



UFBA

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI**

DOUTORADO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

ALEXANDRE MAGNO FERREIRA DINIZ

**Modelagem em Regime Transitório, Simulação e
Otimização Energética de um Sistema de
Abastecimento de Água Baseado no
Reconhecimento de Padrões de Consumo**



**SALVADOR
2014**

ALEXANDRE MAGNO FERREIRA DINIZ

**MODELAGEM EM REGIME TRANSITÓRIO, SIMULAÇÃO E
OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE
ÁGUA BASEADO NO RECONHECIMENTO DE PADRÕES DE CONSUMO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Industrial.

Orientadores:

Prof. Dr. Cristiano Hora de Oliveira Fontes

Prof. Dr. Caiuby Alves da Costa

Salvador
2014

D585 Diniz, Alexandre Magno Ferreira.
Modelagem em regime transitório, simulação e
otimização energética de um sistema de abastecimento de
água baseado no reconhecimento de padrões de consumo /
Alexandre Magno Ferreira Diniz. – Salvador, 2014.
150 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Hora de Oliveira Fontes.
Co-orientador: Prof. Dr. Caiuby Alves da Costa.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Bahia.
Escola Politécnica, 2014.

1. Abastecimento de água. 2. Modelagem. 3. Eficiência
energética. I. Fontes, Cristiano Hora de Oliveira. II. Costa,
Caiuby Alves da. III. Universidade Federal da Bahia. IV.
Título.


CDD: 628.144

**MODELAGEM EM REGIME TRANSITÓRIO, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO
ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA BASEADO NO
RECONHECIMENTO DE PADRÕES DE CONSUMO**

ALEXANDRE MAGNO FERREIRA DINIZ

Tese submetida ao corpo docente do programa de pós-graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de doutor em Engenharia Industrial.

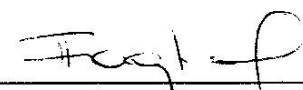
Examinada por:

Prof. Cristiano Hora de Oliveira Fontes 
Doutor em Engenharia Química, Brasil, 2001;

Prof. Caiuby Alves da Costa 
Doutor em Engenharia Eletrônica, França, 1983;

Prof. Carlos Arthur Mattos Teixeira Cavalcante 
Doutor em Engenharia de Produção, Brasil, 1999;

Prof. André Luiz de Carvalho Valente 
Doutor em Engenharia Elétrica, Brasil, 1997;

Prof. Flávio Sanson Fogliatto 
Doutor em Engenharia Industrial e de Sistema, Estados Unidos, 1997;

Prof. Luís Mauro Moura 
Doutor em Engenharia Térmica e Energética, França, 1998;

Salvador, BA - BRASIL
Outubro/2014

Conforme resolução do Programa, o conjunto de orientadores teve a representação de 1 (um) único voto no parecer final da banca examinadora.

AGRADECIMENTOS

A Deus e a Nossa Senhora do Perpétuo Socorro, pelo dom da vida.

À minha esposa, Ângela, pela compreensão.

Aos meus filhos, Marina e Mateus, pela compreensão da minha ausência.

Aos meus pais, Bento e Loló, pelos ensinamentos na minha formação pessoal.

Aos meus orientadores, Cristiano Hora de Oliveira Fontes e Caiuby Alves da Costa, pelo apoio, ensinamentos e acompanhamento desta tese de doutorado.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA) Campus Camaçari pelo apoio e incentivo para a realização deste curso de pós-graduação.

A Empresa Baiana de Águas e Saneamento (EMBASA) que permitiu o acesso as suas unidades de negócios em Salvador, e disponibilizou os dados para a concretização deste trabalho de pesquisa.

A todos os professores e funcionários do PEI que de forma direta ou indireta contribuirão para a realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise de um sistema de abastecimento de água contemplando-se as atividades de modelagem em regime transitório, otimização baseada na minimização do consumo de energia elétrica e reconhecimento de perfis de demanda. O estudo de caso envolve um segmento do sistema de abastecimento e distribuição de água da cidade de Salvador (Brasil) e a análise é focada na estação de bombeamento, linha adutora principal e reservatórios de distribuição de água. Como geralmente ocorre em sistemas análogos, a operação atual do sistema de bombeamento é realizada através de regras heurísticas baseadas no conhecimento de especialistas no processo de bombeamento e o controle da vazão de descarga das bombas é essencialmente do tipo liga/desliga. Neste contexto, o uso de conversores de frequência associado a uma abordagem sistêmica de otimização e predição de demanda pode representar um significativo potencial de melhoria na eficiência energética. A estratégia de otimização proposta determina a velocidade de rotação de bombas ao longo de um ciclo de trabalho de modo a assegurar um volume adequado de água no reservatório de distribuição e o devido atendimento à demanda horária de consumo. O modelo matemático desenvolvido possui um caráter genérico e permite realizar uma análise cuidadosa do sistema de abastecimento de água viabilizando também uma primeira avaliação de benefícios decorrentes do uso de bombas com rotação variável. A resolução do problema de otimização compreendeu modelos reduzidos baseados em Redes Neurais Artificiais e a predição da curva de demanda de acordo com a sazonalidade climática anual através de técnicas de reconhecimento de padrões em séries temporais univariadas. A comparação entre os resultados da simulação baseado no modelo fenomenológico e os dados medidos mostra que o modelo descreve a rede hidráulica de forma satisfatória, uma vez que o modelo é capaz de prever o comportamento dinâmico da vazão ao longo da linha adutora principal. Além disso, os resultados da otimização mostram os ganhos de economia de energia conseguida por meio do uso de conversores de frequência, considerando-se as restrições impostas e a variabilidade da demanda de consumo ao longo do ano.

Palavras-chave: Modelagem; Transitório; Otimização; Eficiência energética; Sistema de abastecimento de água; Reconhecimento de padrões.

ABSTRACT

This work presents an analysis of a system of water supply considering up the activities of transient modeling, optimization based on the minimization of energy consumption and recognition of demand profiles. The case study involves a segment of the supply and distribution of water from the city of Salvador (Brazil) and the analysis is focused on pumping station, main supply pipeline and tanks of water distribution system. As usually happens in similar systems, the current operation of the pumping system is performed using heuristic rules based on expert knowledge in the pumping process and the control of flow discharge of the pumps is essentially the type on / off. In this respect, the use of frequency converters associated with a systemic approach to optimization and prediction of demand may represent a significant potential for improving energy efficiency. The optimization strategy determines the speed rotation of the pumps during a work cycle so as to ensure an adequate volume in the tank and without any problems to the consumption of hourly demand. The mathematical model developed has a generic character and allows you to perform a careful analysis of water supply including an initial assessment of benefits arising from the use of pumps with variable speed system. The resolution of the optimization problem has included small scale models based on Artificial Neural Networks and pattern recognition techniques in univariate time series. The comparison between the simulation results based on the phenomenological model and the measured data shows that the model describes the hydraulic network in satisfactory manner, since the model is able to predict the transient behavior of the flow along the main supply pipeline. Moreover, optimization results show gains in energy savings achieved through the use of frequency converters, considering the restrictions imposed and the variability of consumption of hourly demand throughout the year.

Key-words: Modeling; Transient; Optimization; Energy efficiency; Water supply system; Pattern recognition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Consumo de energia elétrica anual no Brasil por classes de consumo	14
Figura 1.2	Diagrama de blocos de um sistema de abastecimento genérico	15
Figura 1.3	Estação de tratamento de água que abastece os reservatórios do complexo da Bolandeira– ETA Vieira de Mello	16
Figura 2.1	Vista aérea do complexo do sistema de abastecimento de água – Complexo da Bolandeira, Salvador-BA, 2010	29
Figura 2.2	Esquema simplificado do sistema de abastecimento do complexo da Bolandeira	30
Figura 2.3	Bomba e motor da estação de bombeamento EE Alta Carga	31
Figura 2.4	Curva de desempenho da bomba modelo 16LN26	32
Figura 2.5	Representação das curvas do sistema de bombeamento	34
Figura 2.6	Linha adutora	35
Figura 2.7	Esquema hidráulico simplificado da EE Alta Carga	36
Figura 2.8	Detalhes do ponto de descarga da linha adutora	36
Figura 2.9	Perfil de cotas – linha adutora principal de água	37
Figura 2.10	Bloco de ancoragem em uma adutora de diâmetro interno 900 mm (DI 900)	38
Figura 2.11	Distribuição de demanda de água de um dia útil	39
Figura 2.12	Reservatórios de distribuição de água	40
Figura 2.13	Esquema simplificado do sistema de abastecimento e distribuição de água	46
Figura 2.14	Estratégia de simulação	49
Figura 2.15	Resultados da simulação para vazão de descarga e nível de água	52
Figura 2.16	Estados estacionários inicial (4 bombas) e final (3 bombas)	53
Figura 2.17	Perfis dinâmicos de vazão e altura piezométrica	54
Figura 2.18	Vazão $Q(0,t)$ (m ³ /h) de descarga da estação de bombeamento – bombas com rotação fixa e variável	56
Figura 2.19	Nível de água no reservatório – bombas com rotação fixa e variável	56
Figura 2.20	Economia de energia com bombas de velocidade de rotação	57

	variável	
Figura 3.1	Representação da estrutura da RNA recorrente do modelo, com seis variáveis de entradas e uma variável de saída, e quatro neurônios na camada intermediária	69
Figura 3.2	Representação da estrutura da RNA do modelo para calcular a potência total consumida pelas bombas	70
Figura 3.3	Potência consumida – (amostra de teste)	71
Figura 3.4	Nível de água no tanque (amostra de teste)	71
Figura 3.5	Distribuição dos resíduos (erros) do modelo da RNA para potência	73
Figura 3.6	Padrões de demandas diárias por estação	77
Figura 3.7	Grau de pertinência – grupo1	79
Figura 3.8	Disposição da silhueta para as estações primavera (a) e verão (b)	80
Figura 3.9	Perfis de demanda	81
Figura 3.10	Programação de bombeamento	83
Figura 3.11	Nível de água no reservatório (a) e consumo de energia e demanda de água (b)	84
Figura 3.12	Potência elétrica economizada	85
Figura 3.13	Programação de bombeamento – estação primavera	87
Figura 3.14	Programação de bombeamento para cada estação do ano	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Especificações da bomba e motor elétrico da EE Alta Carga	31
Tabela 2.2	Parâmetros e propriedades de projeto	43
Tabela 2.3	Sequência de operação de bombeamento praticada na EE Alta Carga	50
Tabela 2.4	Programação de bombeamento (simulação)	55
Tabela 3.1	Avaliação da qualidade dos valores gerados pelos modelos das RNAs	72
Tabela 3.2	Agrupamentos iniciais - demanda de água	75
Tabela 3.3	Número de objetos (curvas de demanda) em cada agrupamento	79
Tabela 3.4	Potência consumida pelas bombas	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACO: *Ant Colony Optimization* (Otimização colônia de formiga)

AMT: Altura Manométrica Total

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

CLP: Controlador Lógico Programável

DI: Diâmetro interno

EE: Estação Elevatória

ETA: Estação de Tratamento de Água

EUA: Estados Unidos da América

FCM: Fuzzy C-Means

HP: *Horse Power* (cavalo a vapor)

MATLAB: *Matriz Laboratory*

MD: Mineração de Dados

MISO: *Multiple Input Single Output* (Múltiplas entradas e única saída)

NARX: *Nonlinear AutoRegressive with eXogeneous inputs* (Auto regressão não-linear com entradas exogênicas)

PRFV: Poliéster Reforçado com Fibra de Vidro

PHR: Plano Horizontal de Referência

RNA: Rede Neural Artificial

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área, m ²
a	Celeridade
c	Número de grupos
d	Demanda de água, m ³ /h
D	Diâmetro da tubulação, m
e	Espessura da parede da tubulação, mm
E	Módulo Young de elasticidade da parede da tubulação, Pa
f	Fator de fricção
F	Modelo Neural
g	Aceleração média da gravidade, m/s ²
H	Altura piezométrica, m
$h(t)$	Nível de água no tempo t , m
\hat{h}_k	Nível de água no tempo discreto k , m
i	Índice
k	Tempo discreto, h
K	Módulo bulk de elasticidade, Pa
\ln	Logaritmo natural
l	Número de valores da amostra
n	Número de curvas de demanda (objetos)
P_{atm}	Pressão atmosférica, Pa
$P(t)$	Potência consumida no tempo, kW
Q	Vazão, m ³ /h
rot_i	Velocidade de rotação da bomba i , rpm
t	Tempo, h
t_c	Tempo do ciclo de trabalho, h
t_{tr}	Tarifa, US\$
u	Grau de pertinência
z	Cota do centro de gravidade do fluido ao PHR, m
z_f	Cota do centro de gravidade do fluido ao PHR – final, m

Símbolos gregos

Δ_i	Variação entre dois pontos da tubulação, m
ε	Média de rugosidade do aço, m
γ	Peso específico da água (20°C), N/m ³
η_b	Rendimento da bomba
η_m	Rendimento do motor
μ	Coefficiente de Poisson do aço
π	Constante (3,141593 ...)
ρ	Massa específica da água (20°C), kg/m ³
Σ	Somatório
ψ	Constante que depende da espessura da parede e do coeficiente de Poisson
τ	Velocidade de rotação da bomba, rpm

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS – SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA.....	14
1.1 INTRODUÇÃO	14
1.2 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA.....	15
1.3 PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS EM UMA ESTAÇÃO DE BOMBEAMENTO.....	17
1.4 OBJETIVOS	22
1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	22
REFERÊNCIAS	23
CAPÍTULO 2 - MODELAGEM EM REGIME TRANSITÓRIO E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA COM APLICAÇÕES PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	24
2.1 INTRODUÇÃO	24
2.2 O CASO EM ESTUDO	28
2.3 MODELAGEM E SIMULAÇÃO	40
2.4 RESOLUÇÃO NUMÉRICA.....	43
2.5 RESULTADOS.....	50
2.6 CONCLUSÕES	58
REFERÊNCIAS	59
CAPÍTULO 3 - MELHORIA EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA BASEADA NA OTIMIZAÇÃO E RECONHECIMENTO DE PADRÕES DE CONSUMO.....	64
3.1 INTRODUÇÃO	64
3.2 O PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO	66
3.3 RECONHECIMENTO DE PADRÕES DE CONSUMO.....	73
3.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	82
3.4.1 Testes de otimização	82
3.4.2 Vantagens e desvantagens.....	89
3.5 CONCLUSÕES	90
REFERÊNCIAS	91
CAPÍTULO 4 - CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	96
4.1 CONCLUSÕES	96
4.2 RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	97

APÊNDICE A - EQUAÇÃO DO MOVIMENTO A PARTIR DE EQUAÇÃO DA ENERGIA TÉRMICA, E DESENVOLVIMENTO DA EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE EM REGIME TRANSITÓRIO.....	99
APÊNDICE B - IMPROVEMENTS IN WATER SUPPLY SYSTEMS BASED ON OPTIMIZATION AND CONSUMPTION PATTERNS RECOGNITION - ARTIGO ACEITO PARA PUBLICAÇÃO NO PERIÓDICO ENERGY EFFICIENCY JOURNAL	105
APÊNDICE C – DYNAMIC MODELING AND SIMULATION OF A WATER SUPPLY SYSTEM WITH APPLICATIONS FOR IMPROVING ENERGY EFFICIENCY ARTIGO ACEITO PARA PUBLICAÇÃO NO PERIÓDICO JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCE AND TECHNOLOGY	126
APÊNDICE D – CURVAS REAIS DE PERFIL DE DEMANDA HORÁRIA DE ÁGUA DO SISTEMA ESTUDADO.....	145

CAPÍTULO 1

CONSIDERAÇÕES GERAIS – SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

1.1 INTRODUÇÃO

A melhoria na eficiência energética pode trazer efeitos desejáveis em sistemas produtivos, no seu sentido mais amplo, através da redução de custos operacionais e minimização de impactos negativos ao meio ambiente (WEO, 2010). Dentre os setores industriais que mais consomem energia elétrica no Brasil, destaca-se o setor de saneamento e abastecimento cujo consumo de energia em 2013 foi de 12.058,65 GWh, o que representa 16,33% (Fig. 1.1) do consumo total de energia das indústrias neste mesmo período (ANEEL, 2013).

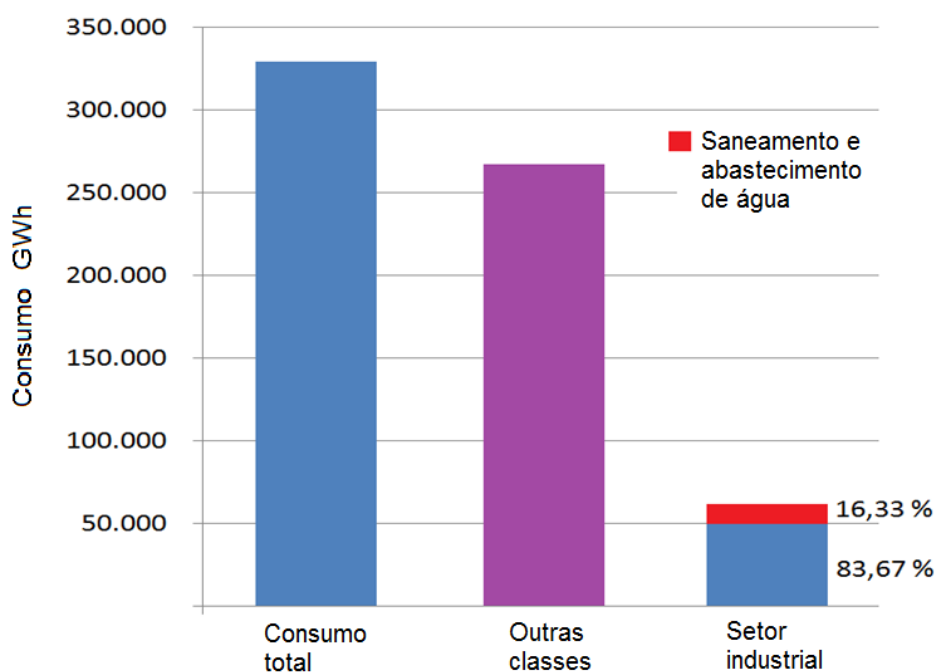


Figura 1.1. Consumo de energia elétrica anual no Brasil por classes de consumo. Fonte: ANEEL, 2013

Nas empresas de abastecimento de água, foco deste estudo, a energia elétrica consumida pelo bombeamento nas estações elevatórias representa 90% de toda energia elétrica consumida pela empresa e os 10% restantes são consumidos na manutenção da estação de bombeamento, na iluminação dos pátios da estação, nos equipamentos de dosagem e tratamento de água, e nas instalações administrativas (Tsutiya, 2001).

1.2 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

A água tratada, própria para o consumo, passa por diversas etapas até chegar ao consumidor (residências, indústrias, comércio, setor público, etc.). As etapas do processo de um sistema convencional de abastecimento e distribuição de água são mostradas na Fig. 1.2.

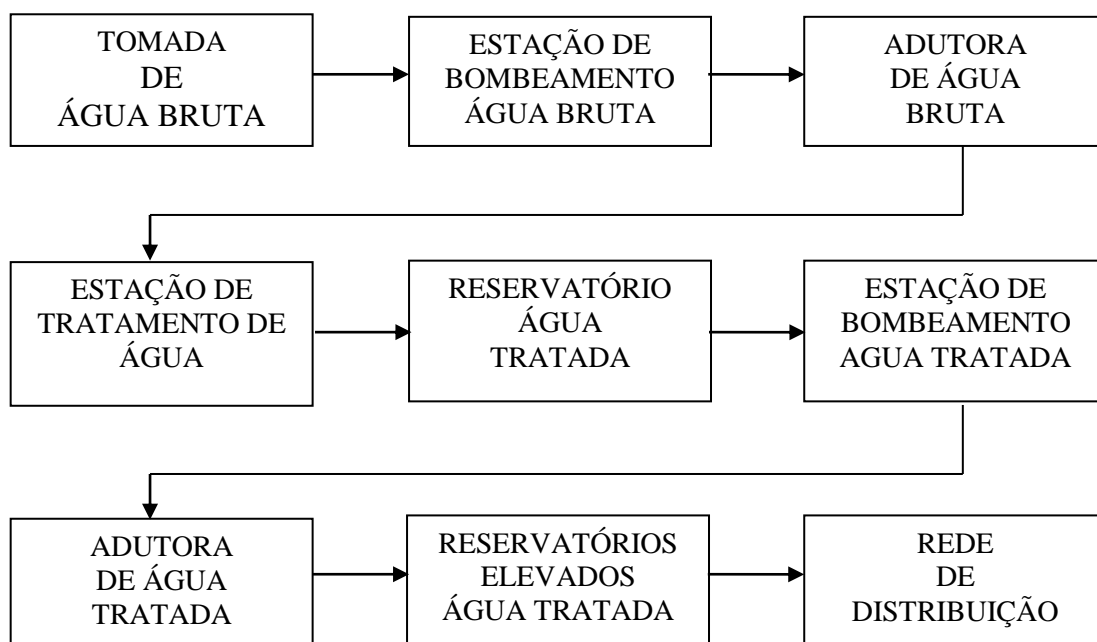


Figura 1.2. Diagrama de blocos de um sistema de abastecimento genérico

O processo de abastecimento de água tem início na captação, com a tomada d'água em águas superficiais de represas em cursos de rios. Em pequenas cidades podem-se ter represas, poços artesianos ou semi-artesianos (poços que captam águas de aquíferos confinados).

Em seguida tem-se o processo de bombeamento da água bruta, no qual são utilizadas bombas de grande capacidade de vazão de descarga. Essas bombas centrífugas são instaladas

em paralelo na estação de bombeamento (ou estação elevatória). As bombas acopladas a potentes motores de indução trifásicos são os principais responsáveis pelo elevado consumo de energia em sistemas de abastecimento de água, isto porque requerem parcelas significativas de energia mecânica para transportar grandes volumes de água de represas até a Estação de Tratamento de Água (ETA) (Fig. 1.3). A água, novamente, é bombeada da ETA até chegar aos reservatórios elevados de água tratada, distribuídos em pontos estratégicos nas cidades, em atendimento ao perímetro urbano.



Figura 1.3. Estação de tratamento de água que abastece os reservatórios do complexo da Bolandeira – ETA Vieira de Mello

As adutoras são condutos responsáveis pelo transporte de grandes volumes de água. Elas são classificadas em adutora de água bruta e de água tratada, formando o sistema adutor. Comumente, essas adutoras são construídas em condutos forçados de aço, de ferro fundido dúctil ou de Poliéster Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV). Dentre outros aspectos, o projeto das adutoras também busca minimizar as perdas de carga de natureza secundária ao longo do escoamento, reduzindo a ocorrência de curvas, desvios ou outros acidentes.

A ETA recebe um grande volume de água bruta bombeada. Nesta etapa do processo, ocorre o tratamento da água. Geralmente, a água bruta captada de rio ou represa contém agentes patogênicos que causam danos à saúde das pessoas, como doenças víricas, bacterianas ou parasitárias veiculadas pela água por ingestão ou por contato com as pessoas e, portanto, imprópria para o consumo. Neste caso, a água deve passar por tratamentos físicos e químicos para ser potável e depois distribuída. A Estação de Tratamento de Água é a unidade do processo responsável por transformar a água bruta em água potável, pronta para distribuição. O processo de tratamento da água deve atender a legislação vigente de potabilidade, em

conformidade aos parâmetros de qualidade físico-química e microbiológica da água. Nas grandes cidades, as ETAs são construídas ao longo dos anos em função do crescimento populacional ou econômico e formam, juntamente com as adutoras e subadutoras, reservatórios e tubulações da rede de distribuição, um complexo sistema de abastecimento e distribuição de água.

Na saída do processo de tratamento, a água está pronta para o consumo e então é armazenada em grandes reservatórios junto a ETA. Novamente, a água é bombeada para os reservatórios de distribuição. Os reservatórios do sistema de abastecimento e distribuição têm quatro funções básicas, quais sejam, reserva de equilíbrio para atender a demanda de consumo de água, reserva de emergência para atender ocasiões de excepcionalidade de demanda, reserva de incêndio nas ocorrências de sinistros, e de garantir a pressão mínima na rede de distribuição. Por fim, a última etapa do processo é a distribuição de água pela rede pública de abastecimento.

1.3 PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS EM UMA ESTAÇÃO DE BOMBEAMENTO

Na estação de bombeamento de água bruta o sistema é projetado para que as bombas trabalhem continuamente. As bombas são instaladas na configuração em paralelo e o desligamento da bomba somente ocorre para a realização de trabalhos de manutenção. Por outro lado, na estação de bombeamento de água tratada, localizada dentro do espaço da ETA, as bombas são ligadas e desligadas para o controle da vazão de descarga conforme a necessidade da demanda de água e, além disso, desligadas na intervenção de trabalhos de manutenção. Neste caso, os operadores da estação de bombeamento seguem diretrizes dos procedimentos operacionais de bombeamento. Os operadores buscam desenvolver suas atividades com o mínimo custo de energia elétrica, baixos índices de intervenção de manutenção, níveis adequados de altura de água nos reservatórios e, principalmente, sem interrupção no abastecimento para a cidade (Tsutiya, 2001).

Por exemplo, os procedimentos operacionais orientam os operadores a evitar o excesso de bombeamento nas horas de pico de energia elétrica. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) determina que sejam elevadas as tarifas nas 3 horas consecutivas de maior demanda por energia elétrica, para forçar a indústria e o comércio a reduzirem a energia consumida nestas horas críticas de demanda. Também, os operadores são orientados a manter o reservatório em níveis adequados de altura de água durante o ciclo de trabalho,

evitando com isso o desabastecimento de água no dia seguinte. Isto é realizado buscando manter o nível de água no reservatório na hora final do início do ciclo de trabalho (24 h) próximo ao nível de água registrado no início do ciclo. Outra orientação importante a comentar refere-se a minimizar os custos de manutenção das bombas, com a redução do número de vezes em que a bomba é ligada ou desligada no ciclo de trabalho. Ou seja, como o ciclo de trabalho é dividido em 24 h, as bombas somente podem mudar de estado no início de cada hora, evitando assim o desgaste excessivo da bomba ou do motor elétrico. A divisão do ciclo de trabalho em horas é uma prática usada em grande parte dos sistemas de abastecimento de água regional.

A programação de operação em estações de bombeamento com rotação fixa das bombas é conhecida como agendamento de bombeamento. Os procedimentos operacionais de bombeamento consistem em estabelecer, basicamente, regras de sequência de manobras de bombas (vazão de descarga, tempo e período de trabalho para cada bomba), abertura de válvulas de restrição e nível de água no reservatório. Em termos gerais, as definições de regras de bombeamento buscam a confiabilidade do sistema de abastecimento e distribuição de água no que se refere ao atendimento adequado da demanda, pressão adequada nas tubulações, nível de água dentro dos limites do reservatório, controle de perdas, redução do custo de operação (consumo de energia elétrica, conta de energia, custos com manutenção e insumos) e o cumprimento da legislação (qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade ambiental) (Zahed, 1990; Luvizotto, 1995).

Normalmente, os procedimentos de bombeamento são definidos no setor de planejamento por operadores com bastante experiência na tarefa, baseados em informações anteriores e no conhecimento do estado atual do sistema. Na prática, a operação em sistemas de abastecimento é baseada em regras heurísticas. Muitas vezes, o controle de vazão de descarga por meio de válvulas de restrição (que apresentam alta perda de carga, aumentam a pressão na tubulação e produzem baixa eficiência no sistema) não é adotado, mantendo-se estas válvulas com abertura total. Neste caso, durante o turno de trabalho, os operadores (ou funcionários do setor de planejamento) definem, a cada hora, quais são as bombas que devem mudar de estado (bombas ligadas ou desligadas) de acordo com o registro da demanda de água da hora anterior, do atual nível de água nos reservatórios e do conhecimento histórico da curva de demanda. Na estação de bombeamento os procedimentos são implementados e os resultados retornam ao setor de planejamento para o acompanhamento, avaliação e ajustes no

desempenho do sistema. Procedimentos desta natureza não garantem e não são necessariamente baseados na melhoria da eficiência energética do sistema.

Problemas adicionais ocorrem quando a estratégia operacional diverge com a mudança de turno dos operadores ou quando um dos operadores da equipe se ausenta do trabalho por um período mais longo. Não existe um manual formal explicando os procedimentos que devem ser tomados. A definição das regras de bombeamento é fundamentada na vivência e experiência dos operadores (conhecimento heurístico).

Outro ponto importante a comentar sobre os procedimentos operacionais de agendamento de bombeamento é a falta de orientação em observância à dinâmica da demanda anual. A sazonalidade das estações reflete-se na demanda de água e, conforme a região, o perfil de consumo também é afetado diretamente pelo ciclo de trabalho e pela dinâmica do contingente populacional na localidade considerada, o que se estabelece através de períodos de férias ou feriados prolongados.

A literatura apresenta alguns métodos para resolução de problemas de operação de procedimento de bombeamento (agendamento de bombeamento). Os métodos de otimização em sistemas de abastecimento e distribuição de água propostos por Lansey e Awumah (1994), Beckwith e Wong (1995) visam à minimização dos custos de energia com a redução efetiva do consumo por meio da otimização da trajetória do nível de água nos reservatórios. Lansey e Awumah (1994) desenvolveram um método para otimizar regras de operação de bombeamento. O método proposto gera curvas de regressão não-lineares ajustadas através de regressão por mínimos quadrados, relacionando o nível de elevação de água nos reservatórios e o consumo de energia. A estratégia determina uma trajetória ótima do nível dos reservatórios, mantendo-se o mínimo volume de água, sem prejuízo ao abastecimento. Conforme Lansey e Awumah (1994), o excesso de água nos reservatórios implica em desperdício de energia elétrica, pois o volume bombeado foi maior que a demanda. O método foi aplicado na cidade de Austin (EUA), em um segmento da rede de distribuição com uma estação elevatória contendo cinco bombas. Os resultados mostraram uma redução de 9% nos custos de energia elétrica.

Beckwith e Wong (1995) aplicaram o método estocástico de algoritmo genético evolucionário baseado na otimização de operação de bombeamento em um sistema de abastecimento com múltiplas estações de bombeamento e múltiplos reservatórios. O objetivo

consistiu em determinar a melhor combinação de bombas em operação com o menor consumo de energia, garantido o volume mínimo de água nos reservatórios para atender a demanda diária. O método proposto pelos autores associava os custos de bombeamento com a variação do volume nos reservatórios e a demanda de água. Considerou-se que as bombas são de velocidades fixas, o chaveamento (liga/desliga) só poderia ser feito em momentos pré-estabelecidos e que as bombas trabalhariam na situação de melhor rendimento. Para verificar a eficácia do método, foram realizadas simulações em uma rede de abastecimento de água com 5 estações de bombeamento, com o número de bombas em cada estação variando de 2 a 4 unidades. A diferença entre a situação de melhor eficiência elétrica e a mais desfavorável foi de 3,6%.

Outros pesquisadores, como Ormsbee *et al.* (1989) e Jowitt e Germanopoulos (1992), utilizaram métodos de otimização visando a redução dos custos de energia elétrica sem redução efetiva do consumo, restringindo a operação de bombeamento em determinados períodos do dia. Na função objetivo foram considerados os custos do consumo de energia (kWh) e os custos da demanda (kVA). A demanda contratada é a quantidade de potência disponibilizada pela concessionária para atender a uma determinada indústria. O valor de contrato da demanda é pré-estabelecido e fixado (mesmo sem usar efetivamente a potência disponibilizada). Além disso, é aplicada uma multa referente a uma parcela de ultrapassagem do limite de demanda contratada. Ormsbee *et al.* (1989) aplicaram um método baseado na programação dinâmica para minimizar os custos de operação de bombeamento em sistema de distribuição de água. O método buscava soluções para uma política de operação de bombeamento (regras de bombeamento) associada à trajetória ótima do nível de água no reservatório. O método consistia em encontrar soluções ótimas na combinação de bombas para atender a mudanças na demanda de água. A determinação da trajetória de nível ótimo do reservatório tinha o foco na determinação do volume ótimo para cada hora do ciclo de trabalho (24h), evitando o excesso do nível de água no reservatório (desperdício de energia consumida) ou evitando a redução do nível abaixo do limite mínimo do reservatório. A função objetivo é de minimizar os custos de energia elétrica evitando a ultrapassagem da demanda de energia contratada e a redução do número de bombas em operação nas horas de pico de energia. O método foi aplicado na cidade de Washington DC (EUA) em um determinado segmento de uma rede de distribuição composta de duas estações elevatórias, com seis bombas de 1.590 HP e outra com duas bombas de 1.000 HP, tendo com resultado a redução de 6,7% no consumo de energia.

O método proposto por Jowitt e Germanopoulos (1992) consiste em determinar as bombas que deverão ser ligadas ou desligadas em um determinado período dentro de um ciclo de trabalho (24h), com restrições de operação nas horas de pico e de ultrapassagem de demanda contratada. O modelo foi simulado em um sistema de distribuição real, com resultados promissores, apresentando uma economia de 7,7% de consumo de energia (kWh) e de 15,6%, considerando o consumo e os limites máximos de demanda.

Os autores Wang *et al.* (2009) e López-Ibáñez *et al.* (2008) apresentaram métodos heurísticos ou meta-heurísticos de otimização com o intuito de reduzir os custos com as despesas de energia elétrica na operação de bombeamento em sistemas de abastecimento, sem reduzir efetivamente o consumo de energia.

Wang *et al.* (2009) apresentaram um modelo de otimização solucionado através de algoritmo genético. Os objetivos compreendem a redução dos custos de energia elétrica, a minimização dos custos de manutenção, e a minimização dos impactos causados pelos problemas de assoreamento de poços. O método considera um ciclo de trabalho de 24 horas, bombas operando intermitentemente e com chaveamento (liga/desliga) em qualquer instante do ciclo de trabalho. Na simulação foram consideradas bombas de diferentes potências operando com vazões nominais. Os autores formularam um problema multi-objetivo considerando os custos de operação das bombas por meio de tarifas diferenciadas de energia elétrica, em horas de pico (majoração tarifária) e fora de pico, custos de manutenção baseado no número de vez que a bomba foi ligada no ciclo de trabalho, e custos ambientais devidos a depreciação dos recursos hídricos de águas subterrâneas.

López-Ibáñez *et al.* (2008) aplicaram o método de otimização meta-heurística *Ant Colony Optimization* na minimização dos custos de energia elétrica. *Ant Colony Optimization* (ACO) é um método de otimização baseado em algoritmo evolucionário (Dorigo e Stützle, 2004). A proposta do método foi encontrar a melhor solução de regras de bombeamento visando minimizar esta operação de bombeamento nas horas de pico de energia (redução do tempo de bombeamento neste período).

A otimização da operação de bombeamento em sistemas de abastecimento e distribuição de água é complexa e a aplicação de modelos em grandes sistemas de abastecimento (elevada capacitância) é dificultada devido ao tempo de processamento computacional, o que dificulta a aplicação em tempo real.

1.4 OBJETIVOS

Este trabalho desenvolve e aplica um modelo em regime transitório fenomenológico em um segmento do sistema de abastecimento da cidade de Salvador-BA, constituído por uma estação de bombeamento, linha adutora e reservatório de distribuição. O modelo é usado como restrição em um problema de otimização que prevê a operação de bombeamento por meio do uso de bombas com velocidade de rotação variável. Padrões de curvas de demanda ao longo do ano são obtidos através de técnicas de reconhecimento de padrões e agrupamento em séries temporais univariadas. Apesar do estudo de caso estar relacionado a um sistema real específico, a abordagem de modelagem desenvolvida, a sistemática de otimização e da padronização sazonal da demanda são perfeitamente aplicáveis em outras estruturas ou sistemas de abastecimento análogos.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta tese de doutorado está dividida em 4 capítulos. Além do Capítulo 1 introdutório da tese, o Capítulo 2 apresenta a simulação em regime transitório de um sistema de abastecimento urbano de água baseado no modelo fenomenológico de parâmetros distribuídos, capaz de prever o comportamento hidráulico e o consumo de energia.

O Capítulo 3 apresenta e resolve um problema de otimização em regime transitório que inclui o modelo ótimo para determinar a velocidade de rotação da bomba em sistema de abastecimento de água, considerando uma política de custo mínimo de energia e de manutenção. O Capítulo 4 apresenta as conclusões, recomendações e sugestões para trabalhos futuros. No apêndice A é apresentada a demonstração da equação do movimento a partir da equação da energia térmica, utilizada como uma das equações fundamentais do modelo fenomenológico. Neste mesmo apêndice é apresentado o desenvolvimento da equação da continuidade em regime dinâmico a partir da lei da conservação de massa em um volume de controle diferencial. Os apêndices B e C apresentam os dois artigos aceitos para publicação em periódicos internacionais como resultado deste trabalho. O apêndice D apresenta as curvas reais de demanda horária de água do sistema estudado.

REFERÊNCIAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Relatórios do Sistema de Apoio a Decisão. 2013. <http://relatorios.aneel.gov.br/>. Acessado em Julho/2014.

Beckwith, S.F.; Wong, K.P. A genetic algorithm approach for electric pump scheduling in water supply system. In: *Proc. of the IEEE Conference on Evolutionary Computation*, 21-26, Perth, Australia, 1995.

Brion, L.M.; Mays, L.W. Methodology for optimal operation of pumping stations in water distribution systems. *J. of Hydraulic Engineering*, 11, 1551-1569, 1991.

Dorigo, M.; Stützle, T. *Ant colony optimization*. Massachusetts Institute of Technology, MIT Press, Cambridge, MA, 2004.

Lansley, K.E., Awumah, K. Optimal pump operations considering pump switches. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 1, 17–35, 1994.

López-ibáñez, M.; Prasad, T.D.; Paechter, Ben. Ant Colony Optimization for Optimal Control of Pumps in Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 134, n. 4, 337-346, 2004.

Luvizotto, E.J. *Controle Operacional de Redes de Abastecimento de Água Auxiliado por Computador*. 143 p. Tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1995.

Jowitt, P.W.; Germanopoulos, G. Optimal pump scheduling in water-supply networks. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 4, 406–422, 1992.

