo de abastecimento reduz o custo da operação de bombeamento, pois o enchimento dos reservatórios se dá no período de menor consumo, em geral na madrugada, quando o custo da energia elétrica é inferior.

Existe um grande número de modelos que apresentam, em sua formulação, uma combinação de várias técnicas de otimização e simulação, geralmente trabalhando com programação linear nas partes em que os equacionamentos são lineares, programação dinâmica nas partes em que envolve decisões multi-estágios e simulações para averiguação de alguns parâmetros. Enquanto poucos modelos simuladores hidráulicos têm sido adaptados para propósitos operacionais, como a

detecção de alguma anormalidade no sistema. Nenhum tem sido utilizado para controle ótimo.

3.2. Modelos de Previsão de Demanda

Os modelos de simulação são alimentados por uma demanda de consumo de água existente ou por uma demanda prevista. O objetivo de se utilizar um modelo de previsão de consumo de água é reduzir incertezas, servindo de base para a programação operacional e tomada de decisões.

O modelo previsor pode ser definido como uma ferramenta auxiliar na definição de uma regra de operação. Segundo Zahed (1990), é muito mais interessante que se consiga definir uma regra operacional do que se alcançar uma previsão “perfeita”. Entretanto, o estabelecimento de regras operacionais pode variar desde definições subjetivas do operador, passando por uma metodologia definida, através do auxílio de um modelo de previsão de demanda de água, proposta por Zahed (1990). A metodologia proposta por este estudo utiliza um modelo operacional que consiste no modelo de previsão de demanda desenvolvido por Zahed (1990) baseado na série de Fourier, critérios de consistência de dados utilizados por Borges (2003), simulador hidráulico e um otimizador.

Vale ressaltar que, em um sistema de abastecimento, é factível a correção da operação sempre que ocorrer um desvio excessivo no valor previsto da demanda em relação ao valor real. É mais importante avaliar os desvios de volumes armazenados ao longo do período de observação em relação aos valores

previstos do que verificar as correlações entre os valores calculados e observados de consumo em uma dada hora.

Em 1986, a Figueiredo Ferraz (FIGUEIREREDO FERRAZ, 1985) desenvolveu um modelo de previsão de demandas, utilizando para isso:

- Uma curva neutra média de consumo por dia da semana para cada setor de abastecimento;
- Um coeficiente de correção para cada curva neutra obtida – em função dos dados históricos;
- Outro coeficiente de correção para o fator temperatura – em função da faixa de temperatura, e em função de ser as temperaturas mínimas, médias ou máximas a que influencia o setor;

O método utilizado é bastante criticável, pois a divisão das temperaturas em faixas é feita sem um critério objetivo, além de que a relação entre o consumo de um setor a uma dada hora e a temperatura média, máxima ou mínima varia de setor para setor. O consumo pode estar correlacionado com a temperatura de instantes anteriores, e também com gradientes de temperatura.

O IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas (Sabesp - 2002), apresentou um modelo de previsão para o consumo em sete reservatórios da Alça Leste do SAM. O modelo foi desenvolvido a partir de observações horárias de consumos e temperaturas entre abril-2001 e novembro-2002, com horizontes de previsão de 1 hora e 24 horas.

Para a previsão da demanda, o modelo depende do cálculo de 58 parâmetros que são diferentes tanto para cada setor de abastecimento quanto para o horizonte de previsão. Esse modelo é baseado em dados históricos, atualizável

de hora em hora, mas não prevê a tendência de consumo e sua correção para a hora seguinte. Em setores que apresentam um comportamento de consumo cíclico bem definido, o modelo apresentou bons resultados, já em setores onde as condições de reservação não são adequadas, houve um desvio acentuado entre o consumo real e o previsto.

Zhou et al. (2000) desenvolveram um modelo de previsão de consumo de água e aplicaram em um estudo de caso para o sistema de abastecimento de Melbourne, Austrália. O modelo foi baseado na tendência representada por uma função polinomial pelo tempo, (sazonal) definindo verão e inverno, correlação e autocorrelação climática e fatores de persistência. O modelo matemático prevê, sob a demanda passada o período futuro de 24 horas. Não houve uma ponderação sobre dias atípicos como feriados.

As demandas de consumo de água previstas, em geral, baseiam-se numa projeção de consumo que podem ser do tipo anual, média diária, máxima diária, mínima horária e máxima horária.

Muitos artigos tratam da previsão de demanda de consumo de água urbana sob a ótica anual ou mensal. Poucos falam sobre o uso de água diário. Para fins operacionais de abastecimento de água, há necessidade de um conhecimento do consumo de água de um período de curto prazo (Borges - 2003). Alguns programas computacionais de modelos de previsão de consumo surgiram a partir dos anos 90, tais como:

- O modelo desenvolvido pela Universidade de Kentucky (Jain e Ormsbee – 1992);

- O modelo desenvolvido por Zahed na Universidade de São Paulo (1990) - desenvolveu e aplicou dois modelos de previsão de demanda na operação horário na operação de parte do Sistema Adutor Metropolitano de São Paulo. Considerou como premissas mais importantes a eliminação do efeito do dia da semana (24 horas móveis); erros medidos em termos de desvios de volumes acumulados, comparados aos volumes dos reservatórios; associação simples com dados históricos recentes para evitar utilizar modelos auxiliares (previsão de temperatura). A metodologia empregada utilizou dados válidos da semana anterior e do dia. Trabalhou com horizonte de previsão máximo de 24;
- O modelo IWR-MAIN (Strus e Dziegielewski – 1992) – é um software de planejamento que estima as demandas de água através de projeções de população e de domicílios. A previsão de demandas é estimada por área (setor ou subsetor de abastecimento), ou por períodos de tempo (sazonal, anual) observando estatísticas de consumos passados.
- O modelo utilizado em Paris (Crommelynck et al. – 1992);
- O modelo de previsão de demanda de água - GIDAP desenvolvido pela Leicester Polytechnic Water Control Unit (Williams e Coulbeck – 1987) - O modelo de previsão de demanda de água GIDAP, que é um dos módulos do modelo simulador hidráulico GINAS, compara a demanda analisada e a prevista com interface gráfica e se resume em duas partes: a análise inicial dos dados usados para a previsão e a previsão diária ou semanal. Os dados previstos podem ser processados pelo

modelo para os períodos de 24 horas ou 7 dias. Um dos projetos que deram continuidade ao desenvolvimento deste trabalho foi o projeto WaterCIME (WSS –2000; WaterCIME - 2002), da Comissão Europeia (EC nº 8399) responsável pelas integrações entre os equipamentos de medição e controle e possui diversos módulos, entre eles o modelo simulador – GINAS e o programador da operação, da FINESSE.

- O modelo desenvolvido para o sistema de abastecimento de Melbourne, Austrália (Zhou et al. – 2000); e para o sistema Ein Ziv, em Israel (Zessler – 1989);
- O modelo desenvolvido para o sistema de abastecimento da cidade de Regina, no Canadá (Lertpalangsunti et al. – 1999) – modelo de previsão diária, utilizando uma combinação de sistemas inteligentes (lógica fuzzy, “Data Mining”, “Knowledge-based”). Trata-se de um modelo bastante sofisticado que utiliza um grande número de variáveis para gerar dados de previsão apresentados na forma probabilística.

3.3. Modelos Simuladores

O termo simulação geralmente refere-se ao processo de imitação do comportamento de um sistema através das funções de um outro. No presente trabalho, o termo simulação refere-se ao uso de um modelo matemático para representar um sistema real. A simulação é utilizada para avaliar respostas do sistema submetido a eventos sob um grande número de condições e restrições.

Os *softwares* de simulação hidráulica atuais utilizam interfaces gráficas (GUI), o que facilita a criação do modelo e a visualização dos resultados. Gerações antigas desse tipo de software permitiam apenas a interação tabular de entrada e saída dos dados.

Os modelos de simulação podem ser utilizados na análise de planos estratégicos de desenvolvimento (por exemplo, introdução de um novo sistema produtor de água no sistema adutor), para a modificação do funcionamento operacional de grupos elevatórios e reservatórios, minimizando custos energéticos, ou mesmo na operação diária e estudo de cenários de falhas de elementos do sistema.

As técnicas de simulação em sistemas são eficientes para a avaliação de alternativas, estudos de possíveis configurações de sistemas, especialmente na fase de projetos, pois nesses casos é complicado obter uma expressão analítica que reflita o comportamento do sistema.

Existem duas possibilidades de trabalho do modelo simulador em relação ao tempo: por determinado instante fixo, onde se dispõe de dados necessários em um momento, para simular, geralmente, uma condição limite de máxima ou de mínima horária; e por um período extensivo, onde se requer a alimentação de dados por uma sucessão de momentos consecutivos.

Na segunda condição, o modelo simulador atende às necessidades para um uso operacional. A implantação de um modelo simulador para controle operacional de um sistema adutor proporciona, entre outros benefícios:

- Melhor compreensão do funcionamento do sistema;
- Calibração da rede existente;

- Previsão de operação do sistema para atender às necessidades (normais e emergenciais), decorrentes da determinação das vazões e pressões em tempo estendido, pois em função das vazões atuais simula-se a vazão futura do sistema analisado para as próximas horas;
- Modelagem de bombas de velocidade constante ou variável;
- Cálculo da energia de bombeamento e do respectivo custo;
- Modelagem dos principais tipos de válvulas (por exemplo, válvulas do tipo On/Off, de retenção, reguladoras de pressão e de vazão);
- Modelagem de reservatórios de armazenamento de nível variável;
- Configuração das condições de operação do sistema em controles simples (dependentes de uma só condição), ou em controles com múltiplas condições (por exemplo, desligar/ligar a bomba e abrir/fechar a tubulação de by-pass, quando a altura de água no reservatório de nível variável está acima/abaixo de um determinado valor especificado, respectivamente).

Taha (1987) salienta que o sucesso da simulação em modelagens advém dos expressivos avanços dos computadores digitais, sendo impossível pensar no sucesso da simulação sem o uso do computador.

Esses modelos utilizam, para análise de sistemas em recursos hídricos, uma analogia do tipo lógica, através de equações matemáticas que expressam relações entre o mundo real e o modelo matemático.

Os modelos matemáticos para simulação de rede hidráulica se baseiam nos princípios de Conservação de Massa e Conservação de Energia. Esses modelos são preparados para um sistema hidráulico composto por tubulações,

reservatórios de nível fixo (represa), reservatórios de nível variado, bombas ou estações de bombeamento, nós ou pontos de demanda, e válvulas.

O modelo simulador trata de um determinado instante fixo onde se dispõe de dados necessários em um momento, para simular, geralmente, uma condição limite de vazão máxima ou mínima horária, submetida a restrições (por exemplo, pressão) do sistema, ou simula em período extensivo que requer a alimentação de dados por uma sucessão de momentos consecutivos. A condição que simula em tempo extensivo atende às necessidades para um uso operacional e para modelagem da qualidade da água.

Para a simulação, são necessários os dados de rede hidráulica ou a topologia do sistema, ou seja, os dados relativos aos elementos físicos do sistema tais como comprimento, diâmetro e coeficiente de rugosidade da tubulação, cotas nos nós e nos reservatórios etc e os dados operacionais, como medidas de vazão, pressão e níveis dos reservatórios.

Mesmo que todos os dados requeridos tenham sido coletados e inseridos no software de simulação hidráulica, não se pode presumir que o modelo matemático é uma representação realística do sistema.

O software de simulação hidráulica simplesmente resolve equações de continuidade e energia utilizando os dados fornecidos, a qualidade dos dados de entrada determina a qualidade dos resultados. A precisão do modelo hidráulico depende de quão bem ele foi calibrado, portanto uma análise de calibração deve sempre ser feita antes do modelo ser usado para tomada de decisão.

Calibração

A calibração é o processo de comparação entre os resultados do modelo e os dados observados em campo, e, se necessário, o ajuste dos dados do modelo até que os resultados obtidos passem a concordar com as medidas observadas em campo, sob as diversas condições de operação.

O processo de calibração pode incluir mudanças nas demandas, um ajuste fino na rugosidade dos tubos, alteração das características de funcionamento das bombas, entre outras.

Validação

O objetivo primário da simulação é reproduzir o comportamento do sistema real, de acordo com suas características espaciais e dinâmicas. Para atingir este objetivo, é necessário o fornecimento dos dados que representem as características físicas do sistema, e suas condições de contorno. Mesmo que todos os dados necessários para descrever o sistema no modelo forem reunidos e apresentarem uma boa proximidade com os dados reais, é improvável que as pressões e vazões calculadas pelo modelo sejam iguais às observadas. Isso porque há várias suposições matemáticas empregadas para que o modelo possa ser tratado computacionalmente (Walski et al., 2001). Assim, modelagem é essencialmente o balanço entre a realidade, a realidade simulada, e o esforço necessário para ajustar as duas.

Dos dados necessários para simular o modelo destacam-se:

- Topologia da Rede – O modelo deve ser elaborado, utilizando-se o cadastro correto, contendo o posicionamento das redes, válvulas, reservatórios,

bombas e demais acessórios existentes, comprimento e diâmetro dos tubos, bem como as cotas ou levantamento topográfico do terreno. A qualidade e formato dessas informações (sistemas CAD ou SIG) assim como a regularidade das atualizações é importante para que o modelo reflita as condições do mundo real.

- Distribuição das Demandas – O processo de alocação da demanda é uma possível fonte de erro no modelo e que deve ser considerado, já que o consumo não se dá de forma pontual, mas sim distribuído ao longo de um trecho, no caso de redes de distribuição. Para redes de adução, a estimativa dos consumos é feita por macro-medição; já para redes de distribuição, podem-se utilizar dados de faturamento. As perdas, decorrentes de vazamentos ou pontos não monitorados da rede, presentes em todos os sistemas de abastecimento constituem outro fator que dificulta a estimativa dos consumos.

- Coeficientes de perda de carga – a obtenção dos coeficientes de perda de carga distribuída, comuns às formulas de resistência ao escoamento como Darcy-Weisbach e Hazen-Williams é uma tarefa difícil na calibração. O coeficiente de rugosidade obtido na calibração engloba várias imprecisões, devido à existência de perdas de carga localizadas, vazamentos, idade do tubo, variações entre o diâmetro nominal e o real e até mesmo no levantamento topográfico, consistindo assim em um ajuste global, um coeficiente de rugosidade equivalente.

- As mudanças temporais das condições de contorno – o efeito do tempo tem um impacto significativo nos esforços de calibração porque muito dos parâmetros descritos em um sistema de abastecimento, tais como demanda, são dependentes do tempo. Por exemplo, considere um dia particular com medições de pressão e vazão do sistema as 6:00h, 10:00h, 12:00h, 14:00h e as 19:00h; as

demandas variam ao longo do dia, assim como o nível dos reservatórios, a posição das válvulas e o status das bombas e tubos. Tem-se, então, um conjunto de condições de contorno que reflete as condições do sistema para cada hora. Para este exemplo, cinco simulações “steady-state” (regime permanente) separadas devem ser feitas, cada qual com o conjunto de condições de contorno existentes para cada tempo em que as medições foram tomadas.

O método de calibração manual, ou tentativa e erro, é um método demorado e não apresenta garantia de resultados razoáveis, devido ao grande número de parâmetros a serem estimados, no entanto, um profissional experiente consegue obter ótimos resultados. Dependendo das condições de vazão simuladas, o modelo apresentará reações diferentes a cada alteração que ocorra por tipo de variável alterada.

Existem no mercado de informática diversos modelos e softwares de modelagem matemática para auxílio da análise hidráulica e de qualidade. Dentre eles: H2Onet – H2OMap - Montgomery Watson Inc. (MW Soft); SynerGEE – Stoner Workstation Service; Epanet – Environmental Protection Agency (EPA); WaterCad - WaterGems – Haestad Methods Inc.; Pipe2000 - KYPipe (University of Kentucky); MikeNet - Boss International; Finesse – Water Software Systems (WSS); InfoWorks WS (Wallingford Software); Derceto (Derceto Inc.).

Cada um desses softwares provê uma robusta interface gráfica para o desenvolvimento dos modelos, anotações, códigos de cores e dados de contorno ou resultados, e têm interface com dados de Sistemas de Informações Geo-referenciadas (GIS), dados de AutoCad e conexão com sistemas SCADA.

Atualmente, os softwares oferecem rotinas, incorporadas ou não aos modelos simuladores, que facilitam o uso dos simuladores nas diversas linhas possíveis, como a “esqueletonização” (redução da malha de abastecimento às redes de maior porte) (WaterCad, Pipe200, Finesse, H2OMap, InfoWorks); módulos de programação de bombas (“pump schedule”) (Finesse – programação não linear - GAMS – CONOPT; H2ONet - técnica dos algoritmos genéticos; Derceto – programação linear) ; a opção de cálculo de bomba com velocidade variável; análises de custo de energia; regras operacionais complexas; módulos de previsão de demanda (Finesse); calibração automática, baseada na técnica dos algoritmos genéticos (Pipe 2000 e WaterCad) ou programação não linear - GAMS – CONOPT (Finesse) ou Algoritmo Genético Modificado - messy GA (H2OMap), e sofisticadas formas de apresentação de resultados.

As informações sobre esses softwares assim como uma versão para testes podem ser facilmente obtidas pela Internet.

O modelo simulador hidráulico utilizado no presente trabalho é o modelo WaterCAD, o qual é atualmente utilizado pela Sabesp, possui módulos de calibração, de qualidade da água, de interface com o software AutoCAD, de sistema geográfico de informação e de custos, e permite a comunicação com outros sistemas como o SCOA e o sistema de informações geográficas (SIGNOS) que está em fase de implantação na Sabesp.

4. ESTRUTURA TARIFÁRIA DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

A Estrutura tarifária é um conjunto de tarifas aplicáveis aos componentes de consumo de energia elétrica e/ou demanda de potência ativas, de acordo com a modalidade de fornecimento.

Segundo a resolução da ANEEL nº 456/2000, são duas as modalidades tarifárias:

- Os consumidores do Grupo B (baixa tensão) - têm tarifa monômnia, isto é, são cobrados apenas pela energia que consomem.
- Os consumidores do Grupo A - têm tarifa binômnia, isto é, são cobrados tanto pela demanda quanto pela energia que consomem. Estes consumidores podem enquadrar-se em uma de três alternativas tarifárias:
 - Tarifação Convencional,
 - Tarifação horo-sazonal Verde,
 - Tarifação horo-sazonal Azul (compulsória para aqueles atendidos em tensão igual ou superior a 69 kV).