Ormsbee, L.E.; Reddy, S.L. Nonlinear heuristic for pump operations. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 121(4), 302-309, 1995.

Tarquin, A.J.; Dowdy, J. Optimal pump operation in water distribution. *J. Hydraulic Eng.*, 2, 496–501, 1989.

Tsutiya, M.T. *Redução do Custo de Energia Elétrica em Sistemas de Abastecimento de Água*. ABES, 2001

Wang, Jen-ya; Chang, Tsui-ping; and Chen, Jr-shian. An enhanced genetic algorithm for bi-objective pump scheduling in water supply. *Expert systems with applications*, v. 36, 10249-10258, 2009.

WEO - World Earth Outlook. International Energy Agency (IEA). *Relatório técnico*. 2010.

Zahed, K.F. *Previsão da Demanda de Consumo em Tempo Real no Desenvolvimento Operacional de Sistemas de Distribuição de água*. Tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1990.

Zessler, U.; Shamir, U. Optimal operation of water distribution systems. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 6, 735-752, 1989.

CAPÍTULO 2

MODELAGEM EM REGIME TRANSITÓRIO E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA COM APLICAÇÕES PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

2.1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia devido ao desenvolvimento econômico provoca impacto direto sobre o meio ambiente, especialmente considerando que o modelo global de geração de energia elétrica é baseado, principalmente, em combustíveis fósseis (IEA, 2013). No Brasil, a capacidade instalada de energia elétrica é de 113.847 MW e energia gerada pelas usinas hidrelétricas fornece 64% desse montante. Os restantes 36% vem da geração térmica, tais como gás natural, carvão, nuclear e do petróleo, e energia eólica (1,6%) (Brasil, 2013). A usina hidrelétrica emite cem vezes menos gases de efeito estufa (Abe *et al.*, 2005) do que uma usina térmica com a mesma potência. No entanto, mesmo neste cenário, uma redução no desperdício de energia elétrica é de fundamental importância, pois os impactos ambientais negativos associados à construção de novas usinas hidrelétricas são enormes.

Um sistema de abastecimento de água para consumo humano tem como principal objetivo atender a demanda de água. Para a concretização desse objetivo é necessário fazer o armazenamento, transporte e tratamento de um grande volume de água. A estação de bombeamento de água é a responsável pelo maior consumo de energia do sistema.

Alguns trabalhos apresentam uma análise da eficiência energética em sistemas de abastecimento com base na modelagem e otimização. Lansey e Awumah (1994) e Wong e Beckwith (1995) sugerem a ausência de excesso na acumulação de água nos reservatórios no final de um ciclo de operação. Ormbee e Lansey (1994) propõem procedimentos operacionais para suporte à tomada de decisão associado ao tempo de funcionamento, ao número de bombas em operação, ao percentual de abertura de válvulas de controle de vazão na descarga de bombas, a trajetória de níveis de reservatórios, e a velocidade de rotação ideal das bombas para atender a demanda (considerando a possibilidade de ajustar a velocidade de rotação da bomba). Coulbeck e Orr (1984) e Jowitt e Germanopoulos (1992) lidam com o problema da

eficiência energética. Os autores buscam reduzir o volume da água bombeada durante as horas de pico de consumo de energia elétrica no qual existe um aumento nas tarifas de consumo de energia.

Algumas estações de bombeamento compreendem bombas hidráulicas dispostas em paralelo e com uma velocidade fixa de vazão de descarga controlada pelo número de bombas em funcionamento. Neste tipo de configuração é muito difícil definir um procedimento operacional de bombas para operarem com um custo mínimo de energia, sem comprometer o atendimento da demanda diária e assegurar um nível adequado de reservatório para o próximo ciclo de trabalho. Alguns trabalhos apresentam algoritmos baseados na programação em regime transitório, que resolve esse tipo de problema (Coulbeck e Orr, 1984; Quindry *et al.*, 1981; Kessler e Shamir, 1989; Ormsbee *et al.*, 1989; Yu *et al.*, 1994; Bounds *et al.*, 2006; Zessler e Shamir, 1989) e, mais recentemente, algoritmos baseados em métodos heurísticos (Gupta e Khanna, 1999; Maier *et al.*, 2003 ; Reis *et al.*, 2005; Haddad *et al.*, 2006; López-Ibáñez *et al.*, 2008; Wang e Guo, 2010).

Alternativamente, a estratégia de operação utilizando os conversores de frequência, a fim de alterar a velocidade de rotação da bomba, permite uma melhoria do funcionamento do sistema de bombeamento, ajustando a vazão de descarga de forma mais adequada de acordo com o perfil da demanda diária, sem excesso de água nos reservatórios e de consumo de energia (Lingireddy e Wood, 1998; Lambeth e Houston, 1991).

Viholainen *et al.* (2012) desenvolveram uma estratégia de controle de bombeamento utilizando conversores de frequência. A estratégia de controle foi implementada e testada em sistema de abastecimento em escala de laboratório com duas bombas em paralelo, dois conversores de frequência e um Controlador Lógico Programável (CLP). A estratégia proposta baseia-se na regulação individual da velocidade de rotação das bombas de acordo com a demanda (vazão de referência) dentro de uma região de busca de eficiência elevada, definida pela curva da bomba (relaciona a vazão e a altura manométrica) e pelas curvas de eficiência da bomba. Esta estratégia de controle utilizando os conversores de frequência permite que as bombas operem com altas eficiências.

Bortoni *et al.* (2008) usaram um algoritmo de programação em regime transitório para o controle ideal de bombas com conversores de frequência para obter ganhos econômicos. O controle ótimo é feito por um CLP e procura atender a demanda (vazão de

referência) e a altura piezométrica (representa a energia de pressão da unidade de peso do líquido submetido a uma determinada pressão) mínima exigida para o sistema de abastecimento de água. O estudo de caso consistiu em um sistema hipotético com três bombas em paralelo, de características diferentes, e cada uma com conversor de frequência. Os resultados mostram que a estratégia de controle é robusta, capaz de conseguir melhoria da eficiência energética do sistema para a maioria dos cenários considerados (combinações entre bombas de velocidade variável e fixa, e bombas de diferentes potências, velocidade de rotação e curvas características).

Alguns trabalhos apresentam outras maneiras de obter melhoria da eficiência de energia em sistemas de abastecimento de água sem a utilização de bombas de velocidade de rotação variável. Carravetta *et al.* (2012) e Ramos *et al.* (2011) apresentaram um estudo de caso real (sistema de vazão média com menos de 1.440 m³/h) e sugeriram a instalação de bombas nas adutoras, para trabalhar como turbinas (sistema de micro-usina hidráulica) para gerar energia elétrica. A energia potencial do desnível geométrico entre um ponto elevado da adutora e o tanque de abastecimento é convertida em energia elétrica. Além disso, as turbinas (bombas) podem ser utilizadas para proporcionar um controle de pressão, ao invés da utilização de válvulas de controle de pressão.

Outras aplicações incluem a melhoria da eficiência energética e redução das emissões de dióxido de carbono por meio de sistemas de energia híbridos. Nestes casos, as fontes de energias alternativas e renováveis, tais como painéis fotovoltaicos e energia eólica, são empregados em conjunto com fontes de energia tradicionais (Ramos *et al.*, 2011; Ramos e Ramos, 2010; Vieira e Ramos, 2008 e 2009; Vilela e Fraidenraich, 2001).

Alguns modelos hidráulicos, empíricos ou fenomenológicos, têm sido desenvolvidos e aperfeiçoados ao longo dos anos para descrever a dinâmica de redes de abastecimento e distribuição de água. Ormsbee e Lansey (1994) classificaram os modelos em quatro tipos: Modelos hidráulicos baseados no balanço de massa, modelos hidráulicos baseados em regressão não linear, modelos simplificados de redes hidráulicas e modelos de simulação hidráulica. A primeira categoria compreende simplesmente a formulação de um balanço de massa global sob regime transitório (Ormsbee e Lansey, 1994; Baran *et al.*, 2005). Modelo baseado em regressão não linear compreende uma abordagem empírica (Ormsbee *et al.*, 1987; Tarquin e Dowdy, 1989).

Modelo hidráulico de rede simplificada é representado por equações lineares obtidas através de balanços de massa locais (Jowitt e Germanopoulos, 1992; Demoyer e Horowitz, 1975; Coulbeck *et al.*, 1988). Modelo de simulação hidráulica considera a hipótese de estado quase estacionário com base em um conjunto de equações de conservação de massa e energia (Ormsbee e Lansey, 1994; Wanakule *et al.*, 1986; Chase e Ormsbee, 1989; Lansey *et al.*, 1989; Lansey e Zhong, 1990; Brion e Mays, 1991; Ulanicki *et al.*, 2008).

Distúrbios em sistema de abastecimento podem ser causados por mudanças na velocidade de rotação da bomba, mudanças nas configurações de válvulas, formação de ondas dentro dos reservatórios, mudanças na demanda, e procedimentos operacionais de partida e parada de bombas (Chaudhry, 1979; Sanks, 1998; Walski, 1984; Wylie e Streeter, 1978). Um modelo dinâmico é capaz de prever o comportamento transitório de variáveis de estado, tais como a altura piezométrica e vazão ao longo da linha de distribuição. As principais aplicações dos modelos transitórios estão associadas à concepção dos sistemas de distribuição e abastecimento de água, detecção de falhas, qualidade da água e melhoria da eficiência energética por meio de procedimentos operacionais de bombeamento (Boulos *et al.*, 2005; LeChevallier *et al.*, 2003; Ebacher *et al.*, 2011; Wood *et al.*, 2005; Fleming *et al.*, 2006; Izquierdo e Iglesias, 2002).

Uma aplicação importante do modelo dinâmico que está relacionada com a vazão e altura piezométrica é o Golpe de Ariete (fenômenos hidráulicos causados pela brusca mudança da velocidade de escoamento de um fluido em tubulações fechadas, que podem ocasionar condições severas de pressão na tubulação). Kwon (2007) e Afshar *et al.* (2008) estudaram este fenômeno em diferentes situações. Um banco de dados foi formulado utilizando dados históricos de um sistema simples de tubulações de água e também utilizando dados de uma usina hidrelétrica. Em ambos os trabalhos, distúrbios nas vazões de descarga das bombas foram causados pelo fechamento de válvulas ou falhas na operação. Nos dois casos foram realizadas simulações de modelos transitórios utilizando o método das características para a solução do problema (Chaudhry, 1979; LeChevallier *et al.*, 2003).

Ismaier e Schluck (2009) investigaram a interação entre o fenômeno do Golpe de Ariete e as oscilações de pressão causada por bombas centrífugas. Os autores mostraram que as oscilações da pressão da vazão transitória podem causar amortecimento ou amplificação das ondas de pressão no interior da tubulação. Nenhuma das contribuições dos autores

apresentadas nas referências que abordam o fenômeno do Golpe de Ariete apresentam aspectos sobre eficiência energética em condições de regime não-estacionário.

Os trabalhos relacionados até aqui são baseados em sistemas de abastecimento de água em escalas piloto ou de bancada e não apresentam uma análise da eficiência energética com base em uma abordagem em regime transitório (Ormbee e Lansey, 1994; Lansey e Awumah, 1994; Beckwith e Wong, 1995; Jowitt e Germanopoulos, 1992; Viholainen *et al.*, 2012; Lambeth e Houston, 1991).

Este capítulo apresenta a simulação em regime transitório de um sistema de abastecimento de água com base em um modelo fenomenológico completo e também mostra o impacto do ajuste do fluxo de bombeamento para a eficiência energética em condições não estacionárias. O estudo de caso em foco é composto por um caso real de um segmento de abastecimento de água e sistema de distribuição em Salvador (Brasil). A estratégia de simulação adotada é baseada no método das linhas (Marques *et al.*, 2009, Pinto e Lage, 2001). Este método é bem conhecido e apropriado para modelos transitórios com parâmetros distribuídos, principalmente na situação em que apenas uma coordenação de posição é considerada.

A aplicação desta abordagem de simulação em um sistema de abastecimento de água real, juntamente com as fórmulas das diferenças finitas adaptadas de acordo com as condições de contorno reais do problema, representam uma alternativa eficiente e uma contribuição para a modelagem e simulação de sistemas semelhantes (Marques *et al.*, 2009; Pinto e Lage, 2001). Os resultados da simulação são consistentes e confirmam o potencial do modelo para a análise e otimização da eficiência energética em sistemas de abastecimento semelhantes.

2.2 O CASO EM ESTUDO

A Fig. 2.1 mostra uma visão geral do complexo de abastecimento onde se encontra a estação de bombeamento.



Figura 2.1 – Vista aérea do complexo do sistema de abastecimento de água - complexo da Bolandeira, Salvador-BA, 2010

O complexo da Bolandeira é composto pelas ETAs Vieira de Mello (1) e Teodoro Sampaio (2), alimentadas pelos rios Joanes, Ipitanga e Pituaçu. No complexo existem três Estações Elevatórias (EE) em operação, denominadas pela empresa como Elevatória Alta Carga (3) com quatro bombas de 1400 CV, Elevatória Baixa Carga (6) com três bombas de 1400 CV e Elevatória Duna (5) com três bombas de 900 CV. Além disso, o complexo possui um reservatório de capacidade 10.000 m³ (4) e um outro de capacidade 15.000 m³ (7).

A Fig. 2.2 mostra o fluxo de água e a interligação dos principais elementos que fazem parte do complexo da Bolandeira.

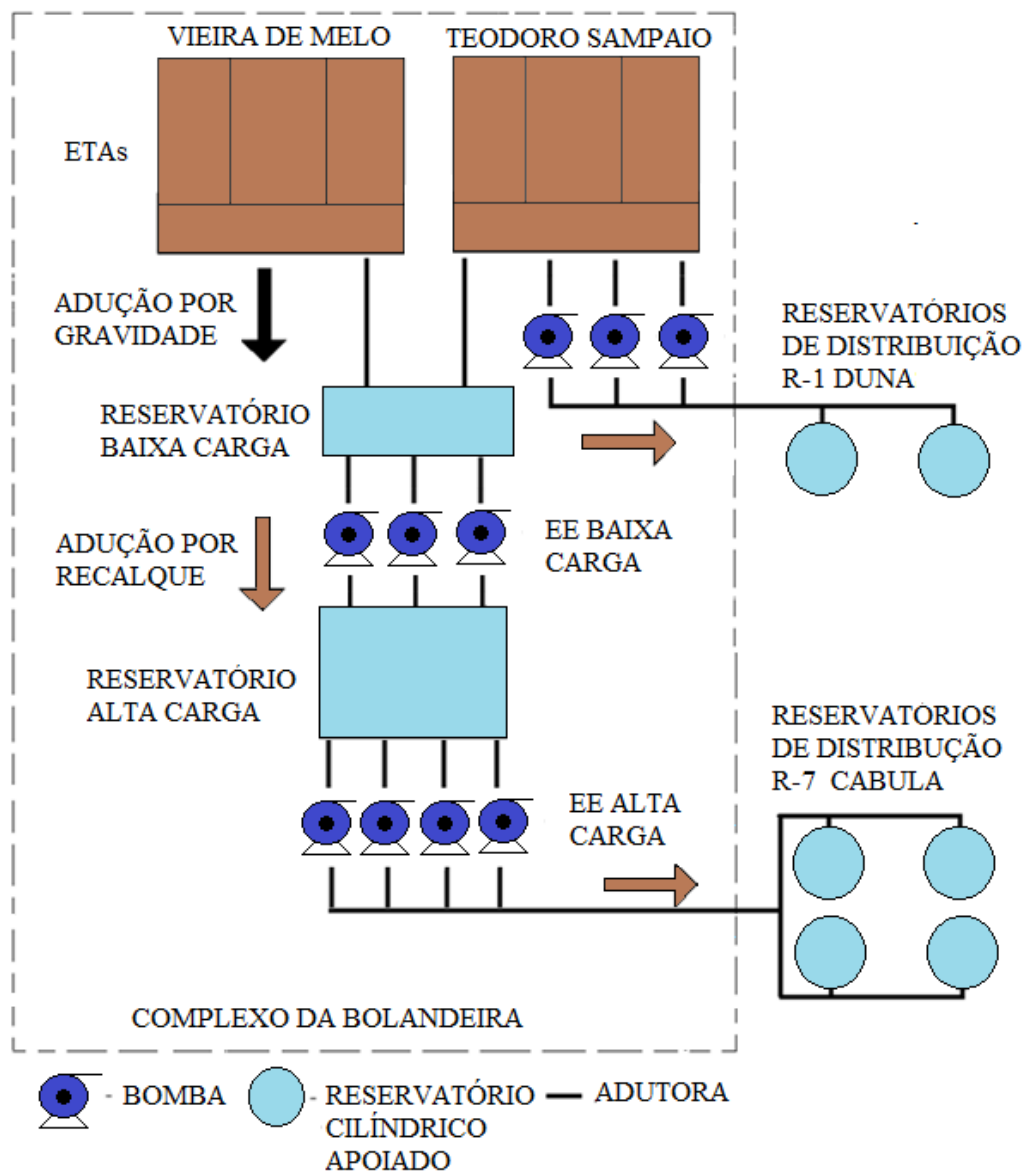


Figura 2.2 - Esquema simplificado do sistema de abastecimento do Complexo da Bolandeira

A Estação Elevatória de bombeamento selecionada para o estudo, denominada EE Alta Carga, opera continuamente e é composta de quatro bombas centrífugas idênticas. A EE Alta Carga tem uma capacidade máxima de 8.800 m³/h (todas as bombas operando com velocidade de rotação nominal de 1.175 rpm). As especificações do motor elétrico e bomba são apresentadas na Tabela 2.1 (Worthington, 1988) e os aspectos gerais são mostrados nas Fig. 2.3a-b. A bomba centrífuga de 1400 CV (Fig. 2.3a) é projetada para o uso contínuo e está acoplada ao motor de indução trifásico (Fig. 2.3b). A curva da bomba é mostrada na Fig. 2.4.

Tabela 2.1 - Especificações da bomba e motor elétrico da EE Alta Carga

Bomba centrífuga		Motor elétrico	
Características	Especificações	Características	Especificações
Fabricante	Worthington	Fabricante/Modelo	Vilares/ HSW1
Modelo	16LN26	Número de pólos	6
Potência	1030 kW	Frequência	60 Hz
Número de estágios	1	Número de fases	3
Diâmetro do Rotor	27"	Tensão	2400 V
Rotação	1175 rpm	Corrente (A)	294 A
Vazão	3009 m ³ /h	Fator de potência	90,2 %
Eficiência	86 %		



(a)



(b)

Figura 2.3 – Bomba e motor da estação de bombeamento EE Alta Carga

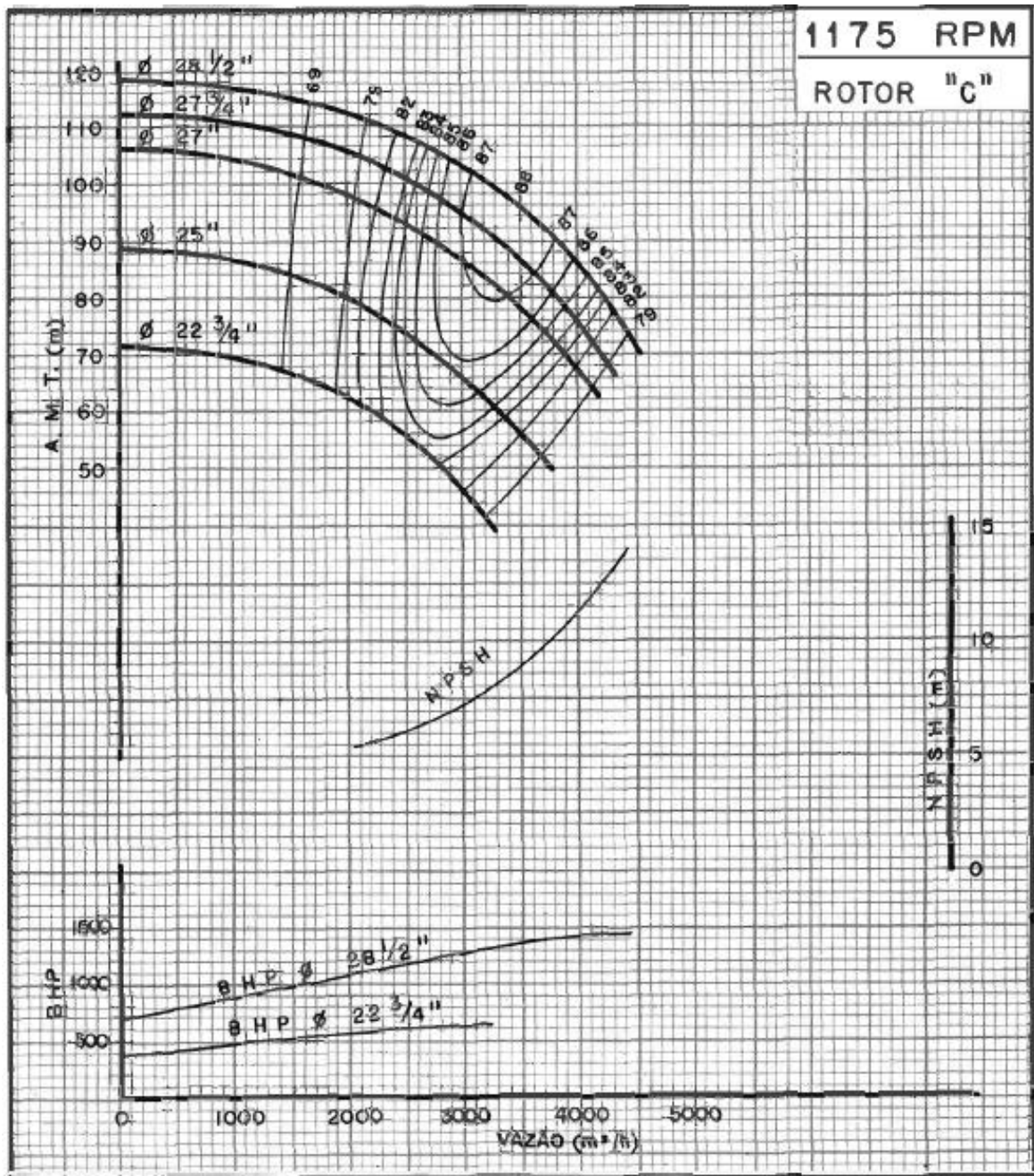


Figura 2.4 – Curva de desempenho da bomba modelo 16LN26 (Fonte: Worthington, 1988)

Todas as curvas na Fig. 2.4 são obtidas empiricamente em laboratório. As curvas vistas na parte superior da Fig. 2.4 relacionam a Altura Manométrica Total (AMT) com a vazão de descarga da bomba para diferentes diâmetros do rotor. Além disso, curvas de iso-rendimento (para delinear regiões de rendimento da bomba) são associadas com o diâmetro da tubulação, vazão e AMT. Por exemplo, o método para encontrar a altura (AMT) e o rendimento considerando a vazão de 3000 m³/h para a bomba 16LN26 e uma curva de desempenho para rotor de 27" de diâmetro tem-se o seguinte procedimento. No eixo das

abscissas levanta-se uma reta perpendicular do ponto da vazão (3000 m³/h) até encontrar o ponto em que toca a curva de desempenho escolhida. Em seguida, traça-se uma reta deste ponto, paralela ao eixo das ordenadas, até encontrar o valor da altura (AMT) no eixo das coordenadas. Neste caso, a altura é, aproximadamente, 85 m. As curvas iso-rendimento que cruzam as curvas de desempenho mostram a região de rendimento da bomba. O ponto obtido sobre a curva de desempenho está na região de rendimento de 88%. Para obter curvas com outras rotações são usadas as equações de afinidade da bomba (Sanks, 1998; Mays, 2004).

Nas estações elevatórias de sistemas de abastecimento de água, as bombas geralmente são instaladas na configuração em paralelo. Outra possibilidade de instalar bombas é na configuração série. Bombas em série busca-se aumentar a pressão na tubulação AMT (observando os limites de operação), e com isso levar água para lugares mais distantes, sem o aumento da vazão de descarga das bombas. Por outro lado, a associação de bombas em paralelo é empregada quando se deseja aumentar ou diminuir a vazão de descarga da estação de elevatória.

O sistema de bombeamento da EE alta carga é formado por quatro bombas iguais na configuração paralela (Fig. 2.2). As bombas são ligadas e desligadas conforme os procedimentos operacionais de bombeamento. A Fig. 2.5 mostra as curvas do sistema de bombeamento da estação elevatória nas quatro configurações de operação possível e na velocidade de rotação de 1175 rpm.

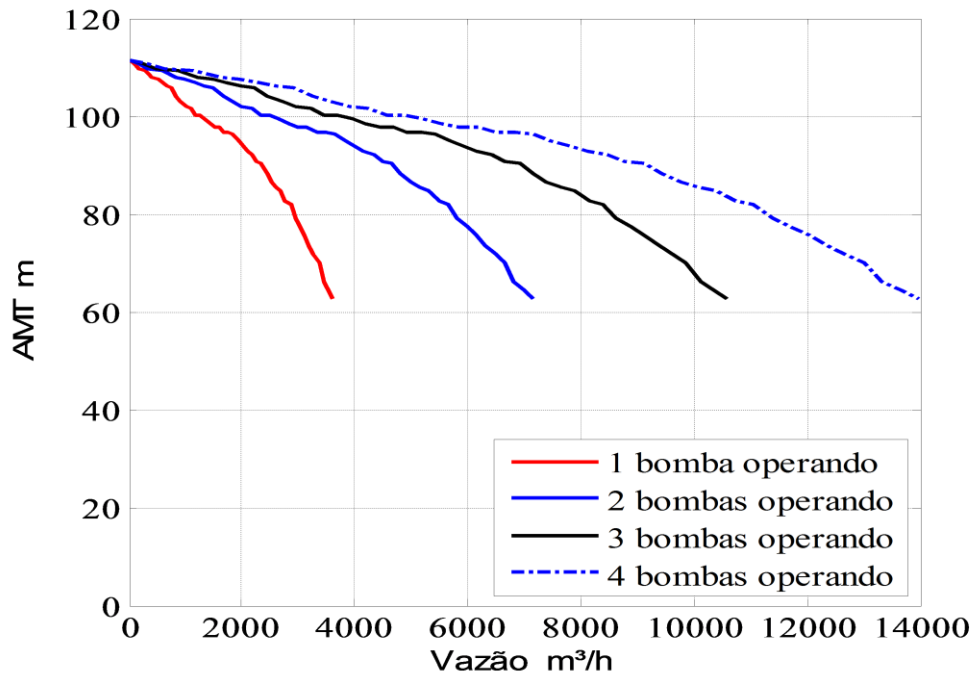


Figura 2.5 – Representação das curvas do sistema de bombeamento

As adutoras são responsáveis pelo transporte de grandes volumes de água. Elas são classificadas em adutora de água bruta e de água tratada, formando o sistema adutor (Fig. 2.6). Comumente, nas cidades, as adutoras são construídas em condutos forçados de aço ou ferro fundido dúctil. Mais recentemente, também, são usadas adutoras construídas de Poliéster Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV).



(a)



(b)

Figura 2.6 - Linha adutora. (a) Construção de uma linha adutora de ferro fundido dúctil e diâmetro interno 1000 mm (DI 1000) (b) Manutenção de uma linha adutora de PRFV - assentamento de um tê na tubulação (DI 1200)

As bombas acopladas a potentes motores de indução trifásicos (Fig. 2.3a-b) são os principais responsáveis pelo elevado consumo de energia em sistemas de abastecimento de água. Isto porque requerem parcelas significativas de energia mecânica para transportar grandes volumes de água de represas, passando pelas ETAs, até chegar aos reservatórios elevados de água tratada distribuídos em pontos estratégicos nas cidades, em atendimento ao perímetro urbano.

As bombas da EE Alta Carga estão dispostas em paralelo, como mostrado nas Figs. 2.7 e 2.8. O uso de bombas em paralelo permite que a manutenção de cada equipamento possa ocorrer sem a interrupção do fornecimento de água. O reservatório da estação de bombeamento encontra-se acima das bombas de recalque, neste caso, as bombas trabalham afogadas. As válvulas trabalham com abertura total, sendo fechadas somente na necessidade de manutenção das bombas. Todas as linhas de bomba possuem válvulas de retenção para assegurar a vazão unidirecional da descarga da bomba para o ponto A.

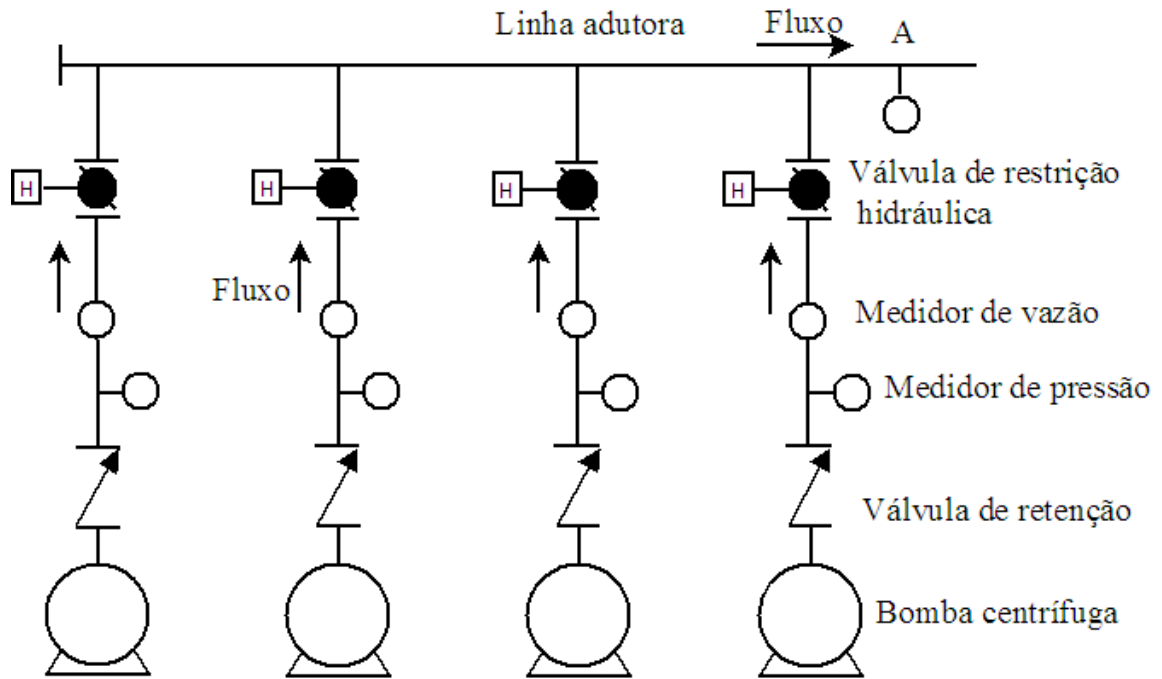


Figura 2.7 - Esquema hidráulico simplificado da EE Alta Carga



Figura 2.8 – Detalhes do ponto de descarga da linha adutora. Prédio da estação de bombeamento Alta Carga (é possível ver três bombas das quatro da instalação, e os ramais de conexões das bombas com a linha adutora principal)

O controle de vazão na EE Alta Carga é feito simplesmente pelo ligamento e desligamento do número de bombas em operação sem a utilização de uma válvula de restrição hidráulica (válvula de controle de vazão). As manobras de operação das bombas são realizadas dentro de um período mínimo de uma hora, com base no nível de água nos reservatórios. A finalidade deste limite de tempo operacional é reduzir o número de manobras nas bombas e, assim, reduzir a ocorrência de problemas de manutenção (Awumah e Lansey, 1994).

Toda a água tratada bombeada flui ao longo de uma adutora de grande diâmetro (linha principal) para o reservatório. A linha principal de água é feita de aço carbono e tem um comprimento total de 5600 m. O perfil da cota da linha principal de água é mostrado na Fig. 2.8. Existe uma camada de terra por toda extensão da linha adutora (Fig. 2.5a). Os desníveis do percurso contribuem para as perdas de carga e, por conseguinte, para o aumento do consumo de energia elétrica. Blocos de ancoragem são instalados ao longo da adutora em pontos críticos de esforços mecânicos (Fig. 2.8).

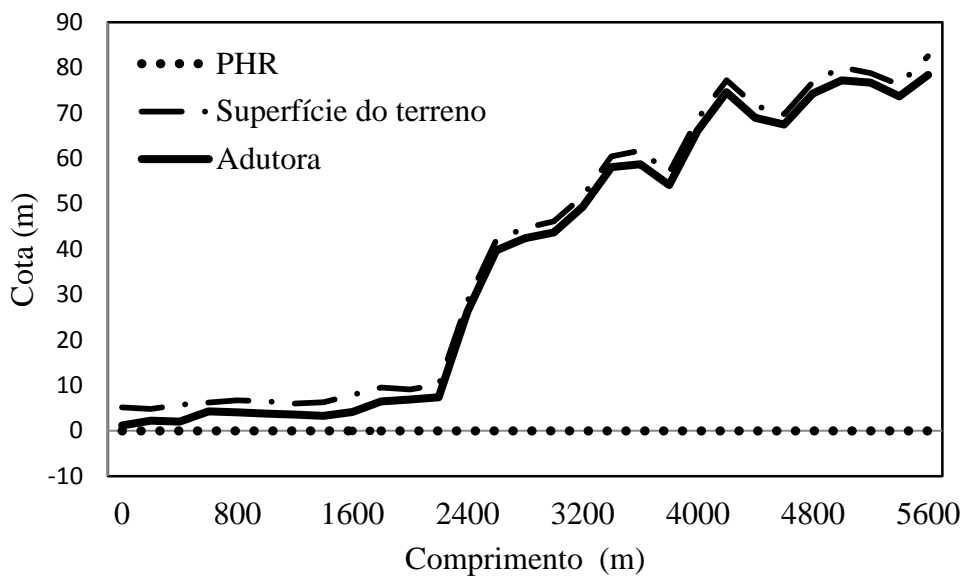


Figura 2.8 - Perfil de cotas – linha adutora principal de água



Figura 2.9 – Bloco de ancoragem em uma adutora de diâmetro interno 900 mm (DI 900).
Fonte: Embasa (2010)

A linha adutora principal começa na extremidade do sistema de bombeamento (ponto A da Fig. 2.7) e nos primeiros 1600 m não há aumento significativo no nível da linha adutora em relação ao Plano Horizontal de Referência (PHR). Esta linha adutora é composta por segmentos de seções retas, curvas verticais e horizontais, reservatórios e válvulas unidirecionais. Devido à topografia irregular da superfície do solo, a linha principal é muito sinuosa, o que explica a grande quantidade de elementos de conexão hidráulicos instalados. No total, a linha adutora principal tem 88 elementos hidráulicos. Todos estes elementos foram considerados no modelo como perdas de carga secundárias.

A Fig. 2.10 mostra uma curva de demanda diária típica (0-24h) da localidade abastecida pela EE Alta Carga. O período de amostragem praticado na EE Alta Carga é de 1 hora. Este período está associado à inerente dinâmica lenta de todo o sistema (confirmado adiante pelos resultados), o que se justifica pela elevada capacitância de massa (linha adutora e reservatório).

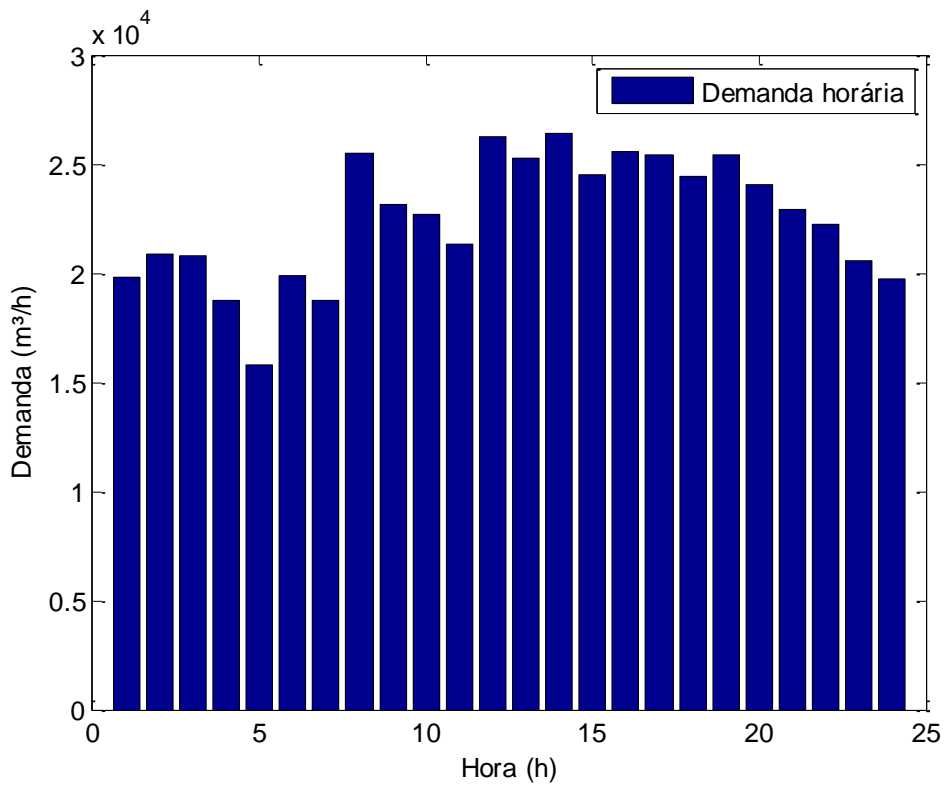


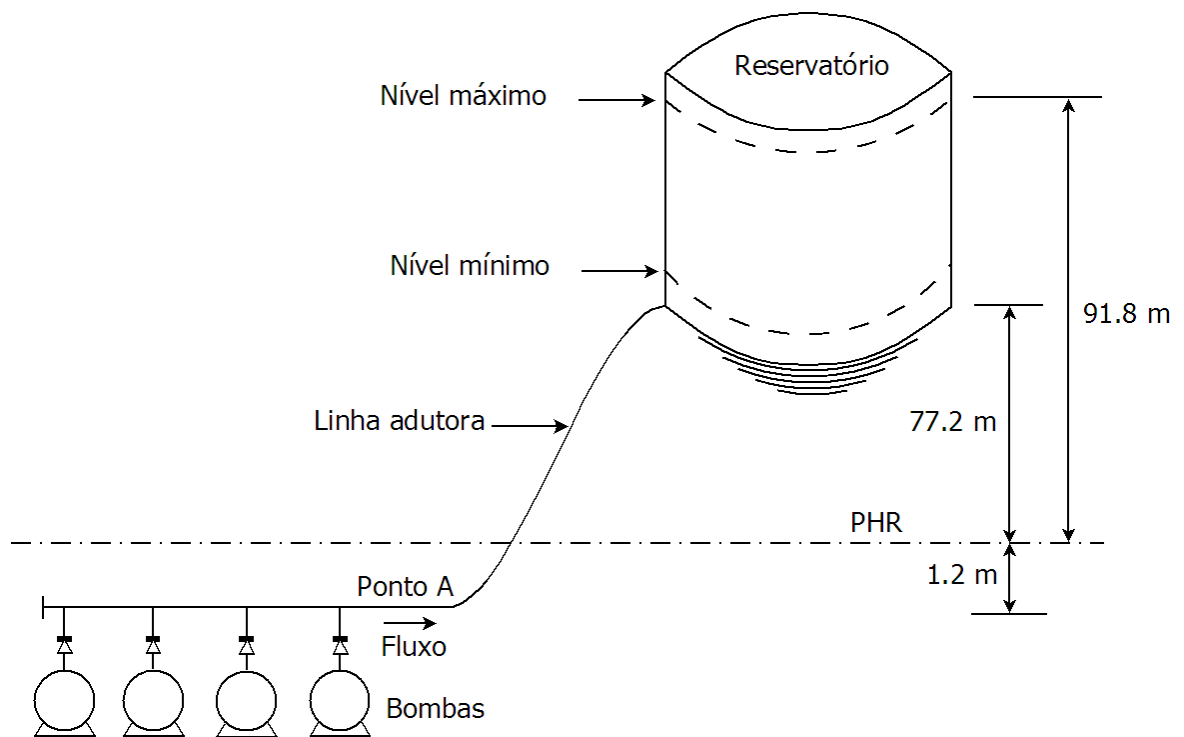
Figura 2.10 - Distribuição de demanda de água em um dia útil

A curva na Fig. 2.10 mostra o comportamento transitório ao longo do dia com picos de demanda. O perfil da demanda muda de acordo com o dia (dias úteis e feriados) e conforme a sazonalidade ao longo do ano.