A Classe Alta tensão é subdividida em grupos de acordo com classificação apresentada na tabela 4.1.

TABELA 4.1 – Classificação dos Subgrupos por Tensão de Energia Elétrica

Subgrupos	Tensão de Fornecimento
A1	≥ 230 kV
A2	88 kV a 138 kV
A3	69 kV
A3a	30 kV a 44 kV
A4	2,3 kV a 25 kV
AS	Subterrâneo

A estrutura tarifária convencional é caracterizada pela aplicação de tarifas de consumo de energia elétrica e/ou demanda de potência independentemente das horas de utilização do dia e dos períodos do ano.

Já a estrutura tarifária horo-sazonal é caracterizada pela aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência de acordo com as horas de utilização do dia e dos períodos do ano, conforme especificação a seguir:

a) Tarifa Azul: modalidade estruturada para aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, bem como de tarifas diferenciadas de demanda de potência de acordo com as horas de utilização do dia.

b) Tarifa Verde: modalidade estruturada para aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, bem como de uma única tarifa de demanda de potência.

c) Horário de ponta (P): período definido pela concessionária e composto por 3 (três) horas diárias consecutivas, exceção feita aos sábados, domingos e feriados nacionais, considerando as características do seu sistema elétrico.

d) Horário fora de ponta (F): período composto pelo conjunto das horas diárias consecutivas e complementares àquelas definidas no horário de ponta.

e) Período úmido (U): período de 5 (cinco) meses consecutivos, compreendendo os fornecimentos abrangidos pelas leituras de dezembro de um ano a abril do ano seguinte.

f) Período seco (S): período de 7 (sete) meses consecutivos, compreendendo os fornecimentos abrangidos pelas leituras de maio a novembro.

A demanda contratada é a demanda de potência ativa a ser obrigatória e continuamente disponibilizada pela concessionária, no ponto de entrega, conforme valor e período de vigência fixados no contrato de fornecimento e que deverá ser integralmente paga, seja ou não utilizada durante o período de faturamento, expressa em quilowatts (kW).

A demanda de ultrapassagem é a parcela da demanda medida que excede o valor da demanda contratada, expressa em quilowatts (kW).

A demanda medida é a maior demanda de potência ativa, verificada por medição, integralizada no intervalo de 15 (quinze) minutos durante o período de faturamento, expressa em quilowatts (kW).

O registro de demanda é o valor médio (integral) das potências ativas instantâneas solicitadas pela instalação num intervalo de 15 minutos, sendo usualmente expressa nas unidades kilowatts (kW) ou Megawatts (MW). Por exemplo, em um mês de 30 dias, existem 2880 intervalos de 15 minutos, dos quais, o maior valor será tomado de base para o cálculo da parcela demanda de sua conta de energia.

O horário de ponta, que também conhecemos como "horário de pico", é o período em que mais se consome energia. Este alto consumo não chega normalmente a sobrecarregar o sistema de fornecimento, mas pode, em momentos extremos, causar problemas.

Foi criado, então, um incentivo (THS Azul) para que os consumidores industriais deslocassem sua carga para o horário fora de ponta. Para isso, a tarifa no horário de ponta sofreu um pequeno acréscimo, modalidade THS azul, e a tarifa no horário fora de ponta foi diminuída. Dessa forma, são evitados altos investimentos que serviriam apenas para suprir a demanda do horário de ponta, e que não representariam uma melhoria real no sistema de abastecimento.

A figura 4.2 ilustra um exemplo do comportamento da tarifa na modalidade THS Verde A4 ao longo do dia. O valor de consumo (R\$/MWh) é 8 vezes maior no horário de ponta. Já os valores de demanda e de ultrapassagem não sofrem variação ao longo do dia. Esse tipo de tarifação é interessante para estações que não operem no período de ponta, ou que sua taxa de utilização seja baixa.

A figura 4.3 ilustra um exemplo do comportamento da tarifa na modalidade THS Azul A4 ao longo do dia. Enquanto que o valor de consumo (R\$/MWh) é aproximadamente 2 vezes maior no horário de ponta, os valores de demanda e de ultrapassagem de demanda são 3 vezes maiores no horário de ponta do que fora de ponta e os valores absolutos de demanda e de R\$/KWh são os mesmos que os da tarifa verde. Na tarifa convencional, figura 4.4, o valor R\$/KWh é maior do que nas tarifas verde ou azul, mas não sofre alteração ao longo do dia, assim como os valores de demanda e de ultrapassagem.

As tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 mostram um exemplo de valores de Tarifação da Concessionária Eletropaulo / Resolução ANEEL 165/04, para as modalidades de tarifa THS Azul, THS Verde e Convencional respectivamente.

Figura 4.2 – THS VERDE A4 - Demanda, Ultrapassagem e Consumo

Figura 4.3 – THS AZUL A4 - Demanda, Ultrapassagem e Consumo

Figura 4.4 – Convencional A4 - Demanda, Ultrapassagem e Consumo

TABELA 4.1 – THS AZUL – Eletropaulo / Resolução ANEEL 165/04 - 2004

THS AZUL					
ENERGIA ATIVA (R\$/MWh)		PONTA		FORA DE PONTA	
		SECO	ÚMIDO	SECO	ÚMIDO
TUSD+TUST+TE	A2 (88 a 138kV)	164,49	150,03	106,03	96,07
	A4 (2,3 a 25kV)	234,47	214,20	120,56	107,02

THS AZUL					
DEMANDA E ULTRAPASSAGEM (R\$/kW)		DEMANDA		ULTRAPASSAGEM	
		PONTA	F.PONTA	PONTA	F.PONTA
TUSD+TUST+TE	A2 (88 a 138kV)	19,25	3,99	57,75	11,98
	A4 (2,3 a 25kV)	32,59	10,17	97,76	30,53

TABELA 4.2 – THS VERDE - Eletropaulo / Resolução ANEEL 165/04 - 2004

THS VERDE					
ENERGIA ATIVA (R\$/MWh)		PONTA		FORA DE PONTA	
		SECO	ÚMIDO	SECO	ÚMIDO
TUSD+TUST+TE	A4 (2,3 a 25kV)	897,40	877,18	120,56	107,02

THS VERDE					
DEMANDA E ULTRAPASSAGEM (R\$/kW)		DEMANDA		ULTRAPASSAGEM	
		PONTA	F.PONTA	PONTA	F.PONTA
TUSD+TUST+TE	A4 (2,3 a 25kV)	10,17		30,51	

TABELA 4.3 – Convencional - Eletropaulo / Resolução ANEEL 165/04 - 2004

CONVENCIONAL					
ENERGIA ATIVA (R\$/MWh)		PONTA		FORA DE PONTA	
		SECO	ÚMIDO	SECO	ÚMIDO
TUSD+TUST+TE	A4 (2,3 a 25kV)	179,79			
	B3 (Baixa Tensão)	325,45			

CONVENCIONAL					
DEMANDA E ULTRAPASSAGEM (R\$/kW)		DEMANDA		ULTRAPASSAGEM	
		PONTA	F.PONTA	PONTA	F.PONTA
TUSD+TUST+TE	A4 (2,3 a 25kV)	16,97		50,91	

As instalações de alta tensão na Sabesp são classificadas nos subgrupos A2 e A4, alta e média tensão respectivamente. A Sabesp possui 11 instalações de

alta tensão, 997 de média tensão e 3432 de baixa tensão, distribuídos percentualmente e financeiramente de acordo com as figuras 4.5 e 4.6.

Figura 4.5 - Consumo e Gastos por Classe de Tensão na Sabesp
(fonte: Sabesp–2004d)

Figura 4.6 - Consumo e Gastos por Classe de Tensão na Adução
(fonte: Sabesp – 2004d)

5. METODOLOGIA

Dentre os problemas mais comuns em sistemas de abastecimento urbano, destacam-se: o elevado índice de perdas físicas de água, volumes inadequados dos reservatórios de distribuição que dificultam a manutenção de uma adução constante da ETA a esses reservatórios, gastos elevados com energia elétrica, constantes necessidades de manobras emergenciais, cadastros técnicos desatualizados.

As dificuldades operacionais desses sistemas advêm da carência de técnicas de engenharia de operação de sistemas, e também de técnicas modernas sobre gestão de pessoas.

O cenário tecnológico dos computadores vêm se modificando de forma acelerada. A informática evolui cada vez mais rapidamente e as velocidades de processamento dobram em períodos cada vez mais curtos. Para se ter uma noção disso, basta observar que entre os modelos de computador mais antigos, os espaçamentos entre uma novidade e outra eram de dezenas de anos, sendo que hoje não chega a durar nem um mês. O avanço científico e do poder de cálculo avança de maneira que não se encontra paralelo da história humana, barateando os custos e tornando acessível essa tecnologia, possibilitando a enorme evolução das técnicas matemáticas descritivas (simulação) e normativas ou prescritivas (otimização).

O perfil de consumo de cada setor muda ao longo do tempo em virtude de uma mudança de perfil dos consumidores, da dinâmica de crescimento urbano,

adensamento ou rareamento populacional, consumo reprimido e até dos próprios limites dos setores de abastecimento que são dinâmicos. Por esses fatores, torna-se inviável a análise de evolução do perfil de consumo baseado em técnicas estatísticas clássicas, onde se utiliza uma série histórica dos dados de consumo ao longo de um grande período. Assim sendo, torna-se necessária a aplicação de um modelo de previsão de demandas dinâmico, em tempo real, baseado em uma série histórica recente.

Diante desses fatores, a proposta do presente trabalho é desenvolver um modelo de operação de sistemas de abastecimento de água, a partir das sete etapas seguintes:

- 1) Na primeira parte do trabalho, serão feitos a coleta, o tratamento e a consistência dos dados operacionais da Sabesp tais como, dados do SCOA, dos estudos hidráulicos da produção e operação, envolvendo a topologia da rede adutora calibrada e validada a partir do modelo simulador implantado;

- 2) Em uma segunda etapa, será feita a implantação do modelo de previsão de demandas em tempo real, baseado em série de Fourier (Zahed – 1990);

- 3) Será adaptada a interface de comunicação entre o modelo de previsão de demandas e o sistema de controle da operação -SCOA (Borges – 2003);

- 4) Implantação de um algoritmo de otimização (PL – Premium Solver Platform Version 6 for Microsoft Excel);

- 5) Desenvolver uma nova interface de transferência de dados integrando o modelo simulador e o de previsão de demanda, e uma outra entre o SCOA e o algoritmo de otimização;

6) Aplicação do sistema desenvolvido nas etapas anteriores à otimização do sistema de adução de água da RMSP (estudo de caso).

7) Avaliação dos benefícios e custos associados da operação obtida com a aplicação do modelo de operação proposto.

O primeiro passo é entender o propósito para o qual o modelo de operação será utilizado. É importante que haja interação entre a engenharia, a manutenção e a operação. O modelo não deve ser visto como um esforço isolado de uma única pessoa ou área envolvida. É importante alocar tempo suficiente para a confecção e calibração do modelo.

A figura 5.1 mostra esquematicamente a sequência de passos idealizados para a realização do trabalho.

Figura 5.1 – Esquema das etapas do trabalho.

6. COLETA E CONSISTÊNCIA DOS DADOS

6.1. Sistema Adutor Metropolitano - SAM

A Região Metropolitana Administrativa de São Paulo (RMSP) possui 18,02 milhões de habitantes, abrangendo 39 municípios (IBGE – 2003). A Sabesp produz cerca de 67,7 m³/s para atender a essa população (SABESP(b) – 2004). Desses 39 municípios, 32 cidades são operadas pela Sabesp, e 6 municípios (Diadema, Guarulhos, Mauá, Mogi das Cruzes, Santo André e São Caetano do Sul) que compram água da empresa por atacado. O Sistema Integrado de Abastecimento de Água operado pela Sabesp cobre 29 dos 39 municípios da RMSP. Há 9 municípios (Pirapora do Bom Jesus, Santana do Parnaíba, Cajamar, Mairiporã, São Lourenço da Serra, Juquitiba, Biritiba Mirim, Salesópolis e Guararema) que são abastecidos com sistemas Isolados. As figuras 2 e 3 mostram o mapa da situação administrativa dos sistemas da RMSP (sistemas integrado e isolados) e o esquema do SAM atualizado em outubro de 2004, respectivamente.

O sistema integrado é constituído por:

- 8 Estações de Tratamento de Água (ETA);
- 1500 km de adutoras;
- 150 reservatórios;
- 24.000 km de redes de distribuição.

No total, são 8 sistemas produtores de água potável:

Figura 6.1 – **SITUAÇÃO ADMINISTRATIVA DOS SISTEMAS DE ÁGUA DA RMSP**
Sistemas Integrado e Isolados da região Metropolitana de São Paulo

Figura 6.2 – Áreas de Influência dos Sistemas Produtores da região Metropolitana de São Paulo

- *Sistema Cantareira* – é o maior sistema produtor. Capta água dos rios Jaguari, Jacareí, Cachoeira, Atibainha e Juqueri. Produz 33 m³/s de água. Abastece 8,8 milhões de pessoas nas zonas norte, central, parte do leste e oeste da capital e os municípios de Franco da Rocha, Francisco Morato, Caieiras, Guarulhos (parte), Osasco, Carapicuíba, Barueri (parte), Taboão da Serra (parte), Santo André (parte) e São Caetano do Sul.
- *Sistema Guarapiranga* – o segundo maior sistema produtor de água, fica próximo a Serra do Mar. A água é proveniente da represa Guarapiranga (formada pelos rios Embu-Mirim, Embu-Guaçu, Santa Rita, Vermelho, Ribeirão Itaim, Capivari e Parelheiros). Produz 14 m³/s de água e abastece 3,7 milhões de pessoas na zona sul e sudoeste da capital.
- *Sistema Alto Tietê* – Produz 10 m³/s de água provenientes das barragens Ponte Nova, Paraitinga, Biritiba, Jundiaí e Taiacupeba. Abastece 2,7 milhões de pessoas da zona leste da capital e os municípios de Arujá, Itaquaquecetuba, Poá, Ferraz de Vasconcelos e Suzano.
- *Sistema Rio Grande* – é um braço da represa Billings. Produz 4,2 m³/s de água e abastece 1,2 milhão de pessoas em Diadema, São Bernardo do Campo e parte de Santo André.
- *Sistema Rio Claro* – fica a 70 km da capital e produz 4 m³/s de água captada do rio Ribeirão do Campo. Abastece 900 mil pessoas de Sapopemba (parte), na capital, e parte dos municípios de Ribeirão Pires, Mauá e Santo André.

- *Sistema Alto Cotia* – capta água da represa Pedro Beicht e produz 1,3 m³/s de água. Abastece 400 mil habitantes de Cotia, Embu, Itapeceira da Serra, Embu-Guaçu e Vargem Grande.
- *Sistema Baixo Cotia* – capta água do rio Cotia e produz 1,1 m³/s de água. Abastece 300 mil pessoas de Barueri, Jandira e Itapevi.
- *Sistema Ribeirão da Estiva* – capta água do rio Ribeirão da Estiva e produz 100 l/s de água. Abastece 20 mil pessoas do município de Rio Grande da Serra.

O sistema de adução é composto pela rede adutora entre as estações de tratamento de água (ETAs) e os reservatórios abastecidos pelas ETAs. Os sistemas adutores são parcialmente interligados entre si e ultrapassam os limites administrativos dos municípios.

A água tratada produzida nas ETAs deve ser aduzida por muitos quilômetros de redes adutoras até chegar aos reservatórios, podendo passar por várias estações elevatórias no caminho. Desses reservatórios, a água ainda passa por muitos quilômetros de redes distribuidoras e até alguns boosters até chegar ao consumidor final.

As operações de adução e distribuição consomem energia e demandam serviços permanentes como inspeção, manutenção, monitoramento de qualidade e controle de medição.

Para o estudo de caso, optou-se pela escolha de parte do sistema Alto Tietê, do SAM. Esse sistema atende a setores de abastecimento considerados pela Sabesp, de deficiência hidráulica (SABESP – 2001). Esse sistema passou por estudos para estabelecer regras operacionais com o objetivo de reduzir os custos

de energia elétrica, a partir de 1999 (SABESP(b) – 1999), e vêm sendo alvo de projetos de eficiência energética (SABESP - 2004).

6.2. *Demanda de água*

O conhecimento da demanda é de fundamental importância para se atingir a excelência da operação do serviço. A demanda de água tratada pode ser entendida como o volume de água consumido pelos clientes abastecidos, o volume de perdas, volume previsto para apagar incêndios, volumes operacionais (lavagem de reservatórios, drenagem de adutoras, usos públicos).

O conhecimento desse total consumido é de grande importância para o desenvolvimento da operação do sistema.

A caracterização da demanda tem base nos consumos micromedidos por ligação, discriminados por categorias (residencial, industrial, comercial, pública e mista) e nas Vazões Produzidas e Distribuídas pelo Sistema, para cada um dos Setores de Abastecimento da RMSP, (PDA-2025 - 2004). A projeção da população, fator que direciona a evolução proposta para o consumo e demanda de água, tem como base os Distritos Censitários, referidos ao mapeamento dos Setores Censitários do IBGE (Censo - 2000), além da evolução estimada em função do Uso e Ocupação do Solo.

Para o planejamento operacional de médio prazo (mensal, semanal), no entanto, há de se considerar as alterações do consumo causadas por variações de fatores: climáticos (temperatura ambiente), diários (dia da semana), horários (picos

horários ao longo do dia), sazonais (estação do ano como verão ou inverno), sócio-econômicos (tais como renda média familiar), tipo de consumidores (perfil de consumo comercial, residencial, industrial etc). Quando se realiza um programa de racionamento em função do baixo nível d'água nas represas, por exemplo, leva-se em conta a previsão de consumo semanal nos setores de abastecimento do raio de influência dessa demanda produtiva (ETA). Se a situação estiver dentro da normalidade, a escala temporal de maior representatividade é a mensal agregada à região, uma vez que os volumes das represas são dimensionados para regularizações plurianuais.

Para uma política diária de operação de um sistema adutor - curto prazo (diária, horária ou menor), as previsões devem indicar o volume diário e a variação esperada ao longo do dia. A programação da operação se faz baseada no comportamento histórico atualizado em tempo real com considerações dos horários de consumo de água mínimos e máximos, com o objetivo de estabelecer regras operacionais rotineiras e possibilitar interferências e correções no sistema em tempo real.

Cabe aqui uma definição sobre os consumos de água mínimo e máximo considerados.

Consumo individual instantâneo real: volume realmente consumido na propriedade, abastecido por uma ligação com o sistema público de abastecimento em um pequeno período de tempo.