O complexo de reservatórios do Cabula é constituído por quatro reservatórios cilíndricos idênticos apoiados no chão, com capacidade total de armazenamento de 36.000 m³. Os reservatórios são construídos no mesmo plano horizontal (Fig. 2.11a-b). Tomando como base o PHR, o fundo do reservatório está situado a altura de 77,2 m e o nível máximo de água é de 91,8 metros. A descarga das bombas (ponto A da Fig. 2.7) situa-se a 1,2 m abaixo do PHR, de acordo com a Fig. 2.11b.



(a)



(b)

Figura 2.11 – Reservatórios de distribuição de água. (a) Complexo de reservatórios do estudo de caso, reservatório do Cabula (Fonte: Embasa, 2010), (b) elevação do reservatório de água

2.3 MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Em geral, o comportamento transitório de redes hidráulicas pode ser descrito pela

equação da continuidade (balanço de massa na forma diferencial), juntamente com a equação da conservação de momento (Chaudhry, 1979), também na forma diferencial. Esta última considera o equilíbrio de forças que atuam sobre um volume de controle previamente especificado de acordo com o sistema de coordenadas adotado. O modelo adotado neste trabalho as seguintes hipóteses foram assumidas:

- Escoamento incompressível (densidade constante) e fluxo unidimensional, de modo que a variação espacial das variáveis de estado (altura piezométrica e vazão volumétrica) ocorre apenas na direção axial (coordenada x). Isto implica em assumir uma distribuição uniforme de velocidade, em cada seção transversal da linha adutora principal.
- Elasticidade linear da parede do tubo de modo que a sua expansão (ou contração) é diretamente proporcional à tensão aplicada.
- As mesmas correlações para a perda de carga no estado estacionário são válidas para o transitório.

Considerando um volume de controle infinitesimal de comprimento (δx) e raio de seção transversal (r), a equação da continuidade, em regime transitório e em condições de densidade constante, estabelece que a variação de massa total de fluido dentro do volume durante um intervalo de tempo infinitesimal (δt) é igual à diferença entre os volumes de fluido que entram e saem deste volume de controle neste mesmo intervalo de tempo. No Apêndice A encontra-se a demonstração completa da equação da continuidade em regime (Eq. 2.1) que estabelece a altura piezométrica H como variável de estado (Chaudhry, 1979):

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{a^2}{A \cdot g} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} \quad 2.1$$

A altura piezométrica está diretamente relacionada com a pressão do escoamento ($p(x,t)$) ao longo da linha principal.

$$H(x,t) = \frac{p(x,t)}{\rho \cdot g} + z(x) \quad 2.2$$

x é a posição (distância em metros a partir do ponto A, Fig. 2.7), a é a velocidade da onda (ou

velocidade da onda do Golpe de Ariete) (m/s), g é a aceleração da gravidade (m/s²), ρ é a densidade da massa de água (kg/m³), A é a área da secção transversal de um tubo (m²), t é o tempo (h) e Q a vazão volumétrica (m³/h). A velocidade da onda de água a é uma propriedade do fluido e pode ser estimada de acordo com Sanks (1998), considerando o módulo de elasticidade (K), o coeficiente de Poisson para o aço (μ) e o módulo de Young de elasticidade das paredes da tubulação (E) como parâmetros adicionais:

$$a = \sqrt{\frac{K / \rho}{1 + \frac{D}{e} \cdot \frac{K}{E} \cdot \Psi}} \quad 2.3$$

onde $\Psi = 1 - \mu^2$ é o fator de correção para o encanamento de paredes finas, $D/e > 40$ e ancorada contra o movimento axial. As quantidades físicas de K , e , D , E e ρ são apresentadas na Tabela 2.2. O valor da velocidade de onda obtido através da Eq. 2.3 é 1.495 m/s.

A aplicação da conservação do momento, em um volume de controle infinitesimal gera outra equação diferencial parcial tendo a vazão volumétrica (Q) como variável de estado:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -g \cdot A \cdot \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{f \cdot Q^2}{2 \cdot D \cdot A} \quad 2.4$$

f é o coeficiente de atrito. A correlação Swamee-Jain (Swamee e Sharma, 2008) foi adotada para estimar este parâmetro (Eq. 2.5).

$$f = \left\{ \left[\frac{64}{\left(\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v \cdot D} \right)} \right]^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{\left(\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v \cdot D} \right)^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{\left(\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v \cdot D} \right)} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad 2.5$$

onde ε é o valor médio da rugosidade do tubo em m e v é a viscosidade cinemática do fluido (m²/s). A Eq. 2.6 apresenta a viscosidade da água em função da temperatura.

$$v = 1,792 \cdot 10^{-6} \left[1 + \left(\frac{T}{25} \right)^{1,165} \right]^{-1} \quad 2.6$$

O Apêndice A apresenta uma proposta de desenvolvimento da Equação do movimento (Eq. 2.4) a partir da equação da energia térmica.

O consumo de energia (kWh) está relacionado com a potência e tempo de operação de cada bomba. Por sua vez, a potência P (kW) é uma função da vazão e da altura piezométrica na descarga da estação de bombeamento ($Q(0, t)$ e $H(0, t)$) (ponto A na Fig. 2.7) e também do rendimento global da estação de bombeamento ($\eta_b(t)$) (Sanks, 1998; Mays, 2004).

$$P = \gamma \cdot \frac{Q(0, t) \cdot H(0, t)}{\eta_b(t)} \quad 2.7$$

γ é o peso específico da água (kN/m^3). Em um dado instante a eficiência global é o produto da eficiência de todas as bombas em operação. As constantes físicas usadas no modelo estão apresentadas na Tabela 2.2 (Sanks, 1998).

Tabela 2.2 - Parâmetros e propriedades de projeto

Constantes físicas	Símbolo	Valor
Aceleração média da gravidade	g	9,81 m/s^2
Coefficiente de Poisson do aço	μ	0,27
Massa específica da água (20°C)	ρ	1000 kg/m^3
Módulo Young de elasticidade da parede da tubulação	E	125×10^{12} Pa
Módulo Bulk de elasticidade	K	$2,23 \times 10^9$ Pa
Peso específico da água (20°C)	γ	9,79 kN/m^3
Pressão atmosférica	P_{atm}	101.300 Pa
Diâmetro da tubulação	D	1,5 m
Espessura da parede da tubulação	e	0,04 m
Média de rugosidade do aço	ε	4×10^{-5} m

2.4 RESOLUÇÃO NUMÉRICA

O modelo transiente do sistema de abastecimento compreende o seguinte sistema de equações diferenciais parciais, composto pelas Eqs. 2.1 e 2.4:

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{a^2}{A \cdot g} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} \\ \frac{\partial Q}{\partial t} = -g \cdot A \cdot \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{f \cdot Q^2}{2 \cdot D \cdot A} \end{cases} \quad 2.8$$

A resolução do sistema de Eqs. 2.8 fornece os perfis de vazão e altura piezométrica ao longo do tempo [$Q(x, t)$ e $H(x, t)$]. A condição inicial inclui os perfis iniciais [$Q(x, 0)$ e $h(x, 0)$] dentro do domínio do problema (da descarga das bombas até ao fim da linha principal). Nos primeiros ensaios de simulação, um perfil de vazão uniforme considerando-se o mesmo valor de vazão medida na descarga do sistema de bombeamento foi assumido. Para a altura piezométrica, um perfil inicial foi obtido assumindo um comportamento linear da pressão desde a descarga da bomba (leitura disponíveis) até a pressão atmosférica (fim da linha principal, descarga nos reservatórios), de acordo com a Eq. 2.9:

$$H(x, 0) = \frac{p(x, 0)}{\rho \cdot g} + z(x) \quad 2.9$$

onde $p(x, 0)$ é o perfil da pressão inicial (N/m^2), e $z(x)$ é o perfil de cota (m).

As condições de contorno foram estabelecidas de acordo com a realidade, natureza do modelo e as limitações impostas pelo sistema. Para altura piezométrica, a pressão no final da linha principal é igual à pressão atmosférica em qualquer instante de tempo:

$$H(x_f, t) = H_f = \frac{P_{atm}}{\rho \cdot g} + z_f \quad 2.10$$

onde x_f representa a posição axial final, z_f é a cota final (m) e P_{atm} é a pressão atmosférica (N/m^2).

Por sua vez, as condições de contorno para a variação de vazão foram especificadas na descarga da estação de bombeamento (no início da linha principal), a partir da velocidade de rotação das bombas e as suas respectivas curvas (fornecidas pelo fabricante). Cada curva relaciona a vazão com a altura piezométrica, ambos na descarga da bomba. Uma curva global do sistema, resultante das curvas das três bombas dispostas em paralelo, foi obtida de acordo com Sanks (1998). Assim, em cada instante de tempo, a vazão no início da linha principal (ponto A da Fig. 2.7) é determinada pelo valor da altura piezométrica através da curva global do sistema de bombeamento.

As quatro bombas são consideradas idênticas e o fabricante fornece uma curva de

carga de uma única bomba a uma velocidade de rotação de 1175 rpm. O tratamento analítico para obter a curva de carga global do sistema de bombeamento inclui o seguinte:

- A partir da curva original (velocidade de rotação de 1175 rpm), outras curvas de análogas para rotações de 1150 rpm, 1125 rpm e 1115 rpm foram geradas diretamente por meio das Leis de Afinidade (Eq. 2.11) (Sanks, 1998; Mays, 2004).

$$\begin{cases} \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \\ \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \\ \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \end{cases} \quad 2.11$$

onde n é a velocidade de rotação da bomba em rpm.

- Cada curva referente a uma determinada velocidade de rotação foi ajustada por um polinômio de segundo grau:

Os coeficientes dos polinômios das três curvas foram ajustados a um polinômio de primeiro grau, chegando-se a uma curva genérica para qualquer velocidade de rotação na faixa de operação considerada (de 1120 a 1175 rpm).

$$H(\tau, Q) = \alpha_1(\tau) + \alpha_2(\tau) \cdot Q + \alpha_3(\tau) \cdot Q^2 \quad 2.12$$

onde $\alpha_1(\tau)$, $\alpha_2(\tau)$ e $\alpha_3(\tau)$ são os parâmetros da curva genérica e τ a rotação.

Como a estação de bombeamento tem uma configuração em paralelo, a altura piezométrica na descarga de cada bomba é a mesma e igual a altura piezométrica após a junção da vazão das bombas (ponto A, Fig. 2.7). Esta altura piezométrica $(H(0, t))$ é obtida através da solução numérica do modelo em um dado instante t . A outra condição de contorno está associada ao valor da vazão volumétrica no início da linha principal $(Q(0, t))$. Esta vazão será a soma das vazões de cada bomba e esta será definida pela altura piezométrica $(H(0, t))$ no início da linha de descarga e pela respectiva rotação praticada.

O método das linhas (Pinto e Lage, 2001; Marques *et al.*, 2009; Schiesser, 1991) viabiliza a transformação do sistema de equações diferenciais parciais (Eq. 2.8) em um

sistema de equações diferenciais ordinárias no tempo, através da discretização das derivadas de posição por meio de diferenças finitas. O método das linhas oferece uma alternativa eficiente para resolver equações diferenciais parciais dependentes do tempo e unidimensionais (Chen-Shan, 2006), com aplicações em diferentes tipos de problemas (Schittkowski, 1997). O sistema de equações diferenciais resultantes foi resolvido através do MATLAB[®] utilizando o método de Runge–Kutta de quarta ordem e de passo variável, assegurando-se que o intervalo de tempo é pequeno o suficiente para satisfazer a condição de estabilidade de *Courant* (Fenghua *et al.*, 1999; Christoph e Waymond, 2002). O domínio espacial do problema foi dividido em segmentos de mesmo comprimento de acordo com a Fig. 2.12.

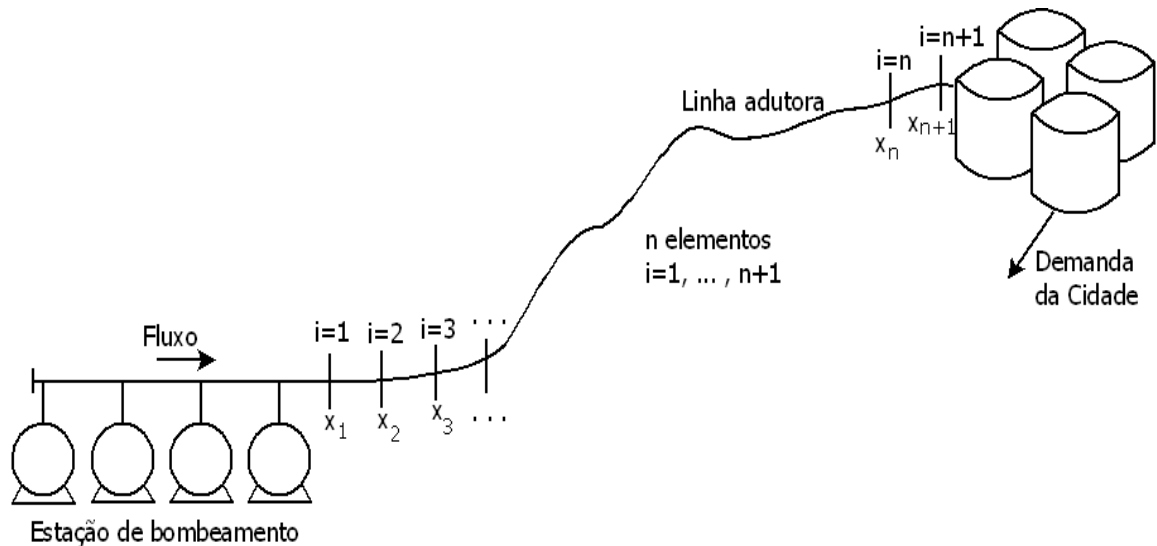


Figura 2.12 - Esquema simplificado do sistema de abastecimento e distribuição de água

As fórmulas das diferenças finitas de primeira ordem para frente e para trás foram adotadas para as derivadas de posição da vazão e altura piezométrica (Eqs. 2.13 e 2.14), respectivamente, considerando-se que as condições de contorno para vazão e altura piezométrica foram definidas no início e no final da linha principal, respectivamente:

$$\left. \frac{\partial Q}{\partial x} \right|_i = \frac{dQ_i}{dt} = \frac{Q_{i+1} - Q_i}{\Delta_i} \quad 2.13$$

$$\left. \frac{\partial H}{\partial x} \right|_i = \frac{dH_i}{dt} = \frac{H_i - H_{i-1}}{\Delta_i} \quad 2.14$$

onde Δ_i é o comprimento (m) de cada intervalo.

Aplicando as Eqs. 2.13 e 2.14 no sistema 2.8 tem-se:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dQ}{dt} \Big|_i = \frac{dQ_i}{dt} = -g \cdot A \cdot \left(\frac{H_i - H_{i-1}}{\Delta_i} \right) - \frac{f_{i-1,i} \cdot (Q_i)^2}{2 \cdot D \cdot A} \end{array} \right. \quad 2.15$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dH}{dt} \Big|_i = \frac{dH_i}{dt} = -\frac{a^2}{A \cdot g} \cdot \left(\frac{Q_{i+1} - Q_i}{\Delta_i} \right) \end{array} \right. \quad 2.16$$

$f_{i-1,i}$ é o fator de atrito para cada segmento da linha principal (entre os pontos x_{i-1} e x_i),

$(dQ/dt)|_i$ e $(dH/dt)|_i$ são as derivadas temporais da vazão e altura piezométrica no ponto x_i .

De acordo com as condições de contorno especificadas, as Eqs. 2.15 e 2.16 fornecem o seguinte sistema de equações diferenciais ordinárias:

$$\left\{ \begin{array}{l} i=1 \Rightarrow \frac{dH_1}{dt} = -\frac{a^2}{A \cdot g} \cdot \left(\frac{Q_2 - Q_1}{\Delta_1} \right) \quad \text{onde } Q_1 = f(H_1, \text{rotação da bomba}) \\ i=2 \Rightarrow \frac{dH_2}{dt} = -\frac{a^2}{A \cdot g} \cdot \left(\frac{Q_3 - Q_2}{\Delta_2} \right) \\ i=2 \Rightarrow \frac{dQ_2}{dt} = -g \cdot A \cdot \left(\frac{H_2 - H_1}{\Delta_2} \right) - \frac{f_{1,2} \cdot (Q_2)^2}{2 \cdot D \cdot A} \\ \vdots \\ i=n \Rightarrow \frac{dH_n}{dt} = -\frac{a^2}{A \cdot g} \cdot \left(\frac{Q_{n+1} - Q_n}{\Delta_n} \right) \\ i=n \Rightarrow \frac{dQ_n}{dt} = -g \cdot A \cdot \left(\frac{H_n - H_{n-1}}{\Delta_n} \right) - \frac{f_{n-1,n} \cdot (Q_n)^2}{2 \cdot D \cdot A} \\ i=n+1 \Rightarrow \frac{dQ_{n+1}}{dt} = -g \cdot A \cdot \left(\frac{H_{n+1} - H_n}{\Delta_n} \right) - \frac{f_{n,n+1} \cdot (Q_{n+1})^2}{2 \cdot D \cdot A} \quad \text{sabendo que } H_{n+1} = \frac{P_{atm}}{\rho g} + z_{n+1} \end{array} \right.$$

n é o número de intervalos adotados. O sistema transitório apresentado compreende $2 \times n$ equações diferenciais ordinárias e $2 \times n$ variáveis de estado, quais sejam, os valores de vazão volumétrica (Q_i , $2 \leq i \leq n+1$) e altura piezométrica (H_i , $1 \leq i \leq n$). Neste trabalho, com base nos testes iniciais de simulação, foram considerados 112 intervalos, cada um de 50 m de comprimento, resultando em um sistema de equações com 224 equações diferenciais.

A Eq. 2.17 (equilíbrio de massa no reservatório) também foi considerada no modelo a fim de descrever o comportamento transitório do nível de água no reservatório.

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_{n+1} - Q_{out}}{A_b} \quad 2.17$$

onde Q_{n+1} é vazão de entrada (m^3/h) nos tanques, Q_{out} é saída dos tanques (demanda) (m^3/h), A_b é a área da base dos tanques (m^2). O valor mínimo e máximo do nível da água foi também determinado para evitar problemas de baixa pressão na rede de distribuição de água ou transbordamento nos tanques. A Fig. 2.13 mostra a estratégia de simulação.

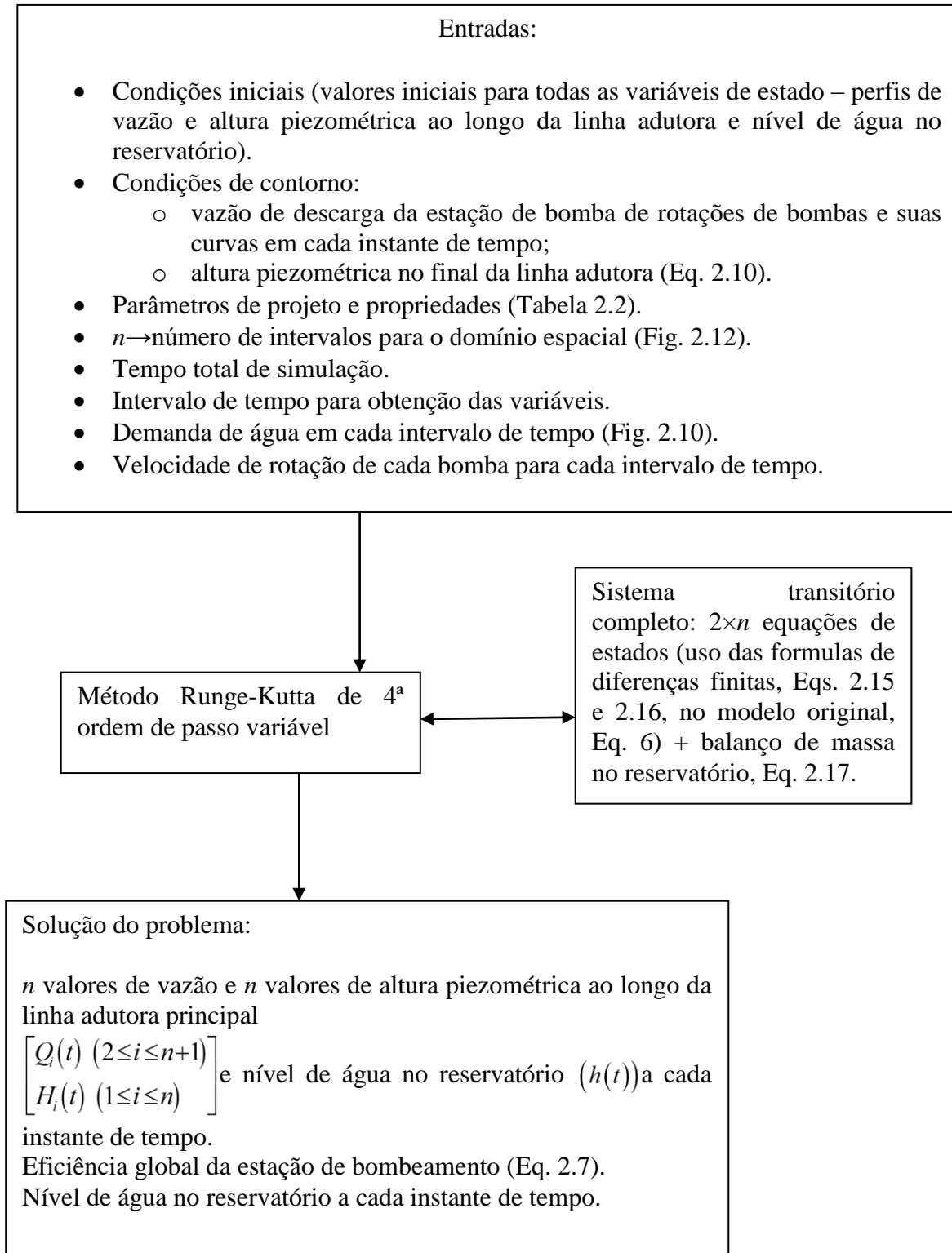


Figura 2.13 - Estratégia de simulação

De acordo com a Eq. 2.17 (ver também a Fig. 2.13), a demanda (Q_{out}) é uma entrada do modelo e o seu valor, a cada intervalo de tempo, é explicitamente considerado no balanço de massa do reservatório, que fornece o comportamento transitório do nível de água no reservatório ($h(t)$). Portanto, a abordagem de simulação produz como resultado os perfis de

vazão e altura piezométrica na linha principal, sendo atendida a curva de demanda diária (Fig. 2.10).

2.5 RESULTADOS

O primeiro teste de simulação foi realizado para verificar o desempenho do modelo com base nas medições disponíveis do sistema de abastecimento (vazão volumétrica na descarga da estação de bombeamento e altura do nível de água no reservatório). A simulação seguiu os procedimentos operacionais praticados na estação de bombeamento (Tabela 2.3). A Tabela 2.3 mostra os períodos de operação de bombeamento realizados na EE Alta Carga durante um ciclo de 24 horas de trabalho.

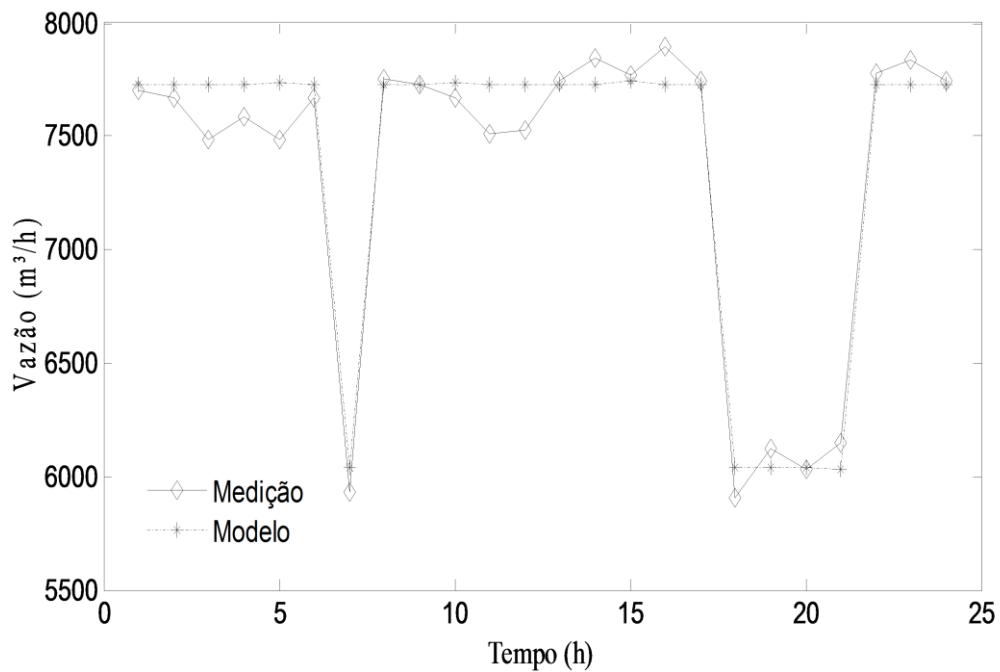
Tabela 2.3 – Sequência de operação de bombeamento praticada na EE Alta Carga

Período (h)	Número de bombas em operação	Velocidade de rotação de cada bomba (rpm)
0:00 - 5:00	4	1175
6:00	2	1175
7:00 - 16:00	4	1175
17:00 - 20:00	2	1175
21:00 - 23:00	4	1175

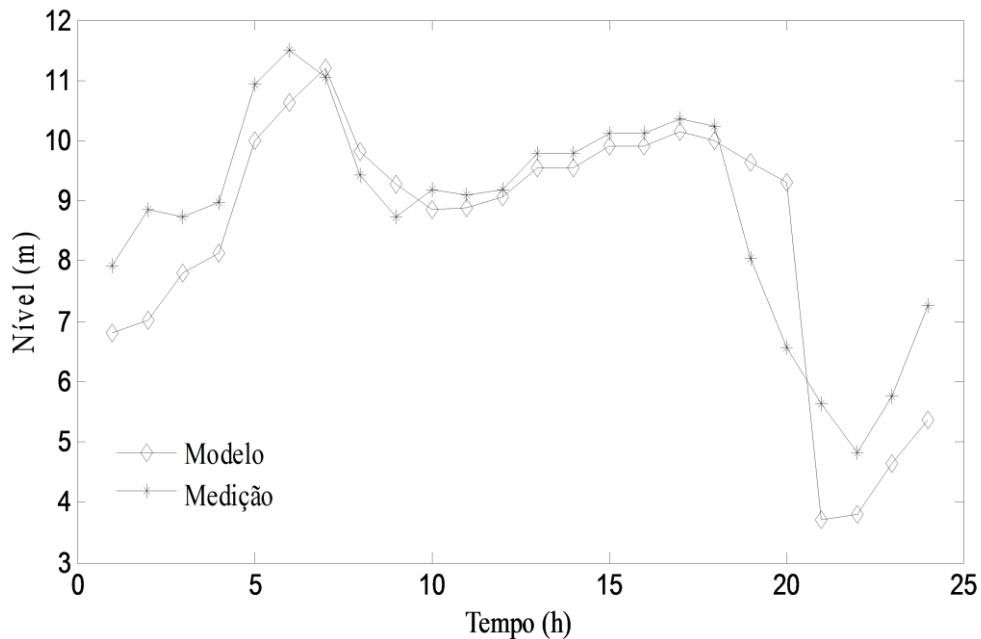
A Tabela 2.3 apresenta um procedimento operacional padrão para o funcionamento do sistema de bombeamento baseado em um padrão diário de demanda (Fig. 2.10) com o objetivo de minimizar os custos de energia, reduzindo a capacidade de bombeamento através do desligamento de duas bombas durante o período de maior custo de eletricidade (em Salvador, o horário/período de pico fica entre 17 e 20 h nos dias úteis). Ainda, no período de 5 às 6h o bombeamento foi reduzido para reduzir a tendência de elevação da curva do nível de água, e com isso evitar a ultrapassagem do nível máximo do reservatório. Em geral, o operador da estação de bombeamento busca assegurar que os níveis iniciais e finais de cada ciclo (24 horas) mantenham-se iguais. Além disso, as mudanças e manobras de bombas são realizadas pelo operador com base em seu conhecimento e experiência. Neste caso, tanto o nível de água nos reservatórios como as alterações no padrão de demanda podem influenciar nestes ajustes.

A Fig. 2.14a apresenta os resultados da vazão volumétrica predita pelo modelo e a vazão medida, ambos no ponto de descarga da estação de bombeamento (ponto A da Fig. 2.7),

de acordo com a Tabela 2.3. As Figs. 2.14a-b mostram os resultados dos testes de adequabilidade (*lack of fit*) do modelo. Com base nesses resultados, pode-se afirmar que o modelo fenomenológico descreve satisfatoriamente a dinâmica dominante do sistema. Mais ainda, os desvios entre os valores previstos e medidos tendem a se compensar ao longo de todo ciclo de trabalho, embora a maior parte dos valores preditos sejam mais elevados do que os valores medidos durante as primeiras 12 horas do dia. Por outro lado, a Fig. 2.14b mostra que a simulação também apresenta a consistência na predição da trajetória do nível de água no reservatório.



(a)



(b)

Figura 2.14 – Resultados da simulação para vazão de descarga e nível de água. (a) Vazão $Q(0,t)$ (m^3/h) volumétrica na descarga da estação de bombeamento e (b) nível de água nos tanques

Um segundo teste foi realizado para verificar a consistência do modelo na predição dos perfis de altura piezométrica e vazão ao longo da adutora. As Figs. 2.15, 2.16a-b mostram os perfis destas duas variáveis de estado em regime permanente e em regime transitório.

Neste teste de simulação, a estação de bombeamento começa a operar com a capacidade máxima de operação (quatro bombas) e após quatro horas uma das quatro bombas é desligada. A Fig. 2.15 apresenta os perfis de estado de equilíbrio (regime permanente) inicial e final da altura piezométrica e da vazão ao longo da linha adutora. Os perfis de estado estacionário da altura piezométrica antes e após a perturbação estão consistentes com a existência de perda de carga ao longo da tubulação e com os valores mais elevados de pressão obtidos na carga máxima de bombeamento (quatro bombas operando). Ainda, os perfis uniformes de vazão também são consistentes, pois é assumido que o escoamento é incompressível e a vazão mássica é uniforme no regime permanente.

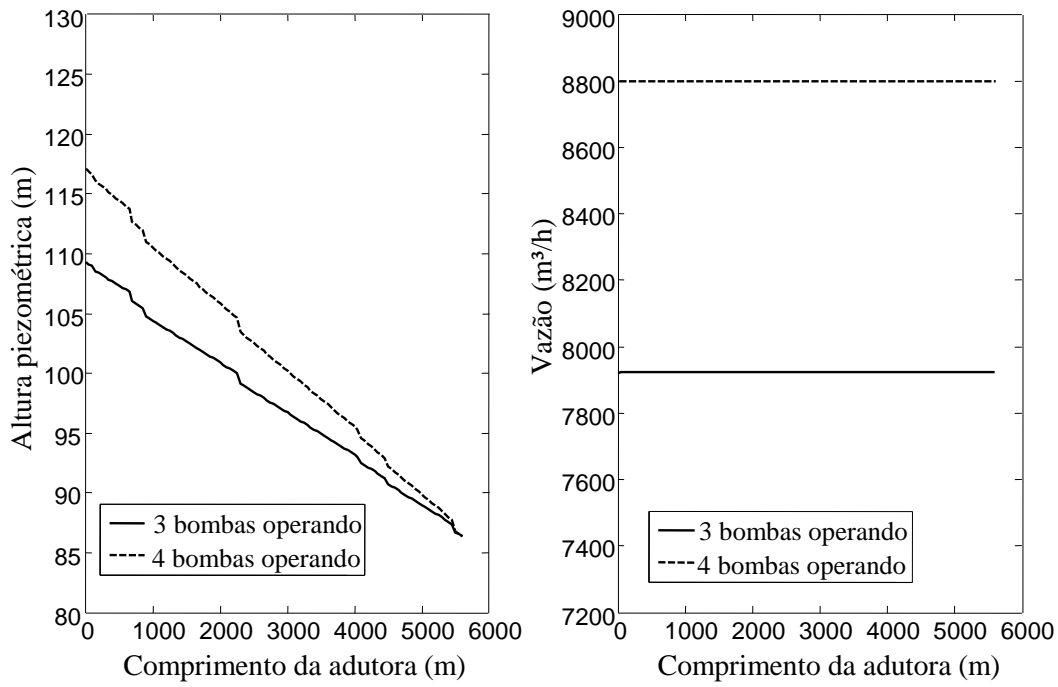
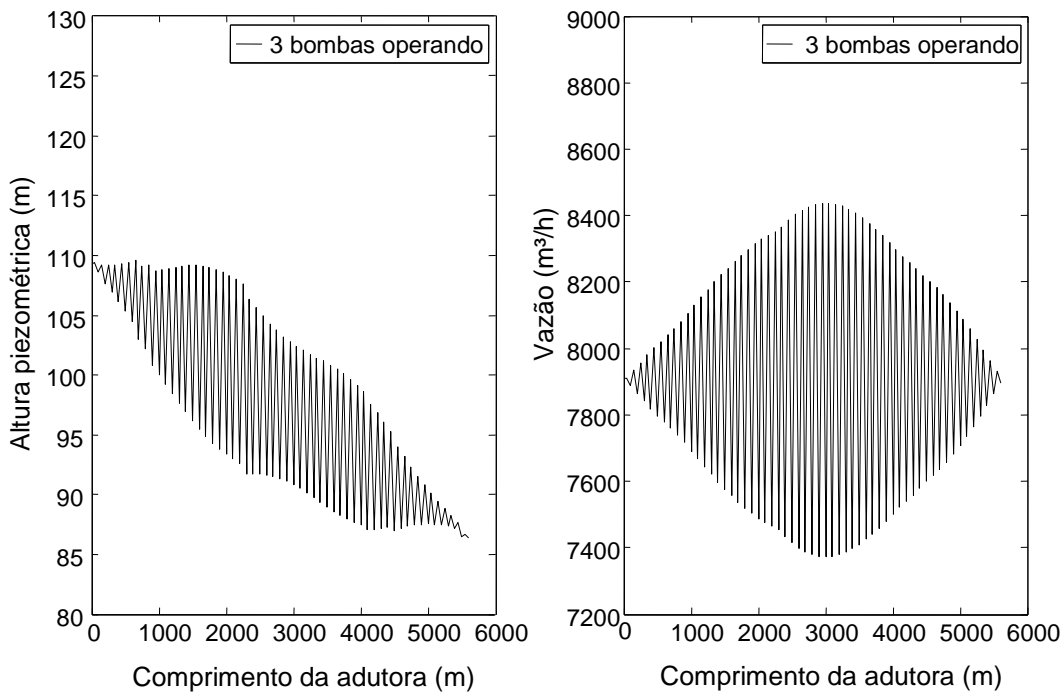


Figura 2.15 - Estados estacionários inicial (4 bombas) e final (3 bombas)



(a)

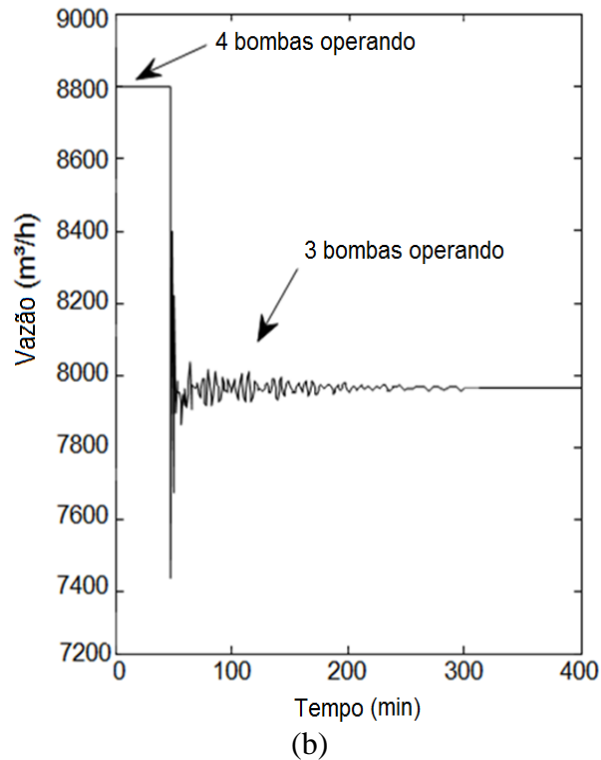


Figura 2.16 - Perfis transitórios de vazão e altura piezométrica. (a) Perfis de altura piezométrica e vazão $Q(0,t)$ (m^3/h) após o desligamento de uma bomba, e (b) comportamento no tempo da vazão na descarga da estação de bombeamento devido ao desligamento de uma bomba

A Fig. 2.16a mostra os perfis transitórios de altura e vazão ao longo da linha adutora logo após a perturbação (desligamento de uma bomba). A simulação considera que a parada da bomba é instantânea, o que pode ser considerado muito próximo da realidade. A Fig. 2.16b apresenta o comportamento transitório da vazão especificamente na descarga da estação de bombeamento. Ainda, observa-se na Fig. 2.16b que o estado de equilíbrio final foi atingido quatro horas depois do distúrbio. O perfil oscilatório na Fig. 2.16b pode ser aproximado por um comportamento transitório de segunda ordem com o fator de amortecimento e frequência iguais a 0,29 e 0,053 Hz, respectivamente. Durante o transitório, os perfis de vazão e de altura piezométrica apresentam comportamento oscilatório. Isto está associado ao efeito ressonante nas oscilações de vazão provocado pelo desligamento da bomba (alteração brusca de vazão e altura piezométrica). Estas ondas ressonantes são relatados por Chaudry (1979), Wylie e Streeter (1978), e Wood *et al.* (2005).