Consumo individual instantâneo aparente: volume entregue à propriedade pelo sistema público de abastecimento de água em um pequeno intervalo de

tempo. Difere do anterior pelo efeito de regularização do reservatório individual e pela restrição hidráulica da tubulação de alimentação interna da propriedade.

Consumo agregado instantâneo aparente: soma dos consumos individuais instantâneos aparentes em uma área definida (micro setor de abastecimento, setor de abastecimento...). Este valor é que deve ser utilizado na operação em tempo real de um sistema adutor. Em geral, os valores máximos dos consumos agregados instantâneos aparentes em um período de análise são inferiores à soma dos consumos máximos individuais instantâneos aparentes, devido a não coincidência de máxima utilização pelas propriedades abastecidas (Zahed Filho - 2005).

Nesse caso, há necessidade de utilização de um modelo de previsão de consumo de água de curto prazo (horário).

6.3. Sistema de Controle Operacional do SAM

O sistema de controle operacional do SAM é composto pelo Sistema de Telemetria e pelo Sistema Informático denominado SCOA – Sistema de Controle da Operação de Adução utilizando o processo SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition.

O SCOA é responsável pelo gerenciamento da adução da água tratada desde as saídas das estações de tratamento até os reservatórios de distribuição dos municípios da RMSP abastecidos pela Sabesp ou em pontos de entrega com macro-medidores, onde é feito apenas o monitoramento, pela impossibilidade de controle. Este Sistema supervisiona e comanda todo o abastecimento de água

através de um Centro de Controle Operacional (CCO) que se comunica com 160 unidades remotas instaladas em elevatórias e reservatórios.

O SCOA comanda:

- 146 bombas (partida e parada);
- 117 válvulas (abertura e fechamento).

Também supervisiona as condições e estados operacionais de:

- 342 bombas (estado de funcionamento);
- 117 válvulas (estado de abertura);
- 238 reservatórios (nível);
- 43 torres (nível);
- 175 pontos de medição de pressão;
- 185 pontos de medição de vazão;
- 1232 alarmes de condições operacionais.

O controle da operação em tempo real pode ser dividido basicamente em três subsistemas: o subsistema de aquisição, de controle e o subsistema de apoio à operação. O subsistema de aquisição é responsável pela leitura e tratamento dos dados, via telemetria, e disponibilização em tempo real para os operadores para atuação no sistema.

O sistema SCOA está passando por modificações em relação ao seu meio de transmissão de dados. Até então, o sistema composto por Unidades Remotas de Telemetria (URTs), Concentrador de Telemetria, Linhas Telefônicas Privativas (LPs) e comando de bombas e válvulas, onde as Unidades Remotas estão

distribuídas no campo e o Concentrador de Telemetria está localizado no CCO e a interligação através das Linhas Telefônicas Privadas.

O sistema agora está fazendo uso de uma nova tecnologia da telecomunicação: o sistema Frame Relay, e a rede da qual faz parte agora pertence a um projeto do Governo Estadual em parceria com a Telefônica, chamado INTRAGOV, uma rede apenas para órgãos do governo, assim sendo uma rede mais segura, com o tráfego controlado e menor custo.

Independentemente do tipo de conexão que façam, seja entre computadores ou entre terminais e computadores, as redes de comunicação dividem-se em dois tipos básicos: de comutação de circuitos (redes baseadas em conexões) e de comutação de pacotes (frame, conhecida, ainda, como redes sem conexão ou virtuais).

O esquema apresentado na figura 6.3 mostra a topologia da rede. O Frame Relay utiliza-se de circuitos virtuais ao invés de um circuito ponto-a-ponto para conectar cada site ou estação, com protocolos TCP/IP, OSI, ATM, IPX, NAT e protocolos de roteamento. Toda a comunicação entre os concentradores e o sistema é feita via TCP/IP, podendo usar linhas privativas ou redes corporativas. A segurança do sistema é garantida por senhas para os diversos níveis de operação, e o ambiente de trabalho pode ser Windows NT, 2000 ou 2003.

Figura 6.3 – Esquema de Topologia da Rede.

O esquema apresentado na figura 6.4 mostra o caminho que os dados percorrem desde o CPD/Sabesp até a nuvem Frame Relay .

Dessa forma, os dados obtidos dos instrumentos de medição, CLPs, (nível, pressão, temperatura, vazão) e dos acionadores (estados de bombas e posição de abertura de válvulas) podem ser visualizados nas telas do centro de controle, em tempo real (30 segundos), juntamente com a indicação de alarmes de situações como: nível de reservatório fora dos limites operacionais pré-estabelecidos, mudanças bruscas de abertura ou fechamento de válvulas ou desarme de bombas, subsidiando a tomada de decisão quanto à manobra necessária a ser executada.

Figura 6.4 – Esquema – Detalhamento do caminho que as informações (Sabesp/CPD) percorrem até a nuvem Frame Relay .

Esta tomada de decisão é subjetiva e pessoal, pois depende da experiência individual e do comportamento de risco do controlador.

O subsistema de controle possibilita o acionamento por telemetria de partidas ou desarmes de bombas e mudanças de aberturas das válvulas de controle, a partir do CCO, através de um software de controle que permite o acionamento em campo de atuadores elétricos (solenóides), de compressores

O subsistema de apoio à operação permite a análise dos dados históricos, fornecendo informações para análises pós-operacionais, manutenção de telemetria,

manutenção civil e eletromecânica, manutenção do sistema de comunicação de dados e de voz, operadores volantes, pitometrias, grupo de estudos (de planejamento operacional e auditorias pós-operação) e cadastro . O SCOA é um sistema SCADA, com ciclo de aquisição de dados e processamento da seguinte forma:

- Aquisição de dados da telemetria a cada 30 segundos;
- Médias de valores calculados a cada 10 minutos;
- Médias horárias a cada 60 minutos;
- Médias diárias a cada 24 horas;
- Histórico da ultimas 24 h de cada ponto;
- Armazenamento de dados a cada minuto.

A geração de dados históricos pós-operacionais é feita através de um Servidor de Dados do SCOA – SDS, que armazena todos os estados e medidas dos pontos a cada minuto.

Ao longo do tempo, foram desenvolvidos diversos aplicativos em diferentes linguagens para auxiliar na análise dos dados armazenados.

A qualidade dos dados recebidos do campo é prejudicada quando ocorrem problemas nas linhas telefônicas ou falta de energia nas estações ou falta de sincronismo na aquisição dos dados, e nesse caso, os dados armazenados recebem uma identificação qualificando o dado segundo o problema ocorrido.

O sistema mede os seguintes parâmetros de adução: vazões aduzidas, pressão à montante das válvulas de controle, nível d'água em reservatórios e torres, e temperatura. Os consumos são calculados a partir dos dados de vazões

aduzidas e das diferenças de níveis verificadas nos reservatórios em intervalos horários. O sistema recebe dados a cada 30 segundos e ao final de 10 minutos, calcula uma média dos 20 valores registrados para cada parâmetro. Nem sempre se consegue obter 20 dados em 10 minutos, por problemas de comunicação das LPs ou sincronismo entre a varredura e o software de aquisição. A média a cada 10 minutos é considerada válida se houver mais de 10 aquisições válidas. Caso não haja 10 ou mais valores válidos, a média é calculada, mas recebe atributo “E”. A média horária é calculada com as médias válidas de 10 minutos. Se forem utilizados 3 ou mais valores, a média horária é considerada válida, caso contrário, a média horária também recebe o atributo “E”.

A média desses valores médios de 10 minutos válidos, fornece o dado horário que fica armazenado no sistema por 7 dias. O aplicativo HISCOA, criado em 1995, transfere esses dados para uma mídia magnética (nessa fase em CD), criando uma série histórica de dados referentes à adução dos setores de abastecimento.

Alguns valores obtidos no SCOA, apesar de não estarem caracterizados como sendo valores duvidosos, são incoerentes quando comparados aos demais valores de uma série diária, valores nulos, por exemplo. Não existe, no SCOA, uma metodologia para fazer a consistência da base de dados, excluindo valores incorretos. Portanto, para a utilização dos dados, é necessário, primeiro, adotar uma metodologia para consistir a base para que não cause uma distorção da realidade.

O projeto original do SCOA foi idealizado em 1977, e sua operação iniciada em 1980. Em 1989 foram substituídos os computadores COBRA-700 pelo COBRA-1200. O software migrou de linguagem CORAL para C, para permitir portabilidade. Foram modificados os relatórios de interface (conteúdo e lay-out). Foram introduzidas modificações que poderiam suportar uma evolução futura (controle de válvulas por vazões, gráficos comparativos entre consumos reais e previstos, níveis reais e previsto, etc.). De 1989 até hoje a evolução tem sido feita de forma gradual e contínua, destacando-se:

- Substituição do Painel Central de Telemetria (ECT);
- Substituição das URT(ERT) pelas URIT;
- Substituição do Armário de Proteção de Linhas (APL);
- Substituição de algumas válvulas de controle;
- Medidores de nível e pressão;
- Softwares de apoio:
 - CADOP (1991); CISAM (1994); HISCOA (1995); SDS (1997); WaterCad (1998) – acoplado a operação; SAFE (2003).

Um histórico dessa evolução pode ser acompanhada nas figuras 6.5 a 6.9.

Figura 6.5 – LPs (múltiplos pares) Telefonica, Modems Sabesp (ECTs)

Figura 6.6 – LPs (múltiplos pares) Telefonica, Modems Sabesp (Conc).

Figura 6.7 – LPs Telefonica, Modems Telefonica

Figura 6.8 – Transição Modems Sabesp-Telefonica

Figura 6.9 – LPs Telefonica e New Bridge

Resumo de Evolução:

- De fios para fibra ótica;
- De cabos seriais para rede;
- Dualidade na comunicação;
- Aumento das velocidades;
- Desenraizamento do controle;
- Expansões.

O sistema foi concebido com uma tripla abordagem, sendo redundantes entre si. Os três roteadores estão em produção da seguinte forma: O roteador “A”, em conjunto com o modem (A) e o ADM 1-2, estão com 50% da carga de estações e trafega pelo lado (A) da fibra ótica. O roteador “B”, em conjunto com o modem (B) e o ADM 1-3, estão com 50% da carga de estações e utiliza o lado (B) da fibra ótica. Um programa backup faz a supervisão de operação do sistema. Na queda do roteador “A”, todas as estações serão migradas para o roteador “B”, caso caia o roteador “B” todas as estações de “B” serão migradas para “A”, na queda dos dois

roteadores “A” e “B”, que estão alimentados pelo sistema ótico, o sistema de backup transfere todas as estações para o roteador “C”, o qual está ligado com a central telefônica através de um cabo metálico.

Este sistema nasceu da necessidade de migrar o sistema para o “novo SCOA”. Como a tecnologia estava muito defasada, havia muita dificuldade para se migrar do sistema SCOA para qualquer outra nova tecnologia. O grande limitador do sistema sempre foi seu meio de comunicação. O sistema Frame Relay tornou melhor a conexão, mais segura, com mais tecnologia e com menor custo.

Em 1997, a Sabesp iniciou um programa de modernização do SCOA. Um projeto amplo que inclui a substituição de equipamentos de campo, envolvendo instalações de transmissão de pressão, medidores de nível de reservatórios (ultrassônicos), unidades remotas inteligentes e equipamentos que procuram introduzir funções avançadas de apoio à operação (por exemplo, equipamento de automação, introdução dos dados de controle de qualidade d’água), além da atualização de hardwares e softwares com a substituição da atual rede de Linhas Privativas (LPs) da telemetria, integração com o projeto de Sistema Geográfico de Informações no Saneamento – SIGNOS, e demais sistemas de informações da Sabesp.

A figura 6.10 apresenta um diagrama esquemático da rede WSCOA atual, desde a coleta dos dados pelas estações remotas de telemetria – Mauell (utilizada pela SABESP) com um roteador que faz a interface do protocolo serial Mauell com o protocolo TCP/IP e um modem para ter acesso à rede Frame Relay – meio de transmissão. Através da frame relay, os dados transmitidos chegam a sala de

equipamentos – CCO – Sabesp, onde são então decodificados, processados e armazenados pelos servidores – WinSCOA Controle, e então as informações seguem para os postos na sala de operação do CCO.

O futuro do SCOA deverá ir além de uma simples supervisão e controle de grande porte. O sistema deverá estar integrado com softwares que fornecerão apoio necessário aos controladores. Esses softwares serão o simulador de redes hidráulicas, o de previsão de demandas e o de otimização; softwares necessários à melhoria da eficiência do controle operacional. Para um entendimento básico do funcionamento desse novo SCOA apresenta-se a figura 6.11.

Figura 6.10 – diagrama esquemático de toda a rede WSCOA
(fonte Sabesp - Relatório Sistema TCP/IP no WSCOA (Anexo))

Figura 6.11 – Esquema de funcionamento do “Novo” SCOA.

Os dados coletados pelo SCOA são analisados pelo setor de engenharia, utilizando a ferramenta WaterCad, software comercial fornecido pela Haestad

Methods. Esse software permite realizar simulações do comportamento do sistema de adução de água. Foi escolhido e homologado, pela Sabesp, como o mais adequado para atender às suas necessidades depois de um estudo abrangente que avaliou os softwares existentes no mercado nacional e internacional.

Essas análises possibilitam o desenvolvimento do processo operacional. Com o conhecimento das curvas de consumo médio de cada setor de abastecimento é possível então calibrar os dados da rede adutora, otimizar os níveis operacionais dos reservatórios, verificar condições emergenciais devido à falha de algum componente do sistema, reduzir custos de energia, entre outros.

No entanto, essas análises consomem muito tempo, pois é necessário, primeiro, a obtenção e tratamento dos dados para então gerar a topologia do modelo que por sua vez deverá se calibrado e daí então começar a ser feita a simulação que é por “tentativa e erro”, uma vez que não se dispõe de uma ferramenta matemática que agilize esse processo.

Utilizando o simulador hidráulico EPANET, Gambale (2000) avaliou o uso de algoritmos genéticos na calibração de redes de abastecimento de água. Realizou estudos sobre a influência do número de pontos monitorados na determinação dos coeficientes de rugosidade. O autor evidencia a robustez do algoritmo genético e a necessidade de uma rede de amostragem otimizada para a calibração.

A equipe do sistema de controle de abastecimento de água é composta por controladores, supervisores de controle e técnicos de planejamento da operação. O dimensionamento desta equipe é ponderado de forma a atuar na maximização da

regularidade de abastecimento, baseando-se na experiência da equipe sem se preocupar com os custos envolvidos nas tomadas de decisão na operação. Há, assim, a necessidade inerente de ampliar o escopo de suas atividades, estabelecendo critérios sustentados por modelos matemáticos.

6.4. Curvas de Consumo

O estudo sobre as curvas de consumo setoriais definidas pela Sabesp (Hasegawa et al. - 1999), se baseou numa série histórica de três anos e meio de dados de consumo. Esse trabalho objetivou a determinação dos coeficientes de variação de consumo, K_1 , K_2 e K_3 e a definição das curvas de consumo em função do tipo de ocupação e dos dias da semana para cada setor.

Esse estudo deu um primeiro passo à implantação de modelos previsionais e otimizadores na operação, pois o conhecimento das curvas de consumo é de fundamental importância para a implantação de um modelo de operação em tempo real e, posteriormente, para a implantação dos modelos otimizadores, objetivando reduzir custos operacionais.

O valor de K_1 foi obtido pelo consumo médio de cada setor considerando a média dos consumos dos últimos 12 meses para cada dia da série histórica. O coeficiente K_2 foi obtido pela relação entre a vazão máxima de consumo horário e a vazão média de um dia, procurando avaliar as maiores oscilações de consumo de um dia. E o coeficiente K_3 , a razão entre o menor consumo horário do dia e o

consumo médio do dia, que serve como indicativo para a detecção de perdas físicas de água em determinados setores.

A análise das curvas do consumo desse estudo mostrou que pode ser definido um perfil típico de consumo para os setores do SAM, onde se verificam picos máximos de consumo entre 12:00 e 14:00 e picos mínimos entre 3:00 e 5:00.

A figura 6.12 mostra um exemplo dessas curvas, obtido para o setor Jaçanã (scoa 7).

Figura 6.12 – Curva de consumo média, mínima e máxima do setor Jaçanã.

Esse trabalho apresenta também a caracterização das curvas de consumo do setor, segundo o dia da semana, através de curvas neutras (adimensionais) e dimensionais de cada setor, obtidas para cada dia da semana. As figuras 6.13 e 6.14 mostram exemplos dessas curvas, obtidas para o setor Itaquera (scoa 22).

Figura 6.13 – Curvas de consumo diárias do setor Itaquera.

Figura 6.14 – Curvas de consumo diárias adimensionais do setor Itaquera.

Os gráficos da figura 6.15 apresentam curvas de duração de K1, K2 e K3.

Tomando-se como exemplo a estação 24 (Itaim Paulista), verifica-se que para uma frequência de excedência de 10% , define-se um valor de $K1 = 1,097$. Isso significa que, tomando-se todos os valores de K1 calculados para o período de análise, verificou-se que em 10% do tempo os valores foram superiores a 1,097 (e conseqüentemente, em 90% do tempo os valores se apresentaram menores que

1,097). Analogamente, em 10% do tempo os valores de K2 foram maiores que 1,616 e de K3 maiores que 0,529 (para a mesma estação).

Setor - ITAIM PAULISTA

freq. de excedência	K1	K2	K3
1%	1,158	1,742	0,647
2.5%	1,129	1,684	0,594
5%	1,114	1,644	0,560
10%	1,097	1,616	0,529
15%	1,078	1,589	0,515
20%	1,068	1,565	0,503

Figura 6.15 – Gráfico de valores de K_1 , K_2 e K_3 atingidos ou superados em cada frequência (0 a 100%) do setor Itaim Paulista.

6.5. Dados operacionais e cadastrais do sistema

Dados Operacionais do SCOA

Os dados do SCOA estão disponíveis a partir de uma base de dados SQL Server (Structured Query Language - é uma linguagem de programação padrão

destinada a selecionar e a atualizar informação de uma base de dados), existente no servidor, que possibilita a obtenção de informação de um período solicitado.

Para melhor compreensão dos termos e símbolos utilizados armazenados nesse banco, discorre-se sobre as abreviações:

- Est – número da estação SCOA;
- LP – linha privativa e indica “0” quando não há problemas na comunicação e “1” quando há;
- AlEst – alarme da estação;
- Fase - falta de uma fase ou defeito no trifásico da estação SCOA;
- Seg - indica o acionamento do alarme de segurança patrimonial da estação SCOA;
- Local - indica que a telemetria está no local da estação SCOA;
- NNNXMM - Ponto da estação selecionada, o código é entendido por três algarismos (NNN) identificando o número da estação seguido por uma letra (X) que pode ser B, F, R, T, V, Z, P, Y e mais dois algarismos (MM) para identificar quando há mais de um ponto semelhante na mesma estação, identificando o ponto em questão. Os dados são disponibilizados da seguinte forma:
 - BXX – bomba (contendo o status “0” – desligada ou “1” – ligada),
 - FXX – vazão de entrada do reservatório (l/s),
 - RXX – nível d’água no reservatório (m),
 - TXX – nível d’água na torre (m),
 - VXX – posição da válvula de controle (%), abertura,

- ZXX – variável calculada em função de outros valores de pontos
SCOA,
- PXX – pressão medida (mca),
- YXX – consumo calculado (l/s).
- B1QL - o qualificador do dado de medição do ponto, da estação. O código é compreendido por uma das letras identificadoras do tipo de elemento B, F, R, T, V, Z, P, Y e do número identificador do ponto acompanhado das letras QL. O código de erros é detalhado a seguir.

Os tipos de erros alarmados podem ser:

- E – quando a medição não é válida;
- ESC – erro de escala, pode ser A (alta) ou B (baixa), quando o medidor ultrapassa a faixa válida de medição, ou ainda por uma falta de energia, qualifica-se alta quando o aparelho medidor extrapola o limite máximo de medição e baixa quando a medida é inferior a capacidade mínima de medição;
- LP – erro da linha privativa, ocorre quando a linha telefônica está sem comunicação;
- TR – erro de transmissão da linha telefônica, pelo motivo de oscilações na transmissão;
- BL – bloqueio acionado pelo CCO;
- S – substituição “a mão” por informação passada de um operador volante que faz a leitura em campo;
- T – erro de telemetria;
- MA – em manutenção.

Depuração dos dados

Durante a transmissão ou recebimento dos parâmetros de abastecimento dos setores, alguns erros podem ocorrer, gerando uma série de dados não confiáveis. Quando isso ocorre, o dado recebido é seguido por um caracter “E”. A série assim obtida não seria apropriada ao uso de modelos simuladores, otimizadores e previsionais, uma vez que não representa a realidade. Daí a necessidade de se fazer uma depuração dos dados.

A metodologia para a depuração dos dados registrados pode ser visualizada no fluxograma apresentado da figura 6.16. A depuração desses dados foi feita utilizando linguagem PL-SQL em um banco de dados ORACLE, que roda em um servidor dedicado.

Figura 6.16 – Fluxograma - Consistência dos Dados Operacionais do SCOA

1. **SCOA** – Sistema de Controle da Operação do Abastecimento que monitora e controla a distância as variáveis do sistema.
2. **SAC** – Sistema Automático de Coleta de dados, roda automaticamente no servidor, no formato de serviço. Sua função é solicitar os dados de leitura do SCOA. São solicitados dados de leitura a cada 1 (um) minuto de todas as estações do SAM. Esse sistema também pode enviar comandos e informações ao SCOA.
3. **HST_LEITURA** – Os dados de leitura recebidos do SCOA são armazenados na tabela HST_LEITURA, tal como vieram, sem qualquer tipo de processamento. Esses dados são mantidos por 5 dias.
4. **MÉDIA DOS VALORES** – É calculada a partir dos dados armazenados na tabela HST_LEITURA, aplicando uma média dos valores a cada 15 minutos. Se 50% ou mais dos dados lidos, em um período de 15 minutos, por estação, estão sem qualificadores de erro e sem alarme, a média é acompanhada de um qualificador bom, ou seja 0 (zero). Caso contrário, se mais de 50% dos dados lidos, em um período de 15 minutos, por estação estão com qualificadores de erro ou com alarme, a média é acompanhada de um qualificador ruim, ou seja 1 (um).
5. **HST_LEITURA_MÉDIA** - Os dados armazenados já com o qualificador 0 ou 1.
6. **CÁLCULO DO CONSUMO (Y01)** – é feito o cálculo do consumo do período. É aplicado um qualificador, do mesmo modo descrito anteriormente, para o consumo (Y01). Os dados de consumo são calculados a partir dos valores de vazão da adução e da variação do nível do reservatório, como descrito a seguir:

$$F_1 - Y_1 = \frac{(R_1 - R_0) * A}{\Delta T}$$

F_1 : Vazão de adução média, medida na entrada do reservatório entre t_0 e t_1 .

Y_1 : Consumo calculado

R_1 : Nível do reservatório no instante t_1 .

R_0 : Nível do reservatório no instante t_0 .

A : Área do reservatório

ΔT : Intervalo de tempo decorrido entre duas leituras consecutivas t_0 e t_1 . (1 hora).

Em uma análise inicial dos dados de consumo calculados, verificou-se que os mesmos apresentam um efeito “dente de serra”, ou seja, oscilações bruscas de consumo em torno de uma curva média, muito acentuado. Em função disto, optou-se por fazer um ajuste (média móvel) que permite a obtenção de uma curva suavizada.

7. **MÉDIA MÓVEL DO CONSUMO (Y01F)** – É calculada a média móvel dos dados de consumo, utilizando de cinco valores consecutivos.
8. **COMPARAÇÃO ENTRE VALORES DE CONSUMO CALCULADO (Y01) E O CONSUMO RESULTADO DA MÉDIA MÓVEL (Y01F)** – Caso a diferença absoluta entre Y01 e Y01F for maior que 15%, o valor do consumo (Y01) será substituído pelo valor obtido da média móvel (Y01F). Caso contrário, o valor adotado será o próprio consumo calculado (Y01). São armazenados na tabela

HST_LEITURA_MÉDIA os dados do consumo calculado (na coluna - Y01) e os dados de consumo resultantes do item 8 (na coluna - Y01f).

Os dados assim ajustados podem ser utilizados nas análises dos parâmetros de previsão de consumo, de reservação, de simulação, de otimização e planejamento dos setores de abastecimento.

Dados Cadastrais

A adução do sistema Alto Tietê tem início no reservatório de adução RA Taiaçupeba, figura 6.17, a 5 km da saída da estação de tratamento de água Taiaçupeba até os limites da estrutura de controle Sifão 7, ponto de transferência de água entre o sistema Alto Tietê e o sistema Rio Claro, e os reservatórios São Miguel e Ermelino Matarazzo que recebem água tratada, ora do sistema Alto Tietê ora do sistema Cantareira através do booster Ermelino (antigo booster BAC). No período em estudo, o limite do sistema Alto Tietê era o reservatório Ermelino Matarazzo.

Para a obtenção da topologia, foram utilizados mapas do SAM em formato de *shapes* - ARCVIEW (SABESP – 2004c) que estão em coordenadas georeferenciadas (UTM). Essa topologia, figura 6.17, está associada a dados referentes aos tubos (comprimento, diâmetro e material), conexões com outros tubos e equipamentos do sistema e também dados de altimetria.

Figura 6.17 – Topologia do Sistema Alto Tietê

Essa topologia foi importada para o modelo simulador e é composta por:

- Reservatórios de nível variado Itaquera, São Miguel, Itaim, Ermelino Matarazzo, Suzano e Poá com tubulação de entrada por cima e válvula de controle, Guaianazes com tubulação de entrada por cima e sem válvula de controle, Brás Cubas, Ferraz de Vasconcelos e Itaquaquecetuba com válvula de controle;
- Reservatório de Adução (RA) da ETA Taiaçupeba;
- Pontos de Demanda sem reservação EC Sifão 7, derivação Thevear, e Derivação Bonsucesso;
- Booster Santa Etelvina com 07 grupos moto-bombas, Brás Cubas com 01 conjunto moto-bomba, Poá (antigo Sam Leste) com 03 grupos moto-bombas, Guaianazes com 05 grupos moto-bombas e Ermelino com 03 grupos moto-bombas.

Os dados cadastrais utilizados na topologia do sistema Alto Tietê foram:

- Reservatórios – cota da laje de fundo, limites operacionais de nível (mínimo e máximo), volumes nominal, ativo e inativo (tabela 6.1);
- Adutoras – comprimento, diâmetro e material da tubulação (anexo B);
- Nós que indicam mudança de diâmetro ou material de tubulação ou mudança no sentido da inclinação – cota (anexo B);
- Reservatório da ETA Taiaçupeba - cota (tabela 6.1);
- Válvulas – cota e diâmetro (tabela 6.3);

- Pontos de demanda sem reservação – cota (tabela 6.4);
- Boosteres – cota do eixo e curva das bombas (tabela 6.5);
- Nós que representam pontos de medição de pressão – cota do medidor de pressão secundário (tabela 6.6).

Esses dados foram obtidos do cadastro de dados operacionais – CADOP, comparados com os dados da base Scoa - tabela de dados cadastrais da operação atualizada pelo operador, plantas cadastrais do Cadastro Técnico e também do relatório técnico de redução de custos com energia do Alto Tietê (Sabesp – 1999b). Os dados referentes ao nível inicial dos reservatórios, obtidos do SCOA, disponíveis a partir do servidor de banco de dados históricos em SQL.

TABELA 6.1 – Capacidade dos reservatórios do sistema Alto Tietê

Reservatórios	Cota de Fundo (m)	Nível Mínimo (m)	Nível Máximo (m)	Volume Inativo (m³)	Volume Ativo Total (m³)	Volume Nominal (1000 x m³)
Arujá 097	822,00	1,51	4,61	621,80	5.378,33	6
Mogi das Cruzes - Brás Cubas 092	784,90	0,80	3,85	4.050,00	15.950,34	20
Suzano 090	786,00	0,23	5,43	1.930,00	8.070,04	10
Poá 094	787,93	0,60	5,00	521,35	4.478,65	5
Ferraz de Vasconcelos 095	790,16	2,00	4,95	735,04	6.264,96	7
Cidade Tiradentes 156	866,70	0,40	7,45	1.140,71	8.859,29	10
Santa Etelvina 153	912,21	0,50	5,40	1.301,64	3.698,36	5
Guaianazes 025	816,57	0,50	8,08	706,08	14.293,92	15
Itaquera 022	779,93	2,70	5,88	982,43	23.017,57	24
São Miguel 023	783,38	0,85	8,50	386,73	9.613,27	10
Ermelino Matarazzo 021	787,46	0,60	5,37	3.932,63	27.067,37	31
Itaim Paulista 024	783,00	0,70	7,60	1.135,60	18.864,40	20
Itaquaquecetuba - Centro 096	782,00	0,50	7,50	979,27	14.020,73	15
Itaquaquecetuba - Pinheirinho 158	799,86	0,50	5,50	92,71	907,29	1
Itaquaquecetuba - Vila Industrial 157	804,58	1,04	6,74	415,79	4.584,21	5
RA Taiaçupeba 099	820,00					40

A tabela 6.2 apresenta os comprimentos totais das adutoras classificadas por diâmetro. Os comprimentos, diâmetros e material de cada trecho podem ser encontrados em forma digital no anexo B.

TABELA 6.2 – Dimensões das adutoras do sistema Alto Tietê (resumo)

Comprimento (m)	Diâmetro (mm)
2.094	200
8	300
2.389	400
8.576	500
16.264	600
110	700
5.357	750
7.807	800
16.663	900
51	1000
13.007	1050
4.995	1200
2.673	1500
17.168	1800
12.192	2100
1.839	2500
111.194	Total

A tabela 6.3 apresenta as informações de cotas e diâmetros de válvulas, obtidas do CADOP, consultas ao cadastro técnico, Revisão e Atualização do Plano Diretor de Abastecimento de Água (Sabesp – 2004c), e relatório de redução de custos com energia do Alto Tietê (Sabesp – 1999b).

TABELA 6.3 – Dados cadastrais das válvulas telecomandadas nas entradas dos reservatórios do sistema Alto Tietê

Reservatórios	Válvulas	
	Cota (m)	Diâmetro (mm)
Ermelino Matarazzo 021 (V01)	788,80	400
Ermelino Matarazzo 021 (V02)	788,80	400
Itaquera 022	779,93	1.050
São Miguel 023	783,38	900
Itaim Paulista 024	783,00	900
Suzano 090	786,00	800
Poá 094	787,93	400
Ferraz de Vasconcelos 095	790,16	400
Itaquaquecetuba - Centro 096	782,00	800
Arujá 097	822,00	600
Itaquaquecetuba - Vila Industrial 157	804,62	500
Itaquaquecetuba - Vila Industrial 157	804,00	500
Itaquaquecetuba - Pinheirinho 158	799,86	200

A tabela 6.4 apresenta as cotas nos pontos de demanda obtidas do cadastro técnico.

TABELA 6.4 – Pontos de demanda de água na representação do sistema Alto Tietê

Pontos	nº SCOA	Cota (m)
EC Sifão 7	137 F01	766,90
Derivação Bonsucesso	157 F02	758,89
Derivação THEVEAR	096 Z01	741,70

As curvas características das bombas, apresentadas na tabela 6.5, foram obtidas por meio de cadastro e checagem em campo.

TABELA 6.5 – Curvas características das bombas por booster/EEA.

Booster Poá		EEA Santa Etelvina				Booster Brás Cubas	
Antigo SAM Leste		Antigo Sta Etelvina ZA		Antigo Passagem Funda ZB			
Vazão (l/s)	Altura Manométrica (m)	Vazão (l/s)	Altura Manométrica (m)	Vazão (l/s)	Altura Manométrica (m)	Vazão (l/s)	Altura Manométrica (m)
0	55	0	100	0	192	0	55
200	51	55,55	98	20	180	200	51
300	49	111,11	97	40	168	300	49
400	47	166,66	95	60	160	400	47
500	45	222,22	93	80	144	500	45
600	42	277,71	89	100	129	600	42
700	39	333,33	84	120	110	700	39
800	36	388,88	77			800	36
900	34	444,44	70			900	34
1000	30	500,00	60			1000	30
1100	27					1100	27
1200	23					1200	23

Booster Ermelino		Booster Itaquá		Booster Vila Industrial		Booster Guaianazes			
Antigo Booster BAC						Novo		Velho	
Vazão (l/s)	Altura Manométrica (m)	Vazão (l/s)	Altura Manométrica (m)	Vazão (l/s)	Altura Manométrica (m)	Vazão (l/s)	Altura Manométrica (m)	Vazão (l/s)	Altura Manométrica (m)
0	72,0	0	105	100	38,0	0	59,33	0	16,0
278	70,5	200	102	140	36,6	302	44,50	120	15,5
556	68,0	400	96	167	34,5	604	0	160	13,0
833	60,0	600	79						
1111	46,0	700	66						
1250	36,0								

O booster Santa Etelvina, através das bombas B04, B05 e B06, eleva a carga piezométrica aduzida até o reservatório Cidade Tiradentes (antigo Passagem Funda ZA), assim como para o reservatório Santa Etelvina (antigo Santa Etelvina ZA) através das bombas B01, B02 e B03. Ambos os reservatórios não possuem uma válvula de controle na entrada. No modelo, optou-se por adicionar válvulas fictícias na entrada dos reservatórios para poder controlar a máxima vazão entregue.

O reservatório Guaianazes é abastecido pelo reforço de pressão promovido pelo booster Guaianazes. O reservatório Guaianazes não possui válvula de controle na entrada, sendo operado através do acionamento de bombas no booster a montante.

O booster Ermelino Matarazzo (antigo booster BAC), é um booster reversível, estratégico, utilizado para transferir água do sistema Alto Tietê para o sistema Cantareira e vice-versa. Durante o período de simulação do modelo de operação, este booster foi mantido desligado. Ou seja, a água do sistema Alto Tietê é utilizada para abastecer até o reservatório Ermelino.

Nas tabelas 6.6 e 6.7 encontram-se, respectivamente, os valores de vazão e consumo médio, dos setores de abastecimento do sistema Alto Tietê, no período de janeiro a abril de 2005.

Os dados utilizados para calibrar o modelo foram:

- Reservatórios – nível mínimo e máximo (tabela 6.1) e nível em um dado instante (tabela 6.8);
- Pontos de demanda sem reservação, vazão aduzida, em um dado instante (anexo B);
- Vazão medida na entrada do reservatório em um dado instante (anexo B);
- Estado de bomba, ligado ou desligado, em um dado instante (anexo B);

TABELA 6.6 – Vazão média diária, por ponto de medição, dos setores de abastecimento do Sistema Alto Tietê, de janeiro a abril de 2005.

SCOA	PONTO	NOME_PONTO	JAN-05	FEV-05	MAR-05	ABR-05
21	F01	Vazão Ermelino Matarazzo Cantareira	492	452	593	622
21	F02	Vazão Ermelino Matarazzo Alto Tietê	506	543	435	423
22	F01	Vazão Itaquera	1.147	1.164	1.169	1.195
23	F01	Vazão São Miguel	816	823	845	859
24	F01	Vazão Itaim	1.292	1.274	1.236	1.227
25	F01	Vazão Guaianazes	559	563	570	583
90	F01	Vazão Suzano	621	629	625	639
90	F02	Vazão ZA	139	144	143	146
92	F01	Vazão Brás Cubas	549	551	555	551
93	F01	Vazão Santa Etelvina	165	165	169	168
93	F02	Vazão Cidade Tiradentes	415	409	409	418
94	F01	Vazão Poá	292	293	295	301
95	F01	Vazão Ferraz Vasconcelos	320	322	311	300
96	F01	Vazão R1 e R2 - Itaquá	1.279	1.257	1.257	1.250
96	F02	Vazão E.E. Nova Pitot	848	856	858	834
96	F03	Vazão E.E. Nova Eletromagnético	894	898	893	876
97	F01	Vazão Arujá	178	182	187	178
137	F01	Vazão Alto Tietê-Rio Claro	577	673	726	728
153	F01	Santa Etelvina	507	533	526	518
157	F01	Vazão Vila Industrial	231	236	232	214
157	F02	Vazão Bonsucesso	265	271	276	274
158	F01	Vazão Pinheirinho	15	15	16	14
163	F01	Vazão ETA - Alto Tietê RAT/RD	8.889	9.151	9.314	9.912

TABELA 6.7 – Demanda média diária dos setores de abastecimento do Sistema Alto Tietê, de janeiro a abril de 2005.