Um terceiro teste de simulação foi baseado na possibilidade de inclusão de conversores de frequência na EE de Alta Carga, de modo a melhorar a eficiência energética

do sistema de abastecimento. A utilização de um conversor de frequência permite a manipulação da vazão de descarga sem a utilização de acessórios adicionais, que geram perdas de carga. Nos últimos anos, conversores de frequência têm sido cada vez mais utilizados na indústria e têm demonstrado resultados promissores na redução do consumo de energia (Lingireddy e Wood, 1998; Ozdemir, 2003). A programação de bombeamento praticada EE Alta Carga no período de 0-24 horas (bombas com rotação fixa, caso real, Tabela 2.3) foi considerada como base de comparação. A simulação com velocidade de rotação variável foi realizada considerando que as bombas podem operar com velocidades de rotação de 1120 a 1175 rpm e conforme uma programação de funcionamento de acordo com a Tabela 2.4, visando manter a vazão de descarga da estação de bombeamento (início da adutora) próxima da demanda horária (Fig. 2.17).

Tabela 2.4 – Programação de bombeamento (simulação)

Tempo (h)	Velocidade de rotação da bomba (rpm)			
	Bomba 1	Bomba2	Bomba 3	Bomba 4
1	1175	1175	0	0
2	1120	0	1175	0
3	1120	0	0	1120
4	1120	1120	0	0
5	1120	0	1120	0
6	1120	0	0	1175
7	1135	1175	0	0
8	1120	0	1175	0
9	1150	0	0	1175
10	1120	1120	1120	0
11	1175	0	1120	1120
12	1175	1175	0	1175
13	1120	1120	1175	1175
14	1175	1175	1160	0
15	1175	1120	0	1120
16	1160	0	1120	1120
17	1175	1175	0	0
18	1175	0	0	1120
19	1150	1175	0	0
20	1175	0	0	1160
21	1165	1175	0	0
22	1175	0	1150	1120
23	1175	1120	1120	0
24	1175	0	0	1175

A Fig. 2.17 mostra a vazão de descarga da estação de bombeamento (obtida a partir da simulação). Em ambas as situações (velocidade de rotação fixo e variável), foram consideradas a mesma curva de demanda horária (Fig. 2.17). Inicialmente, para as bombas

operando com rotação fixa, os resultados mostram uma alta de descarga, mesmo nos instantes de baixa demanda. A Fig. 2.18 apresenta a trajetória dos níveis dos reservatórios em ambos os casos simulados e mostra que na situação de bombas operando com velocidade de rotação variada houve um menor acúmulo de água no reservatório, sem comprometer o atendimento à demanda horária.

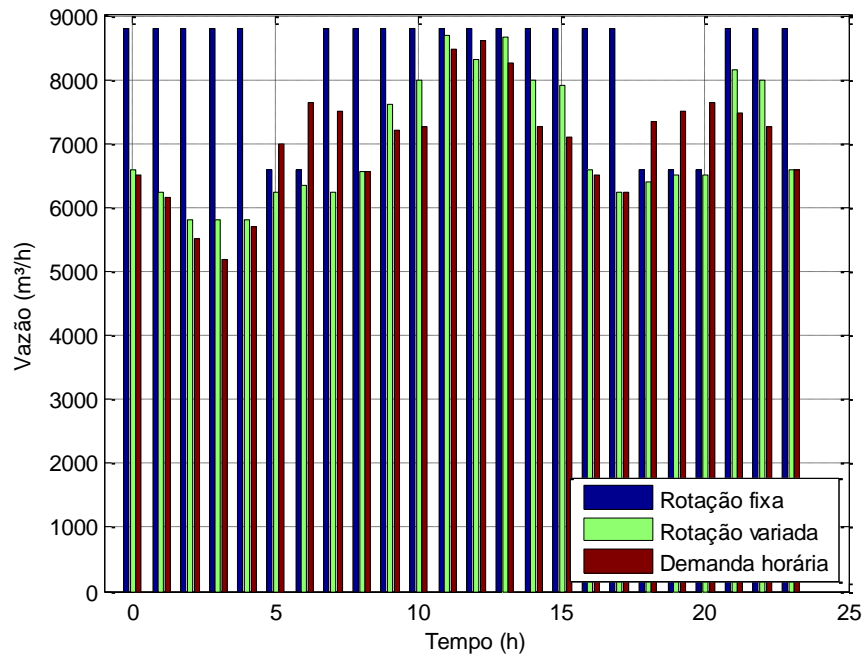


Figura 2.17 - Vazão $Q(0,t)$ (m³/h) de descarga da estação de bombeamento – bombas com rotação fixa e variável

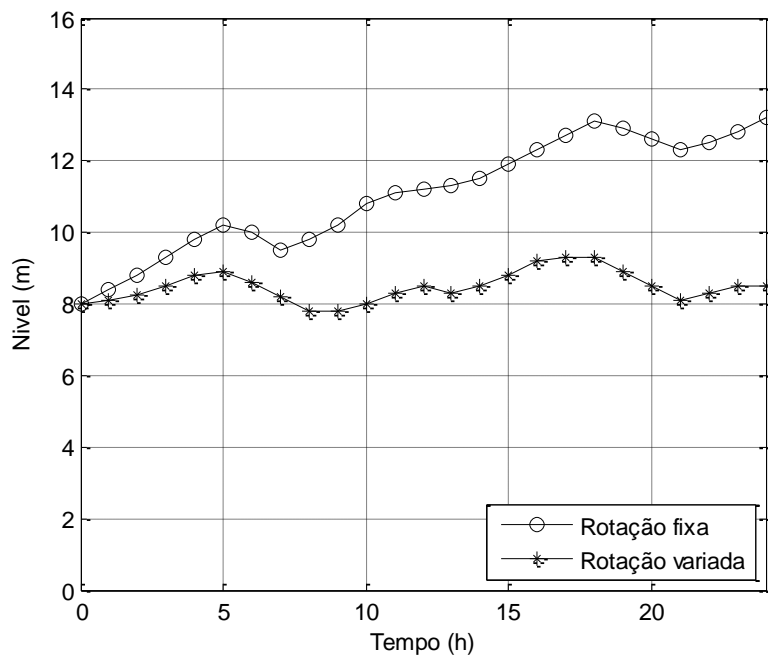


Figura 2.18 - Nível de água no reservatório – bombas com rotação fixa e variável

A Fig. 2.19 confirma a melhoria da eficiência de energia na operação de bombeamento com rotação variável, comparando a potência horária do sistema de bombeamento para ambos os casos analisados.

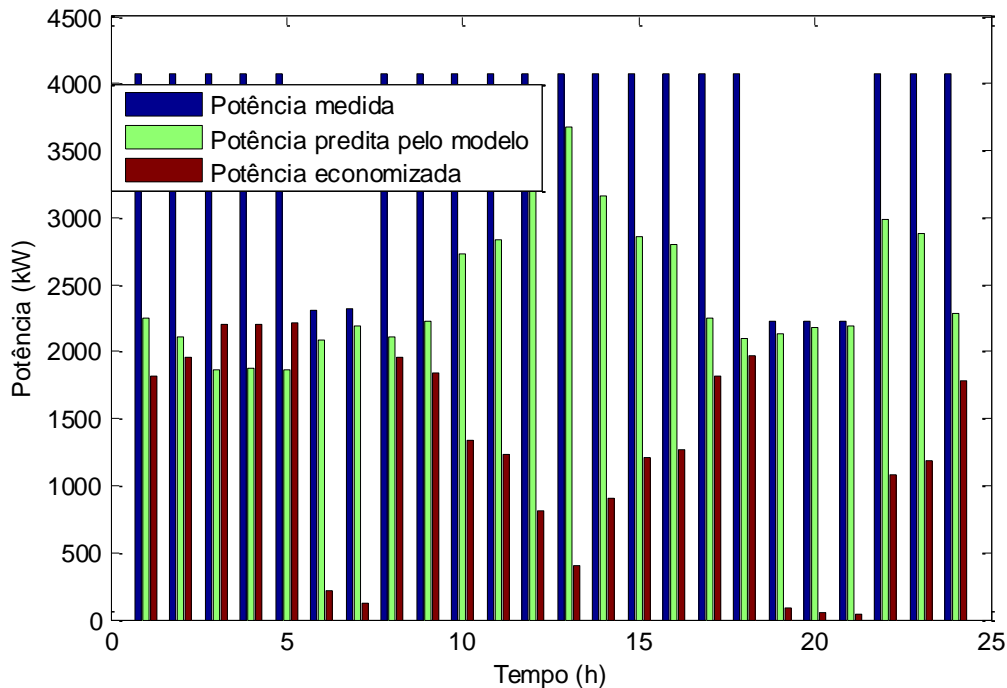


Figura 2.19 – Economia de energia com bombas de velocidade de rotação variável

De acordo com a Fig. 2.18, durante o período analisado, a energia economizada é de 29.274,00 kW o que equivale a uma redução de 33,1% em comparação com a potência medida para o mesmo período. Este ganho representa uma economia de cerca de U\$ 3.867,10 em 24 horas de operação de bombeamento, considerando-se uma tarifa de U\$ 0,1321/kWh neste período de tempo (COELBA, 2011).

Por sua vez, a figura 2.18 mostra que a operação padrão produziria um acúmulo de água no tanque de 3.750 m³ no final do ciclo de trabalho. O transporte deste volume de água requer um consumo adicional de potência igual a 7.727 kW. Este acúmulo de água, certamente, será utilizado no ciclo de trabalho do dia seguinte e para as análises do ciclo atual significa uma “poupança” de energia. Se considerarmos esta potência armazenada (7.727 kW) teríamos uma economia de potência de 21.547 kW (ao invés de 29.274 kW) o que equivale a uma redução de 24,4%.

2.6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta a simulação em regime transitório de um sistema de abastecimento urbano de água com base em um modelo fenomenológico de parâmetros distribuídos capazes de prever o comportamento hidráulico e do consumo de energia. Os testes de simulação, baseado em um caso real, atestam a consistência do modelo e o procedimento numérico considerado. Apesar das características específicas relacionadas com o caso real estudado, o modelo e a estratégia de simulação podem ser aplicados a outros sistemas de abastecimento de água, com o objetivo de conhecer o comportamento dinâmico dos perfis de altura piezométrica e vazão volumétrica ao longo da linha adutora. A estratégia do modelo e simulação também permite uma análise cuidadosa do sistema de abastecimento de água e representa uma ferramenta potencial para avaliação de estratégias de controle, dos efeitos ocasionados por distúrbios e da eficiência energética.

Os resultados mostram o ganho potencial em eficiência energética através da inclusão de conversores de frequência no sistema de bombeamento. Além disso, as mudanças na política de atuação, com a inclusão de bombas de velocidade de rotação variável, não causam alterações consideráveis no nível do reservatório e pode garantir a demanda de serviço total. Assim, a utilização de conversores de frequência no controle da vazão através da regulação da rotação da bomba é uma alternativa viável e pode ter um impacto significativo sobre a melhoria da eficiência energética em sistemas de bombeamento. Este trabalho representa uma importante contribuição para a implementação de estratégias de controle ótimo com base em bombas de velocidade variável em substituição à política operacional atualmente adotada (Tabela 2.4). O modelo dinâmico permite a análise e simulação de estratégias de controle ótimo capazes de rastrear a trajetória da demanda, desde que satisfaçam as restrições do sistema (como o nível mínimo e máximo de armazenamento) e minimizar alguma função de custo associada à eficiência energética.

Embora, outros trabalhos destaquem o impacto do ajuste da vazão de bombeamento na eficiência energética, mesmo considerando os custos associados com a instalação e manutenção dos conversores de frequência, este trabalho mostra o ganho em eficiência energética com a inclusão dos conversores de frequência em um sistema de bombeamento de escala comercial.

REFERÊNCIAS

Abe, D. S.; *et al.* Carbongas cycling in the sediments of serra da mesa and manso reservoirs, central Brazil. *Verhandlungen–Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, 9, 67-572, 2005.

Afshar, M.H.; Rohani, M. Water hammer simulation by implicit method of characteristic. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 85, 851–859, 2008.

Ahonen, T.; *et al.* Pump operation monitoring applying frequency converter. In: *Proc. IEEE Symp. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion (SPEEDAM)*, Ischia, Italy, 2008.

Barán, B.; Lücken, C. V.; and Sotelo, A. Multi-objective pump scheduling optimization using evolutionary strategies. *J. Advances in Engineering Software*, 36, 39–47, 2005.

Beckwith, S.F.; Wong, K.P. A genetic algorithm approach for electric pump scheduling in water supply system. In: *Proc. of the IEEE Conference on Evolutionary Computation*, 21-26, Perth, Australia, 1995.

Bird, R.B.; Stewart, W.E.; and Lightfoot, E. N. *Transport phenomena*. New York: John Wiley and Sons, 1960.

Bortoni, E.A.; Almeida, R.A.; and Viana, A.N.C. Optimization of parallel variable-speed-driven centrifugal pumps operation. *Energy Efficiency*, 1, 167–173, 2008.

Boulos, P.F.; *et al.* Hydraulic transient guidelines for protecting water distribution systems. *J. American Water Works Assoc.*, 5, 111–124, 2005.

Bounds, P.; Kahler, J.; and Ulanicki, B. Efficient energy management of a large-scale water supply system. *J. Civil Eng. and Environ. Systems*, 3, 209-220, 2006.

BRASIL (Ministério de Minas e Energia). *Balanço Energético Nacional – BEN*. Brasília: MME, 2013.

Brion, L.M.; Mays, L.W. Methodology for optimal operation of pumping stations in water distribution systems. *J. of Hydraulic Engineering*, 11, 1551-1569, 1991.

Carravetta, A.; *et al.* Energy Production in Water Distribution Networks: A PAT Design Strategy. *Water Resources Management*, 1-13, 2012.

Chase, D.V.; Ormsbee, L.E. Optimal pump operation of water distribution system with multiple storage tanks. In: *Proc. Conf. on Water Resour. Plann. Manag.*, 733-736, 1989.

Chaudhry, M.H. *Applied hydraulic transients*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1979.

Chen-Shan, L. An efficient backward group preserving scheme for the backward in timeburgers equation. *Computer Modeling in Engineering and Science*, 12, 55-65, 2006.

- Christoph, T.S.; Waymond, R.S. On the Stability of the FDTD algorithm for elastic media at a material interface. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40, 474-481, 2002.
- COELBA (Companhia Elétrica do Estado da Bahia). *Tabela de tarifa e preço final de energia elétrica*. Salvador: COELBA, 2011.
- Coulbeck, B.; Orr, C.H. Optimized pumping in water supply systems. In: *Proc. of IFCA, IX Triennial World Congress*, 3175-3180, Budapest, Hungary, 1984.
- Coulbeck, B.; *et al.* A hierarchical approach to optimized control of water distribution systems: part 1 decomposition. *J. Optimal Control Applications and Methods*, 9, 51-61, 1988.
- Demoyer, R.; Horowitz, L. *A systems approach to water distribution modeling and control*. Boston: Lexington books, 1975.
- Ebacher, G.; *et al.* Transient modeling of a full-scale distribution system: comparison with field data. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 2, 173-182, 2011.
- Fenghua, Z.; Zhizhang, C.; and Jiazong Z. A finite-difference time-domain method without the Courant stability conditions. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 9, 441-443, 1999.
- Fleming, K.K.; *et al.* *Susceptibility of distribution systems to negative pressure transients*. New York: American Water Works Assoc., 2006.
- Gupta, I.; Khanna, G.P. Genetic algorithm for optimization of water distribution systems. *Environmental Modeling and Software*, 14, 437-446, 1999.
- Haddad, O.; Afshar, A.; and Mariño, M.A. Honey-Bees Mating Optimization (HBMO) algorithm: a new heuristic approach for water resources optimization. *J. Water Resour. Manage.*, 5, 661-680, 2006.
- IEA (International Energy Agency). *World Energy Outlook*. Paris: OECD/IEA, 2013.
- Ismaier, A.; Schlücker, E. Fluid dynamic interaction between water hammer and centrifugal pumps. *Nuclear Engineering and Design*, 239, 3151-3154, 2009.
- Izquierdo, J.; Iglesias, P.L. Mathematical modeling of hydraulic transients in simple systems. *J. Mathematical and Computer Modeling*, 35, 801-812, 2002.
- Jowitt, P.W.; Germanopoulos, G. Optimal pump scheduling in water-supply networks. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 4, 406-422, 1992.
- Kessler, A.; Shamir, U. Analysis of the linear programming gradient method for optimal design of water supply networks. *J. Water Resour. Research*, 7, 1469-1480, 1989.
- Kwon, H.J. Analysis of Transient Flow in a Piping System. *J. Civil Engineering*, 4, 209-214, 2007.

- Lambeth, J.; Houston, J. Adjustable frequency drives saves energy. *Water Envir. and Technol.*, 3 (5), 34, 1991.
- Lansey, K.E.; Awumah, K. Optimal pump operations considering pump switches. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 1, 17–35, 1994.
- Lansey, K.E.; Zhong, Q. A methodology for optimal control of pump station. In: *Proc. Conf. on Water Resour. Plann. Manage*, 58-61, 1990.
- Lansey, K.E.; *et al.* Water distribution system design under uncertainties. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 5, 630-645, 1989.
- LeChevallier, M.W.; *et al.* The potential for health risks from intrusion of contaminants into the distribution system from pressure transients. *J. Water and Health*, 1, 3-14, 2003.
- Lingireddy, S.; Wood, D.J. Improved operation of water distribution systems using variable-speed pumps. *Journal of Energy Engineering*, ASCE 124 (3), 90-103, 1998.
- López-Ibáñez, M.; Prasad, T.D.; Paechter, B. Ant colony optimization for optimal control of pumps in water distribution networks. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 4, 337-346, 2008.
- Maier, H.R.; *et al.* Ant colony optimization for design of water distribution systems. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 3, 200–209, 2003.
- Marques, C.A.X.; *et al.* Efficiency control in a commercial counter flow wet cooling tower. *J. Energy Conversion and Management*, 50, 2843–2855, 2009.
- Mays, L.W. *Water distribution systems handbook*. New York: McGraw-Hill, 2004.
- Ormsbee, L.E.; Lansey K.E. Optimal control of water supply pumping systems. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 2, 237–252, 1994.
- Ormsbee, L.E.; *et al.* Techniques for improving energy efficiency at water supply pumping stations. *U.S. Army Engineer Water ways Experiment Station*. Jackson: Technical report, 1987.
- Ormsbee, L.E.; Walski, T.M.; Sharp, W.W. Methodology for improving pump operation efficiency. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 2, 148-164, 1989.
- Ozdemir, E. Energy conservation opportunities with a variable speed controller in a boiler house. *Applied Thermal Engineering*, 24, 981–993, 2003.
- Pinto, J.C.; Lage, P.L.C. *Mathematical methods in chemical engineering problems*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, E-papers, 2001.
- Quindry, G.E.; Brill, E.D.; Liebman, J.C. Optimization of looped water distribution systems. *J. Environ. Eng.*, 107EE4, 665-679, 1981.
- Ramos, J.S.; Ramos, H.M. Multi-criterion optimization of energy management in drinking systems. *Water Science and Technology: Water Supply*, 10(2), 129-144, 2010.

Ramos, H.M.; Kenov, K.N.; Vieira, F. Environmentally friendly hybrid solutions to improve the energy and hydraulic efficiency in water supply systems. *Energy for Sustainable Development*, 15 (4), 436-442, 2011.

Reis, L.F.R.; *et al.* Multi-reservoir operation planning using hybrid genetic algorithm and linear programming: an alternative stochastic approach. *J. Water Resour. Manage.*, 19, 831-848, 2005.

Sanks, R.L. *Pumping stations-design and construction*. 2nd ed. New York: Butterworth-Heinemann, 1998.

Schiesser, W.E. *The numerical method of lines: integration of partial differential equations*. San Diego: Academic Press, 1991.

Schittkowski, K. Parameter Estimation in one-dimensional time-dependent partial differential equations. *Optimization Methods and Software*, 7, 165-210, 1997.

Swamee, P.K., Sharma, A.K. *Design of water supply pipe networks*. New Jersey: John Wiley and Sons Inc, 2008.

Tarquin, A.J.; Dowdy, J. Optimal pump operation in water distribution. *J. hydraulic Eng.*, 2, 496-501, 1989.

Tiainen, R.; *et al.* Utilization possibilities of frequency converter in electric motor diagnostics. In: Proc. International Symp. *Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion (SPEEDAM)*, Taormina, Italy, 2006.

Ulanicki, B.; Kahler, J.; Coulbek, B. Modeling the efficiency and power characteristics for a pump group. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 1, 88-93, 2008.

Vieira, F.; Ramos, H.M. Hybrid solution and pump-storage optimization in water supply system efficiency: A case study. *Energy Policy*, 36, 4142-4148, 2008.

Vieira, F.; Ramos, H.M. Optimization of the energy management in water supply systems. *Water Science and Technology: Water Supply*, 9 (1), 59-65, 2009.

Viholainen, J.; *et al.* Energy-efficient control strategy for variable speed-driven parallel pumping systems. *Energy Efficiency*, 1-15, 2012.

Vilela, O.C.; Fraidenraich, N. A methodology for the design of photovoltaic water supply systems. *Progress in photovoltaics: research and applications*, 9, 349-361, 2001.

Walpole, R.E.; Myers, R.H.; e Ye, Keeying. *Probabilidade e estatística para engenharia e ciências*. 8ª ed. São Paulo: Pearson, Prentice Hall, 2009.

Walski, T.M. *Analysis of water distribution systems*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1984.

Wanakule, N.; Mays, L.W.; and Lasdon, L.S. Optimal management of large-scale aquifers: methodology and applications. *J. Water Resour. Research*, 4, 447-465, 1986.

Wang, H.; Guo, W. ACO optimizing neural network for macroscopic water distribution system modeling. In: *Proc. International Conf. on Intelligent Computing and Cognitive Informatics*, 367-370, Washington, USA, 2010.

Wood, D.J.; *et al.* Numerical methods for modeling transient flow in distribution systems. *J. American Water Works Assoc.*, 7, 104-115, 2005.

Worthington. *Catálogo de bombas*. Rio de Janeiro: Worthington do Brasil, 1988.

Wylie, E.B.; Streeter, V.L. *Fluid transients*. New York: McGraw-Hill, 1978.

Yu, G.; Powell, R.S.; and Sterling, M.J.H. Optimized pump scheduling in water distribution systems. *J. of Optimization Theory and Application*, 3, 463-488, 1994.

Zessler, U., Shamir, U. Optimal operation of water distribution systems. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 6, 735-752, 1989.

CAPÍTULO 3

MELHORIA EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA BASEADA NA OTIMIZAÇÃO E RECONHECIMENTO DE PADRÕES DE CONSUMO

3.1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda de energia elétrica provoca impacto direto sobre o meio ambiente, especialmente considerando que o modelo global de geração de energia elétrica baseia-se principalmente em combustíveis fósseis (IEA, 2011). Os impactos econômicos também podem ser verificados através das ocorrências de interrupção do fornecimento de energia, a degradação da qualidade de energia, do alto preço da energia elétrica e da majoração tarifária nas horas de elevada demanda de energia elétrica. A indústria é a grande consumidora de energia elétrica e o sistema de abastecimento de água também se destaca como um consumidor significativo devido ao processo de bombeamento. A intervenção neste setor, através de ações de melhoria da eficiência energética pode proporcionar importantes ganhos econômicos.

Conforme descrito no Capítulo 2, um sistema de abastecimento de água típico dispõe de uma estação de bombeamento, reservatório de água e linha adutora (Fig. 2.12). Devido ao seu caráter transitório, trata-se de um sistema transitório no qual os perfis de pressão e de vazão volumétrica ao longo da linha adutora e o nível de água no reservatório variam de acordo com a demanda e alterações na velocidade de rotações das bombas (velocidade fixa ou variável). Em geral, o volume de água em excesso no reservatório de armazenagem durante um ciclo de trabalho implica em desperdício de energia, porque a vazão bombeada é maior do que a demanda de água (Ormsbee, 1989). Neste caso, a política operacional procura manter inalterado o nível de água ao longo de um ciclo de trabalho (tipicamente 24 horas). Na maioria dos casos, o processo de controle da vazão na estação de bombeamento compreende métodos tradicionais de bombeamento por meio de manobra de bombas do tipo liga/desliga (velocidade de rotação fixa). Em outras palavras, a política

operacional fixa o número de bombas em funcionamento a cada hora para reabastecer o volume no reservatório (em cada ciclo de trabalho) para satisfazer a demanda horária (Zessler e Shamir, 1989; Jowitt e Germanopoulos, 1992). Estações de bombeamento com bombas de velocidade fixa são amplamente utilizadas em sistemas de abastecimento de água. Por outro lado, conforme inclusive os resultados apresentados no capítulo anterior, a utilização de conversores de frequência (bomba de velocidade variável) é a forma mais eficiente de minimizar o consumo de energia, permitindo que a vazão de descarga seja a melhor ajustada para satisfazer a demanda diária, sem excesso de água no reservatório e sem o consumo de energia excessivo (Lingireddy e Wood, 1998; Collins, 1991; Lamberth e Houston, 1991; Bortoni *et al.*, 2008).

Alguns trabalhos incluem na estratégia de otimização de sistemas de abastecimento de água outros objetivos, além do custo mínimo de energia. Lansey e Awumah (1994), Lopez-Ibanez *et al.* (2008) e Vladimir *et al.* (2010) consideram os custos de manutenção associados com as bombas. Estes custos estão diretamente relacionados com o número de mudança de estado (ligado/desligado) da bomba. Se a bomba é mantida funcionando por um longo tempo, isto resulta na minimização dos seus custos de manutenção (Lansey e Awumah, 1994). Guo e Wang (2010) também consideram o problema do assoreamento de água de poço artesianos em uma função multi-objetivo. Jowitt e Germanopoulos (1992) e McCormick e Powell (2013) incluem uma penalidade na função objetivo que se aplica quando a demanda máxima de energia é ultrapassada. Georgescu *et al.* (2010) consideram uma penalidade para minimizar a diferença entre os níveis inicial e final do reservatório ao longo de um ciclo de trabalho.

Problemas de otimização em sistema de abastecimento de água podem ser resolvidos por métodos clássicos de otimização, como programação linear e não-linear (Jowitt e Germanopoulos, 1992; Chase e Ormsbee, 1989; Yu *et al.*, 1994) e programação em regime transitório (McCormick e Powell, 2013; Brion e Mays, 1991; Nitivattananon, 1996). Alguns trabalhos utilizam métodos baseados em otimização combinatória (Vladimir, 2010; Georgescu *et al.*, 2010; Tarquin e Dowdy, 1989; Barán *et al.*, 2005). Em grandes sistemas de abastecimento de água, o uso de métodos convencionais ou tradicionais para a resolução de problemas de otimização, baseados em modelos fenomenológicos, implica em elevado esforço computacional. Mais recentemente modelos de otimização utilizam técnicas de inteligência artificial baseados em Redes Neurais Artificiais (RNA) em substituição às estratégias tradicionais de modelagem. Rao *et al.* (2007) apresentam um problema de controle

ótimo aplicado a sistema de abastecimento e rede de distribuição de água. Um modelo transitório baseado em RNA foi desenvolvido para prever a combinação de bombas e válvulas para atender a demanda, considerando o ciclo de 24 horas de trabalho. Este modelo é utilizado em um algoritmo de otimização que considera os custos operacionais de bombeamento juntamente com restrições hidráulicas.

A curva de demanda representa uma entrada na modelagem de sistemas de abastecimento de água e uma perturbação em problemas de controle ótimo. O perfil diário de demanda afeta diretamente a operação de bombeamento, o consumo de energia e também pode ser usado para apoiar a tomada de decisão em procedimentos de operação de bombeamento (Ghiassi, 2008). Em geral, a demanda diária de água é predita de forma heurística e intuitiva, baseada no conhecimento e experiência dos operadores dos sistemas de abastecimento de água (Greenaway, 2008; Walski, 2003; Mays, 2000). Por outro lado, a predição da curva de demanda depende de aspectos sazonais associados ao histórico do clima da região ao longo do ano.

Este trabalho apresenta e resolve um problema de otimização em regime transitório que fornece uma programação ótima para as velocidades de rotação das bombas em um sistema de abastecimento de água, de modo a minimizar os custos de energia e de manutenção. Tal como no capítulo anterior, o caso estudado compreendeu um caso real de um segmento do sistema de abastecimento e distribuição de água em Salvador (Brasil). O procedimento de bombeamento considera que a utilização de conversores de frequência e o comportamento transitório do sistema são representados por dois modelos MISO (Múltiplas Entradas - Única Entrada), baseados em RNA, capazes de prever o nível do reservatório de armazenamento e o consumo de energia, em qualquer instante de tempo. Padrões de reconhecimento de curvas de demanda são construídos com base em dados reais utilizando o método Fuzzy-C-Means (FCM), um método bem conhecido pertencente à família de modelos C-Means de agrupamentos (Bensaid *et al.*, 1996; Bezdek *et al.*, 2005) e que se aplica para objetos representados por séries temporais univariadas (Liao, 2005).

3.2 O PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

O modelo proposto de otimização está baseado no capítulo anterior, que apresenta um modelo fenomenológico completo de parâmetros distribuídos para a EE Alta Carga, capaz

de prever o comportamento hidráulico da linha adutora e o consumo de energia. O modelo proposto de otimização tem como objetivo fornecer a programação operacional ótima para a estação de bombeamento (velocidades de rotação variáveis) (Brion *et al.*, 1991).

A energia consumida no instante t é função da vazão e da altura piezométrica na descarga da estação de bombeamento ($Q(0,t)$ e $H(0,t)$), e também da eficiência global da estação de bombeamento ($\eta_b(t)$).

$$P(t) = \gamma \cdot \frac{Q(0,t) \cdot H(0,t)}{\eta_b(t)} \quad 3.1$$

Em qualquer instante, a eficiência global é o produto da eficiência de todas as bombas em operação. A Eq. 3.1 estabelece que a energia consumida está diretamente relacionada com os perfis transitórios da vazão e altura piezométrica ao longo da linha adutora, na medida em que $H(0,t)$ é uma variável de estado do modelo transitório obtido a partir da discretização do modelo original, usando diferenças finitas para as derivadas espaciais.

O modelo de otimização compreende a seguinte função objetivo:

$$\min_{rot_i(t) (i=1, \dots, 4)} \int_0^{t_c} P(t) \cdot t_{tr}(t) \cdot dt \quad 3.2$$

Sujeito às seguintes restrições:

- a) Limites de velocidade de rotação para evitar problemas de excesso de pressão ou cavitação:

Apenas uma das bombas deverá operar de modo ininterrupto:

$$1120 \text{ rpm} \leq rot_1(t) \leq 1175 \text{ rpm} \quad 3.3$$

Para as demais ($i=2,3,4$):

$$0 \leq rot_i(t) \leq 1175 \text{ rpm}$$

enquanto que

$$rot_i(t) = 0 \text{ se } rot_i(t) < 1120 \text{ rpm}$$

- b) Limites para o nível da água no reservatório:

$$3.0 \text{ m} \leq h(t) \leq 15.5 \text{ m}$$

A função objetivo representa o custo total do consumo de energia (kWh) ao longo de um ciclo de trabalho (t_c) (24 horas). t_{tr} é a tarifa estabelecida para o instante de tempo t . $rot_i(t)$ ($i = 1, \dots, 4$) é a solução do problema (programação ótima para a velocidade de rotação de cada bomba).

Este problema de otimização compreende duas variáveis de saída da EE Alta Carga, ou seja, a energia consumida $P(t)$ e o nível de água no reservatório de $h(t)$. A primeira é função das variáveis de estado da vazão e da altura piezométrica ao longo da linha adutora, e a segunda é uma variável de estado do modelo relacionada com o balanço de massa no próprio reservatório (Eq. 2.17). Considerando-se que a complexidade do modelo fenomenológico (sistema com 224 equações diferenciais) torna-o inadequado para a sua direta inserção no problema de otimização (como restrição adicional de igualdade), uma estratégia de redução foi adotada usando modelos empíricos baseados em Redes Neurais Artificiais (RNA). Portanto duas restrições de igualdade adicionais são consideradas:

$$h(t) = f_1(rot_1(t), rot_2(t), rot_3(t), rot_4(t), d(t)) \quad 3.4$$

$$P(t) = f_2(rot_1(t), rot_2(t), rot_3(t), rot_4(t), d(t)) \quad 3.5$$

f_1 e f_2 representam os respectivos modelos neurais e d é a demanda (variável de entrada). O uso de RNA tem vantagens sobre as abordagens tradicionais de modelagem. Esta estrutura de modelo permite a manipulação eficiente de grandes quantidades de dados com alta capacidade de generalização (Ding *et al.*, 2013; Ahmadi e Mashoufi, 2012; Farmaki *et al.*, 2010).

O modelo baseado em RNA associado ao nível de água no reservatório de armazenamento compreende uma estrutura transitória NARX típica (*Nonlinear AutoRegressive with eXogeneous inputs*), estrutura que foi identificada (rede de treinamento) como saída realimentada predita no momento anterior (topologia recorrente).

$$\hat{h}_k = f_3(rot_{1,k-1}, rot_{2,k-1}, rot_{3,k-1}, rot_{4,k-1}, d_{k-1}, \hat{h}_{k-1}) \quad 3.6$$

onde \hat{h}_k é o nível de água predito pelo próprio modelo no instante de tempo k . Portanto, o treinamento desta RNA foi realizado admitindo-se uma topologia recorrente realimentando-se a variável de saída predita pelo modelo (Fig. 3.1). Ou seja, o modelo foi treinado para predição de longo alcance e não apenas para predição de um passo a frente.

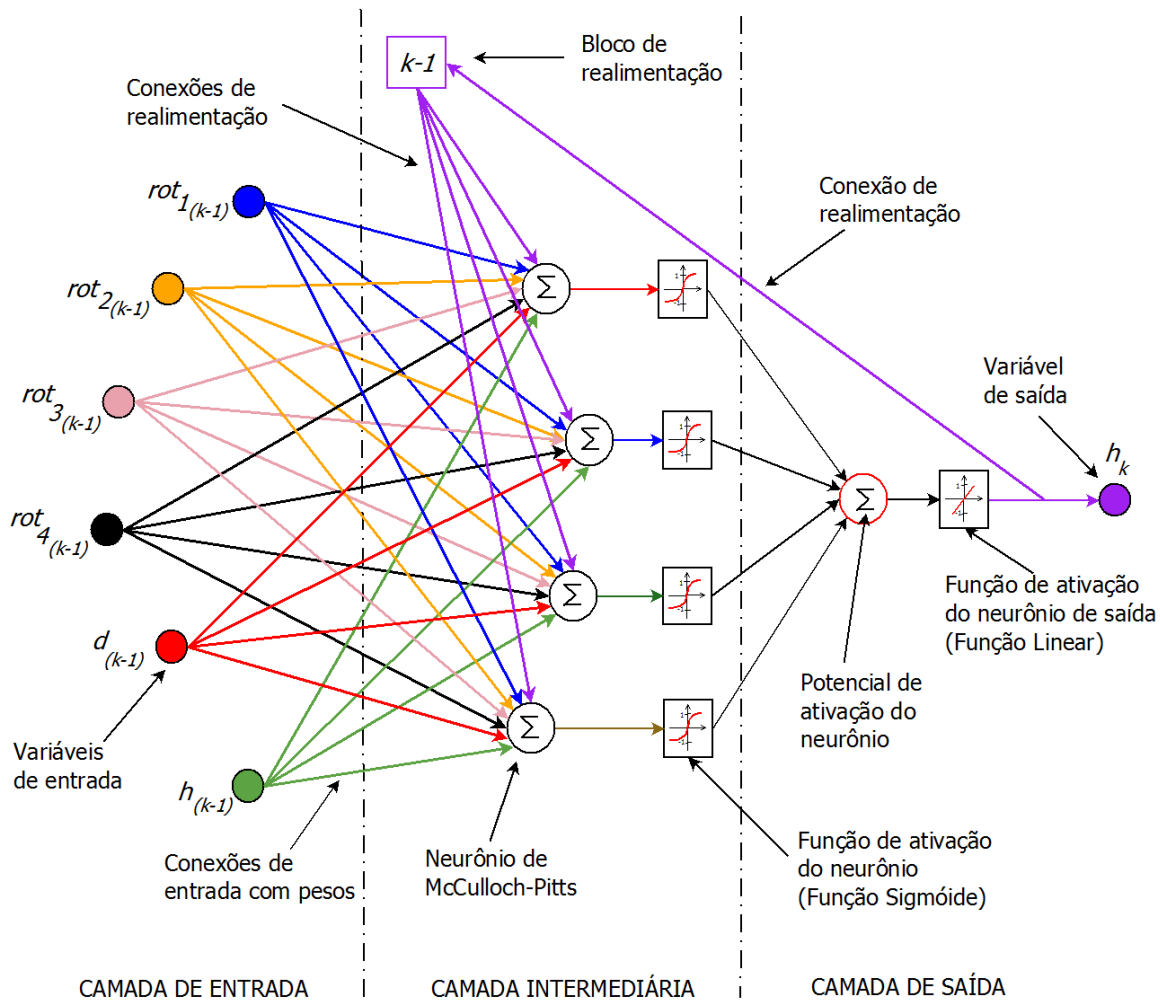


Figura 3.1 – Representação da estrutura da RNA recorrente do modelo com seis variáveis de entrada e uma variável de saída, e quatro neurônios na camada intermediária

Com base nas características operacionais e transitórias do caso estudado (perturbações causadas por manobras de operação das bombas com base na medição da demanda horária), um período de amostragem de uma hora foi considerado para a identificação do modelo e também no problema de otimização.