SCOA	PONTO	NOME_PONTO	JAN-05	FEV-05	MAR-05	ABR-05
21	Y01	Ermelino Matarazzo	999,13	998,18	1027,52	1040,57
24	Y01	Itaim Paulista	1292,20	1274,68	1235,52	1223,83
25	Y01	Guaianazes	558,71	565,61	569,58	576,27
94	Y01	Poá	292,10	292,46	294,61	300,30
95	Y01	Ferraz de Vasconcelos	319,35	321,68	310,77	300,63
96	Y01	Itaquá	430,03	400,32	395,39	417,17
97	Y01	Arujá	177,52	182,79	186,61	183,50
99	Y01	RA Alto Tietê	8888,23	9147,96	9318,77	9911,30
153	Y01	Santa Etelvina	164,84	165,21	166,55	169,37
156	Y01	Cidade Tiradentes	418,13	412,57	413,29	428,40
157	Y01	Itaquaquecetuba - Vila Industrial	54,39	53,64	49,90	51,77
158	Y01	Itaquaquecetuba - Pinheirinho	16,61	16,61	16,06	15,20

- Nós que representam o ponto de medição de pressão (22P01, 23P01, 24P01, 9P03, 90P01, 92P01, 94P01, 95P01, 96P01, 93P01, 137P01) em um dado instante (anexo B).

Para calibrar e validar o modelo foram, utilizados os dados dos dias 17/04/05 às 6:00 e 15:00h, 18/04/05 às 6:00h e 19/04/05 às 20:00h.

Os dados utilizados para calibrar e rodar o modelo de operação (interface entre SCOA, modelo de previsão, modelo simulador e modelo de otimização) e para simular a operação durante 48 horas, foram do período entre 17/04/2005 a 23/04/2005, encontram-se gravados em meio digital e estão disponíveis no anexo B deste volume.

TABELA 6.8 – Dados Utilizados para Calibração - Reservatórios

Dados Utilizados para Calibração - Reservatórios		17/4/05 6:00	17/4/05 15:00	18/4/05 6:00	19/4/05 20:00
ID_SCOA	LABEL_SCOA	Ini_Elev (m)	Ini_Elev (m)	Ini_Elev (m)	Ini_Elev (m)
21R01	Ermelino Matarazzo 021	3,30	3,03	3,94	2,55
22R01	Itaquera 022	4,92	3,82	4,31	3,26
23R01	São Miguel 023	5,57	4,09	6,43	3,23
24R01	Itaim Paulista 024	6,68	3,65	6,97	4,32
25R01	Guaianazes 025	5,49	3,89	6,42	6,22
90R01	Suzano 090	5,10	3,03	4,47	3,58
92R01	Mogi das Cruzes - Brás Cubas 092	1,74	2,22	3,23	2,82
94R01	Poá 094	4,59	2,78	3,90	3,90
95R01	Ferraz de Vasconcelos 095	2,00	2,00	2,00	2,00
96R01	Itaquaquecetuba - Centro 096	6,43	2,95	5,76	4,86
97R01	Arujá 097	2,03	1,97	1,96	2,03
99R01	Taiácupeba 099	2,60	1,50	3,56	3,65
153R01	Santa Etelvina 153	5,12	3,38	3,92	3,07
156R01	Cidade Tiradentes 156	7,35	5,40	5,35	2,50
157R01	Itaquaquecetuba - Vila Industrial 157	5,46	2,75	4,03	1,45
158R01	Itaquaquecetuba - Pinheirinho 158	4,62	2,78	3,03	4,30

6.6. Resultados da Calibração

O processo de calibração consistiu em fixar as vazões observadas na entrada dos reservatórios e adequar o coeficiente de rugosidade “C” (Hazen-Williams), tal que os valores de pressão calculados atinjam valores próximos aos observados. A melhor combinação de coeficientes “C” nas tubulações da topologia estudada, figura 6.18, resultou nas pressões calculadas apresentadas na tabelas seguintes.

Figura 6.18 – Topologia do Sistema Alto Tietê – Coeficientes de rugosidade.

A tabela 6.9 apresenta as vazões e as pressões observadas às 6:00 h, do dia 17/04/2005, disponíveis no Histórico de Dados do Sistema - HDS e as pressões calculadas pelo modelo simulador WaterCad.

TABELA 6.9 – Pressão observada e pressão calculada às 6:00h do dia 17/04/2005.

Data Hora: 17/04/2005 06:00:00		Vazão Observada (l/s)		Pressão			
				observada		calculada	
ID_SCOA	LABEL_SCOA	F01	F02	P01	P02	P01	P02
21	Ermelino Matarazzo 021	690	233	17,75	30,00	25,89	30,53
22	Itaquera 022	1050			43,05		39,89
23	São Miguel 023	873		27,30		34,53	
24	Itaim Paulista 024	1250		8,50		6,70	
25	Guaianazes 025	505				15,72	
90	Suzano 090	295	88	17,20	63,35	24,89	
92	Mogi das Cruzes - Brás Cubas 092	895		3,20		1,74	
94	Poá 094	237		13,00		16,70	
95	Ferraz de Vasconcelos 095	179		20,55		28,67	
96	Itaquaquecetuba - Centro 096	1330	698	10,80	61,20	7,17	
97	Arujá 097	87		12,54		10,53	
153	Santa Etelvina 153	0		0,00		8,22	
156	Cidade Tiradentes 156					7,34	
157	Itaquaquecetuba - Vila Industrial 157	158	270	19,95	44,45	14,30	14,87
158	Itaquaquecetuba - Pinheirinho 158	23		19,25		27,32	

A tabela 6.10 apresenta as vazões e as pressões observadas às 15:00 h, do dia 17/04/2005.

TABELA 6.10 – Pressão observada e pressão calculada às 15:00h do dia 17/04/2005.

Data Hora: 17/04/2005 15:00:00		Vazão Observada (l/s)		pressão (mca)			
				observada		calculada	
ID_SCOA	LABEL_SCOA	F01	F02	P01	P02	P01	P02
21	Ermelino Matarazzo 021	825	675	28,00	25,00	0,00	22,94
22	Itaquera 022	1340		28,50	45,50		33,57
23	São Miguel 023	828		23,10		28,41	
24	Itaim Paulista 024	1450		6,25		3,69	
25	Guaianazes 025	770				5,93	
90	Suzano 090	710	187	8,80	57,05	4,28	
92	Mogi das Cruzes - Brás Cubas 092	430		3,20		38,20	
94	Poá 094	300		5,25	33,75	2,89	
95	Ferraz de Vasconcelos 095	427		13,20		22,53	
96	Itaquaquecetuba - Centro 096	1510	1110	9,60	78,60	3,00	
97	Arujá 097	345		7,78		5,21	
153	Santa Etelvina 153	820		12,00		3,39	
156	Cidade Tiradentes 156					22,07	
157	Itaquaquecetuba - Vila Industrial 157	320	293	28,70	30,80	2,75	3,37
158	Itaquaquecetuba - Pinheirinho 158	13		35,75		37,90	

A tabela 6.11 mostra as vazões e as pressões observadas às 6:00 h, do dia 18/04/2005

TABELA 6.11 – Pressão observada e pressão calculada às 6:00h do dia 18/04/2005.

Data Hora: 18/04/2005 06:00:00		Vazão Observada (l/s)		pressão (mca)			
				observada		calculada	
ID_SCOA	LABEL_SCOA	F01	F02	P01	P02	P01	P02
21	Ermelino Matarazzo 021	653	165	17,50	30,00	0,00	27,24
22	Itaquera 022	1470		31,80	47,95		36,83
23	São Miguel 023	954		25,90		32,22	
24	Itaim Paulista 024	860		8,50		23,58	
25	Guaianazes 025	735				13,67	
90	Suzano 090	700	93	16,00	62,65	5,80	
92	Mogi das Cruzes - Brás Cubas 092	525		4,40		29,92	
94	Poá 094	366		16,00	39,50	8,01	
95	Ferraz de Vasconcelos 095	214		20,85		27,11	
96	Itaquaquecetuba - Centro 096	1020	705	8,70	58,80	20,99	
97	Arujá 097	117		9,48		41,97	
153	Santa Etelvina 153	344		5,80		3,93	
156	Cidade Tiradentes 156					20,35	
157	Itaquaquecetuba - Vila Industrial 157	138	273	19,60	42,35	40,00	40,51
158	Itaquaquecetuba - Pinheirinho 158	25		13,50		54,77	

A tabela 6.12 apresenta as vazões e as pressões observadas às 20:00 h, do dia 19/04/2005.

TABELA 6.12 – Pressão observada e pressão calculada às 20:00h do dia 19/04/2005.

Data Hora: 19/04/2005 20:00:00		Vazão Observada (l/s)		pressão (mca)			
				observada		calculada	
ID_SCOA	LABEL_SCOA	F01	F02	P01	P02	P01	P02
21	Ermelino Matarazzo 021	1005	210	17,50	30,00	0,00	31,18
22	Itaquera 022	830		31,80	47,95		40,39
23	São Miguel 023	495		25,90		36,51	
24	Itaim Paulista 024	990		8,50		16,24	
25	Guaianazes 025	515				39,06	
90	Suzano 090	600	156	16,00	62,65	4,98	
92	Mogi das Cruzes - Brás Cubas 092	510		4,40		30,99	
94	Poá 094	489		16,00	39,50	5,53	
95	Ferraz de Vasconcelos 095	298		20,85		28,49	
96	Itaquaquecetuba - Centro 096	970	653	8,70	58,80	17,44	
97	Arujá 097	123		9,48		44,80	
153	Santa Etelvina 153	272		5,80		8,06	
156	Cidade Tiradentes 156					111,39	
157	Itaquaquecetuba - Vila Industrial 157	68	280	19,60	42,35	48,84	49,33
158	Itaquaquecetuba - Pinheirinho 158	12		13,50		66,71	

Segundo alguns autores, é razoável uma diferença de até 10% entre as pressões observadas e calculadas. No entanto, por este critério, os reservatórios Poá, Arujá, Vila Industrial e Pinheirinho ultrapassam essa diferença. Este fato deve-se principalmente à existência de pontos de demanda no sistema que correspondem às derivações na rede de abastecimento (adutoras) que atendem setores onde a distribuição é feita em marcha. As vazões em alguns desses pontos são calculadas (e não medidas) e em outros são “desconhecidas”.

Dessa forma, a calibração não pode ser considerada atingida, deve-se assumir então uma perda na melhoria de eficiência da operação proposta.

7. MODELO DE PREVISÃO DE CONSUMO ESCOLHIDO

7.1. Premissas do Modelo

As premissas mais importantes do modelo adotado, Zahed (1990) são: a eliminação do efeito do dias da semana pela introdução do dia móvel (24 horas móveis); associação simples com dados históricos recentes para evitar utilizar modelos complementares (previsão de temperatura); horizonte de previsão máximo de 24 horas para reservação.

O modelo é baseado na Série de Fourier, atualiza os coeficientes harmônicos de forma diária, com ciclo dos harmônicos de 7 dias e correção através de um coeficiente de relação entre os valores previstos e os observados em um período de tempo imediatamente anterior à previsão.

7.2. Equacionamento

Parâmetros de entrada do algoritmo:

- a.* Código da estação;
- b.* Data base (normalmente o horário atual);
- c.* Número de harmônicas de Fourier;
- d.* Horas de base;
- e.* Horas de Previsão;

A figura 7.1 mostra o fluxograma de cálculo do algoritmo utilizado para as previsões de demanda.

Figura 7.1 – Fluxograma de cálculo do algoritmo de previsão de demandas

1. Determinação de R1, A1, A2, A3 e A4 :

Os períodos de tempo R1, A1, A2, A3 e A4 deverão ser sempre iguais, figura 7.2, e esse período é definido pelo parâmetro “número de horas base”. No cálculo existente hoje, adotou-se 6 horas para o número de horas de base. O período R1 refere-se às últimas 6 horas anteriores a hora do início da previsão. O período A1 refere-se ao mesmo período de 6 horas do mesmo dia da semana de uma semana atrás, assim como A2, A3 e A4 referem-se ao período de 6 horas, do mesmo dia da semana de 2, 3 e 4 semanas anteriores respectivamente.

Assim, cada um desses períodos tem 4 valores de consumo por hora, ou seja, 1 valor médio de consumo a cada 15 minutos, resultado da média de até 15 valores. No período total de 6 horas temos então 24 (4 x 6) valores de consumo.

Figura 7.2 – Diagrama explicativo

2. Cálculo do fator de influência do consumo - Alfa (α) :

Para o cálculo do Alfa (α), primeiramente são calculados n alfas. Cada um desses alfas é calculado como descrito no fluxograma da figura 7.1, que considera cada um dos elementos de R1, A1, A2, A3 e A4.

Depois que todos os alfas são calculados (para 6 horas teremos até 24 alfas calculados), é obtido uma média de todos esses alfas, e temos então um valor de alfa médio final.

3. Cálculo da série de Fourier :

A série de Fourier funciona como um filtro dos dados de consumo. O período obtido para obter a série, corresponde a última semana completa de dados de consumo, conforme ilustrado na figura 7.3.

Figura 7.3 – Diagrama explicativo

4. Obtenção do Previsional :

O previsional corresponde exatamente ao valor do consumo da semana anterior (obtida pela série de Fourier) multiplicada ponto a ponto pelo Alfa já calculado. Desta forma é possível obter a previsão de consumo hora a hora.

A figura 7.4 mostra o consumo da semana anterior, projetada para a semana futura multiplicada pelo fator Alfa.

Figura 7.4 – Diagrama explicativo

A previsão dos dados é calculada caso os dados de consumo estejam com mais de 50% dos dados com qualificador bom. Se 50% ou mais dos dados estejam com qualificador de erro ruim (igual a 1), são utilizados para a previsão os dados da curva média. A figura 7.5 apresenta os passos seguidos.

Figura 7.5 – Fluxograma de implementação da previsão

0. HST_LEITURA MÉDIA - São lidos os dados da tabela HST_LEITURA MÉDIA.

1. Construir a curva média de consumo - Alguns valores obtidos do SCOA, apesar de não estarem caracterizados como sendo valores duvidosos, são incoerentes se comparados aos demais valores da série diária (os valores nulos, por exemplo). Neste caso, há uma interpolação de dados com os valores vizinhos. É construída com base nas 4 semanas anteriores. A curva média é atualizada a

cada 15 minutos. É apagado o primeiro dado armazenado e inserido o dado da última meia hora.

2. Cálculo da previsão - A previsão de dados é então calculada. Caso os dados de consumo estejam com mais de 50% com qualificador de erro ruim (igual a 1), são utilizados os dados da curva média. Caso for necessário utilizar a curva média e a mesma também estiver com mais de 50% de qualificador de erro ruim (igual a 1), o sistema calcula a previsão e avisa ao operador que o dado previsto não é confiável, e que o sistema deve passar de automático para manual.

3. HST_PREVISÃO - Os dados são armazenados na tabela HST_PREVISÃO e enviados ao SCOA.

Os dados de previsão ficam disponíveis na tela de operação (próxima hora) e na rede, como ilustrado na figura 7.6.

Figura 7.6 – Gráfico Consumo X Previsão

8. MODELO DE SIMULAÇÃO ESCOLHIDO

O modelo WaterCad é o software utilizado pela Sabesp em estudos de readequações e verificações hidráulicas tanto de variáveis, como pressão e vazão da rede, como para dimensionamento de equipamentos. Possui módulos de calibração, de qualidade da água, de interface com o software AutoCAD, de sistema geográfico de informação e de custos, e permite a comunicação com outros sistemas como o SCOA e o sistema de informações geográficas.

As topologias dos subsistemas que compõem o SAM são previamente montadas, importando os dados relativos à topologia de uma base GIS ou AutoCad (cotas, comprimento e diâmetro das adutoras), inserindo os dados cadastrais (curvas de bombas, válvulas) e os coeficientes de rugosidade das tubulações. Desta forma, o modelo fica preparado para receber as informações dos níveis dos reservatórios, vazões nas válvulas e estado de bombas que integram o subsistema, os consumos previstos pelo modelo de previsão de demanda e hora referente ao início da seqüência de dados.

A entrada de dados para o modelo WaterCad pode ser feita pela simples digitação de cada parâmetro ou pela importação dos dados através de conexão com banco de dados. A figura 8.1 mostra uma tela do programa WaterCad com o modelo esquemático do sistema Alto Tietê.

O modelo de operação propicia a recepção dos consumos previstos das próximas 24 horas, pelo modelo simulador hidráulico, e estabelece uma regra

operacional diária que atenda às demandas horárias , considerando o menor custo de energia elétrica e evitando manobras desnecessárias. A regra é estabelecida pelo modelo otimizador, que assim como o modelo de previsão de demanda de água, pode chegar ao limite de aceitação que o obrigue a um auto ajuste e reinício de cálculo.

Dessa forma, toda a vez em que as condições de operação se alterem, os dados são novamente transmitidos para o modelo simulador e nova análise se torna necessária. Este estudo se limitará à primeira programação diária das regras operacionais e propõe avaliar a condição de que se obtém ganhos operacionais quando comparada à operação atual do CCO.

Figura 8.1 – Tela do modelo WaterCad

9. MODELO DE OTIMIZAÇÃO UTILIZADO

O modelo de operação proposto, esquematicamente mostrado na figura 9.1, interage com a rede real através do sistema SCADA, onde recebe informações sobre o estado corrente do sistema (nível de água dos reservatórios, status de bombas e válvulas, pressão e vazão de pontos selecionados, últimos valores de consumos). A fim de programar a operação ótima para as próximas 24 horas, o modelo conta com um modelo previsional para gerar as demandas futuras e é imposta uma condição de que os volumes finais no reservatório deva ser maior ou igual ao volume mínimo desejável em função do dia da semana. Essa condição é importante quando se espera uma operação periódica do sistema.

Figura 9.1 – Modelo de Otimização da Operação do SAM Idealizado

Para o cálculo da rede hidráulica, o modelo de otimização aplicado neste trabalho, utiliza o simulador hidráulico WaterCad e utiliza programação linear - software Premium Solver Platform – Frontline Systems, Inc., para o processo de otimização e faz uso de procedimentos iterativos para contornar problemas de não linearidade presentes nas equações. O problema a ser otimizado pela modelagem é um problema de planejamento operacional com um horizonte de operação diário, onde os intervalos de operação são horários. A formulação matemática para isto deve atender a regras operacionais que minimizem custos de energia em função da previsão de consumo de água do SAM.

O intuito é determinar, automaticamente, a política de operação do sistema ao menor custo para o sistema da distribuição da água, satisfazendo às exigências de desempenho hidráulico.

A política de operação para uma bomba ou conjunto de bombas representa um conjunto de regras temporais ou diretrizes que indicam quando uma bomba particular deve ser acionada ou desligada em um período de tempo.

As exigências de desempenho do sistema são os limites de pressão nos nós, as velocidades máximas na tubulação, os volumes máximos bombeados, os níveis máximo e mínimo operacionais dos reservatórios setoriais, e os volumes finais dos reservatórios no fim de um período de tempo especificado para assegurar a continuidade operacional. O problema matemático é governado pela função objetivo de custos de energia e associado a um conjunto de restrições operacionais do sistema de abastecimento.

Custos de Energia de Bombeamento

Dependem da vazão, altura manométrica, eficiência, potência máxima consumida, valor do quilowatt hora, e tempo de funcionamento da bomba. O custo de energia de bombeamento de um dado período pode ser calculado como:

$$C = C_f Q h_p p t / (e_p e_m)$$

onde:

C - Custo da energia no período de tempo t (R\$/kWh);

Q - Vazão (l/s);

h_p - Altura manométrica da bomba (m);

p - custo unitário da energia (R\$/kWh);

t - período de tempo (h);

e_p - eficiência da bomba;

e_m - eficiência do motor;

C_f - fator de conversão = 1,019 (SI).

Determinar o valor do custo C torna-se complicado em função da estrutura tarifária em que o custo unitário depende da modalidade contratada com o fornecedor de energia e do período do dia.

O objetivo do controle de otimização é minimizar custos de energia enquanto satisfaz hidraulicamente os requisitos do sistema. Para essa abordagem é possível definir a função objetivo como:

FUNÇÃO OBJETIVO: Minimização dos custos de energia elétrica

$$Z_1 = \sum_{t=1}^N \left[\sum_{t=0}^T E_n(t) C_n(t) + \sum_{bp=1}^{NBPn} E \max_n^{bp} C_n(bp) \right]$$

Onde:

N : representa o número de bombas;

T : período de tempo de controle (horas);

$C_n(t)$: custo unitário de energia de cada bomba N no tempo T ;

$E_n(t)$: energia consumida durante o intervalo de t a $t+1$;

$E \max_n^{bp}$: máxima energia consumida pela bomba n no período de ponta bp ;

$C_n(bp)$: custo máximo da demanda no período de ponta (R\$/max.kW) da bomba n ;

$NBPn$: número de períodos de ponta de demanda para a bomba n ;

Z_1 : Função Objetivo.

Sujeito às restrições e equações auxiliares:

- Balanço de massa nos nós;
- Balanço de energia nos trechos da rede;
- Cálculo da perda de carga em cada trecho;
- Cálculo da abertura das válvulas de controle.
- Limitação das rotações máximas e mínimas das bombas;

- Limitação das alturas manométricas máximas e mínimas nas bombas;
- Regime de operação dos reservatórios, a diferença entre o volume do reservatório no final do período de operação e o volume inicial não deve ser maior uma certa tolerância ;

$$VR_k^{final} \leq VR_{k_{min}}, \quad \forall k$$

- Regime de operação das bombas (SW número de mudanças);

$$SW_k \leq SW_{max_k}, \quad \forall k, \forall t$$

- Manutenção dos níveis máximos e mínimos nos reservatórios;

$$R_{min_k} \leq R_k(t) \leq R_{max_k}, \quad \forall k, \forall t$$

- Limitação das pressões máximas e mínimas nos nós da rede;

$$P_{min_j} \leq P_j(t) \leq P_{max_j} \quad \forall j, \forall t$$

- Limitação das velocidades máximas (valor absoluto) nos trechos da rede;

$$V_k(t) \leq V_{max_k}, \quad \forall k, \forall t$$

10. INTERFACES DESENVOLVIDAS

Interface SCOA x WaterCad

O aplicativo desenvolvido para integrar os dados do SCOA ao modelo simulador hidráulico WaterCad, foi escrito em linguagem de programação Visual Basic 6.0. Permite a pesquisa, em uma determinada data, dos pontos (reservatórios, bombas, válvulas, pressões) do SCOA pertencentes a um determinado sistema ou subsistema. Para isso gera um banco de dados intermediário, figura 10.1, e cria um banco de dados no formato de leitura do modelo simulador. Isso facilita a entrada de dados no modelo e possibilita uma análise mais rápida de condições operacionais diversas.

Figura 10.1 – Banco de dados do SCOA extraídos do servidor de dados históricos do SCOA - HDS

A figura 10.2 mostra a tela inicial da interface “Modelo de Operação” desenvolvida.

Figura 10.2 – Tela da interface SCOA x Simulador

Interface Previsional x SCOA

Para integrar o modelo de previsional ao SCOA foi necessária a alteração de algumas configurações no próprio SCOA, para que o operador pudesse ter acesso aos dados de previsão de consumo. Uma estação configurada para trabalhar com o modelo previsional apresenta na tela do operador as previsões de consumo de água, do ponto Reservatório, para a próxima hora.

Uma estação pode ser configurada como pertencente ao conjunto de estações que recebe os resultados do modelo previsional através de alteração de parâmetros – Relatório 15 do SCOA.

Na figura 10.3 pode-se visualizar os dados calculados, no ambiente de desenvolvimento PL/SQL do Oracle, que são enviados para o SCOA.

The screenshot shows the PL/SQL Developer interface. The top menu bar includes File, Project, Edit, Session, Debug, Tools, Macro, Documents, Reports, Window, and Help. The toolbar contains various icons for file operations, editing, and execution. The left pane shows the 'My objects' tree with a hierarchy of database objects, including Views, where 'VW_LEITURA_PREVISAO' is selected. The main SQL window displays the following SQL code:

```
create or replace view vw_leitura_previsao as
select dt_inclusao, dt_previsao, y01 from hst_previsao
where cd_estacao='055' and dt_previsao<sysdate-1
```

Below the SQL window, a table grid displays the data for the view. The table has three columns: DT_INCLUSAO, DT_PREVISAO, and Y01. The data consists of 28 rows, each representing a time interval and a consumption value.

	DT_INCLUSAO	DT_PREVISAO	Y01
1	15/10/2004 09:45:53	15/10/2004 15:15:00	280,91
2	15/10/2004 12:45:33	15/10/2004 15:15:00	263,78
3	15/10/2004 09:45:53	15/10/2004 15:30:00	265,94
4	15/10/2004 12:45:33	15/10/2004 15:30:00	257,99
5	15/10/2004 09:45:53	15/10/2004 15:45:00	252,21
6	15/10/2004 12:45:33	15/10/2004 15:45:00	252,81
7	15/10/2004 09:45:53	15/10/2004 16:00:00	239,94
8	15/10/2004 12:45:33	15/10/2004 16:00:00	248,31
9	15/10/2004 12:45:33	15/10/2004 16:15:00	244,55
10	15/10/2004 12:45:33	15/10/2004 16:30:00	241,56
11	15/10/2004 12:45:33	15/10/2004 16:45:00	239,34
12	15/10/2004 12:45:33	15/10/2004 17:00:00	237,89
13	15/10/2004 12:45:33	15/10/2004 17:15:00	237,17
14	15/10/2004 12:45:33	15/10/2004 17:30:00	237,13
15	15/10/2004 12:45:33	15/10/2004 17:45:00	237,70
16	15/10/2004 12:45:33	15/10/2004 18:00:00	238,79
17	15/10/2004 17:46:18	15/10/2004 18:00:00	254,56
18	15/10/2004 12:45:33	15/10/2004 18:15:00	240,29
19	15/10/2004 17:46:18	15/10/2004 18:15:00	252,89
20	15/10/2004 12:45:33	15/10/2004 18:30:00	242,09
21	15/10/2004 17:46:18	15/10/2004 18:30:00	251,92
22	15/10/2004 12:45:33	15/10/2004 18:45:00	244,08
23	15/10/2004 17:46:18	15/10/2004 18:45:00	251,62
24	15/10/2004 12:45:33	15/10/2004 19:00:00	246,14
25	15/10/2004 17:46:18	15/10/2004 19:00:00	251,94
26	15/10/2004 17:46:18	15/10/2004 19:15:00	252,83
27	15/10/2004 17:46:18	15/10/2004 19:30:00	254,21
28	15/10/2004 17:46:18	15/10/2004 19:45:00	255,99

The status bar at the bottom indicates 'SQL Window - create or replace view vw_leitura_...' and '28 rows selected in 0,156 seconds (more...)'.

Figura 10.3 – Tela do banco de dados ORACLE – cálculo da previsão do consumo

Os códigos fonte das rotinas de programação utilizados encontram-se no anexo A.

Interface Previsional x WaterCad

Há dois tipos de simulação que podem ser utilizadas: regime permanente (calibração) e regime estendido (simulação).

Para a calibração, deve-se definir um instante (ano:mês:dia:hora:minuto) para obtenção dos dados operacionais do SCOA – utiliza portanto somente a interface SCOA x WaterCad.

Para a simulação, são inseridos os dados armazenados na tabela HST_PREVISÃO para cada ponto pertinente. Um exemplo desses dados é apresentado na figura 10.4. Tanto os dados do SCOA quanto os dados gerados pelo modelo previsional são convertidos em formatos de tabelas, com um horizonte de previsão de até 24 horas, que são então importados pelo WaterCad.

Previsão de Consumo
Estação - ITAIM

Horário da Previsão	Consumo Previsto
10/1/2005 01:00:00	1.087,28
10/1/2005 02:00:00	1.032,27
10/1/2005 03:00:00	923,90
10/1/2005 04:00:00	867,10
10/1/2005 05:00:00	846,04
10/1/2005 06:00:00	935,60

Horário	Consumo Previsto	Consumo Real
9/1/2005 13:00:00	1.854,06	1.765,38
9/1/2005 14:00:00	1.763,60	1.684,73
9/1/2005 15:00:00	1.678,67	1.649,20
9/1/2005 16:00:00	1.601,77	1.610,54
9/1/2005 17:00:00	1.392,64	1.540,00
9/1/2005 18:00:00	1.351,15	1.543,33
9/1/2005 19:00:00	1.337,82	1.527,29
9/1/2005 20:00:00	1.476,02	1.372,04
9/1/2005 21:00:00	1.417,43	1.391,11
9/1/2005 22:00:00	1.358,02	1.381,42
9/1/2005 23:00:00	1.281,73	1.283,90
10/1/2005	1.185,18	1.278,71

Concluído
Internet

Figura 10.4 – Dados de Previsão de Consumo

As regras operacionais atuais são inseridas no modelo, como parâmetros iniciais. O ajuste dessas regras deverá ser obtido pelo modelo otimizador.

Interface Otimizador x SCOA xPrevisional

O modelo otimizador utiliza o software *Premium Solver Platform - for use with Excel*, versão 6.0. Através da interface, é acessado o banco de dados do SCOA (banco intermediário), e retorna os dados atuais do nível do reservatório, status de bombas, vazão e consumo e preenche a planilha Excel “OTIM_SOLV”.

Essa tabela possui os dados cadastrais dos limites operacionais do reservatório, das bombas (potência e vazão) e custos unitários de energia. Os dados de previsão de consumo também são inseridos nessa tabela.

Com base nesses dados, o modelo gera uma regra de operação, ou seja, uma sequência de acionamentos de bombas para o período de 24 horas.

O modelo trabalha desconetado da base de dados SCOA, portanto, foi escrito um algoritmo, em PL/SQL, para monitoramento da operação. Este algoritmo simula a reservação, utilizando essa curva de consumo juntamente com a vazão de entrada e a reservação medidas em tempo real, para calcular um período determinado, que vai do instante atual, denominado - t_{ini} ao instante final - t_{fim} . Este instante final, a princípio, coincide com o horário de ponta. Esse algoritmo faz uma checagem simples dos volumes atuais de reservação e volumes necessários estimados para que não ocorra desabastecimento. A vazão de entrada no reservatório é recalculada para se obter o nível do reservatório e, determinar a necessidade de acionamento e desligamento das bombas.

A figura 10.5 apresenta esquematicamente o funcionamento da integração das interfaces descritas.

Figura 10.5 – Esquema integração das interfaces com os modelos.

11. RESULTADOS

A análise dos dados operacionais coletados durante o desenvolvimento deste trabalho mostrou a essencialidade dos critérios utilizados na consistência dos dados utilizados pela interface e pelos modelos.

A falta de informações cadastrais confiáveis pode gerar problemas de calibração no modelo simulador, não reproduzindo fielmente os acontecimentos em campo. O cálculo das variáveis consumo Y01 e consumo calculado Z01 merecem ser revistos e, no caso de derivações em marcha, precisam ser medidos.

O algoritmo de previsão de demandas, já implantado na operação, mostra um bom desempenho na velocidade de execução dos cálculos (utilizou-se um microcomputador Pentium 4 (1GHz) com 512 Mb RAM, sistema operacional Windows Server 2000 – servidor ORACLE), gerando valores bastante próximos aos valores de consumo calculados pelo SCOA.

A interrupção na transmissão dos dados do campo para o SCOA, por até 6 horas, não interfere significativamente na qualidade dos dados previstos, como pode ser observado na figura 11.1.

A velocidade de comunicação entre o modelo de Previsão e o SCOA é boa, a previsão de consumo, para as próximas 24 horas, para todos os reservatórios pertencentes ao SAM, é feita em até 12 minutos, checada a cada 30 minutos e recalculada a cada 3 horas.

Os dados de consumo previstos são disponibilizados em uma tabela no banco de dados Históricos em SQL. Essa tabela é importada para o modelo simulador hidráulico através da interface, (tempo de procedimento 30 segundos).

Figura 11.1 – Gráfico do consumo previsto x consumo medido do reservatório Itaim Paulista – 26/03/2005 a 31/03/2005

Para a simulação hidráulica, em tempo extensivo de 24 horas, utilizando os dados de consumo previstos em cada um dos pontos de demanda representados no modelo, as condições iniciais do SCOA (nível de reservatório, estado da bomba, vazões medidas), e os controles lógicos de operação das bombas o tempo de execução é em média de 45 minutos (tempo de processamento em um microcomputador Pentium 4 (1GHz) com 512 Mb RAM, sistema operacional Windows Server 2000).

O modelo otimizador importa os dados do SCOA e do modelo de previsão, (tempo de procedimento 30 segundos). O tempo para o modelo convergir para uma solução depende da solução inicial.

Para avaliar os resultados obtidos com o modelo operação, cabe antes considerações sobre o sistema adutor.

Para os reservatórios da RMSP, recomenda-se deixar o reservatório sempre cheio às 6:00 horas, para que esvazie gradativamente ao longo do dia, repetindo o mesmo processo no dia posterior, sempre respeitando os limites operacionais. A operação de enchimento dos reservatórios durante a madrugada, pois, neste horário, o consumo diminui significativamente facilitando a recuperação do volume de reservação. Além disso, a troca de turno dos operadores do controle – CCO/Sabesp, ocorre às 6:00 horas, então se procura entregar os reservatórios cheios neste horário, para que o próximo turno, somente gerencie o consumo durante o período diurno.

A idéia básica na definição das regras operacionais, é a maximização da utilização da capacidade de reservação de cada setor, a fim de possibilitar o acionamento dos boosteres e EEAs no menor tempo possível, fora do horário de ponta de energia elétrica (17:30 – 20:30h).

A figura 11.2 mostra um esquema hidráulico do sistema Alto Tietê.

Os volumes dos reservatórios do sistema Alto Tietê são, em média, da ordem de 10.000 m³ (variam entre 1.000 m³ e 40.000 m³). Esses reservatórios devem regularizar as vazões consumidas nos respectivos setores de distribuição, e funcionam bem, desde que adequadamente dimensionados, isto é, desde que disponham de volume útil suficiente para compensar as variações horárias de

consumo, recebendo uma vazão de entrada aproximadamente constante. Entretanto, devido à deficiência na reservação setorial, esta condição de vazão de adução constante é mera hipótese de cálculo. Na realidade, são necessários ajustes na vazão aduzida ao longo do dia para compensar grandes variações horárias de consumo.

O Sistema Alto Tietê, é abastecido através da EE de Água Bruta, retirando-se água da represa de Taiaçupeba. A água tratada é recalçada para o Sistema Alto Tietê e para o reservatório de adução – RA Taiaçupeba.

Figura 11.2 – Esquema hidráulico do sistema Alto Tietê

Fonte: Sabesp – Apresentação do MACC para o MASP 2005

As elevatórias de água bruta e de água tratada não são controláveis ou otimizáveis uma vez que todo o recurso disponível é utilizado

A EEA Santa Etelvina, recalca para os reservatórios de Santa Etelvina e Cidade Tiradentes. Esta estação foi objeto de otimização no ano de 2004 dentro de um programa de eficiência energética – ANEEL. E funciona atualmente na melhor configuração possível.

O booster Ermelino, antigo booster BAC, é um booster reversível e estratégico. Permite a transferência de água entre os sistemas Cantareira e Alto Tietê. Nos últimos 11 meses, de outubro de 2004 a setembro de 2005, devido as condições hidrológicas dos mananciais que atendem a esses sistemas produtores, esse booster encontra-se desligado.

O booster Brás Cubas foi alvo de estudo de readequação no ano de 2003. Hoje é acionado de cinco a oito horas a cada dois dias.

O booster Poá, com 4 anos de operação, localiza-se na derivação esquerda da linha de adução da ETA Taiaçupeba e abastece o Reservatório Itaquaquecetuba (que abastece a EEA Itaquaquecetuba), e o Reservatório Itaim, figura 11.3.

Figura 11.3 – Esquema hidráulico – Booster Poá

Esse booster possui 3 grupos moto-bombas. A operação atual utiliza 2 grupos funcionando em média de 20 horas por dia e o terceiro grupo 5 horas. É feito o desligamento dos 3 grupos no período de ponta de energia, das 17:30 às

20:30h, portanto esse booster não é otimizável, em relação ao custo de energia elétrica.

O reservatório de Guaianazes, é abastecido pelo booster Guaianazes, composto por 3 grupos motor bomba do booster Guaianazes Velho, somado a dois grupos, booster Guaianazes Novo, implantados em 2000. O reservatório Guaianazes tem uma boa reservação.

A EEA Itaquaquecetuba - Arujá é abastecida pelo Sistema Alto Tietê e possui 2 (dois) reservatórios semi-enterrados com capacidades para 5.000 m³ (R1) e 10.000 m³ (R2). Os reservatórios, além de servirem como poços de sucção das elevatórias, são responsáveis pelo abastecimento por gravidade da Zona Baixa de Itaquaquecetuba.