Ao contrário do modelo empírico para predição do nível de água no reservatório (Eq. 3.6), a menor constante de tempo associada à energia consumida sugere uma abordagem de identificação em regime estacionário e neste caso o modelo seguiu uma topologia típica *feedforward* (Fig. 3.2).

$$\hat{P}_k = f_4(rot_{1,k}, rot_{2,k}, rot_{3,k}, rot_{4,k}, d_k)$$

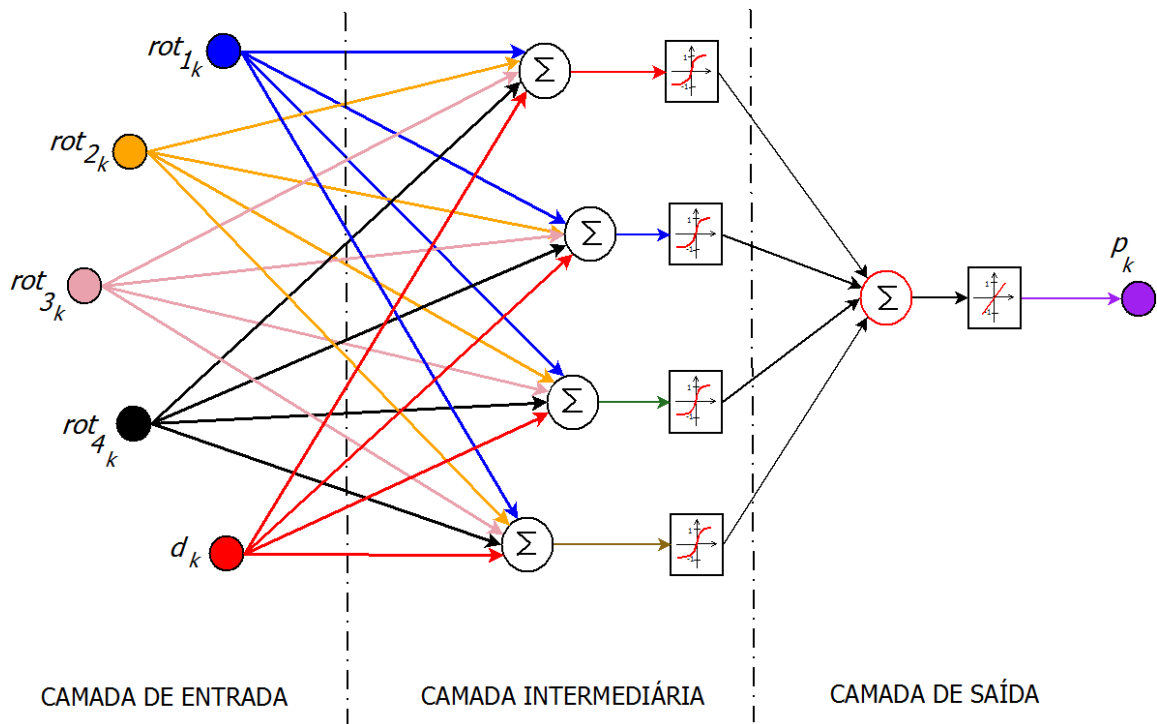


Figura 3.2 – Representação da estrutura da RNA do modelo para calcular a potência total consumida pelas bombas

Ambos os modelos empíricos compreendem apenas uma camada intermediária (neurônios com função de ativação sigmoide) e uma camada de saída com um neurônio (função de ativação linear), de modo que são equivalentes a estruturas MISO (*Multiple Input Single Output*). Os dados foram obtidos através de simulação do modelo fenomenológico. Um procedimento de validação cruzada (Magalhães *et al.*, 2011; Santos *et al.*, 2009) foi adotado usando dados de amostras de treinamento e de amostras de testes (cada uma amostra com 714 pontos).

Os melhores resultados foram obtidos com oito e quatro neurônios na camada escondida para os modelos RNA associados à energia consumida e o nível de água no reservatório de armazenamento, respectivamente. A comparação entre as previsões da RNA e os dados obtidos pelo modelo fenomenológico (amostra de teste) (Figs. 3.3 e 3.4) mostra a adequação dos modelos das RNA para o uso diretamente no problema de otimização.

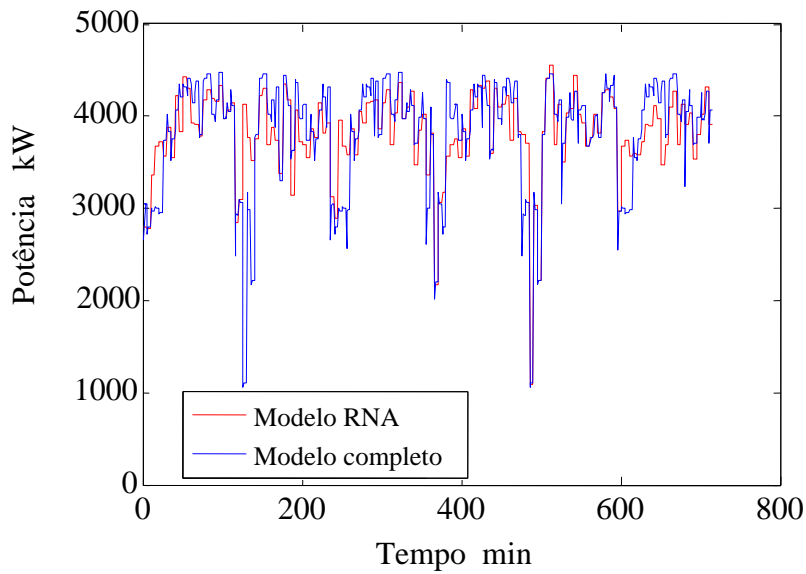


Figura 3.3 - Potência consumida – (amostra de teste)

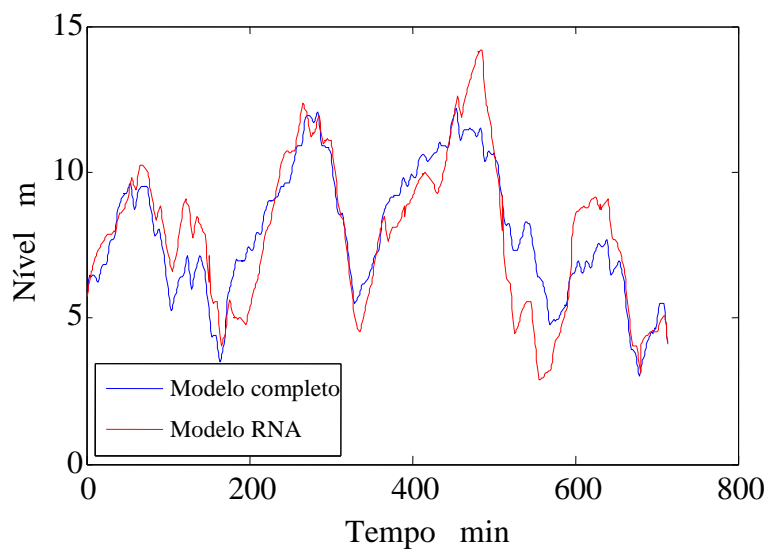


Figura 3.4 - Nível de água no tanque (amostra de teste)

A qualidade dos valores gerados pelos modelos das RNAs para o nível e potência foi avaliada utilizando dois critérios de erros de previsão mais utilizados no estudo da estatística. O Erro Absoluto Percentual Médio Absoluto EPMA (Eq. 3.8), considerado preciso e robusto como medida de acurácia de modelos numéricos, e a Raiz do Erro Médio Quadrático REMQ (Eq. 3.9) que tem a vantagem de mostrar os valores do erro nas mesmas dimensões da variável analisada (Fox, 1981; Morettin e Tolo, 1981; Wilks, 2006).

$$EPMA = \frac{\sum_{i=1}^l \left| \frac{x_i - y_{pi}}{x_i} \right|}{l} \cdot 100 \quad 3.8$$

$$REM_Q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l (x_i - y_{pi})^2}{l}} \quad 3.9$$

onde l é o número de valores da amostra, x_i representa o valor real, y_i representa o valor previsto, com $i=1,2,\dots,h$. Os resultados da avaliação da qualidade dos valores são sintetizados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Avaliação da qualidade dos valores gerados pelos modelos das RNAs

ERRO DE PREVISÃO	RNA DO NÍVEL	RNA DA POTÊNCIA
<i>EPMA</i>	1,31%	1,77%
<i>REM_Q</i>	0,15 m	50,8 kW

A Tabela 3.1 mostra que a qualidade dos dados previstos pelos modelos das RNAs é satisfatória, pois para os dois critérios adotados os erros foram baixos.

Completando as análises estatísticas dos resultados, foi realizado um teste dos resíduos (erros) do modelo da RNA para a potência. Foi criado um histograma dividido em 26 classes e uma curva Guassiana de ajuste a normalidade (Fig. 3.5).

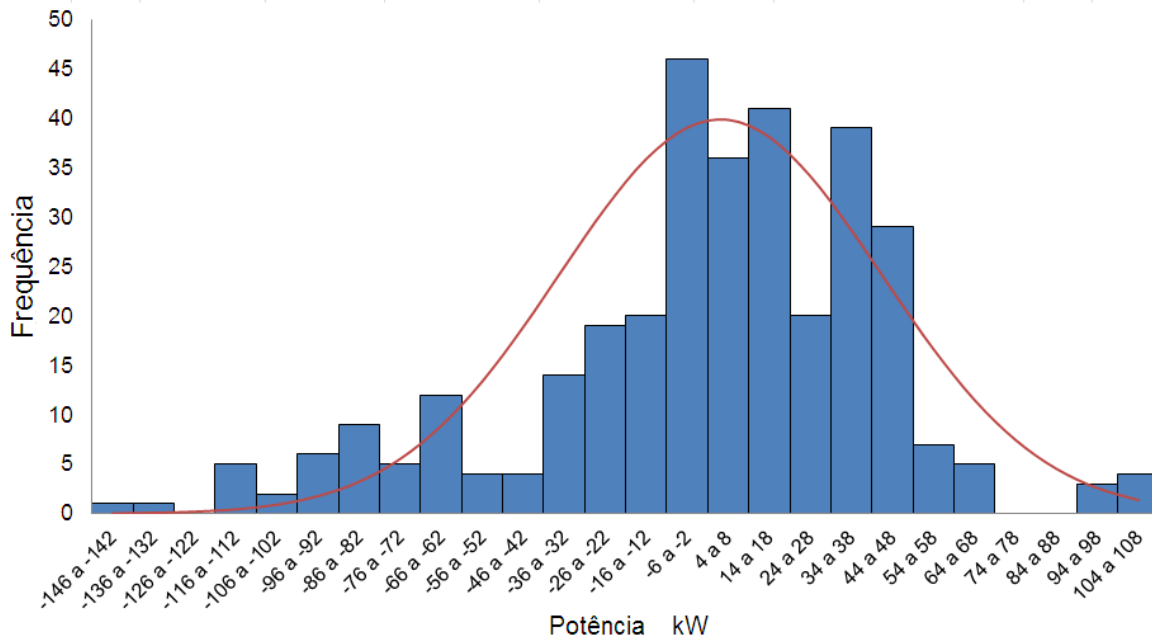


Figura 3.5 – Distribuição dos resíduos (erros) do modelo da RNA para potência

Por inspeção gráfica na Fig. 3.5, o histograma mostra que os resíduos apresentam pequena assimetria positiva, com tendência a uma distribuição simétrica, de baixa dispersão de valores. A curva de formato de sino (concentração dos resultados em torno do centro) tem características de distribuição normal (Montgomery e Runger, 2012). Também, verifica-se que a curva normal tem bom ajustamento dos dados da amostra a distribuição.

3.3 RECONHECIMENTO DE PADRÕES DE CONSUMO

A análise multivariada é uma ferramenta poderosa para a extração de conhecimento, especialmente quando se utiliza técnicas de reconhecimento de padrões baseado em dados (Ferreira *et al.*, 2013). Os métodos de Mineração de Dados (MD) visam extrair informação útil a partir de dados que podem ser usadas para desenvolver ferramentas de apoio à tomada de decisão (Magalhães, 2011; Monedero *et al.*, 2012; Piatetsky, 2007).

O reconhecimento de padrões de curva de demanda permite a predição e tomada de decisão em relação a procedimentos de manobras em estações de bombeamento, proporcionando com isso maior confiabilidade e eficiência para o sistema de abastecimento. O reconhecimento de padrões pode também ser útil na predição de produtos químicos para o tratamento de água ou para o planejamento da infra-estrutura de rede. Basicamente, o reconhecimento de padrões pode ser usado no planejamento e projeto de infra-estrutura do

sistema de abastecimento de água no longo prazo (anos) e no curto prazo (horas ou dias) (Alvisi, 2007; Zhou, 2002).

Neste trabalho, o reconhecimento de padrões em perfis de demanda é tratado através de técnicas de agrupamento de séries temporais univariadas (demanda diária de consumo de água) (Liao, 2005), considerando o caráter sazonal ao longo do ano. Há poucos trabalhos baseados em reconhecimento de padrões aplicado para prever os perfis de demanda em sistemas de abastecimento de água. Greenaway *et al.* (2008) aplicaram uma técnica de reconhecimento de padrões baseada na série de tempo univariada para prever perfis de demanda (curto e longo prazo) em uma empresa de abastecimento e distribuição de água, em uma região com cerca de 900.000 pessoas. Com base no modelo aplicado a curto prazo (durante 24 h), foi possível desenvolver uma abordagem relacionada para a otimização do consumo de energia através da redução de bombeamento em horas de elevadas tarifas e de minimizar o volume de água no reservatório dentro do ciclo de trabalho. Por outro lado, o modelo é também usado no longo prazo para apoiar o planejamento e a gestão financeira. Shvartser *et al.* (1993) desenvolveram modelos de curvas de demanda diária com base na combinação de dois métodos, quais sejam, o reconhecimento de padrões e análise de séries temporais utilizando o processo de Markov. A curva de demanda diária é considerada como um processo estocástico e é modelada através do processo da cadeia de Markov baseada em três segmentos (estados) (padrões de aumento, diminuição e oscilantes).

A abordagem de agrupamento hierárquica realiza a partição dos objetos de forma gradativa e sequencial, enquanto que na abordagem não-hierárquica, há uma predefinição do número de grupos a serem obtidos (HAIR *et al.*, 2005). O nível de coesão/homogeneidade dentro dos grupos e de heterogeneidade entre eles é avaliado através de índices específicos de qualidade do agrupamento. Dentre os métodos não-hierárquicos, destaca-se o algoritmo Fuzzy-C-Means (FCM), pertencente à família de modelos C-Means (Bezdek *et al.*, 2005, Hoppner *et al.*, 2000), que realiza a partição dos objetos em uma quantidade de grupos definida previamente e associa a cada objeto um nível de pertinência no intervalo $[0,1]$ (mais próximo de 1 implica em maior similaridade ou aderência do objeto ao grupo). Desta forma, o algoritmo FCM oferece ao problema de agrupamento um caráter de incerteza que está presente na maioria das situações. Este caráter de incerteza decorre do fato de que, em geral, os grupos a serem reconhecidos não se encontram previamente definidos de forma clara requerendo-se, portanto, a resolução de um problema de otimização cujas variáveis de decisão

são os centros (padrões) de cada grupo e as pertinências de todos os objetos a cada um dos grupos (devidamente representados pelos seus respectivos centros ou padrões).

O algoritmo FCM, em sua versão original pertencente à família de modelos *C-MEANS* de agrupamentos, se aplica perfeitamente ao agrupamento e reconhecimento de padrões em objetos representados por séries temporais univariadas. Dois tipos de problemas devem ser previamente considerados no agrupamento e reconhecimento de padrões em séries temporais, quais sejam, séries univariadas e séries multivariadas (D'Urso *et al.*, 2012; Yang e Shahabi, 2004; Li e Wen, 2014). Tomando-se um conjunto de observações ao longo do tempo $z_i(t)$ ($i=1, \dots, k; t=1, \dots, m$), onde k é o número de variáveis (número de medições disponíveis), m é o número de observações e $z_i(t)$ refere-se à medição da variável i no instante de tempo t , um objeto caracterizado por uma série univariada é aquele no qual $k=1$ (ou seja, apenas a série temporal referente a uma variável compõe o objeto).

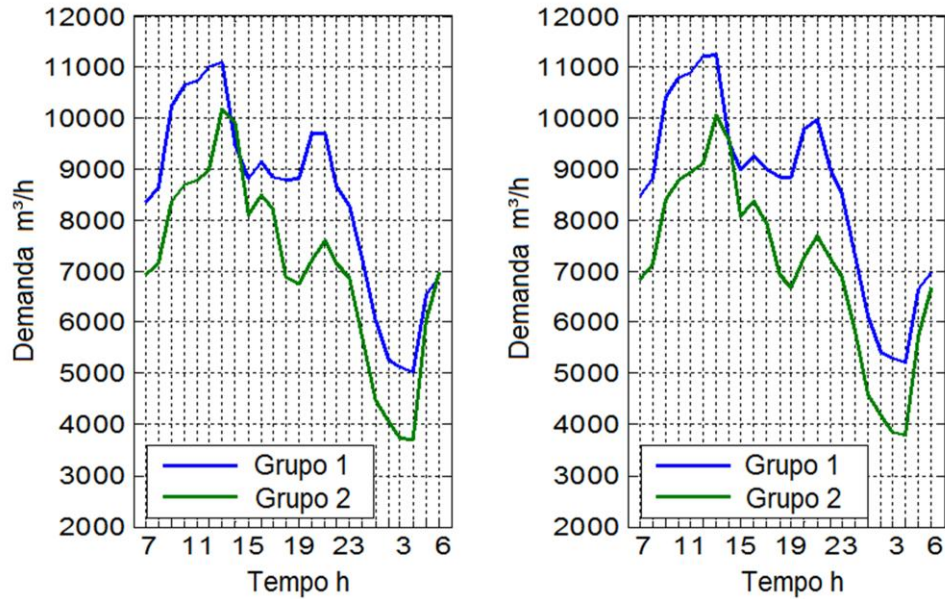
O problema de reconhecimento de padrões de consumo de água neste trabalho compreende essencialmente um problema de agrupamento e reconhecimento de padrões em séries temporais univariadas (curva de demanda diária de água) conforme a sazonalidade ao longo do ano. A amostra inicial foi composta por curvas de demanda diárias para o caso estudado (EE Alta Carga) durante todo o ano de 2010. Um total de 335 dias (perfis de consumo diário) foi disponível.

Com base nas características climáticas do estudo de caso, uma amostra anual de perfis de demanda (2010) foi inicialmente agrupada em três estações, quais sejam, primavera (85 curvas), outono-inverno (183 curvas) e verão (67 curvas). O Apêndice D apresenta as figuras com as curvas de demanda agrupadas conforme as três estações consideradas. A união das estações de outono e inverno foi determinada pela semelhança historicamente verificada entre essas duas estações. Além disso, este agrupamento inicial (seleção de estações) baseou-se também na demanda diária média associada a cada uma destas estações, de acordo com a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Agrupamentos iniciais - demanda de água

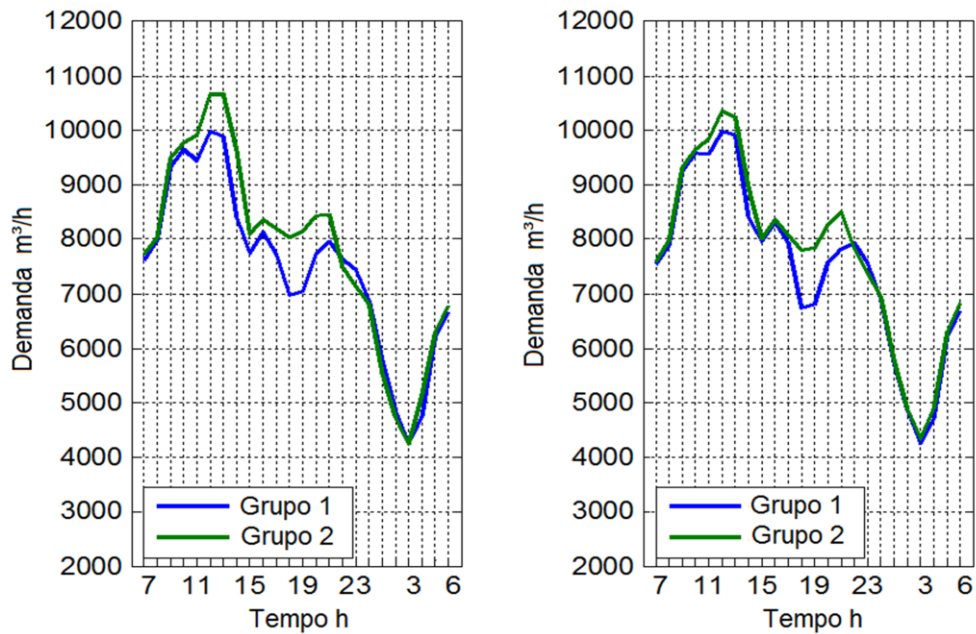
Estações	Média diária (m³/h)	Período
Primavera	7843	23 Setembro a 21 Dezembro
Outono-inverno	7485	21 Março a 22 Setembro
Verão	6933	22 Dezembro a 20 Março

Apenas dias úteis foram considerados nesta análise. O banco de amostras para o reconhecimento de padrões de cada estação foi dividida, por sua vez, em dois subconjuntos (validação e de treinamento), ambos gerados aleatoriamente. Os melhores resultados (usando o método FCM) foram obtidos considerando-se dois grupos (dois padrões) para cada estação. A Fig. 3.6 apresenta os padrões reconhecidos de demanda (centro de cada grupo).



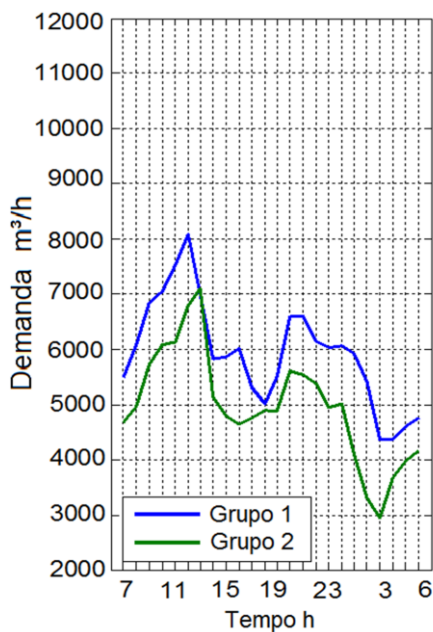
(a) Primavera – amostra de trabalho

(b) Primavera – amostra de validação

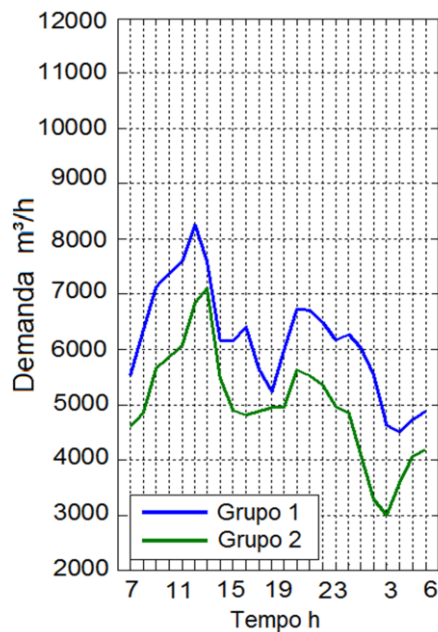


(c) Outono-inverno – amostra de trabalho

(d) Outono-inverno - amostra de validação



(e) Verão – amostra de trabalho



(f) Verão - amostra de validação

Figura 3.6 - Padrões de demandas diárias por estação

Os grupos 1 e 2 (Fig. 3.6) indicam a existência de dois padrões de curva de consumo diário de água na região suprida pela estação de abastecimento. Comparativamente, estes padrões diferem-se, em geral, pelo nível médio diário de consumo, embora ambos possuam, em cada estação, comportamentos transitórios semelhantes. Especificamente, no período de elevada demanda (em torno de 12h) constata-se também uma diferença acentuada no nível de consumo em cada par de padrões (em ambas as amostras de treinamento e validação).

A semelhança entre os padrões reconhecidos para as amostras de treinamento e de validação, na mesma estação, mostra a consistência dos resultados. Além disso, em cada estação do ano considerada, os dois padrões de consumo apresentam um comportamento transitório semelhante ao longo do dia.

Conforme esperado em regiões tropicais as diferenças climáticas entre as estações ao longo do ano não são tão nítidas e a amplitude térmica total observada é inferior a de outras regiões que apresentam estações do ano bem mais definidas. Na região considerada, a ocorrência de temperaturas mais amenas está intimamente associada com a maior intensidade

de chuvas. Com base nos padrões reconhecidos (Fig. 3.6), a demanda média diária máxima de água na primavera, outono-inverno e no verão é igual a 7.792 m³/h, 7.342 m³/h, e 5.452 m³/h, respectivamente. A maior demanda de água na primavera (7h e 13h) (Fig. 3.6a-b) está associada aos baixos índices de pluviosidade verificados neste período, em comparação com a estação outono-inverno.

Geralmente, a demanda de água na época das chuvas é reduzida. Neste período, observa-se a redução do volume de água usado na irrigação de jardins e áreas verdes da cidade. Além disso, a população adota novos hábitos, por exemplos, na higiene pessoal (reduz o número de vezes e o tempo de banhos diários), e no uso da água na casa (reduz a lavagem das áreas externas ou a lavagem dos carros). Por outro lado, no verão as temperaturas são mais elevadas, com ocorrência de chuvas esporádicas. Mesmo assim, a demanda de água é muito baixa em comparação com a primavera e outono-inverno. Isto pode ser explicado pelo fato de que no verão, como em outros lugares, um grande número de pessoas que habitam a área urbana estão em férias e deixa a cidade reduzindo significativamente a demanda. Também, a interrupção das atividades escolares durante este período contribui para este comportamento social, o que justificaria a adoção de políticas específicas de operação de bombeamento para esta estação.

Outra análise compreende a avaliação das curvas de demanda pertencentes a cada grupo. O método FCM tem característica típica de partição suave, ao contrário de outros métodos de agrupamento rígidos baseados em modelos *CRISPS*, como o *K-MEANS* (Bezdek *et al.*, 2005; Vlachos *et al.*, 2003). Considerando n curvas de demanda (objetos), c grupos e uma abordagem probabilística, a matriz de partição obtida pelo método FCM contém o grau de pertinência de cada objeto $\left(u_{ki} \in [0,1], i=1,\dots,n \quad k=1,\dots,c \quad \text{e} \quad \sum_{k=1}^c u_{ki} = 1 \quad \forall i \right)$ para cada um dos grupos reconhecidos. No contexto de agrupamento analisado, um objeto corresponde a uma série temporal (ou uma curva de demanda diária). A Fig. 3.7 apresenta o grau de pertinência de cada curva de demanda (objeto) (primavera e verão) para o grupo 1. O conjunto de graus de pertinência mostra um bom nível de polarização em ambos os casos (poucos valores no intervalo [0,4 - 0,6]), o que também destaca a boa qualidade do agrupamento.

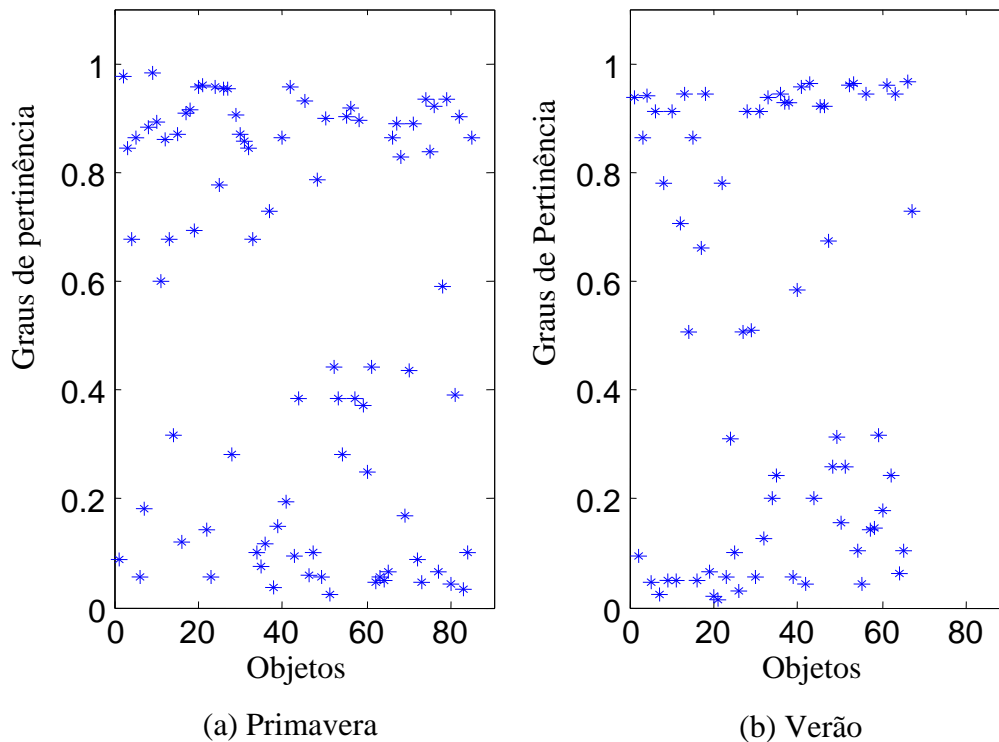


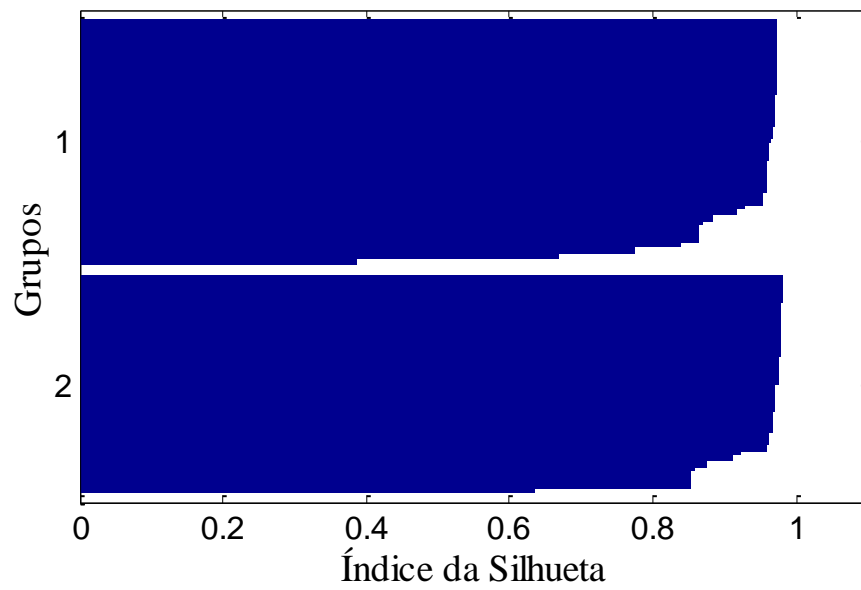
Figura 3.7 - Grau de pertinência – grupo 1

A Tabela 3.3 apresenta o número de objetos pertencentes a cada grupo (duas amostras - de treinamento e de validação) com base nos graus de pertinência associados a cada objeto.

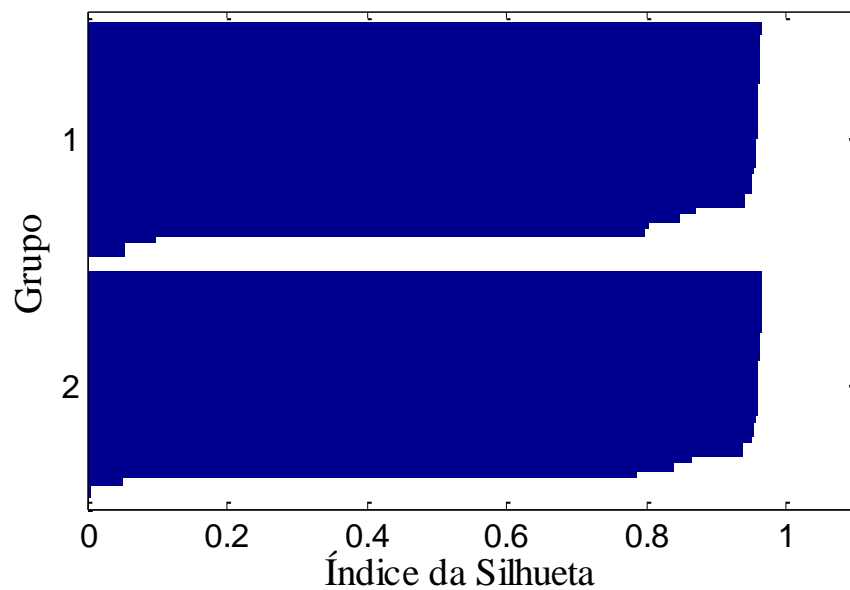
Tabela 3.3 - Número de objetos (curvas de demanda) em cada agrupamento

Estações	Agrupamento 1		Agrupamento 2	
	Objetos	Curvas (%)	Objetos	Curvas (%)
Primavera	45	52.9	40	47.1
Outono-inverno	83	45.4	100	54.6
Verão	34	50.7	33	49.3

A qualidade dos agrupamentos também pode ser representada por meio do índice de silhueta (Rousseeuw, 1987). O índice de silhueta é baseado na distância entre os objetos de um determinado grupo, e na distância desses objetos ao grupo que está mais junto. Muitas vezes, a distância euclidiana é usada para calcular a distância entre os objetos e entre os grupos. A Fig. 3.8a-b mostra os grupos para as estações primavera e verão usando a função silhueta do MATLAB®.



(a) Primavera



(b) Verão

Figura 3.8 – Disposição da silhueta para as estações (a) primavera e (b) verão

A Fig. 3.8a-b mostra, para ambas as estações, que a distância entre os grupos é bem pequena, e os objetos estão distribuídos, praticamente, por igual nos dois grupos, pois os índices da silhueta tem valores altos. Existe uma boa homogeneidade em relação às variáveis observadas e entre os grupos.

Ainda, de acordo com a Tabela 3.3, os números de objetos pertencentes a cada grupo são bastante semelhantes (principalmente na primavera e verão), o que não justifica a escolha de um grupo modal (grupo com o maior número de curvas de demanda) (Ferreira *et al.*, 2013) para representar cada estação. A Fig. 3.9 apresenta os perfis de demanda média das estações.

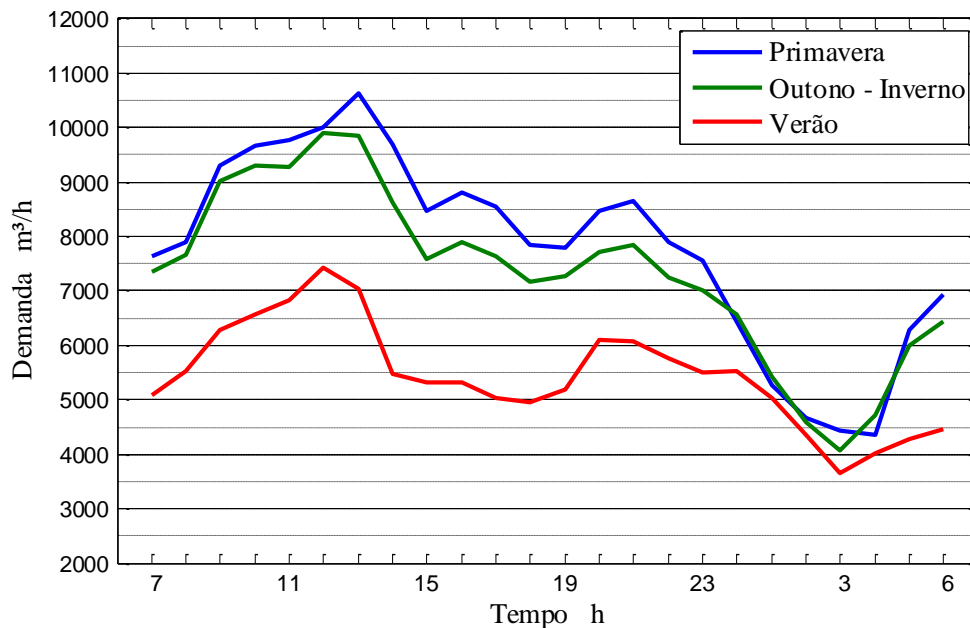


Figura 3.9 - Perfis de demanda

Apesar do comportamento transitório semelhante de consumo diário entre os três padrões apresentados na Fig. 3.9, o que é também uma consequência das características climáticas da região em estudo, deve-se considerar as diferenças quantitativas de demanda que podem resultar em diferentes políticas ou procedimentos operacionais de bombeamento. De acordo com a Fig. 3.9, o perfil da demanda da estação primavera é a mais alta em quase todo ciclo. A pequena diferença entre as temperaturas médias das estações do ano (baixa amplitude térmica ao longo do ano) contribui para a uniformidade dos hábitos de consumo de água. Mesmo na estação outono-inverno, o consumo de água é alto nas atividades no início do turno matutino (5-8 horas).