A Elevatória Velha (de 1976) é responsável pelo abastecimento em marcha da Zona Alta, com operação automática em função dos pressostatos instalados na torre da adutora de recalque. A Elevatória Nova (de 1997) abastece os Reservatórios da Vila Industrial, Pinheirinho e Arujá, e a derivação com abastecimento em marcha conhecida por THEVEAR e é controlada pelo CCO em função dos níveis dos reservatórios a jusante.

A Elevatória Nova de Itaquaquecetuba possui 3 (três) grupos iguais, sendo 2 (dois) efetivos e 1 (um) reserva. Os motores dos grupos são da marca Toshiba alimentados em 3,8 kV com potência de 850 CV. O terceiro grupo (reserva) encontra-se desativado, sem o acoplamento elástico.

A Elevatória Velha, que abastece a Zona Alta, opera em função de pressostatos na torre localizada na linha de recalque, que comandam o liga-desliga das bombas, não é objeto desse estudo.

O CCO é responsável pelo controle da operação da Elevatória Nova, bem como das válvulas telecomandadas na entrada dos Reservatórios a jusante.

Uma representação esquemática do sistema pode ser visto na figura 11.4.

Figura 11.4 – Esquema hidráulico – EEA Itaquaquacetuba - Arujá

O booster Guaianazes e a EEA Itaquaquacetuba - Arujá foram utilizadas no modelo de operação. Os resultados estão apresentados nas figuras 11.5, 11.6, 11.7 e 11.8 seguintes.

Figura 11.5 – Oscilação do nível do reservatório Guaianazes com uma operação real do booster Guaianazes – 17/04/2005.

Figura 11.6 – Oscilação do nível do reservatório Guaianazes com uma operação do booster Guaianazes fornecida pelo otimizador – 17/04/2005.

BOOSTER GUAINAZES - SGOA 009

nº de bombas			hora0	hora1	hora2	hora3	hora4	hora5	hora6	hora7	hora8	hora9	hora10	hora11	hora12	hora13	hora14	hora15	hora16	hora17	hora18	hora19	hora20	hora21	hora22	hora23
	Q(l/s)	P(kW)																								
EEA Nova	130	130	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	3	3	3	2	2	0	0	0	0	0	1
	500	160	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
nº de manobras	8	4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	nº máximo de bombas		1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	2	2	4	4	4	3	3	1	1	1	1	1	2
Vazão Bombeada (l/s)			495	495	500	505	630	505	505	505	505	510	630	630	625	775	765	770	710	720	495	495	495	500	635	
Volume Bombeado (m³)			1.782	1.782	1.800	1.818	2.268	1.818	1.818	1.818	1.818	1.836	2.268	2.268	2.250	2.790	2.754	2.772	2.556	2.592	1.782	1.782	1.782	1.800	2.286	
Ponta																										
Demanda(PS/ kW)	27.7015	8,6445	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	15,00	15,00	15,00	6,60	6,60	6,60	
Energia Ativa (PS/ kW)	0.18207	0.090967	50.47	50.47	50.98	51.49	64.24	51.49	51.49	51.49	51.49	52.00	64.24	64.24	63.73	79.02	78.00	78.51	72.40	146.94	101.02	101.02	101.02	102.04	129.59	
Custo total			57.08	57.08	57.59	58.10	70.84	58.10	58.10	58.10	58.10	58.61	70.84	70.84	70.33	85.63	84.61	85.12	79.00	161.94	116.03	116.03	107.62	108.64	136.20	
amt. constante (m)	33																									
Nível Inicial do Reservatório	3.6																									
Área do Reservatório (m²)	1733																									
Vol min																										
Vol max																										
Volume Acumulado (m³)	866.5	14037	95	257	412	1.048	698	598	581	380	(148)	(239)	(639)	(844)	(310)	(257)	(94)	(144)	108	(544)	(544)	(506)	(374)	(274)	295	
			0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
Nível min			8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	
Nível max			8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	
Nível do Reservatório	0.5	8.1	3.64	3.74	3.94	4.23	4.76	5.20	5.49	5.78	5.83	5.54	5.25	4.81	4.37	3.99	3.94	3.89	3.89	4.03	3.99	3.64	3.45	3.30	3.16	
Volume no Reservatório			6.239	6.334	6.592	7.004	8.051	8.750	9.347	9.929	10.309	10.161	9.922	9.283	8.438	8.129	7.871	7.718	7.634	7.742	7.198	6.624	6.118	5.744	5.470	
Volume Previsto (m³)			1.687	1.543	1.406	1.220	1.120	1.220	1.237	1.438	1.984	2.507	2.907	3.094	3.100	3.011	2.866	2.700	2.484	2.326	2.356	2.288	2.156	2.074	1.991	
Consumo Previsto (l/s)			491	446	411	370	308	314	364	323	476	626	767	848	871	851	822	770	730	650	642	604	594	558	548	

Custo Diário 2.001

Codificação por cores

Figura 11.7 – Guaianazes OPERAÇÃO REAL

BOOSTER GUAÍNAZES - SCAA 009

nº de bombas		hora0																							
	Q(l/s)	hora1	hora2	hora3	hora4	hora5	hora6	hora7	hora8	hora9	hora10	hora11	hora12	hora13	hora14	hora15	hora16	hora17	hora18	hora19	hora20	hora21	hora22	hora23	
EEA Velha	130	0	0	2	3	2	3	3	1	3	0	3	2	2	3	3	3	0	0	0	0	2	2	3	
EEA Nova	500	160	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	
nº de manobras	8	9	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	
nº máximo de bombas		0	1	3	3	3	4	4	3	1	3	1	4	3	3	4	4	0	0	1	0	3	3	4	
Vazão Bombeada (l/s)		495	500	760	390	760	773	773	390	130	390	500	773	760	760	773	773	773	0	0	500	0	760	760	
Volume Bombeado (m³)		1.782	1.800	2.736	1.404	2.736	2.783	2.783	1.404	468	1.404	1.800	2.783	2.736	2.736	2.783	2.783	2.783	0	0	1.800	0	2.736	2.736	
Ponta																									
Demanda(RS kW)	27.7015	6.60	6.60	6.60	6.60	6.60	6.60	6.60	6.60	6.60	6.60	6.60	6.60	6.60	6.60	6.60	6.60	6.60	15.00	15.00	15.00	6.60	6.60	6.60	
Energia Ativa (RS kWh)	0.090967	50.47	50.98	77.49	39.77	77.49	78.82	78.82	39.77	13.26	39.77	50.98	78.82	77.49	77.49	78.82	78.82	78.82	0.00	0.00	102.04	0.00	77.49	78.82	
Custo total		50.69	57.59	84.10	46.37	84.10	85.42	85.42	46.37	19.86	46.37	57.59	85.42	84.10	84.10	85.42	85.42	85.42	15.00	15.00	117.05	15.00	84.10	85.42	
ant. constante (m)	33																								
Nível Inicial do Reservatório	3.6																								
Área do Reservatório (m²)	1733																								
Vol min																									
Volume Acumulado (m³)	2079.6	13517	113	1.193	(2)	1.516	1.563	1.562	1.67	(9.70)	(590)	(707)	(124)	(358)	(344)	(229)	(63)	83	(2.484)	(2.326)	(556)	(2.288)	580	662	
Nível min			0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
Nível max			8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	
Nível do Reservatório	1.2	7.8	3.60	3.67	4.35	4.35	5.23	6.19	7.09	7.19	6.63	6.29	5.88	5.81	5.60	5.39	5.26	5.22	5.26	3.83	2.49	2.17	0.85	1.18	
Volume no Reservatório			6.239	6.352	7.346	7.344	9.059	10.723	12.285	12.452	11.482	10.903	10.195	10.071	9.713	9.349	9.121	9.038	9.121	6.637	4.311	3.755	1.467	2.047	
Volume Previsto (m³)			1.687	1.543	1.406	1.220	1.120	1.220	1.237	1.438	1.984	2.507	2.907	3.094	3.100	3.011	2.866	2.700	2.484	2.326	2.356	2.288	2.156	2.074	
Consumo Previsto (l/s)			491	446	411	370	308	314	364	323	476	626	767	848	871	851	822	770	730	650	642	604	594	558	

MIN (Custo): F.O. 1.589 custo mensal \$ 47.682.92

Especificações do problema

Célula de destino E30 O objetivo é minimizar custos de energia elétrica.

Células variáveis D6:AA7 Número de Bombas ligadas.

Restrições E16:AA20>=0 vazão bombeada não pode ser negativa

D9:AA10<=4 número máximo de bombas que podem ser ligadas

B23:AA238>=B23 nível >= nível mínimo

B23:AA238<=C23 nível <= nível máximo

C8 <=B8 número máximo de acionamentos

Codificação por cores

Célula de destino
 Células variáveis
 Restrições
 Condição Inicial

Figura 11.8 – Guaianazes OPERAÇÃO OTIMIZADA

Observa-se que, no booster Guaianazes o modelo otimizador encontrou uma solução factível com um custo menor de energia elétrica. A operação real apresentou custo de \$ 2.001 e o modelo de otimização \$1.589, uma redução de 25%. Esse resultado foi obtido através da melhor utilização da capacidade do reservatório, diminuindo o tempo de utilização das bombas no horário de ponta, onde o custo da energia elétrica é o dobro do preço.

Nota-se também que o número de acionamentos de bombas aumentou. A função objetivo utilizada no otimizador considera o número de acionamentos como uma das restrições.

As figuras 11.9 a 11.13 mostram os resultados da aplicação do modelo na EEA Itaquaquecetuba – Arujá.

Figura 11.9 – Oscilação dos reservatórios Itaquaquecetuba, Arujá, Vila Industrial e Pinheirinho com uma operação real da EEA Itaquaquecetuba – Arujá e do booster Poá – 17/04/2005.

EEA ITAQUAQUECETUBA - ARUJÁ - SCOA 096

	hora0	hora1	hora2	hora3	hora4	hora5	hora6	hora7	hora8	hora9	hora10	hora11	hora12	hora13	hora14	hora15	hora16	hora17	hora18	hora19	hora20	hora21	hora22	hora23
nº de bombas																								
Q(s)																								
P(kW)																								
806	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1
720	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
750	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
nº de manobras	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0
nº máximo de bombas	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	0	1	1	1	2	2	1
Vazão Bombeada (l/s)	1125	1095	713	713	720	720	728	750	750	758	1193	1193	1185	1170	735	1163	1148	8	735	735	1103	1088	713	728
Volume Bombeado (m³)	4050	3942	2567	2567	2592	2592	2621	2700	2700	2719	4295	4295	4266	4212	2646	4187	4133	29	2646	2646	3917	3917	2567	2621
Velocidade Bombeada (m/s)	4.680	4.752	4.824	4.896	4.716	4.788	4.788	3.492	3.456	3.600	4.176	4.176	4.140	5.580	5.508	5.436	5.136	5.472	4.608	4.572	4.608	4.444	4.320	4.392
Velocidade Bombeada pelo booster Pos(m³)	630	810	2257	2329	2124	2196	2167	792	756	871	(119)	(119)	(126)	1368	2862	1249	1303	5,443	1,962	1,926	637	727	1,753	1,771
Ponta																								
Demandas(RS/kW)	37.12	37.12	37.12	37.12	37.12	37.12	37.12	37.12	37.12	37.12	37.12	37.12	37.12	37.12	37.12	37.12	37.12	88.29	88.29	88.29	88.29	37.12	37.12	37.12
Energia Alivada (RS/kW)	258.34	251.45	163.73	163.73	165.34	165.34	167.17	172.23	172.23	174.06	273.95	273.95	272.12	268.67	168.78	267.07	263.62	3.60	330.62	330.62	496.15	489.40	320.72	327.47
Custo total	295.46	288.57	200.85	200.85	202.45	202.45	204.29	209.34	209.34	211.18	311.07	311.07	309.23	305.79	205.90	304.18	300.74	91.89	418.91	418.91	584.44	526.52	357.84	364.59
amt constante (m)																								
Nível inicial do Reservatório	38																							
Área do Reservatório (m²)																								
Volume Acumulado (m³)																								
Nível do Reservatório																								
liqüação/cubeta																								
Água																								
Pineirão																								
Vila Industrial																								
derivação Thevear																								
Volume no Reservatório																								
liqüação/cubeta																								
Água																								
Pineirão																								
Vila Industrial																								
Consumo Previsto (l/s)																								
liqüação/cubeta																								
Água																								
Pineirão																								
Vila Industrial																								
Consumo Previsto (l/s)																								
liqüação/cubeta																								
Água																								
Pineirão																								
Vila Industrial																								

Figura 11.10 – EEA Itaquaquetuba – Arujá - OPERAÇÃO REAL

Figura 11.11 – Volume bombeado pelo booster Poá e pela EEA Itaquaquecetuba - Arujá - Operação REAL

Figura 11.12 – Volume bombeado pelo booster Poá e pela EEA Itaquaquecetuba - Arujá - Operação OTIMIZADA

FEA ITAQUAQUECETUBA - ARUJÁ - SCOA 096

		hora0	hora1	hora2	hora3	hora4	hora5	hora6	hora7	hora8	hora9	hora10	hora11	hora12	hora13	hora14	hora15	hora16	hora17	hora18	hora19	hora20	hora21	hora22	hora23
nº de bombas	Q (l/s)																								
	806	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0,98611
	807	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1
nº de mandras	8	3																							
nº máximo de bombas		0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	1	1	1
Vazão Bombeada (l/s)	1125	1152	1152	1152	1152	1152	1152	1152	1152	1152	1152	1152	1152	1152	1152	1152	1152	1152	1152	824	830	1152	828	814	791
Volume Bombeado (m³)	4050	4147	4147	4147	4147	4147	4147	4147	4147	4147	4147	4147	4147	4147	4147	4147	4147	4147	3786	2968	2968	4147	2979	2929	2848
Volume Médio Bombeado pelo booster Pq(m³)	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500
derivação Thevat + Borsucasso		567	567	567	567	567	567	567	567	567	567	567	567	567	567	567	567	567	567	567	567	567	567	567	567
Ponta																									
Fora de Ponta																									
Demandat(RS/kW)	28.254	3712	3712	3712	3712	3712	3712	3712	3712	3712	3712	3712	3712	3712	3712	3712	3712	3712	8829	8829	8829	3712	3712	3712	3712
Energia Aliva (RS/kW)	0.200651	258.34	264.54	264.54	264.54	264.54	264.54	264.54	264.54	264.54	264.54	264.54	264.54	264.54	264.54	264.54	264.54	264.54	370.88	373.35	373.35	518.19	372.23	365.93	355.81
Custo total	295.46	301.66	301.66	301.66	301.66	301.66	301.66	301.66	301.66	301.66	301.66	301.66	301.66	301.66	301.66	301.66	301.66	301.66	459.17	461.64	461.64	409.34	403.04	392.92	
amt. constante (m)	66																								
Nível Inicial do Reservatório	3.8																								
Área do Reservatório (m²)	1733																								
Volume Acumulado (m³)	Vol min																								
Itaquaquecetuba	1733	87	109	121	116	111	85	108	40	40	40	133	236	250	315	295	262	134	253	1088	1101	46	1140	1215	1324
Arujá																									
Pinhelinho																									
Vila Industrial																									
Nível max	Nível min																								
Itaquaquecetuba	1.0	37.6	3.81	3.86	3.93	3.99	4.05	4.10	4.15	4.18	4.16	4.08	3.97	3.84	3.67	3.51	3.37	3.30	3.44	4.02	4.61	4.58	5.19	5.85	6.56
Arujá	1.5	2.54																							
Pinhelinho	0.5	2.71																							
Vila Industrial	1.0	2.41																							
Volume no Reservatório	Área																								
Itaquaquecetuba	1187	7020	7107	7216	7336	7452	7563	7648	7756	7795	7759	7626	7420	7170	6854	6539	6297	6163	6415	7503	8504	8559	9699	10914	12239
Arujá	1167	2964	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pinhelinho	83	447	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Vila Industrial	668	1610	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
total		5021	6690	8351	10004	11584	13172	14750	16262	17623	18759	19697	20499	21228	21972	22793	23707	24764	25557	25557	26696	26696	26696	26696	26696
Volume Previsto (m³)																									
Itaquaquecetuba		1174	918	857	844	862	918	923	1004	1264	1575	1881	2092	2288	2369	2273	1984	1706	1629	1539	1456	1402	1327	1231	
Arujá		457	425	360	340	389	427	490	590	745	875	963	1006	990	941	893	788	700	688	716	733	698	657	603	
Pinhelinho		0	0	7	13	13	14	20	32	47	58	63	85	104	104	106	106	103	81	59	56	49	40	34	
Vila Industrial		0	0	0	86	153	117	86	85	122	178	236	277	286	268	299	393	355	149	158	171	178	191	191	169
derivação Thevat + Borsucasso		2498	2466	2495	2567	2560	2569	2635	2786	3071	3299	3344	3344	3418	3404	3326	3233	3091	2993	2968	3008	2979	2929	2848	
Consumo Previsto (l/s)																									
Itaquaquecetuba		386	246	244	232	237	242	268	245	313	389	486	559	603	668	648	615	487	461	444	411	398	381	356	328
Arujá		127	127	109	91	109	107	130	142	186	228	258	277	282	268	255	241	197	192	190	208	199	199	176	159
Pinhelinho		0	0	0	4	3	4	4	7	11	15	17	18	29	29	29	30	29	28	17	16	15	12	10	9
Vila Industrial		0	0	0	48	37	28	20	27	41	58	73	81	78	71	62	45	41	42	46	49	50	56	50	44

MN (Custo): F.O.

8416

edificação por cores

Cálculo de destino

Cálculos variáveis

Restrições

Condição Inicial

Figura 11.13 – EEA Itaquaquecetuba – Arujá - OPERAÇÃO OTIMIZADA

Neste caso, observa-se que a suposição de que a vazão de bombeamento do booster Poá seja constante, introduzida no modelo, gera uma operação com um custo 18% maior que o verificado na operação real (figura 11.13), e uma operação mais constante na EEA Itaquaquecetuba – Arujá.

No caso da EEA Itaquaquecetuba, fica evidente que a otimização passa por adequações físicas como a duplicação da adutora entre o trecho da derivação do SAM para Itaim até o reservatório de Itaquaquecetuba. As condições do sistema são controláveis, pois pode-se reduzir a vazão de entrada dos reservatórios, porém não são otimizáveis, pois não se pode aumentar a vazão aduzida para os reservatórios Itaim e Itaquaquecetuba.