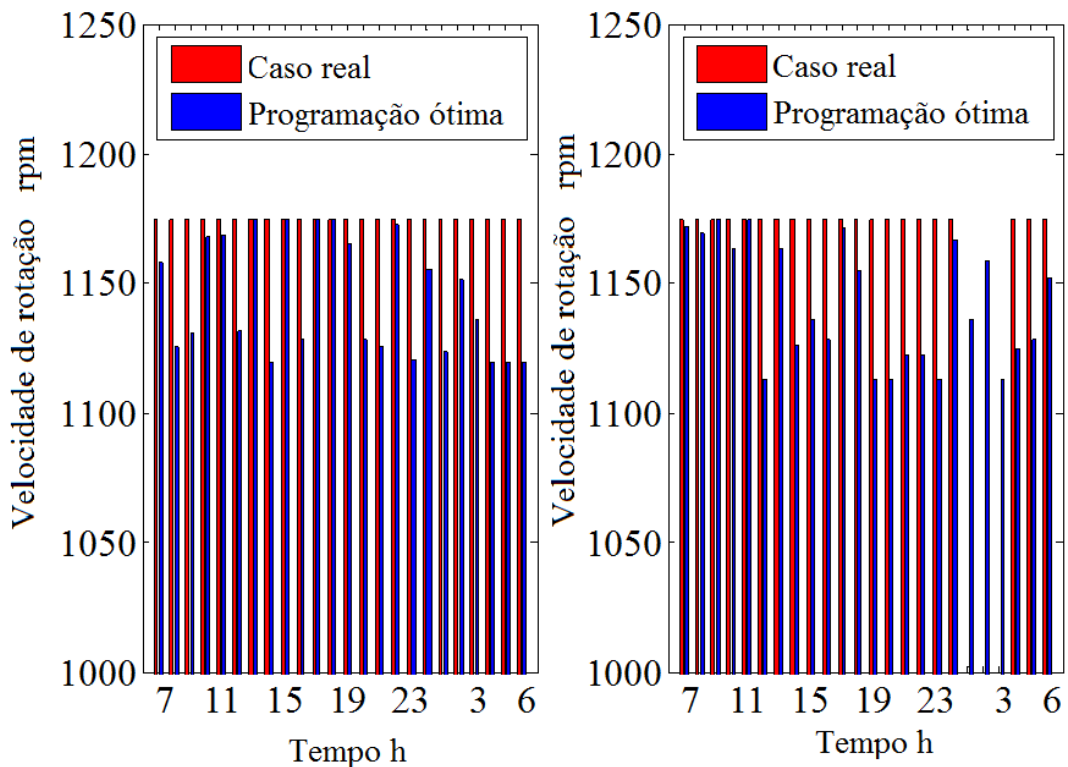
A maior demanda de energia elétrica em todo o sistema elétrico da região considerada ocorre no período de 17 as 20 horas. As tarifas associadas ao consumo de energia neste período são aumentadas a fim de evitar a sobrecarga no sistema elétrico. De acordo com a Fig. 3.9, as demandas de água mais elevadas ocorrem na primavera. A eficiência na gestão,

planejamento e controle do abastecimento de água nestes horários de pico, especialmente nesta temporada, pode viabilizar a redução de custos operacionais de bombeamento.

3.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.4.1 Testes de otimização

Os primeiros testes de otimização comparam os resultados obtidos com bombas de rotação variável (programação ótima utilizando conversores de frequência) e medições do sistema estudado (bombas com velocidade fixa), considerando-se uma curva de demanda típica para ambos os casos (Fig. 2.11). A Fig. 3.10 apresenta a programação ótima para a velocidade de rotação da bomba em conjunto com a programação de bombeamento utilizada no caso real (velocidade fixa de bombeamento), de acordo com a política operacional.



(a) Programação da bomba 1

(b) Programação da bomba 2

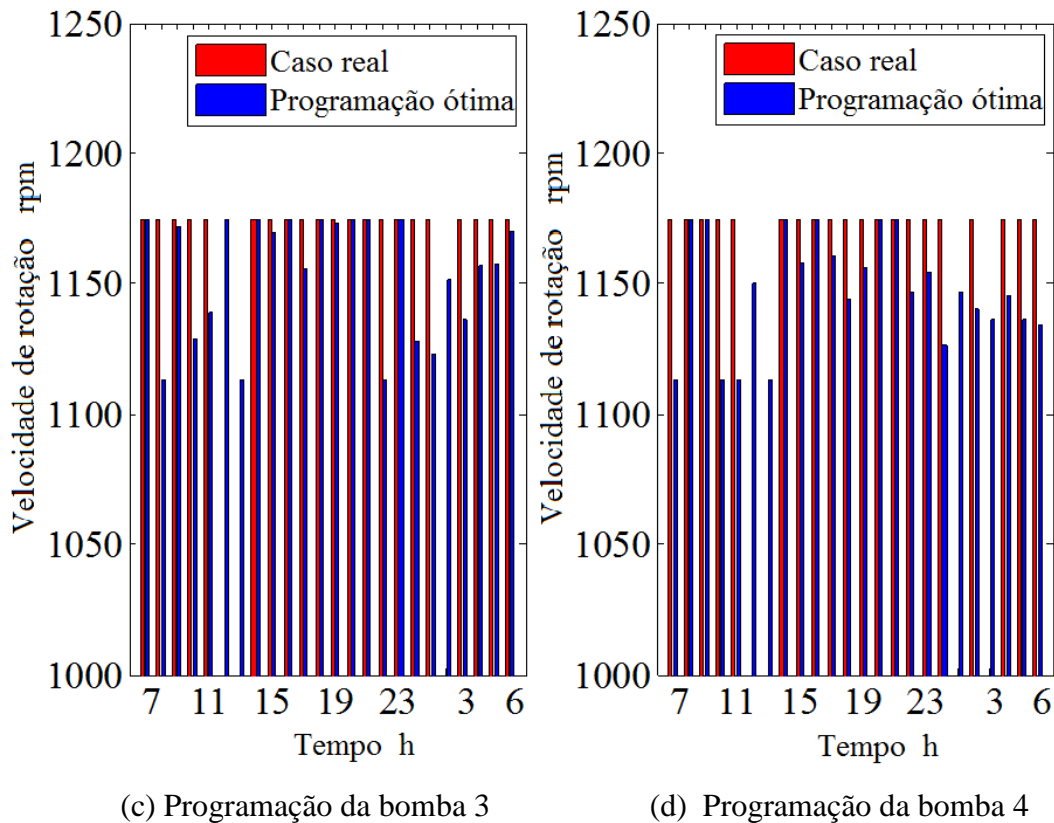


Figura 3.10 - Programação de bombeamento

A Fig. 3.10a mostra que uma bomba 1 trabalha continuamente, durante 24 horas. Isto evita a interrupção do abastecimento de água. Ao contrário do procedimento padrão (velocidade fixa de bombeamento), a velocidade de rotação da bomba 1 pode ser reduzida observando-se as restrições consideradas para a Eq. 3.2 (função objetivo do problema de otimização). Na programação com o uso de conversores de frequência, a velocidade de rotação das bombas é reduzida durante o período de pico de consumo de energia elétrica. Todas as bombas trabalham com velocidades inferiores à máxima, pelo menos uma hora durante o período de pico. Além do impacto econômico da programação ótima, isto também proporciona uma melhoria na segurança do sistema elétrico e contribui para reduzir a necessidade de investimentos para ampliação da geração de energia elétrica.

A Fig. 3.11 apresenta o nível de água no reservatório de armazenamento e a energia consumida pela estação de bombeamento.

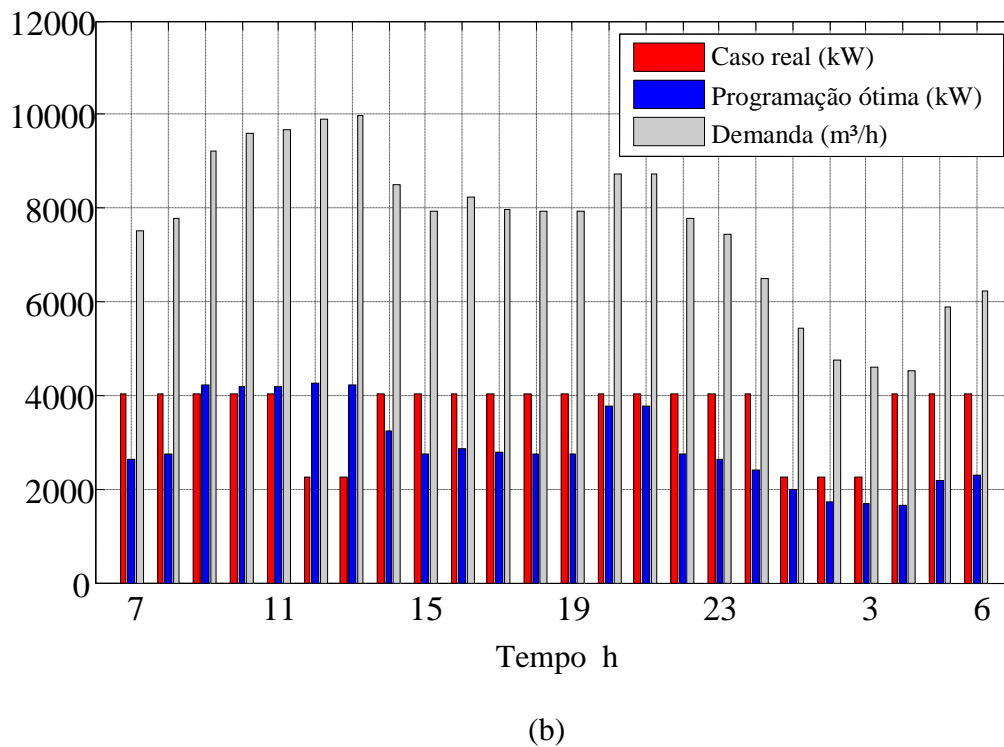
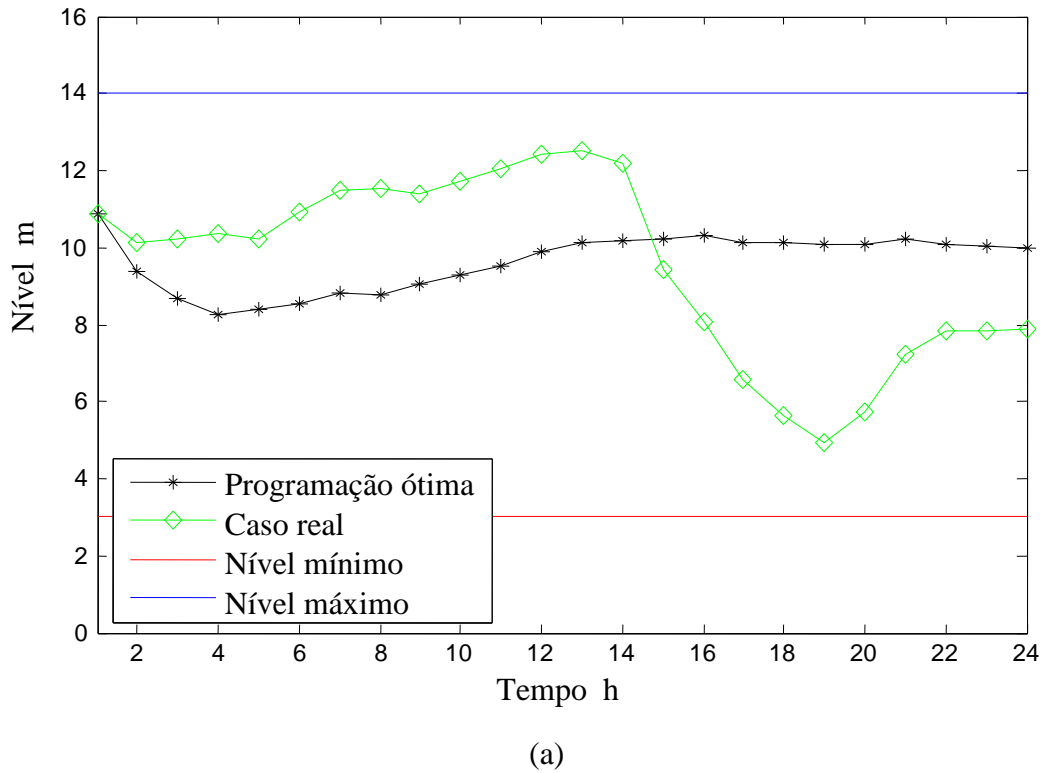


Figura 3.11 - Nível de água no reservatório (a) e consumo de energia e demanda de água (b)

O perfil do nível de água no caso da programação ótima de bombas sugere que não há excesso de vazão de descarga da estação de bombeamento durante o ciclo de trabalho.

Os valores dos níveis iniciais e finais são muito próximos, ao contrário do caso real. As grandes diferenças entre os níveis iniciais e finais podem contribuir para a escassez de água e isto implica em maiores precauções no acompanhamento diário do nível de água.

A redução da potência consumida no processo real (Fig. 3.11, 12h, 13h e de 1h as 3h da manhã) está associada com os desligamentos das bombas. A programação de bombeamento do caso real não busca minimizar o custo de energia no período (17 as 20 h) de maior demanda de energia elétrica do sistema elétrico, assim como de tarifas elevadas de energia elétrica. Todas as bombas estavam em operação durante este período específico de altas tarifas. Além disso, no caso real as quatro bombas trabalham simultaneamente com a velocidade máxima por um longo período (73% do ciclo de trabalho).

O perfil de consumo de energia associado com a programação ótima tem um comportamento transitório semelhante à curva de demanda. De 5 as 8 h (pico de consumo), a programação de bombeamento ótima apresenta resultados de redução no consumo de energia. A Fig. 3.12 apresenta a energia economizada, resultado do uso de conversores de frequência e a programação ótima de bombeamento.

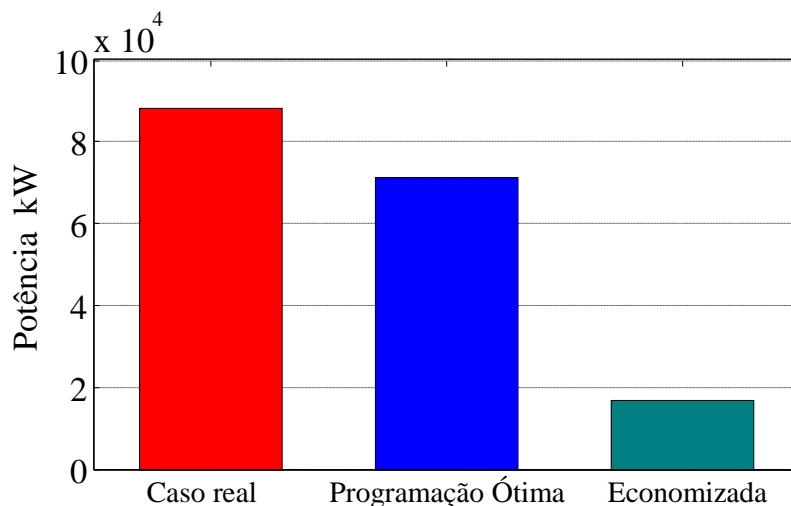
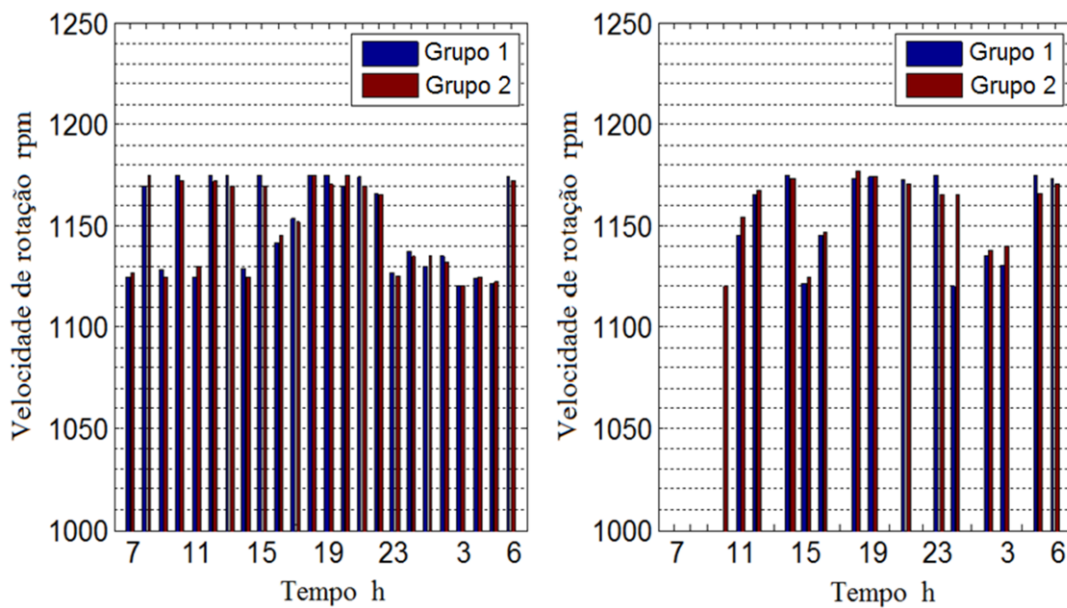


Figura 3.12 - Potência elétrica economizada

De acordo com a Fig. 3.12, considerando-se uma eficiência de conversores de frequência igual a 97% da energia total consumida pelas bombas (Emerson, 2013), os resultados mostram uma economia de potência aproximadamente igual a 17,1%. Com base em uma tarifa média de US\$ 0,108/kWh (COELBA, 2013) e um consumo médio mensal de energia de 2.646.000 kW (ou 88.200 kW/dia), o custo mensal estimado de eletricidade é US\$

285.768,00. A energia média mensal economizada é igual a US\$ 48.980,64. Considerando o investimento inicial de US\$ 284.000,00 referente à compra, construção e instalação de conversores de frequência, o tempo de retorno estimado é de 6 meses.

As diferenças nos valores de demanda entre os padrões de demanda da mesma estação (Fig. 3.6) sugerem a necessidade de diferentes programações de bombeamento. A Fig. 3.13 apresenta os resultados da otimização considerando os dois padrões de demanda da estação primavera (estação com elevada distância Euclidiana entre os padrões de demanda, Figs. 3.13a-b).



(a) Bomba 1

(b) Bomba 2

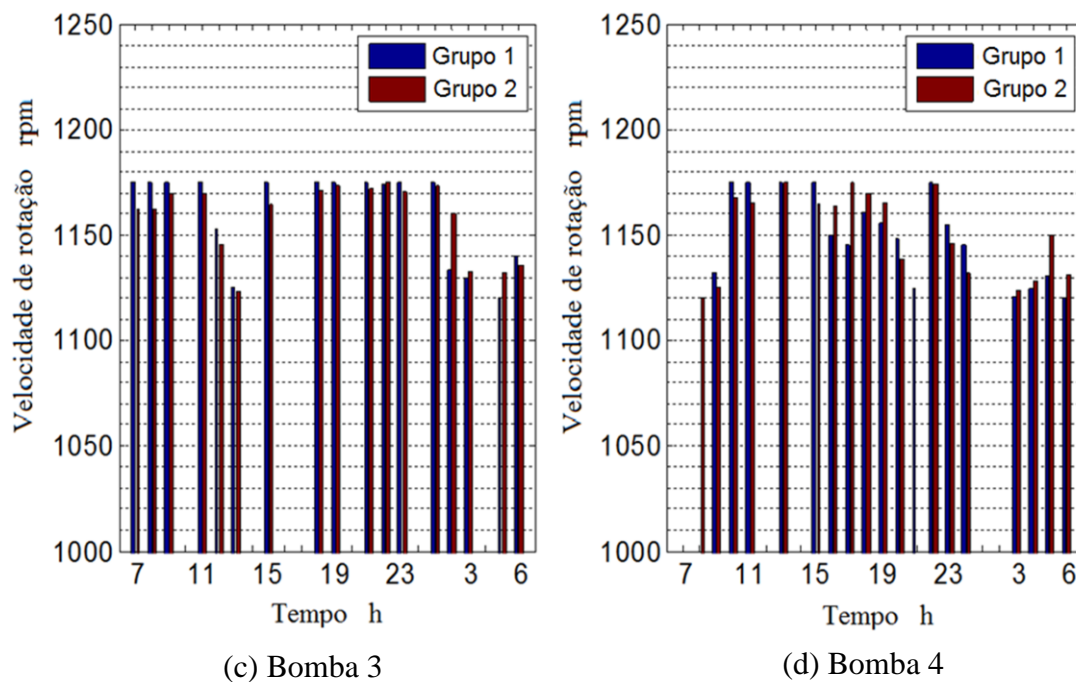


Figura 3.13 – Programação de bombeamento – estação primavera

A Fig. 3.14 mostra que as programações de bombeamento ótimas são semelhantes na maior parte do ciclo de trabalho. Com poucas exceções, as bombas são manobradas (ligadas/desligadas) nos mesmos instantes. Além disso, para cada uma das bombas há uma pequena diferença entre a velocidade de rotação. Portanto, para o propósito de determinação da programação ótima de bombeamento associada a cada estação, quaisquer dos padrões podem ser considerados ou um perfil médio de demanda (tal como visto na Fig. 3.9) também pode ser utilizado como entrada para o problema de otimização. Este raciocínio pode ser aplicado para as outras estações do ano (outono-inverno e verão) com maior similaridade entre os padrões.

A Fig. 3.14 compara os resultados de otimização para as três estações consideradas, com base no padrão de maior demanda média de cada uma.

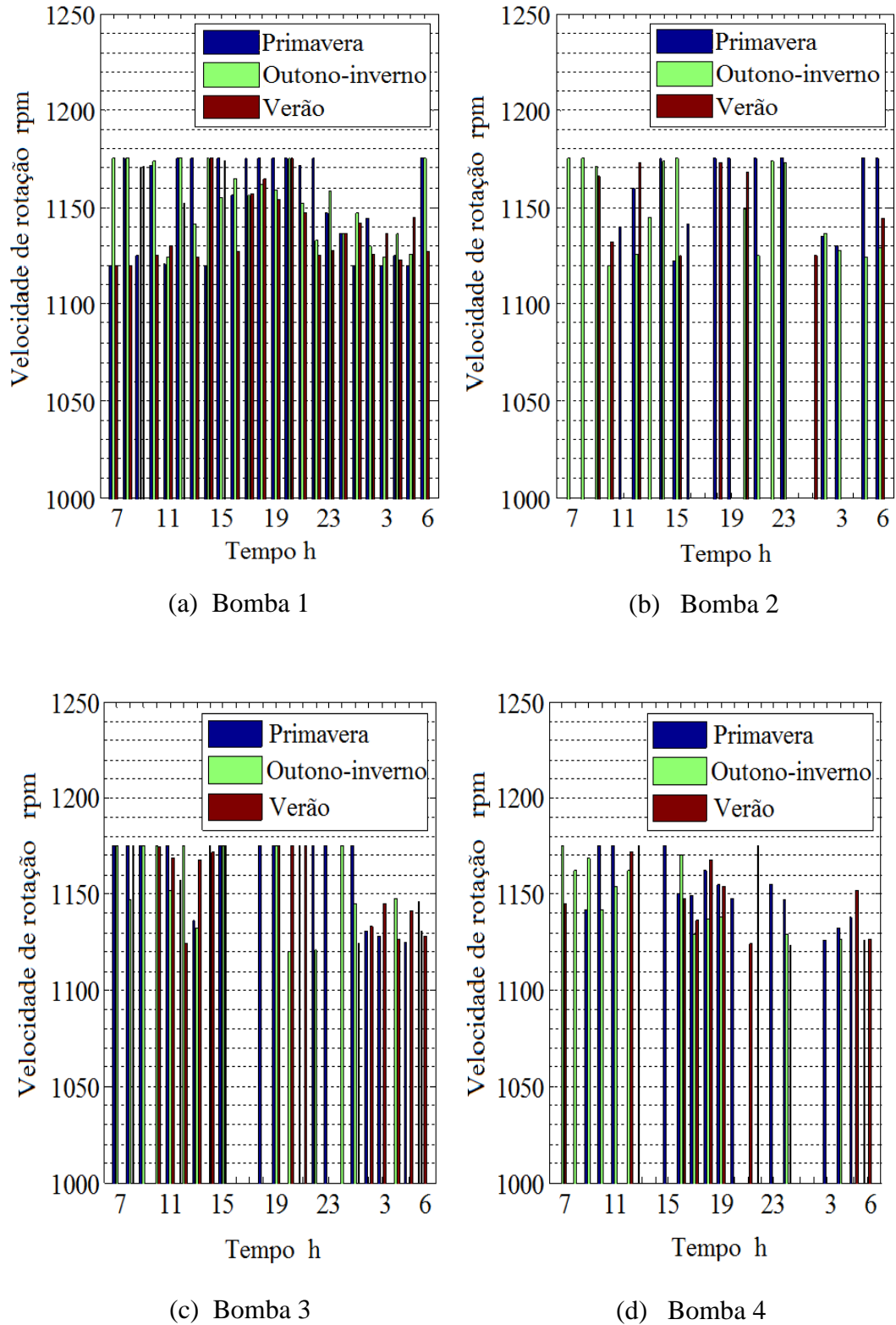


Figura 3.14 – Programação de bombeamento para cada estação do ano

As diferenças entre o horários de bombeamento de cada estação sugerem uma mudança na política operacional para a EE Alta Carga. A Tabela 3.4 apresenta a potência

diária consumida em cada estação. A diferença entre as estações primavera e o verão (maior e menor demanda média diária de água, respectivamente) (20.322 kW) confirma que o mesmo perfil de demanda não deve ser considerado ao longo do ano.

Tabela 3.4 - Potência consumida pelas bombas

Estações	Potência kW
Primavera	92.282
Outono-inverno	83.137
Verão	71.960

3.4.2 Vantagens e desvantagens

Além dos resultados satisfatórios obtidos, a proposta de otimização em regime transitório de um sistema de abastecimento de água, integrada em uma estratégia de reconhecimento de padrões de consumo, apresenta algumas vantagens:

- Eficácia e viabilidade. Além da necessidade de conversores de frequência, a implementação do método não requer a instalação ou aquisição de sistemas complexos. O reconhecimento de padrões pode ser atualizado periodicamente a partir de curvas de consumo de dados;
- Mudança na cultura de operação da unidade de alimentação. Os procedimentos operacionais anteriores, com base em uma abordagem heurística, seriam substituídos por uma nova abordagem, que se justifica pelo ganho em eficiência energética em conjunto com o atendimento racional da demanda;
- Aplicabilidade. Apesar de ter sido aplicado e testado em um sistema específico de abastecimento urbano, o procedimento e abordagem podem ser aplicados a outros sistemas de abastecimento de água nos quais as características hidráulicas e operacionais devam ser consideradas como aspectos adicionais ao problema de otimização;
- Aproximação do modelo reduzido. A estratégia de redução de modelo usando dois modelos empíricos baseados em Redes Neurais Artificiais (RNA) é importante para viabilizar a implementação da otimização em tempo real.

Outros aspectos (ou desvantagens) que devem ser destacados:

- Aumentos dos custos operacionais. Embora o tempo de retorno estimado associado à compra, construção e instalação de conversores de frequência seja de apenas 6 meses, o custo de manutenção, melhoria dos sistemas de aquisição de dados e treinamento devem ser considerados;
- Modelagem e simulação. O impacto de qualquer mudança no problema de otimização ou nos padrões de consumo deve ser avaliada através de simulação. Neste caso, os modelos empíricos devem ser identificados ou atualizados através de um modelo fenomenológico ou de dados reais.

3.5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta a simulação em regime transitório de um sistema de abastecimento urbano de água com base em um modelo fenomenológico de parâmetros distribuídos capazes de prever o comportamento hidráulico e do consumo de energia. Os testes de simulação, baseado em um caso real, atestam a consistência do modelo e o procedimento numérico considerado. Apesar das características específicas relacionadas com o caso real estudado, o modelo e a estratégia de simulação podem ser aplicados a outros sistemas de abastecimento de água, com o objetivo de conhecer o comportamento transitório dos perfis de altura piezométrica e vazão ao longo da linha adutora. A estratégia do modelo e simulação também permite uma análise cuidadosa do sistema de abastecimento de água e representa uma ferramenta potencial para avaliação de estratégias de controle, dos efeitos ocasionados por de distúrbios, e da eficiência energética.

Os resultados mostram o potencial ganho em eficiência energética, com a inclusão de conversores de frequência no sistema de bombeamento. Além disso, as mudanças na política de atuação, com a inclusão de bombas de velocidade de rotação variável, não causam alterações consideráveis no nível dos reservatórios e pode garantir a demanda de serviço total. Assim, como já vimos, a utilização de conversores de frequência no controle da vazão através da regulação da rotação da bomba é uma alternativa viável e pode ter um impacto significativo sobre a melhoria da eficiência energética em sistemas de bombeamento. Este trabalho representa uma importante contribuição para a implementação de estratégias de controle ótimo com base em bombas de velocidade variável, ao invés da política operacional atualmente adotada (Tabela 2.3, pag. 50). O modelo transitório permite a análise e simulação de estratégias de controle ótimo capazes de rastrear a trajetória da demanda, desde que

satisfaçam as restrições do sistema (como o nível mínimo e máximo de armazenamento) e minimizar alguma função de custo associada à eficiência energética.

Embora outros trabalhos destaquem o alto impacto do ajuste da vazão de bombeamento na eficiência energética, mesmo considerando os custos associados com a instalação e manutenção dos conversores de frequência, este trabalho mostra o potencial ganho em eficiência energética com a inclusão dos conversores de frequência de um verdadeiro sistema de bombeamento de escala comercial.

Por fim, os resultados e o método apresentado demonstram as melhorias na eficiência energética no sistema de abastecimento de água, a viabilidade de prever os padrões de consumo de forma não-heurística, e o uso desses padrões diretamente no problema de otimização.

REFERÊNCIAS

- Ahmadi, A.; Mashoufi, B. A new optimized approach for artificial neural networks training using genetic algorithms and parallel processing. *International Review on Computers and Software*, 7 (5), 2195-2199, 2012.
- Alvisi, S.; Franchini, M.; and Marinelli, A. A short-term, pattern-based model for water-demand forecasting. *Journal of Hydroinformatics*, 9(1), 39–50, 2007.
- Barán, B.; Lücken, C.V.; and Sotelo, A. Multi-objective pump scheduling optimization using evolutionary strategies. *J. Advances in Engineering Software*, 36(1), 39–47, 2005.
- Bensaid, A.; Lawrence, O.H.; Bezdek, J.C.; and Clarke, L.P. Partially supervised clustering for image segmentation. *Pattern Recognition*, 29(5), 859–871, 1996.
- Bezdek, J.C.; Keller, J.; Krisnapuram, R.; and Pal, N.R. Fuzzy models and algorithms for pattern recognition and image processing. *Springer*, o-38724-515-4 York, 2005.
- Bortoni, E.A.; Almeida, R.A.; and Viana, A.N.C. Optimization of parallel variable-speed-driven centrifugal pumps operation. *Energy Efficiency Journal*, 1, 167–173, 2008.
- Brion, L.M.; Mays, L.W. Methodology for optimal operation of pumping stations in water distribution systems. *J. of Hydraulic Engineering*, 11, 1551-1569, 1991.
- Chase, D.V.; Ormsbee, L.E. Optimal pump operation of water distribution system with multiple storage tanks. In: *Proc. Conf. on Water Resour. Plann. and Manag.*, ASCE, 733-736, 1989.
- Collins, S. *Variable-speed drive boosts pump efficiency*. *Power*, 135, 164-165, 1991.

COELBA (Companhia Elétrica do Estado da Bahia). *Tabela de tarifa e preço final de energia elétrica*. COELBA: Salvador, 2013.

Ding, S.; Li, H.; Su, C.; Yu, J.; and Jin, F. Evolutionary artificial neural networks: A review. *Artificial Intelligence Review*, 39(3), 251-260, 2013.

Diniz, A.M.F.; Fontes, C.H.O.; and Costa, C.A.; Ferreira, A.M.; Santos, P.I. Dynamic modeling and simulation of a water supply system with applications for improving energy efficiency. *Journal of Energy Efficiency*, submitted (under review), 2013.

D'Urso, P.; Maharaj, E.A. Walets-base clustering of multivariate time series. *Fuzzy Sets and System*, 193, 33-61, 2012.

Emerson Network Power. *Equipment Manual – drive inverter*. Emerson International Limited. Manufacturer trading company. Guangdong, 2013.

Farmaki, E.G.; Thomaidis, N.S.; and Efstathiou, C.E. Artificial neural networks in water analysis: Theory and applications. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 90(2), 85-105, 2010.

Ferreira, A.M.S.; Cavalcante, C.A.M.T.; Fontes, C.H.O.; and Marambio, J.E.S. A new method for pattern recognition in load profiles to support decision-making in the management of the electric sector. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 53, 824-831, 2013.

Fox, D. G. Judging Air Quality Model Performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 62, p. 599-609, 1981.

Georgescu, S.; Popa, R.; and Georgescu, A. Pumping stations scheduling for a water supply system with multiple tanks. *U.P.B. Sci. Bull.*, series d, 72(3), 129-140, 2010.

Ghiassi, M.; Zimbra, D.K.; and Saidane, H. Urban water demand forecasting with a dynamic artificial neural network model. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 134(2), 138-146, 2008.

Greenaway, G.; Guanlao, R.; Bayda, N.; and Zhang, Q. Water distribution systems demand forecasting with pattern recognition. *Water distribution systems analysis symposium*, 1-16, 2008.

IEA- International Energy agency. *World Energy Outlook*, Paris, International Energy Agency, 2013.

Jowitt, P.W.; Germanopoulos, G. Optimal pump scheduling in water-supply networks. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 4, 406-422, 1992.

Hoppner, F.; Klawoon, F.; Kruse, R.; and Runkler, T. *Fuzzy cluster analysis - Methods for classification, data analysis and image recognition*. John Wiley & Sons, LTD, 2000.

Lambeth, J.; Houston, J. Adjustable frequency drives saves energy. *Water Envir. and Technol.*, 3(5), 34-45, 1991.

Lansley, K.E.; Awumah, K. Optimal pump operations considering pump switches. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 1, 17–35, 1994.

Lee, D.; Baek, S.; and Sung, K. Modified K-means algorithm for vector quantizer design. *Signal processing letters, IEEE*, 4 (1), 2-4, 1997.

Li, S.; Wen, J. Application of pattern matching method for detecting faults in air handling unit system. *Automation in Construction*, 43, 49-58, 2014.

Liao, W.T. Clustering of time series data - a survey. *Pattern Recognition*, 38(11), 1857–1874, 2005.

Lingireddy, S.; Wood, D.J. Improved operation of water distribution systems using variable-speed pumps. *Journal of Energy Engineering, ASCE*, 124(3), 90-103, 1998.

López-Ibáñez, M.; Prasad, T.D.; and Paechter, B. Ant colony optimization for optimal control of pumps in water distribution networks. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 4, 337-346, 2008.

Magalhães, R.S.; Fontes, C.H.O.; Almeida, L.A.L.; and Embiruçu, M. Identification of hybrid ARX–neural network models for three-dimensional simulation of a vibroacoustic system. *Journal of Sound and Vibration*, 330(21), 5138-5150, 2011.

Marques, C.A.X.; Fontes, C.H.; Embiruçu, M.; and Kalid, R.A. Efficiency control in a commercial counter flow wet cooling tower. *J. Energy Conversion and Management*, 50(11), 2843–2855, 2009.

Mays, L.W. *Water distribution systems handbook*. New York: McGraw-Hill, 2000.

McCormick, G.; and Powell, R.S. Optimal pump scheduling in water supply systems with maximum demand charges. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 129(5), 372-379, 2013.

Monedero, I.; *et al.* Detection of frauds and other non-technical losses in a power utility using Pearson coefficient, Bayesian networks and decision trees. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 34(1), 90–98, 2012.

Montgomery, D.C.; Runger, G.C. *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

Morettin, P.A.; Tolo, C.M. *Modelos para Previsão de Séries Temporais*. São Paulo: Edgard Blucher, 1981.

Nitivattananon, V.; Sadowski, E.C.; and Quimpo, R.G. Optimization of water supply system operation. *Journal of water resources planning and management*, 122(5), 374-384, 1996.

Ormsbee, L.E.; Walski, T.M.; and Sharp, W.W. Methodology for improving pump operation efficiency. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 2, 148-164, 1989.

Paliwal, K.K.; Ramasubramanian, V. (2000). Comments on “modified k-means algorithm for vector quantizer design”. *Trans. Image Processing, IEEE*, 9 (11), 1964-1967.

Piatetsky, G. Data mining and knowledge discovery 1996 to 2005: overcoming the hype and moving from “university” to “business” and “analytics”. *Data Min, Knowled Discov.*, 15, 99–105, 2007.

Pinto, J.C.; Lage, P.L.C. *Mathematical methods in chemical engineering problems*, COPPE/UFRJ, E-papers, 2001.

Santos, R.; *et al.* Multivariable correlation analysis with low sampling rate in output and its application in an LNG plant. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 66(1-2), 33-41, 2009.

Schiesser, W.E. *The numerical method of lines: integration of partial differential equations*. Academic Press: San Diego, 1991.