12. CONCLUSÕES

Através do modelo desenvolvido foi possível implantar um modelo de operação para o planejamento da operação diária de um sistema urbano de abastecimento de água. A estrutura proposta permitiu integrar um sistema SCADA com um modelo simulador hidráulico, um modelo de previsão de demandas de água e um modelo de otimização. Este trabalho de pesquisa conseguiu viabilizar a implantação de um modelo de operação nas condições do Centro de Controle Operacional da Sabesp.

Devido à natureza do problema físico e do grau de complexidade do equacionamento do problema, optou-se por utilizar ferramentas de uso simples, mas não menos eficazes para aplicação ao problema, sendo escolhida a programação linear como módulo de otimização, o WaterCad como módulo de simulação hidráulica e o modelo de previsão de demandas baseado em série de Fourier como módulo de previsão.

A utilização de um modelo de otimização num estudo de caso apontou que este é um caminho a ser seguido, considerando que há de se preocupar com os tempos totais de processamento gastos na solução das regras operacionais. A análise de simulação hidráulica de diversos cenários de forma manual é obtida de forma consideravelmente rápida, entretanto, deve-se entender que na busca por soluções para sistemas de abastecimento que possuem vários reservatórios há a necessidade de resultados mais rápidos e simultâneos que só podem ser possíveis de forma automática.

A interface desenvolvida permitiu a integração entre os diversos sistemas SCADA, modelo de previsão de demanda de água, modelo de simulação hidráulica e modelo de otimização possibilitando o armazenamento, consulta e otimização, com resultados de visualização gráfica. A construção dessa ferramenta automatiza uma metodologia que permite a estabilidade na qualidade da operação de abastecimento quando comparada às condições de operação ocorridas na forma empírica, com regras baseadas na experiência dos operadores. Em situações de emergências, esse fator é ainda mais relevante, uma vez que as ponderações humanas ficam sujeitas a estresse sob a pressão do momento.

As simulações em regime permanente, utilizando-se o software de simulação hidráulica WaterCad integrado aos dados do SCOA, conferem agilidade ao processo de calibração da rede e de consistência dos dados, propiciando uma maior rapidez na análise de alternativas (obras novas, reabilitação de redes, readequação de equipamentos) e o planejamento de médio (anual) e longo (quinquênais ou maiores) prazo.

A execução das simulações no modelo WaterCad, utilizando as interfaces com os demais modelos torna a operação lenta. É necessário o desenvolvimento de um modelo de simulação personalizado (algoritmo de cálculo integrado com o otimizador) para que o processo se torne mais ágil.

O modelo otimizador desenvolvido nem sempre apresentou resultados factíveis. Isso decorre do fato do modelo otimizador utilizado não incluir todas as restrições hidráulicas reais. Assim, deixa-se aberto a possibilidade de outros modelos que possam atingir melhores resultados.

O estudo de caso confirmou a obtenção de ganhos operacionais no que diz respeito ao custo de energia elétrica. A duração do processo é compatível com a rapidez e confiabilidades necessárias a tomada de decisão na operação em tempo real.

A necessidade de avaliação se o sistema em estudo é controlável e otimizável ficou evidente. Não é necessário incluir todos os pontos do sistema para otimizá-lo. As mudanças que ocorrem na topologia do sistema refletem em sua dinâmica de operação, o que pode e deve levar a uma alteração da função objetivo de otimização incluindo os resultados e novos pontos do sistema.

A princípio, havia muito ceticismo com relação à viabilidade de um sistema mais automatizado do que o atual. Com a implantação do modelo previsional de demandas notou-se por um lado, uma maior confiança nos modelos propostos, mas por outro lado, observou-se alguma resistência dos operadores por suspeitarem da possibilidade de serem substituídos. Após um período em contato com o sistema, houve um amadurecimento da equipe de operação a ponto de concluírem que a automação do processo será sempre uma ferramenta de apoio à decisão mas que não prescinde da presença e da experiência dos operadores.

O modelo de previsão de consumo está implantado e em fase de teste no centro de controle operacional.

A implantação de um novo modelo operacional baseado em técnicas matemáticas exige um prazo longo de desenvolvimento e a participação de muitos profissionais envolvidos. No caso específico do sistema analisado, os primeiros estudos voltados a esta proposta remontam a mais de 20 anos. Foram necessários os desenvolvimentos de bases cadastrais confiáveis, bancos de dados robustos

para armazenamento dos dados operacionais, modelos matemáticos de simulação hidráulica, previsão de consumos, otimização em tempo real e interfaces entre eles.

O presente trabalho contribui com mais um passo essa meta de automatização, mas de forma alguma encerra o processo. Ainda são necessários muitos esforços e envolvimento das equipes para a continuidade das melhorias esperadas.

A evolução da tecnologia tem permitido maior ousadia na busca desse novo modelo de operação devido às facilidades computacionais, novos sistemas de transmissão de dados e “inteligência local” nos pontos controláveis, certamente pode-se esperar desenvolvimentos ainda maiores que permitiram atingir esta nova forma de operar em um prazo mais curto do que se possa prever atualmente.

13. PROPOSIÇÕES

Como seqüência à aplicação e desenvolvimento deste trabalho destacam-se alguns pontos a serem estudados:

a) a aplicação de um outro módulo de otimização substituindo o módulo de otimização linear iterativo aplicado no trabalho;

b) a busca de novas funções objetivo, para uma melhor compreensão sobre os objetivos operacionais considerados. Seria interessante tornar o equacionamento multiobjetivo;

c) o desenvolvimento de um módulo de simulação hidráulica sem a interface gráfica, apenas o módulo de cálculo de redes, para diminuir o tempo de processamento;

d) pesquisar o horizonte de planejamento da operação em tempo real adequado à hora do dia;

e) estudar a melhor alternativa entre a otimização de um sistema complexo de forma única ou a otimização parcial de partes desse sistema;

f) investigar a possibilidade desenvolvimento de rotinas de detecção de pontos controláveis e otimizáveis no sistema. Isto permitirá a exclusão de alguns pontos da função objetivo e sua inclusão em equações de restrição, podendo tornar mais ágil o processo de busca da solução ótima.

14. BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA, R., Operação de Sistemas Urbanos de Abastecimento de Água com Base em Modelos de Otimização Não-Lineares, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP, 2001, 281 p.
- BISCOS C., MULHOLLAND M., LE LANN M.V., BROUCKAERT C.J., BAILEY R. and ROUSTAN M. Optimal operation of potable water distribution network. Water Science and Technology, Vol 46, no 9 p.155-162, 2002.
- BISCOS C., MULHOLLAND M., LE LANN M.V., BUCKLEY, C.A. and BROUCKAERT C.J., Optimal operation of water distribution networks by predictive control using MINLP, Water Science and Technology Vol. 29 No. 4 October 2003. <http://www.wrc.org.za>
- BORGES, V.M.N.A; Acoplamento de um Modelo de Previsão de Demanda de Água a um Modelo Simulador em Tempo Reals – Estudo de Caso: Sistema Adutor Metropolitano de São Paulo, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da USP. 2003, 232p.
- BOULOS, P.F., WU Z., ORR C.H. MOORE, M.R., HSIUNG P., THOMAS D.; Optimal Pump Operation of Water Distribution Systems Using Genetic Algorithms, In Proceedings of the AWWADistribution System Symposium, San Diego, Ca, September pp. 23-26, 2001.
- CABRERA, E.; Uso Eficiente del Agua. Directrices Y Herramientas (Efficient Use Rationale On Water. Guidelines and Tools). EURO water. Valencia, Espanha. Septiembre, 1997.

- CARRIJO, I.B.; Extração de regras operacionais ótimas de sistemas de distribuição de água através de algoritmos genéticos multiobjetivo e aprendizado de máquina , Tese de Doutorado , Escola de Engenharia de São Carlos da USP. 2005, 217p.
- CEMBRANO, G., WELLS, G., QUEVEDO, J., PÉREZ, R. and ARGELAGUET, R.; Optimal Control of a Water Distribution Network in a Supervisory Control System; Control Engineering Practice, Vol. 8, pp. 1177-1188, 2000.
- CIPARRONE, F.A.M.; Otimização do Controle Operacional de Sistemas Hidráulicos Complexos. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da USP. 100p.
- CLINGENPEEL, W. H.; Optimizing Pump Operating Cost, Journal of American Water Works Association, Vol. 75 No.10, p. 502-509. 1983.
- COSTA A.L.H., DE MEDEIROS J.L., PESSOA F.L.P.; Global Optimization of Water Distribution Networks through a Reduced Space Branch-and-Bound Search, Water Resources Research, Vol. 37, No. 4, pp. 1083-1090, 2001.
- CROMMELYNCK, V.; DUQUESNE, C.; MERCIER, M.; MINIUSSI, C. Daily and Hourly Water Consumption Forecasting Tools Using Neural Networks. Computer Conference. American Water Works Association. 1992.
- CUNHA M.D., SOUSA J., Water Distribution Network Design Optimization: Simulated Annealing Approach Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE, Vol.125, No. 4, pp. 215-221. 1999.
- DIBA, A.; LOUIE, P.W.F.; MAHJOUR, M.; YEH, W. W-G, Planned Operation of Large-Scale Water-Distribution System, Journal of Water Resources Planning and Management, p. 260-269, mai/jun 1995.

- FIGUEIREDO FERRAZ. Concepção e desenvolvimento do modelo previsional de demandas em função de temperaturas, hora e dia da semana na Região Metropolitana de São Paulo. Contrato 036/85. 1985.
- FRANCATO, A.L.; Otimização Multiobjetivo para a Operação de Sistemas Urbanos de Abastecimento de Água, Tese de doutorado, Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP, 2002, 182 p.
- FRANCATO, A.L., BARBOSA, P.S.F.; Operação Ótima de Sistemas Urbanos de Abastecimento de Água. In: XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Águas de Lindóia, São Paulo - Anais, 1999.
- GAMBALE, S. R.; Aplicação de Algoritmo Genético na Calibração de Redes de Água. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da USP. 2000, 266p.
- GAMS; The solver manuals. Washington, DC: GAMS Development Corporation, 1997.
- GOULTER, I.C.; System Analysis in Water-Distribution Network Design: From Theory to Practice, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 118 No. 2, p. 238-248, 1992.
- GOLDBARG, M.C.; LUNA, R.P.L.; Otimização Combinatória e Programação Linear – Modelos e Algoritmos. Editora Campus. Ed.2000.
- Greco, M., WATERNET simulation users manual. Technical report WATERNET Project, ESPRIT-IV No. 22186. 1997.
- HASSEGAWA, C.M.; ZAHED FILHO, K.; VICENTE, Rosmeiry V. Caracterização dos perfis de consumo da região metropolitana de São Paulo. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, 1999.

ILICH, N.; SIMONOVIC, S. P. Evolutionary algorithm for minimization of pumping cost. Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, Vol. 12, No. 4, p.232-240, 1998.

INTRAGOV. Material divulgado pela Internet, 2005 - <http://www.intragov.sp.gov.br>
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas; Modelos de Previsão de Consumo a Tempo Real na Adução, Relatório Técnico No. 64130, ref. Contrato No.10.038/02 – Sabesp, 2003.

JAIN, A.; ORMSBEE, L. Evaluation of Short Term Forecast Modeling for Municipal Water Use. Computer Conference. American Water Works Association. 1992.

LÉON, C.; MARTÍN, S.; ELENA, J.M. AND LUQUE, J. EXPLORE – Hybrid Expert System for Water Networks Management, Journal of Water Resources Planning and Management, p. 65- 74, mar/abr 2000.

LERTPALANGSUNTI, N.; CHAN, C. W.; MASON, R.; TONTIWACHWUTHIKUL, P. A toolset for construction of hybrid intelligent forecasting systems: application for water demand prediction. Artificial Intelligence in Engineering, Vol. 13, No. 1, p.21-42, 1999.

LIPPAI, I.; HEANEY, J. P.; LAGUNA, M. Robust water system design with commercial intelligent search optimizers. Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, Vol. 13, No. 3, p.135-143, 1999.

MONTESINOS P., GARCIA-GUZMAN A., AYUSO J.L.; Water Distribution Network Optimization Using a Modified Genetic Algorithm, Water Resources Research, Vol. 35, No. 11, pp. 3467-3473. 1999

ORMSBEE, L. E., LANSEY, K. E.; Optimal Control of Water Supply Pumping Systems, Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 120, n. 2, p.237-252, 1994.

- OSHIMA, N.; KOSUDA, T. Distribution reservoir control with demand prediction using deterministic-chaos method. Water Science and Technology, Vol. 37, No. 12, p.389-395, 1998.
- POWADIMA - POTABLE WATER DISTRIBUTION MANAGEMENT, European Commision Fifth Framework rtd Programme, 2003.
<http://www.ncl.ac.uk/powadima/index.html>
- RIGHETTO, A.M.; Operação Ótima de Sistema Urbano de Distribuição de Água. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Aracajú, Sergipe, 2001.
http://www.lrh.ct.ufpb.br/serea/trabalhos/A23_05.pdf
- SABESP. Curva de consumo nos setores na Região Metropolitana de São Paulo. Relatório Técnico APDA. 1999.
- SABESP(b). Definição de regras operacionais para redução de custos de energia elétrica. Relatório Técnico AAOE. 1999.
- SABESP. Situação dos setores de abastecimento críticos e super críticos. Relatório Técnico AAOE 009/01. 2001.
- SABESP. Diagnóstico energético EEAT Itaquaquecetuba e booster SAM Leste. Termo de convênio nº045/2002 – Programa de combate ao desperdício da ANEEL rev.2. 2003.
- SABESP. Análise do Processo de Automação para a Otimização da Operação do Sistema de Abastecimento de Água da RMSP. Parecer Técnico TACC 014/04. 2004.
- SABESP(a). Contratação de Solução Tecnológica para o Controle Operacional de Abastecimento de Água da RMSP, compreendendo o Fornecimento de

Plataforma de Software e Hardware e Serviços, integrada com Projeto GIS Sabesp, Termo de Referência, 2004.

SABESP(b). Material divulgado pela Internet, 2004. www.sabesp.com.br.

SABESP(c). Revisão e Atualização do Plano Diretor do Abastecimento de Água da RMSP, Superintendência de Planejamento Técnico Integrado – TP/Sabesp, 2004.

SABESP(d). Uso Consciente da Energia Elétrica - operação otimizada do sistema de abastecimento com a redução de despesas com energia elétrica. Departamento de Gestão de Energia – TME/TM, 2004.

SANTANA, G.C., SOARES, S.; Optimization Model for Water Distribution Systems Design, In: FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON HYDRAULIC ENGINEERING SOFTWARE, p. 299-307, 1992.

SAVIC A.D., WALTERS G.A., ATKINSON R.M.; Genetic Algorithm Optimization of Large Water Distribution System Expansion, Measurement & Control, Vol. 32, No. 4, pp. 104-109. 1999.

SHIN H.G., PARK H.; An Optimal Design of Water Distribution Networks with Hydraulic-Connectivity, Journal of Water Services Research and Technology, Vol. 49, No. 4, pp. 219-227. 2000.

SILVA, C.S. E BARBOSA, P.S.F.; Algoritmo do Gradiente Conjugado Escalonado em RNA para a Previsão do Consumo Horário de Água em Sistemas de Abastecimento. In: SEMINÁRIO - Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água: O Estado da Arte e Questões Avançadas, 2002, João Pessoa-PB. Anais ... http://www.lrh.ct.ufpb.br/serea/trabalhos/A02_09.pdf

- SIMONOVIC, S.P., Last Resort Algorithms for Optimization of Water Resources System, Canadian Operational Research Society - CORS Bulletin, Vol. 34 No 1 fev/2000. http://www.cors.ca/bulletin/v34n1_1.pdf
- STRUS, C. A.; DZIEGIELEWSKI, B. Water Demand Planning with IWR-MAIN Version 6.0. Computer Conference. American Water Works Association. 1992.
- TAHA, H.A.; Operations Research: An Introduction. Fourth Edition. Macmillan Publishing Company. 876p. New York. 1987.
- USEPA. EPANET 2.0. Material divulgado pela Internet, 2004 – <http://www.dha.lnec.pt/nes/epanet/>
- VILAS, N.; SADOWSKI, E.C. AND QUIMPO, R.G. Optimization of water supply system operation, Journal of water resources planning and management, p. 374-384, set/out 1996.
- VENTURINI, M.A.A.G.; Contribuição ao Estudo de Otimização de Redes Hidráulicas através de um Modelo de Programação Linear, Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, 1997. 97p.
- WALSKI, T. M.; BRILL Jr., E. D.; GESSLER, J.; GOULTER, I. C.; JEPPSON, R. M.; LANSEY, K.; LEE, H.; LIEBMAN, J. C.; MAYS, L.; MORGAN, D. R.; ORMSBEE, L. Battle of the network models: epilogue. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, Vol. 113, No. 2, p.191-203,1987.
- WALSKI, T. M.; CHASE, D. V.; SAVIC, D. A. Water distribution modeling. Haestad Methods. First edition. 2001.
- WATERNET PROJECT ESPRIT-IV No. 22186; Knowledge capture for advanced supervision of water distribution networks, Water Resources Management 14: 349–368, 2000. (© 2001 Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.349). <http://www.cordis.lu/esprit/src/22186.htm>

- WILLIAMS, M.F.; COULBECK, B. Dynamic modeling and control optimization in the development of the Wolverhampton water supply and distribution system. Water Pollution Control. Vol.86, n°. 2, p.272-291, 1987.
- WU Z.Y., SIMPSON A.R.; Competent Genetic-Evolutionary Optimization of Water Distribution Systems, Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 15, No. 2, pp. 89- 101. 2001.
- XU C.C., GOULTER I.C.; Reliability-Based Optimal Design of Water Distribution Networks, Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE, Vol. 125, No. 6, pp. 352-362. 1999.
- ZOPPOU C., REED M.; Water Distribution Network Design Optimization: Simulated Annealing Approach – Discussion, Journal of Water Resources Planning and Management- ASCE, Vol. 127, No. 1, pp. 69-70. 2001.
- ZAHED FILHO, K. Previsão de demanda de consumo em tempo real no desenvolvimento operacional de sistemas de distribuição de água. Tese de doutorado, Escola Politécnica da USP. 1990, 135p.
- ZAHED FILHO, K. Comunicação pessoal. 2005
- ZEKAI ,SEN and MIKDAT KADIO~ GLU, Simple Daily Dynamic Adaptive Operation Rules for Water Resources Optimization, Water Resources Management, 2000.
- ZHOU, S. L.; MC MAHON, T. A.; WALTON, A.; LEWIS, J. Forecasting daily urban demand: a case study of Melbourne. Journal of Hydrology, ASCE, Vol. 236, p.153-164, 2000.