Shvartser, L.; Shamir, U.; and Feldman, M. Forecasting hourly water demands by pattern recognition approach. *J. Water Resour. Plann. Manage*, 611-627, 1993.

Rao, Z.F.; Wicks, J.; and West, S. Optimising water supply and distribution operations. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Water Management*, 160(2), 95–101, 2007.

Rousseeuw, P.J. Silhouettes: a Graphical Aid to the Interpretation and Validation of Cluster Analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 20, 53-65, 1987.

Tarquin, A.J.; and Dowdy, J. Optimal pump operation in water distribution. *J. hydraulic Engineering*, 2, 496–501, 1989.

Vladimir, Ć.; Heiliö, M.; Krejić, N.; and Nedeljkovic, M. Mathematical model for efficient water flow management. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 11(3), 1600–1612, 2010.

Vlachos, M.; Lin, J.; Keogh, E.; and Gunopulos, D. A wavelet-based anytime algorithm for k-means clustering of time series. In Proc. *Workshop on clustering high dimensionality data and its applications*, 23-30, 2003.

Walski, T.M.; *et al.* *Advanced water distribution modeling and management*. Haestad Methods, Inc. Waterbury, CT, 2003.

Wang, H.; Guo, W. ACO optimizing neural network for macroscopic water distribution system modeling. In: Proc. *International Conf. on Intelligent Computing and Cognitive Informatics*, Washington, USA, 367-370, 2010.

Wilks, D. S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. International Geophysics Series. 2a. Edição, Estados Unidos da América, Academic Press, v. 91, 627 p., 2006.

Yang, K.; Shahabi, C. A PCA-based similarity measure for multivariate time series. In: Proc. *of the 2nd ACM international workshop on Multimedia databases*, MMDB '04, 65–4, 2004.

Yu, G.; Powell, R.S.; and Sterling, M.J.H. Optimized pump scheduling in water distribution systems. *J. of Optimization Theory and Application*, 3, 463-488, 1994.

Zessler, U.; Shamir, U. Optimal operation of water distribution systems. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 6, 735–752, 1989.

Zhou, W.; Zang, L.; and Jiao, L. Linear programming support vector machines. *Pattern Recognition*, 35, 2927–2936, 2002.

CAPÍTULO 4

CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

4.1 CONCLUSÕES

O sistema de bombeamento requer grande quantidade de energia elétrica para disponibilizar água tratada em grande volume para o sistema de abastecimento e distribuição de água. Ações e estratégias na busca da eficiência energética neste importante setor representam ganhos significativos nos custos e minimização consumo e os impactos ambientais da geração e distribuição da energia. Muitas vezes, nas estações de bombeamento, os operadores usam métodos heurísticos baseados em seus próprios conhecimentos, adquiridos nos muitos anos de experiência no trabalho. Estes métodos são passíveis de falhas, principalmente, nas ocasiões em que os operados mais experientes se ausentam do trabalho por um período mais longo.

No primeiro momento do trabalho, é apresentada a simulação em regime transitório de um sistema de abastecimento urbano de água com base em um modelo fenomenológico de parâmetros distribuídos, capazes de prever o comportamento hidráulico e do consumo de energia. A estratégia do modelo e simulação também permite uma análise cuidadosa do sistema de abastecimento de água e representa uma ferramenta potencial para avaliação de estratégias de controle, dos efeitos ocasionados por distúrbios no escoamento da água, e da eficiência energética. Os resultados mostram o potencial ganho em eficiência energética, com a inclusão de conversores de frequência no sistema de bombeamento. Além disso, as mudanças na política de atuação, com a inclusão de bombas de velocidade de rotação variável, não causam alterações consideráveis no nível dos reservatórios e podem garantir a demanda de serviço total. Assim, como já vimos, a utilização de conversores de frequência no controle da vazão através da regulação da rotação da bomba é uma alternativa viável e pode ter um impacto significativo sobre a melhoria da eficiência energética em sistemas de bombeamento.

No segundo momento, é apresentado um otimizador baseado no modelo fenomenológico desenvolvido para resolver um problema de otimização em regime transitório que inclui a programação ótima para a velocidade de rotação da bomba de um sistema de abastecimento de água, considerando uma política de custo mínimo de energia elétrica. A estratégia de otimização é baseada em modelo de rede neural artificial dinâmica, que considera o uso de conversores de frequência, a fim de atender a demanda de água sem excesso de acúmulo de água no reservatório de armazenamento dentro de um ciclo de trabalho. Considerando-se uma curva de demanda típica e outros aspectos associados a eficiência, custos relacionados a compra e instalação de conversores de frequência, os resultados da otimização apresentaram na redução no consumo médio mensal de energia igual US\$ 48.980,64 para o caso estudado. Estes resultados demonstram a melhoria da eficiência energética do sistema de abastecimento de água por meio da estratégia de controle ótimo. Uma redução de 17,1% (consumo diário) na energia consumida é obtida no sistema de bombeamento.

Outro ponto importante a abordar é o desenvolvimento de reconhecimento de curvas padrões de demanda a partir de dados reais do sistema de abastecimento, utilizando o método FCM, apropriado para o reconhecimento de padrões de séries de tempo univariada. O reconhecimento de padrões de curvas de demanda ao longo do ano representa uma ferramenta útil para alterar a programação de bombeamento. Os resultados mostraram que a diferença entre a potência consumida por dia, em cada estação, de acordo com a programação ótima de bombeamento, demonstra que o mesmo perfil de demanda não deve ser considerado ao longo do ano. Por fim, os resultados e métodos apresentados demonstram a melhoria na eficiência energética em sistema de abastecimento de água, a viabilidade de predição de padrões de consumo de modo não heurístico e o uso direto destes padrões no problema de otimização.

4.2 RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como recomendações e sugestões para trabalhos futuros seguem:

- Utilizar estratégias para implementar sistema híbrido de energia alternativa como, por exemplo, energia eólica como proposta de minimizar o consumo de energia;
- Avaliar a utilização de grupos de geradores a diesel para serem ligados nas horas de pico de energia;

- Utilizar um modelo fenomenológico mais amplo que contemple também o sistema de distribuição;
- Avaliação de outras técnicas de reconhecimento de padrões em curvas de consumo associando os perfis de consumo a aspectos climáticos sazonais como temperatura ambiente e umidade;
- Analisar a viabilidade econômica e financeira de aquisição de novos motores elétricos de alto rendimento.

APÊNDICE A - Equação do movimento a partir de equação da energia térmica, e desenvolvimento da equação da continuidade em regime transitório

a) EQUAÇÃO DO MOVIMENTO A PARTIR DE EQUAÇÃO DA ENERGIA TÉRMICA

A partir da equação completa da energia, que considera a taxa de acumulação da energia interna e da energia cinética, é possível derivar a equação da energia térmica (por analogia com a equação da energia mecânica) que somente considera a taxa de ganho da energia interna (Bird *et al.*, 1960). Assim, para um elemento de fluido infinitesimal na vazão de uma dimensão, a seguinte equação é válida:

$$\rho \cdot \frac{Du}{Dt} = -(\nabla \cdot q) - p \cdot (\nabla \cdot v) - (\tau : \nabla v) \quad \text{A1.1}$$

u é a energia interna por unidade de massa do fluido no elemento (volume de controle), v é a velocidade de fluido local, p é a pressão estática, τ é o tensor das tensões e q é o vetor de fluxo de calor. Du/Dt é a derivada substancial (derivada após a movimentação do fluido) de u . $-(\nabla \cdot q)$ representa a taxa de entrada da energia interna pela condução (por unidade de volume), $-p \cdot (\nabla \cdot v)$ e $-(\tau : \nabla v)$ representam a taxa de reversibilidade da energia interna pela compressão e a taxa de irreversibilidade do aumento da energia interna pela dissipação da viscosidade (perdas por atrito), respectivamente, ambos por unidade de volume. Assumindo, escoamento incompressível, $(\nabla \cdot v) = 0$, e integrando a Eq. A1.1 sobre o volume de controle:

$$\int_V \rho \cdot \frac{Du}{Dt} dV = \int_V -(\nabla \cdot q) dV - \int_V (\tau : \nabla v) dV \quad \text{A1.2}$$

Aplicando a Equação de Leibnitz na integral diferencial e na equação da continuidade

$$\int_V \rho \cdot \frac{Du}{Dt} dV = \int_V -(\nabla \cdot q) dV - \int_V (\tau : \nabla v) dV \quad \text{A1.3}$$

onde dU/dt é a derivada total no tempo da energia interna U total no sistema. Para o balanço de energia macroscópica no regime transitório, é assumido que não há trabalho de eixo e que a derivada no tempo da energia potencial total é insignificante, e conduz a Eq. A1.4:

$$\frac{dU}{dt} = -\Delta \left[\left(u + \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} \cdot \langle v \rangle^2 + g \cdot z \right) \cdot w \right] + Q - \frac{dK}{dt} \quad \text{A1.4}$$

z representa a cota, w é a taxa de fluxo de massa, $\langle v \rangle$ é a velocidade média, durante a seção transversal do tubo, Q é a taxa de líquida de calor adicionado ao sistema e K é a energia cinética total no sistema.

Usando o Teorema da Divergência de Gauss:

$$\int_V (\nabla \cdot q) dV = \int_S (n \cdot q) dS = Q \quad \text{A1.5}$$

Usando A1.3, A1.4 e A1.5 em A1.2:

$$\Delta \left[\left(u + \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} \cdot \langle v \rangle^2 + g \cdot z \right) \cdot w \right] + \int_V (\tau : \nabla v) dV + \frac{dK}{dt} = 0 \quad \text{A1.6}$$

Usando a Eq (2) e expressando como $K = \int_V \frac{1}{2} \rho v^2 dV$ e $\int_V (\tau : \nabla v) dV = \int_V \rho \hat{E}_v dV$, onde \hat{E}_v representa a perda de carga por unidade de vazão em massa:

$$\Delta \left[\left(u + g \cdot H + \frac{1}{2} \cdot \langle v \rangle^2 \right) \cdot w \right] + \int_V \rho \hat{E}_v dV + \int_V \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 \right) dV = 0 \quad \text{A1.7}$$

Para um fluxo incompressível e isotérmico, $\Delta u = 0$. A outra taxa líquida adicionada pode ser expressa como integrais de volume:

$$\begin{aligned} \Delta \left[\left(g \cdot H + \frac{1}{2} \cdot \langle v \rangle^2 \right) \cdot w \right] &= \int_S (n \cdot gH \rho v) dS + \frac{1}{2} \int_S (n \cdot \langle v \rangle^2 \rho v) dS = \\ \int_V (\nabla \cdot gH \rho v) dV + \frac{1}{2} \int_V (\nabla \cdot \langle v \rangle^2 \rho v) dV & \quad \text{A1.8} \end{aligned}$$

Substituindo em A1.7:

$$\int_V \left\{ (\nabla \cdot gH \rho v) + \frac{1}{2} (\nabla \cdot \langle v \rangle^2 \rho v) + \rho \hat{E}_v + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 \right) \right\} dV = 0 \quad \text{A1.9}$$

Para um fluxo incompressível e unidimensional, a Eq. A1.9 fornece a seguinte equação:

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + v_x \cdot \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\hat{E}_v}{v_x} = 0 \quad \text{A1.10}$$

v_x é a componente da velocidade na direção x .

A Eq. 2.1 (Capítulo 2) é derivada diretamente da Eq. A1.10, considerando o termo $v_x \cdot \partial v_x / \partial x$ significativamente menor do que o termo $\partial v_x / \partial t$ (Chaudhry 1979), usando a Equação Darcy-Weisbach para calcular a perda de carga, e escrevendo a Eq. A1.10 em termos de vazão volumétrica (Q).

b) DESENVOLVIMENTO DA EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE EM REGIME TRANSITÓRIO

Nomenclatura:

a	Celeridade (velocidade da onda), m/s
A	Área da seção transversal, m ²
D	Diâmetro do tubo, m
e	Espessura da parede do tubo, m
E	Módulo de Young de elasticidade da pared do tubo, Pa
g	Aceleração da gravidade, m ² /s
H	Altura piezométrica, m
K	Módulo de Bulk de elasticidade do fluido, Pa
p	Pressão, N/m ²
Q	Vazão, m ³ /s
r	raio do tubo, m
v	Velocidade do fluido, m/s
t	Tempo, s
x	Distância, m
ρ	Peso específico da água, (1000 kg/m ³)

No desenvolvimento da equação da continuidade aplicado ao modelo elástico para tubulação forçada são assumidas as seguintes hipóteses:

- Fluxo unidimensional de modo que a variação espacial das variáveis de estado (altura piezométrica e vazão) ocorre apenas na direção axial (coordenada x) (distribuição uniforme de velocidade em cada seção transversal da linha adutora);
- Elasticidade linear da parede do tubo de modo que a sua expansão (ou contração) é diretamente proporcional à tensão aplicada;
- As mesmas correlações para a perda de carga no estado estacionário são válidas para o transitório;
- Densidade do fluido constante.

Considere o escoamento de um fluido dentro de um tubo de seção transversal circular (raio r) conforme mostra a Fig. A1.1.

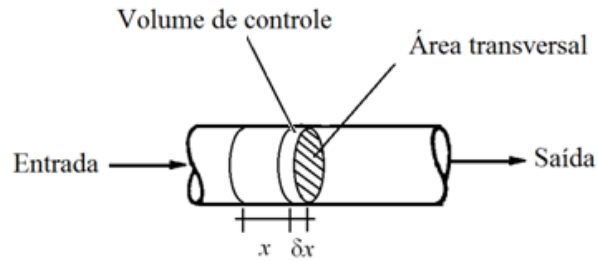


Figura A1.1. Volume de controle infinitesimal.

Com base na expansão em Série de Taylor, as variáveis de estado (velocidade do fluido em uma dada seção e altura piezométrica) ficam estabelecidas conforme a Tabela A1.1.

Tabela A1.1. Incremento nas variáveis de estado.

Variáveis de estado	x	$x+\delta x$
Altura piezométrica	H	$H + \left(\frac{\partial H}{\partial x}\right) \delta x$
Velocidade	v	$v + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right) \delta x$

Tendo-se assumido que a densidade do fluido é constante, a aplicação do princípio da conservação da massa ao volume de controle considerado pode ser realizada em termos de volume de fluido:

$$\left[\begin{array}{l} \text{variação do volume} \\ \text{de controle} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{volume de fluido que entra} \\ \text{volume de fluido que sai} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{variação de volume devido} \\ \text{à compressibilidade do fluido} \end{array} \right]$$

ou

$$\delta V_r = \delta V_f + \delta V_c$$

Em um intervalo de tempo infinitesimal δt , a diferença entre os volumes de fluido na entrada e na saída do volume de controle fica:

$$\delta V_f = V_{ent} - V_{sai} = v \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \delta t - \left(v + \frac{\partial v}{\partial x} \delta x \right) \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \delta t$$

A1.11

$$\delta V_f = V_{ent} - V_{sai} = -\frac{\partial v}{\partial x} \delta x \cdot \delta t \cdot \pi \cdot r^2$$

A variação do volume de controle deve-se à expansão radial ou contração das paredes do tubo (efeito da elasticidade da parede), δV_r . A contração ou expansão da parede do tubo está associada à variação da pressão, ao módulo de elasticidade do tubo (módulo de Young, E) e à espessura da parede do tubo (e). A tensão radial σ devido à pressão é dada por:

$$\sigma = \frac{p \cdot r}{e}$$

A1.12

e a variação da tensão resulta em um intervalo de tempo δt fica:

$$\delta\sigma = \frac{\partial p}{\partial t} \delta t \cdot \frac{r}{e} \quad \text{A1.13}$$

Tendo-se uma variação de raio da seção transversal igual a $r + \delta r$, isto implica em uma variação na deformação:

$$\delta\varepsilon = \frac{\delta r}{r} \quad \text{A1.14}$$

Assumindo a linearidade na elasticidade do tubo, o módulo de Young pode ser expresso na forma

$$E = \frac{\delta\sigma}{\delta\varepsilon} \quad \text{A1.15}$$

Substituindo as Eqs. A1.14 e A1.15 em A1.13:

$$\delta r = \frac{\partial p}{\partial t} \cdot \frac{r^2}{eE} \cdot \delta t \quad \text{A1.14}$$

A variação do volume de controle devido à elasticidade da parede do tubo fica então:

$$\delta V_r = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \delta x \cdot \delta r \quad \text{A1.16}$$

Ou

$$\delta V_r = 2 \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \delta x \cdot \frac{\partial p}{\partial t} \cdot \frac{\delta t}{eE}$$

A variação do volume no intervalo de tempo δt devido a compressibilidade do fluido (δV_c) é função da pressão e do módulo de Bulk da elasticidade do fluido. O volume inicial do elemento do fluido é

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot \delta x \quad \text{A1.17}$$

O módulo de Bulk K é definido como

$$K = \frac{-\delta p}{\delta V_c / V_c} = \frac{-\partial p}{\partial t} \cdot \frac{\delta t}{\delta V_c / V_c} \quad \text{A1.18}$$

A partir das equações A1.17 e A1.18 tem-se:

$$\delta V_c = \frac{-\partial p}{\partial t} \cdot \frac{\delta t}{K} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \delta x$$

Aplicando a equação de conservação da massa (Eq. A1.11) e dividindo por $\pi \cdot r^2 \cdot \delta x \cdot \delta t$ chega-se em:

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial t} \left(\frac{2r}{eE} + \frac{1}{K} \right) = 0 \quad \text{A1.19}$$

Fazendo $p = \rho \cdot g \cdot H$, $v = \frac{Q}{A}$ e $D = 2r$ na Eq. A1.19 tem-se:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} + \rho \cdot g \frac{\partial H}{\partial t} \left(\frac{D}{eE} + \frac{1}{K} \right) = 0 \quad \text{A1.20}$$

Dividindo a Eq. A1.20 por ρg e por $\left(\frac{D}{eE} + \frac{1}{K} \right)$

$$\frac{1}{\rho \left(\frac{D}{eE} + \frac{1}{K} \right)} \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad \text{A1.21}$$

Definindo a^2 como

$$a^2 = \frac{1}{\rho \left(\frac{D}{eE} + \frac{1}{K} \right)} = \frac{1}{\rho \left(\frac{D}{eE} + \frac{1}{K} \right)} \cdot \frac{K}{K} = \frac{K}{\rho \left(1 + \frac{KD}{eE} \right)} \quad \text{A1.22}$$

e substituindo na Eq. A1.21, chega-se à equação da continuidade em regime transitório:

$$\frac{a^2}{gA} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad \text{A1.23}$$

A variável a é conhecida com celeridade e representa a velocidade média de propagação das ondas de pressão na tubulação, e depende das características do fluido e da tubulação com observado na Eq. A1.22.

APÊNDICE B - *Improvements in water supply systems based on optimization and consumption patterns recognition* - artigo aceito para publicação no periódico *Energy Efficiency Journal*

Dynamic modeling and simulation of a water supply system with applications for improving energy efficiency

ALEXANDRE MAGNO FERREIRA DINIZ *, CRISTIANO HORA DE OLIVEIRA FONTES, CAIUBY ALVES DA COSTA, GLORIA MEYBERG NUNES COSTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial (PEI), Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Rua Aristides Novis, nº 2, 6º Andar - Federação, EP-UFBA, Salvador, Bahia, CEP 40.210-630 – Brazil

*Corresponding author.

E-mail address: alexdiniz@ifba.edu.br

Tel.: (71) 3283-9800 Fax: (71) 3283-9800

This paper presents the dynamic simulation of an urban water supply system based on a phenomenological model of distributed parameters capable of predicting the hydraulic behavior and the energy consumption. The case study involves a segment of the supply and distribution water system in the city of Salvador (Brazil) and the analysis focuses on the pumping station, water mainline and distribution tanks. The current operation of the system is performed through heuristic rules based on expert knowledge and the control of discharge flow pumps is essentially on/off. The comparison between simulation results and measured data shows that the model describes the hydraulic network satisfactorily as it is able to predict the transient behavior of the flow along the water main line. Considering the high capacity and dimensions together with the intrinsic dynamic features (disturbances caused by the maneuvers in the pump operation and variable demand throughout the day), the use of dynamic modeling for the case studied is really needed for the simulation results to be consistent. Furthermore, the dynamic model and strategy used enables a careful analysis of the water supply system and represents a potential tool for the evaluation of control strategies and energy efficiency. The results show the potential gain in energy efficiency with the inclusion of frequency converters in the pumping system without considerable changes in the level of reservoirs and ensuring the total service demand.

KEYWORDS: Hydraulic models; Transient model; Water supply system; Energy efficiency.

Introduction

The growing demand for electricity due to economic development causes a direct impact on the environment, especially considering that the global model of electric power generation is based mainly on fossil fuels (IEA 2011). In Brazil, the installed capacity of electric power is 113,327 MW and the energy generated by hydroelectric plants provides 71.2% of this amount. The remaining 28.8% comes from the thermal generation such as natural gas, coal, nuclear and oil, and wind power (0.8%) (Brasil 2011). A hydroelectric power plant emits a hundred times less greenhouse gases (Abe et al. 2005) than a thermal power plant of the same power. However, even in this scenario a reduction in waste electrical energy is of fundamental importance because the environmental impacts associated with building new hydroelectric plants are huge.

A water supply system for human consumption has as its main goal to meet the demand for water. This means that there is a need for storage, transportation and treatment of a large volume of water and a typical water pumping station is the part of the system which is responsible for the highest power consumption.

Some works present an analysis of energy efficiency in supply systems based on modeling and optimization. Lansey and Awumah (1994) and Beckwith and Wong (1995) suggest the absence of the accumulation of water in reservoirs at the end of an operation cycle. Ormbee and Lansey (1994) suggest operating procedures to support decision making associated to the operating time and number of pumps in operation, opening of flow control valves in the discharge of pumps, trajectory of reservoir levels and optimal rotational speed of the pumps to meet the demand (considering the possibility of adjusting the rotation). Coulbeck and Orr (1984) and Jowitt and Germanopoulos (1992) deal with the problem of energy efficiency by reducing the volume of water pumped during the peak hours of electricity consumption in which there is an increase in consumption tariffs.

Some pumping stations comprise hydraulic pumps arranged in parallel with fixed speed and discharge flow controlled by the number of pumps in operation. In this type of procedure it is very difficult to define a schedule of pumps operating with minimal energy cost without compromising the full delivery of daily demand and ensuring a suitable reservoir level for the next work cycle. Some works present algorithms based on dynamic programming that solve this type of problem (Coulbeck and Orr 1984; Quindry et al. 1981; Kessler and Shamir 1989; Ormsbee et al. 1989; Yu et al. 1994; Bounds et al. 2006; Zessler and Shamir 1989), and more recently, algorithms based on heuristic methods (Gupta and Khanna 1999; Maier et al. 2003; Reis et al. 2005; Haddad et al. 2006; López-Ibáñez et al. 2008; Wang and Guo 2010). Alternatively, the operating strategy of using frequency converters in order to provide variable-speed pumps enables an improvement in the pumping system operation adjusting the discharge flow more adequately according to the daily demand profile, without excess water in reservoirs and power consumption (Lingireddy and Wood 1998; Lambeth and Houston 1991). Viholainen et al. (2012) developed a pumping control strategy using frequency converters. The control strategy was implemented and tested in laboratory scale with two pumps in parallel, two frequency converters and one Programmable Logic Controller (PLC). The strategy is based on the individual adjustment of the rotational speed of the pump according to the flow demand (reference flow) within a search region of high efficiency defined by the pump (flow and head) and efficiency curves. This control strategy using frequency converters enables the operation of pumps close to high efficiency. Bortoni et al. (2008) used a dynamic programming algorithm for the optimal control of pumps with frequency converters to obtain economic gains. The optimal control is performed by PLC and seeks to meet the demand (reference flow) and the minimum head required for the water supply system. The case study comprises a hypothetical system with three parallel pumps of

different characteristics and each one with a frequency converter. The results show that the control strategy is robust and capable of improving the energy efficiency of the system for most of the scenarios considered (combinations between variable and fixed speed pumps, pumps with different power, speed and characteristic curves).

Other works present other alternatives in order to improve energy efficiency in water supply systems not directly associated with the use of variable-speed pumps. Carravetta et al. (2012) and Ramos et al. (2011) present a real case study (average flow rate less than 1440 m³/h) and suggest the installation of pumps in the supply pipelines that act as turbines (micro-hydro system) to generate electric power. In this work, the electric power is generated through the geometric gap between a high point in the pipeline and the supply tank beneath. Furthermore, the turbines (pumps) may be used to provide pressure control instead of using pressure control valves. Other applications include improvement in energy efficiency and reducing carbon dioxide emissions by using hybrid energy systems. In these cases, alternative and renewable energy sources such as photovoltaic panels and wind energy are employed in addition to traditional energy sources (Ramos et al. 2011; Ramos and Ramos 2010; Vieira and Ramos 2008 and 2009; Vilela and Fraidenraich 2001).

Several hydraulic models, empirical or phenomenological, have been developed and improved over the years to describe the dynamics of supply networks and water distribution. Ormsbee and Lansey (1994) classify models of these systems into four types, namely, hydraulic models based on mass balance, hydraulic models based on nonlinear regression, simplified network hydraulic models and models of hydraulic simulation. The first category simply comprises the formulation of an overall mass balance under dynamic conditions (Ormsbee and Lansey and Awumah 1994; Barán et al. 2005). Models based on nonlinear regression comprise an empirical approach (Ormsbee et al. 1987; Tarquin and Dowdy 1989). The simplified network hydraulic model is represented by linear equations obtained through local mass balances (Jowitt and Germanopoulos 1992; Demoyer and Horowitz 1975; Coulbeck et al. 1988). The hydraulic simulation model considers the hypothesis of state quasi-stationary based on a set of equations of conservation of mass and energy (Ormsbee and Lansey 1994; Wanakule et al. 1986; Chase and Ormsbee 1989; Lansey et al. 1989; Lansey and Zhong 1990; Brion and Mays 1991; Ulanicki et al. 2008).

Disturbances in a supply system can be caused by changes in pump rotational speed, changes in valve settings, waves on tanks, changes in demand, and starting and stopping procedures (Chaudhry 1979; Sanks 1998; Walski 1984; Wylie and Streeter 1978). A dynamic model is capable of predicting the dynamic behavior of state variables such as the piezometric head and the flow along the distribution line. The main applications of dynamic models are associated to the design of the water supply and distribution systems, fault detection, water quality and improving the energy efficiency through pumping procedures (Boulos et al. 2005; LeChevallier et al. 2003; Ebacher et al. 2011; Wood et al. 2005; Fleming et al. 2006; Izquierdo and Iglesias 2002). An important application related to the dynamic flow is the water hammer. Kwon (2007) and Afshar et al. (2008) studied this phenomenon in different situations. The former used experimental data obtained from a simple system of water pipes and the latter used real data from a hydroelectric plant. In both works, disturbances in the flow were caused by the closure of valves or pump failure. Both comprised the simulation of dynamic models using the method of characteristics (Chaudhry 1979; LeChevallier et al. 2003). Ismaier and Schluck (2009) investigated the interaction between the phenomenon of water hammer and pressure pulsations caused by centrifugal pumps. The authors showed that pressure pulsations in the flow dynamic can cause damping or amplification of pressure waves inside the pipe. None of these references, related to the water hammer phenomenon, present aspects about energy efficiency in non-stationary conditions.

Despite the fact that the related works are based on water supply systems in pilot or bench scales and do not present an analysis of the energy efficiency based on a dynamic approach (Ormbee and Lansey 1994; Lansey and Awumah 1994; Beckwith and Wong 1995; Jowitt and Germanopoulos 1992; Viholainen et al. 2012; Lambeth and Houston 1991), this paper presents the dynamic simulation of a water supply system based on a complete phenomenological model and also shows the high impact of the adjustment of the pumping flow on energy efficiency under non-stationary conditions. The case studied comprises a real case of a segment of the water supply and distribution system in Salvador (Brazil). The simulation strategy adopted is based on the well-known line method suitable for models with distributed parameters. The application of this simulation approach to a real water supply system, together with finite differences formulas adapted according to the real boundary conditions of the problem, represents an efficient alternative and a contribution for the modeling and simulation of similar systems. The simulation results are consistent and confirm the potential of the model for the analysis and optimization of energy efficiency in similar supply systems.

The system studied

The pumping station selected, called PS High Load, works continuously and is composed of four identical centrifugal pumps. The PS High Load has a maximum capacity of 8800 m³/h (all the pumps are operating at nominal rotational speed of 1175 rpm). The specifications of the electric motor and pump are presented in Table 1 (Worthington 1988).

Table 1 Specifications of pump and electric motor of PS High Load

Centrifugal pump		Electric motor	
Features	Specifications	Features	Specifications
Manufacturer	Worthington	Manufacturer/Model	Vilares/ HSW1
Model	16LN26	Number of poles	6
Power	1030 kW	Frequency (Hz)	60
Number of stages	1	Number of phases	3
Rotor diameter	27 ¾ in	Supply voltage (V)	2400
Rotation	1175 rpm	Current (A)	294
Discharge	3009.6 m ³ /h	Power factor (%)	90.2

The PS High Load pumps are arranged in parallel as shown in Fig. 1. The use of pumps in parallel enables the maintenance of each piece of equipment without the interruption of the supply and, at the same time, provides alternatives to control the total flow of discharge. In addition, the flow of water in the suction inlet of the pump occurs by gravity.

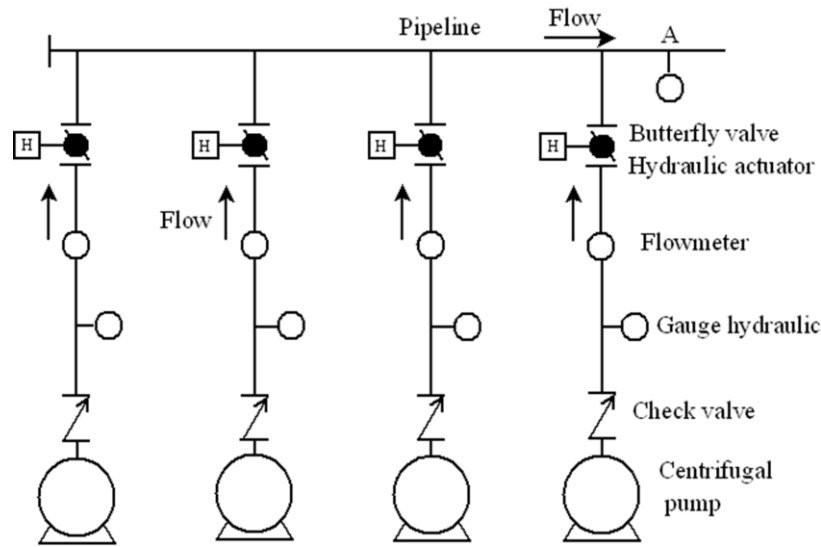


Fig. 1 Simplified hydraulic scheme of the PS High Load

The control flow in PS High Load is done simply by the adjustment of the number of pumps in operation, without the use of a butterfly valve (flow control valve). The maneuvers of the pumps are made within a minimum period of one hour, based on the water level in the reservoirs. The purpose of this operational restriction is to reduce the number of maneuvers in the pumps and thus reduces the occurrence of maintenance problems (Lansley and Awumah 1994).

All treated water is pumped and flows along a large diameter pipe (main line) to the reservoir. The water main line is made of carbon steel and has a total length of 5600 m. The quota profile of the water mainline is shown in Fig. 2.

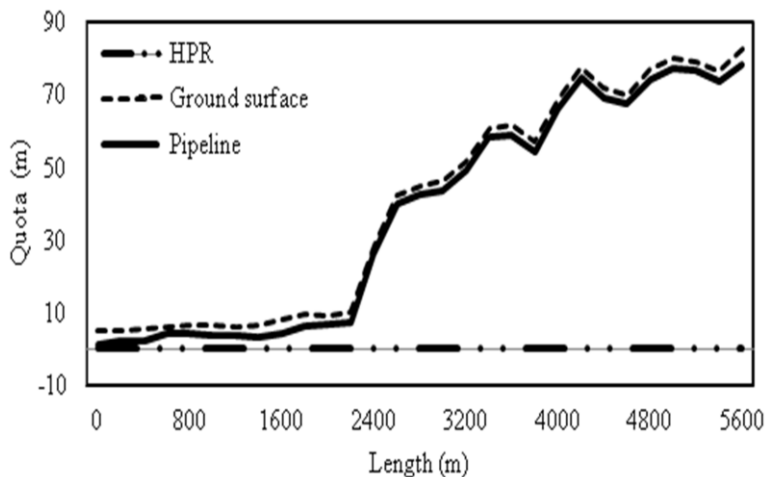


Fig. 2 The quota profile – water main pipeline

The main pipeline starts at the end of the pumping system (point A, Fig. 1) and at the first 1600 m there is no meaningful increase in the quota in relation to the Horizontal Plane of Reference (HPR). This main pipeline comprises segments of straight sections, vertical and horizontal curves, unidirectional tanks and valves. Due to the uneven topography of the ground surface the main pipeline is very sinuous, which explains the large amount of

hydraulic connection elements installed. In total, the main pipeline has 88 hydraulic elements. All these elements were considered in the model as secondary load losses.

Figure 3 shows a typical daily demand curve (from 0 to 24 h) of the region supplied. The sampling period practiced in the PS High Load is 1 hour. This time scale is associated to the slow dynamic of the entire system (confirmed by the results) due to the high capacity of mass storage (pipeline and tanks).

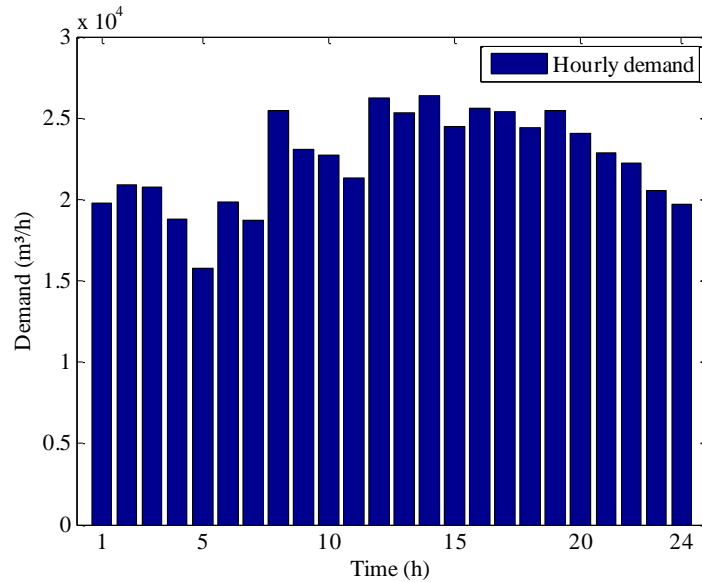


Fig. 3 Water demand distribution

The curve in Fig. 3 shows the dynamic behavior throughout the day with demand peaks. The demand profile changes according to the day (working days and holidays) and also according to seasonal weather throughout the year.

The reservoir complex consists of four cylindrical identical tanks on the ground with total storage capacity of 36,000 m³. The tanks are built on the same horizontal plane. Taking the HPR as basis, the bottom of the tanks are situated at an elevation of 77.2 m and the maximum water level is equal to 91.8 m. The discharge of the pumps (point A, Fig. 1) is situated at 1.2 m below the HPR according to Fig. 4.

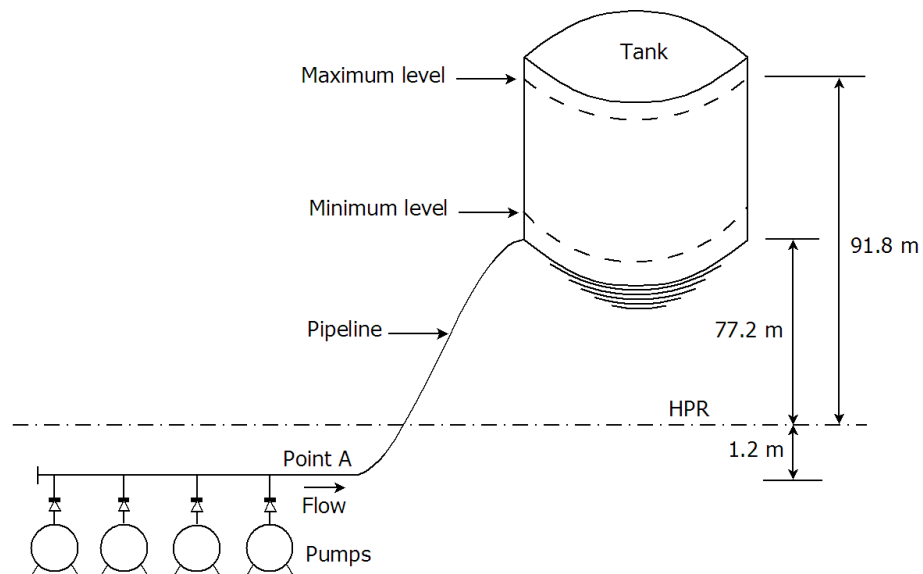


Fig. 4 Water tank elevation

Modeling and Simulation

In general, the dynamic behavior of hydraulic networks can be described by the continuity equation, which comprises an overall mass balance in differential form, together with the conservation of momentum (Chaudhry 1979), also in differential form. The latter considers the balance of forces acting on a control volume previously specified in accordance with the coordinate system adopted. The model adopted in this work is dynamic and the following hypotheses were assumed:

- One-dimensional flow so that the spatial variation of the state variables (piezometric head and flow) occurs only in the axial direction (x coordinate). This implies assuming a uniform distribution of velocity in each cross section of water main line.
- Linear elasticity of the tube wall so that its expansion (or contraction) is directly proportional to the tension applied.
- The same correlations for the load loss in steady state are valid for the transient.

The application of principle of conservation of mass to an infinitesimal control volume under transient leads to the equation of continuity with the piezometric head H (m) as state variable (Chaudhry 1979):

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{a^2}{A \cdot g} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (1)$$

where the piezometric head is directly related to the pressure ($p(x,t)$, in N/m^2) along the main line.

$$H(x,t) = \frac{p(x,t)}{\rho \cdot g} + z(x) \quad (2)$$

x is the position (distance in m from the point A, Fig. 1), a is wave speed (or water hammer wave velocity)(m/s), g is acceleration due to gravity (m/s^2), ρ is the mass density of water (kg/m^3), A is the cross-sectional area of a pipe (m^2), t is time (h), and Q is the volumetric flow rate (m^3/h). The wave speed of water is a fluid property and can be estimated according to Sanks (1998) considering the bulk modulus of elasticity (K), the Poisson's ratio of steel (μ) and the Young's modulus of elasticity of the conduit walls (E) as additional parameters:

$$a = \sqrt{\frac{K / \rho}{1 + \frac{D}{e} \cdot \frac{K}{E} \cdot \Psi}} \quad (3)$$

Where $\Psi = 1 - \mu^2$ (correction factor for thin-walled pipeline, $D/e > 40$ and anchored against axial movement).

The physical quantities of K , E , D , e and ρ are presented in Table 2. The value of the wave velocity was 1,495 m/s.

The application of conservation of momentum in an infinitesimal control volume generates another partial differential equation with the flow (Q) as state variable:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -g \cdot A \cdot \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{f \cdot Q^2}{2 \cdot D \cdot A} \quad (4)$$

f is the friction factor. The Swamee-Jain correlation (Swamee and Sharma 2008) was adopted to estimate this parameter. The Appendix presents a new development of Eq. 4 directly from the equation of thermal energy.

The energy consumption (kWh) is related to the output power and operating time of each pump. In turn, the power P (kW) is a function of the flow and piezometric head in the discharge of the pump station ($Q(0,t)$ and $H(0,t)$) (point A in Fig. 1) and also of the global efficiency of the pump station ($\eta_b(t)$) (Sanks 1998; Mays 2004).

$$P = \gamma \cdot \frac{Q(0,t) \cdot H(0,t)}{\eta_b(t)} \quad (5)$$

γ is the specific weight of water (kN/m). At any time, the global efficiency is the product of the efficiency of all pumps in operation. The physical constants used in the model are presented in Table 2 (Sanks 1998).

Table 2 Design parameters and properties

Physical constants	Symbol	Value
Acceleration due to gravity	g	9.8 m/s ²
Poisson's ratio of steel	μ	2.7 x 10 ⁻¹
Specific mass of water (20°C)	ρ	1000 kg/m ³
Young's modulus of elasticity of the conduit walls	E	125 x 10 ¹² Pa
Bulk modulus of elasticity	K	22.3 x 10 ⁸ Pa
Specific weight of water (20°C)	γ	9.8 kN/m ³
Atmospheric pressure	P_{atm}	101,300 Pa
Diameter of pipe	D	1.5 m
Thickness of pipe wall	e	4 x 10 ⁻² m
Average roughness of the steel	ε	4 x 10 ⁻⁵ m

Numerical resolution

The dynamic model of the supply system comprises the following system made up of Eqs. 1 and 4:

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{a^2}{A \cdot g} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} \\ \frac{\partial Q}{\partial t} = -g \cdot A \cdot \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{f \cdot Q^2}{2 \cdot D \cdot A} \end{cases} \quad (6)$$

The resolution of the system of equations provides the profiles of flow and piezometric head over time [$Q(x,t)$ and $H(x,t)$]. The initial condition includes the initial profiles [$Q(x,0)$ and $H(x,0)$] inside the domain of the problem (discharge of the pumps until the end of the main line). In the first simulation tests, a uniform flow profile considering the same value of the flow measured in the discharge of the pumping system is assumed. For the piezometric head, an initial profile was obtained assuming a linear behavior from the pump discharge (reading available) to the atmospheric pressure value (end of the main line, discharge into reservoirs) according to Eq. 7:

$$H(x,0) = \frac{p(x,0)}{\rho \cdot g} + z(x) \quad (7)$$

where $p(x,0)$ is the initial pressure profile (N/m²) and $z(x)$ is the quota profile (m).

The boundary conditions were established in accordance with reality and the constraints imposed by the system. For the piezometric head, the pressure at the end of the main line must be equal to the atmospheric pressure at any instant of time:

$$H(x_f, t) = H_f = \frac{P_{atm}}{\rho \cdot g} + z_f \quad (8)$$

where x_f is the final axial position, z_f is the final quota (m) and P_{atm} is the atmospheric pressure (N/m²).

In turn, the boundary condition for the flow rate was specified in the discharge of the pumping station (at the beginning of the main line) from the rotational speed of the pumps and their curves (provided by the manufacturer). Each curve relates the flow with the piezometric head, both on pump discharge. An overall curve of the system, resulting from the curves of the three pumps arranged in parallel, was obtained according to Sanks (1998). Thus, at each instant in time, the flow at the beginning of the main line (point A, Fig. 1) is determined by the value of the piezometric head through the overall curve of the pumping system.

The four pumps are considered identical and the manufacturer has provided a load curve for a single pump at the rotational speed of 1175 rpm. The analytic treatment to obtain the global load curve of the pumping system included the following:

- From this original curve (rotational speed of 1175 rpm), other curves for rotational speed 1150 rpm, 1125 rpm and 1115 rpm were generated directly through the Law of Affinity (Sanks 1998; Mays 2004).
- Each curve for a given rotational speed N was fitted by a 2nd order polynomial.
- The polynomial coefficients of the three curves were fitted together by another polynomial (first order) in order to determine a generic curve of a single pump for any rotational speed in the operating range considered (from 1120 to 1175 rpm).
- As the pumping system has a parallel configuration, the piezometric head in the discharge of each pump is the same and equal to piezometric head after the junction of the discharge of pumps (point A, Fig. 1). The value of the flow, in turn, is simply equal to the sum of individual flows of each pump (Sanks 1998).

Thus, it is possible to determine the overall curve of the pumping system and establish the boundary condition at the beginning of the main line directly from the piezometric head, at this point, at any time instant.

The equations presented comprise a transient model with distributed parameters (one-dimension). The line method (Pinto and Lage 2001; Marques et al. 2009; Schiesser 1991) was used in the dynamic systems simulation. The derivatives of position were approximated through finite differences and the time integration was carried using the 4th order Runge-Kutta method with a variable step. The MATLAB® code was used for the implementation of the simulation model. The line method allows an efficient alternative to solve one-dimensional time-dependent partial differential equations (Chen-Shan 2006) with applications in different kinds of problems (Schittkowski 1997). In this case studied, the variable step Runge-Kutta method is able to ensure that the time step is small enough to satisfy the Courant condition of stability (Fenghua et al. 1999; Christoph and Waymond 2002). The spatial domain of the problem was divided into segments of same length according to Fig. 5.

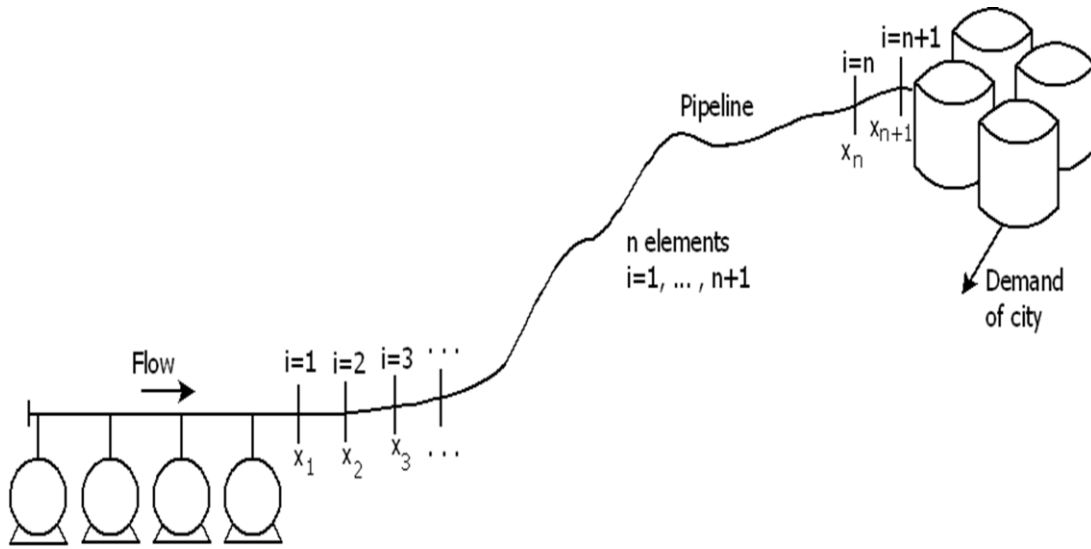


Fig. 5 Water supply and distribution system-simplified scheme

First-order forward and backward finite difference formulas were adopted for the derivatives of position of flow and piezometric head (Eqs. 9 and 10), respectively, considering that the boundary conditions for flow and piezometric head were defined at the beginning and the end of the main line respectively:

$$\left. \frac{\partial Q}{\partial x} \right|_i = \frac{dQ_i}{dt} = \frac{Q_{i+1} - Q_i}{\Delta_i} \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial H}{\partial x} \right|_i = \frac{dH_i}{dt} = \frac{H_i - H_{i-1}}{\Delta_i} \quad (10)$$

where Δ_i is the length of each interval(m), $\Delta_i = x_{i+1} - x_i$.

Applying the line method to the system (6) using Eqs. 9 and 10:

$$\left\{ \begin{aligned} \left. \frac{dQ}{dt} \right|_i = \frac{dQ_i}{dt} = -g \cdot A \cdot \left(\frac{H_i - H_{i-1}}{\Delta_i} \right) - \frac{f_{i-1,i} \cdot (Q_i)^2}{2 \cdot D \cdot A} \end{aligned} \right. \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \left. \frac{dH}{dt} \right|_i = \frac{dH_i}{dt} = -\frac{a^2}{A \cdot g} \cdot \left(\frac{Q_{i+1} - Q_i}{\Delta_i} \right) \end{aligned} \right. \quad (12)$$

$f_{i-1,i}$ is the friction factor for each segment of the main line (between the points x_{i-1} and x_i), $(dQ/dt)|_i$ and $(dH/dt)|_i$ are the time derivatives of the flow and piezometric head at point x_i . According to the boundary conditions specified, Eqs. 11 and 12 provide the following system of ordinary differential equations:

$$\left\{ \begin{array}{l}
i = 1 \Rightarrow \frac{dH_1}{dt} = -\frac{a^2}{A \cdot g} \cdot \left(\frac{Q_2 - Q_1}{A_1} \right) \quad \text{where } Q_1 = f(H_1, \text{pump rotation}) \\
i = 2 \Rightarrow \frac{dH_2}{dt} = -\frac{a^2}{A \cdot g} \cdot \left(\frac{Q_3 - Q_2}{A_2} \right) \\
i = 2 \Rightarrow \frac{dQ_2}{dt} = -g \cdot A \cdot \left(\frac{H_2 - H_1}{A_2} \right) - \frac{f_{1,2} \cdot (Q_2)^2}{2 \cdot D \cdot A} \\
\vdots \\
i = n \Rightarrow \frac{dH_n}{dt} = -\frac{a^2}{A \cdot g} \cdot \left(\frac{Q_{n+1} - Q_n}{A_n} \right) \\
i = n \Rightarrow \frac{dQ_n}{dt} = -g \cdot A \cdot \left(\frac{H_n - H_{n-1}}{A_n} \right) - \frac{f_{n-1,n} \cdot (Q_n)^2}{2 \cdot D \cdot A} \\
i = n+1 \Rightarrow \frac{dQ_{n+1}}{dt} = -g \cdot A \cdot \left(\frac{H_{n+1} - H_n}{A_n} \right) - \frac{f_{n,n+1} \cdot (Q_{n+1})^2}{2 \cdot D \cdot A} \quad \text{knowing that } H_{n+1} = \frac{P_{atm}}{\rho g} + z_{n+1}
\end{array} \right.$$

n is the number of intervals adopted. The dynamic system presented comprises $2 \times n$ ordinary differential equations and $2 \times n$ state variables, namely, the values of volumetric flow (Q_i , $2 \leq i \leq n+1$) and piezometric head (H_i , $1 \leq i \leq n$). In this work, based on initial simulation tests, 112 intervals were considered, each of 50 m length resulting in an equation system with 224 differential equations.

The Eq. 13 (mass balance in reservoirs) was also considered in the model in order to describe the dynamic behavior of the water level in reservoirs.

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_{n+1} - Q_{out}}{A_b} \quad (13)$$

where Q_{n+1} is inflow (m^3/h) of tanks, Q_{out} is outflow of tanks (demand) (m^3/h), A_b is the area of the base of the tanks (m^2). In this work the seasonality effects throughout the year were not considered and a demand pattern according to Fig. 10 was assumed. The minimum and maximum of the water level was also determined to avoid problems of low pressure in the distribution network or water overflow in the tanks. Figure 6 show the simulation strategy.

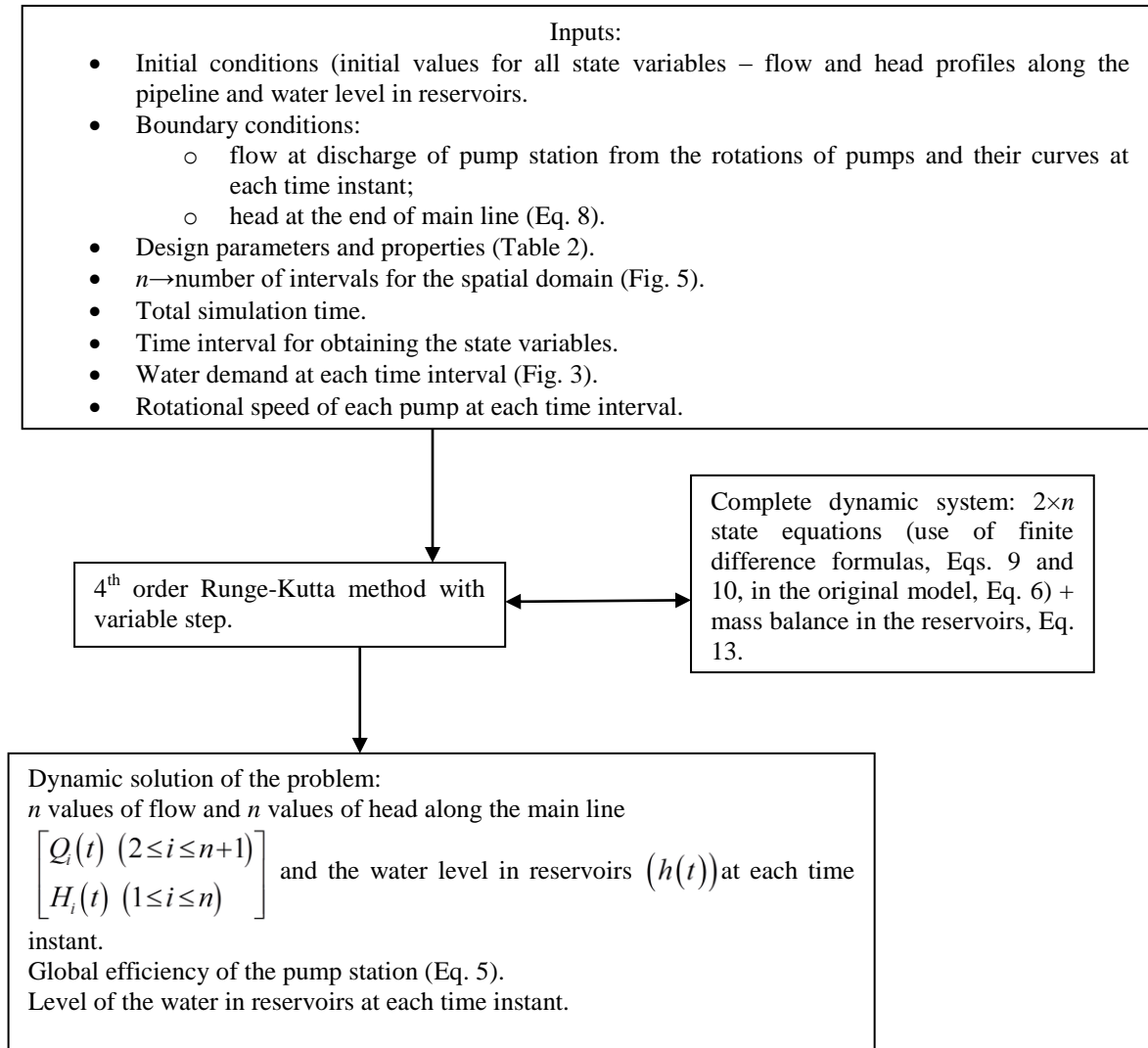


Fig. 6 Simulation strategy

According to the Eq. 13 (see also Fig. 6), the demand (Q_{out}) is an input of the model and its value, at each time interval, is explicitly considered in the mass balance in reservoirs that provides (together with other state equations, see Fig. 6) the dynamic behavior of water level in reservoirs ($h(t)$). Therefore, the simulation approach considers that the daily demand curve (Fig. 3) is always fully met.

Results

The first simulation test was carried out to check the model performance based on the available data of the supply system. The simulation followed the operating procedures practiced in the pumping station (Table 3). Table 3 shows the periods of pump operation performed in the PS High Load during a work cycle of 24 h.

Table 3 Pumping operation- PS High Load

Period (h)	Number of operating pumps	Rotational speed of each pump (rpm)
0:00 - 5:00	4	1175
5:00- 6:00	2	1175
6:00 - 17:00	4	1175
17:00 - 21:00	2	1175
21:00 - 23:00	4	1175

Table 3 presents a standard operational procedure for the operation of the pumping system based on a daily pattern of demand (Fig. 3) aiming to reduce energy costs by reducing the pumping capacity through the shutdown of two pumps during the period of higher cost electricity. Additionally, changes and maneuvers can be performed by the operator based on his knowledge and experience. In this case, both the level of water in the reservoirs and changes in demand pattern may influence these adjustments. In general the operator seeks to ensure that the initial and final levels in each cycle (24 hours) are equal.

According to Table 3, the station's operation policy aims to reduce energy costs by reducing the pumping capacity through the shutdown of two pumps during the period of higher cost electricity. In addition, the pumping operation is also based on the hourly demand and the level of water in the reservoirs.

Figure 7a presents the results of flow predicted by the model and the measured flow, both at the point of discharge of the pumping station (point A, Fig. 1), according to Table 3. The model describes the dominant dynamic of the system well.

In addition, the deviations between predicted and measured values tend to compensate for each other over the total period, although most of the predictions are higher than the measured values during the first 12 hours. Figure 7b shows that the simulation also presents consistency in the prediction of the trajectory of the water level in the tanks.

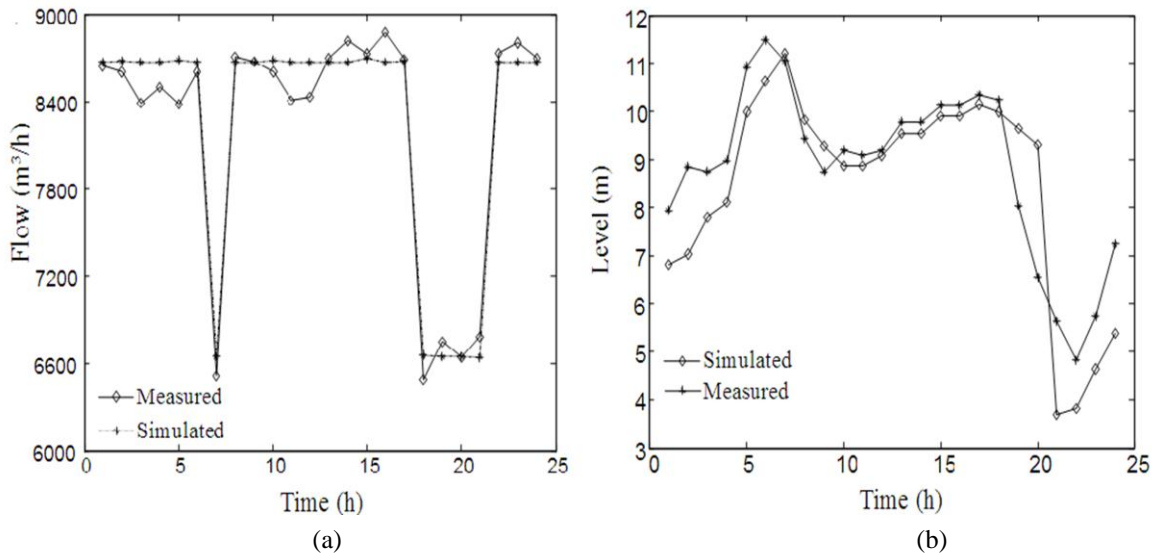


Fig. 7 (a) Volumetric flow rate at the beginning of the main line –measured and simulated profiles (b) Water level in the tanks

A second test was performed to check the consistency of the model in the prediction of piezometric head and flow profiles. Figures 8, 9a and 9b show profiles of these state variables in steady state and transient conditions.

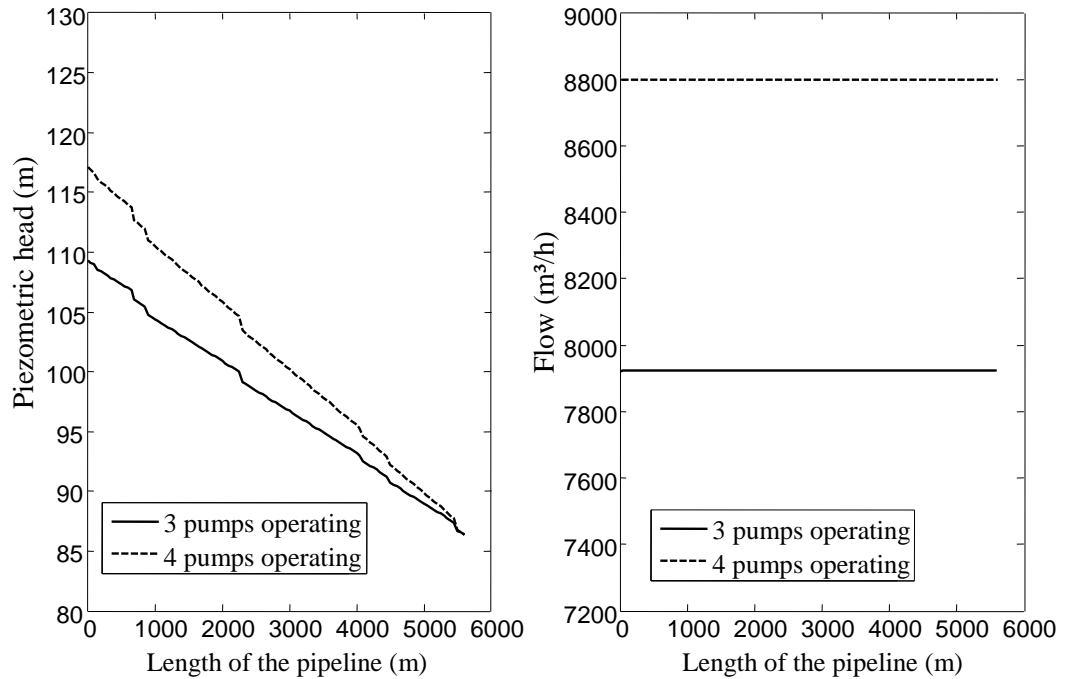


Fig. 8 Initial (4 pumps) and final (3 pumps) steady states

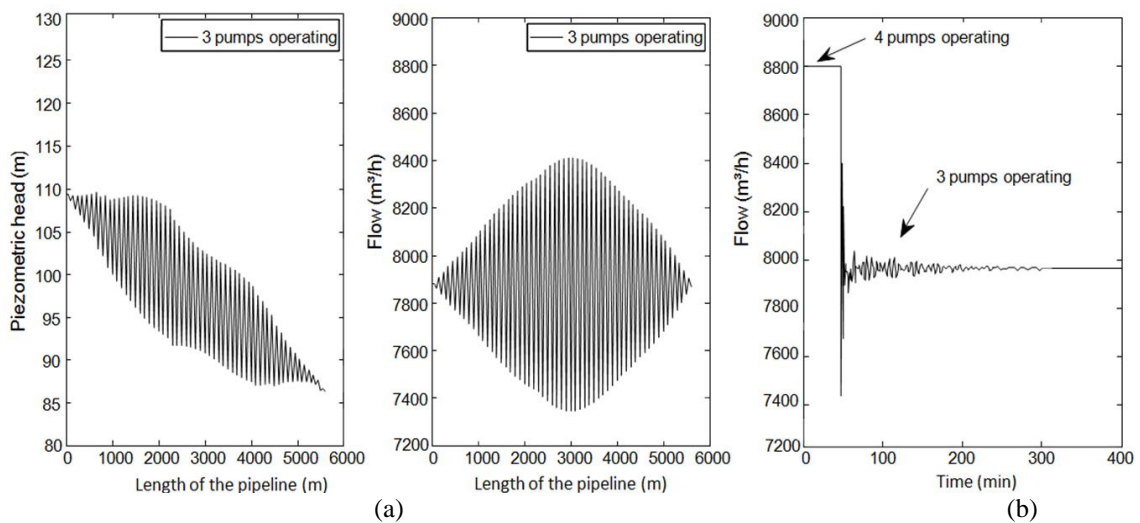


Fig. 9 (a) Transient profiles after the shutdown of one pump (b) Transient-state flow at discharge of pump station

In this simulation test the pumping station begins operation with maximum capacity (four pumps) and after four hours one of the four pumps was switched off. Figure 8 presents the initial and final steady state profiles of piezometric head and flow along the pipeline. The steady state profiles of the piezometric head before and after the disturbance are consistent with the load loss along the pipeline and the higher values of pressure obtained with maximum load of pumping (four pumps operating). The uniform flow profiles are consistent with the fact that an incompressible flow is assumed and the mass flow must be uniform during the steady state. Figure 9a shows the transient profiles of head and flow along pipeline immediately after the disturbance (shutdown of one pump). The simulation considers that the stopping of the pump is instantaneous which is very close to reality. Figure 9b presents the dynamic behavior of the flow specifically at discharge of pump station and the final steady state was reached four hours after the disturbance. The oscillatory profile in Fig. 9b can be described by a dynamic behavior of second order with damping factor and frequency equal to 0.29 and 0.053 Hz respectively. During the transient state flow and piezometric head profiles present oscillatory behavior. This is associated to the oscillations generated by the disturbance that causes a resonant effect in the flow (vibrations). These resonant waves are reported by Chaudry (1979), Wylie and Streeter (1978) and Wood et al. (2005).

A third step in the simulation tests was based on the possibility of including frequency converters in PS High Load so as to improve the energy efficiency of the whole supply system. The use of a frequency converter enables the manipulation of discharge flow without the use of additional accessories which generate load loss. In recent years frequency converters have been increasingly used in industry and have demonstrated promising results in reducing energy consumption (Lingireddy and Wood 1998; Ozdemir 2003).

In the third simulation test a period from 0-24 hours (Table 3) was considered and two simulations were made: First (Table 4), the rotational speed of each variable speed pump (range 1120-1175 rpm) was set randomly so as to maintain the discharge flow of the pumping station close to hourly demand (Fig. 3). Only pump 1 was kept in operation throughout the working cycle. The second case comprises all pumps working with the highest rotational speed (1175 rpm) according to Table 3 (real case).

Table 4 Operational sequence of pumping – variable rotational speed pump

Time (h)	Rotational speed (rpm)			
	Pump1	Pump2	Pump3	Pump4
1	1175	1175	0	0
2	1120	0	1175	0
3	1120	0	0	1120
4	1120	1120	0	0
5	1120	0	1120	0
6	1120	0	0	1175
7	1135	1175	0	0
8	1120	0	1175	0
9	1150	0	0	1175
10	1120	1120	1120	0
11	1175	0	1120	1120
12	1175	1175	0	1175
13	1120	1120	1175	1175
14	1175	1175	1160	0
15	1175	1120	0	1120
16	1160	0	1120	1120
17	1175	1175	0	0
18	1175	0	0	1120
19	1150	1175	0	0
20	1175	0	0	1160
21	1165	1175	0	0
22	1175	0	1150	1120
23	1175	1120	1120	0
24	1175	0	0	1175

Figure 10 shows the discharge flow of the pumping station (obtained from the simulation) in both situations (fixed and variable rotational speed) together with the hourly demand. The results show the high value of the discharge flow even in the instants of low demand. Figure 11 presents the trajectory of the reservoir levels in both cases showing that in the situation of varied rotational speed there was no significant accumulation of water in the reservoirs and the demand was fully met.

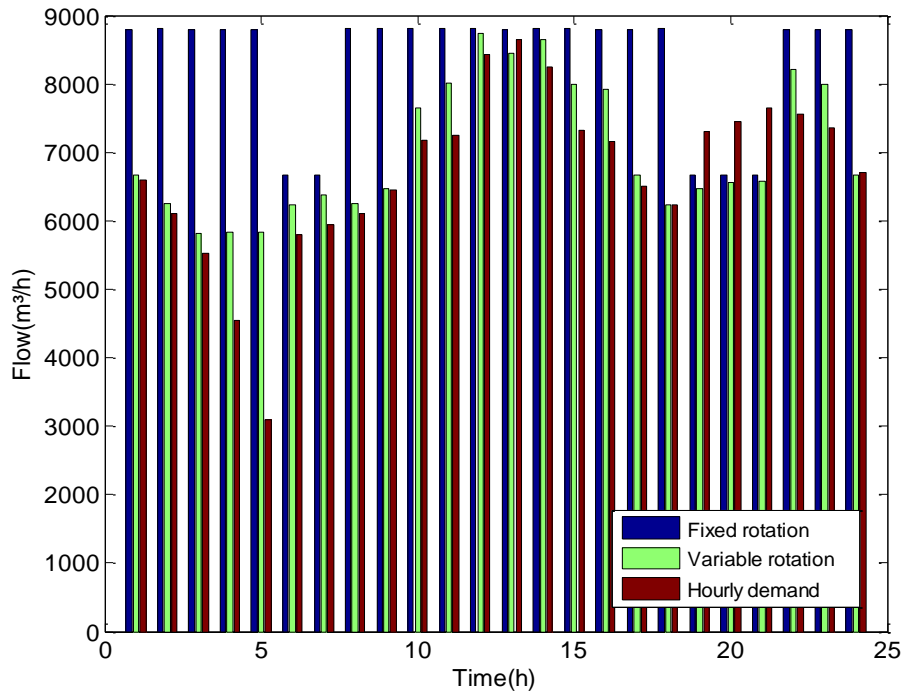


Fig. 10 Discharge flow – fixed and variable rotational speed pump

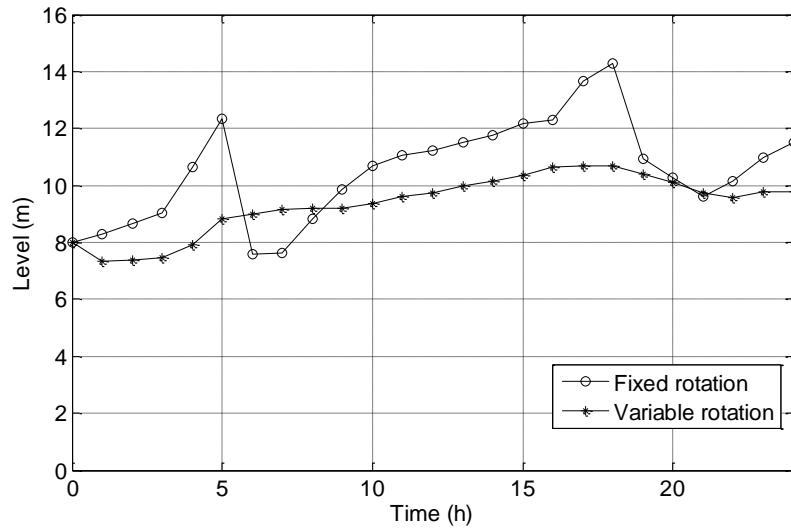


Fig. 11 Trajectory of the water level in the tank - fixed and variable rotational speed pump

Figure 12 confirms the improvement in energy efficiency in the operation with variable rotation pumping, comparing the hourly power of pumping system in both cases analyzed.

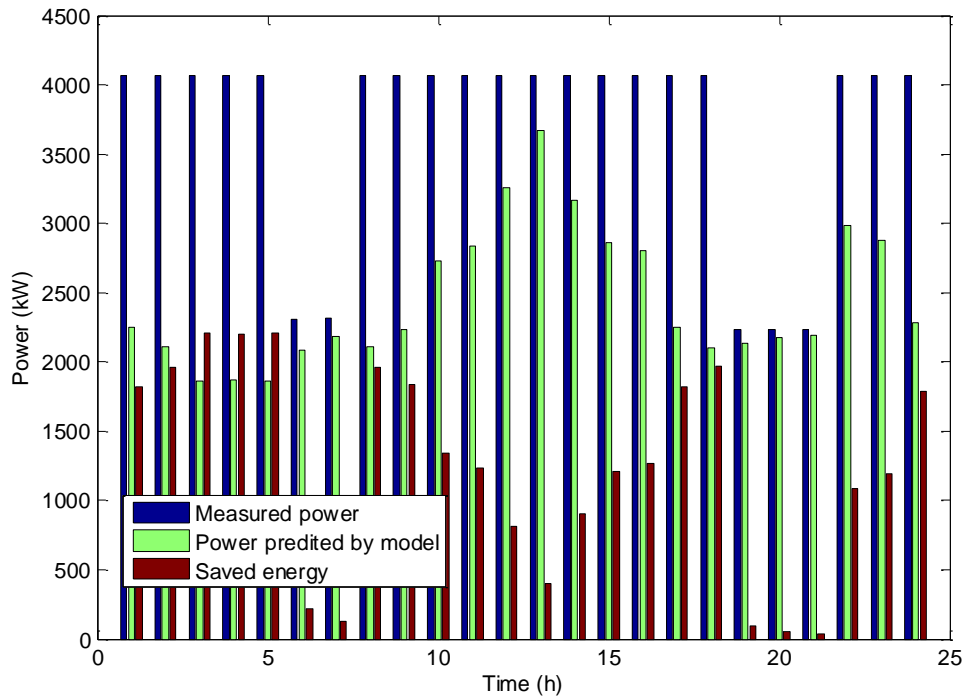


Fig. 12 Power saved with variable rotational speed pumps

According to Fig. 12, during the period considered, the power saved was 29,274.0 kW, equivalent to a 33.1% reduction compared to the measured power for the same period. This gain represents a saving of approximately US\$ 3867.1 in twenty four hours of pumping operation, considering a tariff of US\$ 0.1321/kWh in this period of time (COELBA 2011).

Conclusions

This paper presents the dynamic simulation of an urban water supply system based on a phenomenological model of distributed parameters capable of predicting hydraulic behavior and the energy consumption. The simulation tests, based on a real case, attest the consistency of the model and the numerical procedure. Despite the specific features associated to the real case studied, the model and the simulation strategy can be applied to other water supply systems to provide the dynamical behavior of the piezometric head and flow profiles along the distribution line. The model and simulation strategy also enables a careful analysis of the water supply system and represents a potential tool for the evaluation of control strategies, the effect of disturbances and energy efficiency.

The results show the potential gain in energy efficiency with the inclusion of frequency converters in the pumping system. Additionally, changes in the operating policy, with the inclusion of variable rotational speed pumps, do not cause considerable changes in the level of reservoirs and can ensure the total service demand. Thus, as we have seen, the use of frequency converters in the flow control through the regulation of the rotation of pumps is a viable alternative and can have a significant impact on the improvement of energy efficiency in pumping systems. This work represents an important contribution to the implementation of optimal control strategies based on variable-speed pumps instead of the operational policy currently adopted (Table 3). The dynamic model allows the analysis and simulation of optimal control strategies capable of tracking a demand trajectory while satisfying the system constraints (such as the minimum and maximum level of storage) and minimizing some cost function associated to the energy efficiency.

Although other works highlight the high impact of the adjustment of the pumping flow on energy efficiency, even considering the costs associated with the installation and maintenance of the frequency converters, this work shows the potential gain in energy efficiency with the inclusion of frequency converters in a real pumping system of commercial scale.

Appendix – Equation of Motion from Equation of Thermal Energy

From the complete equation of energy that considers the rate of accumulation of internal and kinetic energy, it is possible to derive the equation of thermal energy (by analogy with the equation of mechanical energy) that only considers the rate of gain of internal energy (Bird et al. 1960). Then, for an infinitesimal element of fluid in one-dimensional flow, the following equation is valid:

$$\rho \cdot \frac{Du}{Dt} = -(\nabla \cdot q) - p \cdot (\nabla \cdot v) - (\tau : \nabla v) \quad (\text{A.1})$$

u is the internal energy per unit mass of fluid in the element (control volume), v is the local fluid velocity, p is the static pressure, τ is the stress tensor and q is the heat flux vector. Du/Dt is the substantial derivative (derivative following the fluid motion) of u . $-(\nabla \cdot q)$ represents the rate of internal energy input by conduction (per unit volume), $-p \cdot (\nabla \cdot v)$ and $-(\tau : \nabla v)$ represents reversible rate of internal energy increase by compression and irreversible rate of internal energy increase by viscous dissipation (friction loss), respectively, both per unit volume. Assuming incompressible flow, $(\nabla \cdot v) = 0$, and integrating Eq. A.1 over the control volume:

$$\int_V \rho \cdot \frac{Du}{Dt} dV = \int_V -(\nabla \cdot q) dV - \int_V (\tau : \nabla v) dV \quad (\text{A.2})$$

Applying the Leibnitz formula for differentiating integral and equation of continuity,

$$\int_V \rho \cdot \frac{Du}{Dt} dV = \int_V -(\nabla \cdot q) dV - \int_V (\tau : \nabla v) dV \quad (\text{A.3})$$

where dU/dt is the total time derivative and U is the total internal energy in the system. An unsteady-state macroscopic energy balance assuming no shaft work and that the time derivative of total potential energy is negligible leads to Eq. A.4:

$$\frac{dU}{dt} = -\Delta \left[\left(u + \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} \cdot \langle v \rangle^2 + g \cdot z \right) \cdot w \right] + Q - \frac{dK}{dt} \quad (\text{A.4})$$

z is the quota, w is the mass rate of flow, $\langle v \rangle$ is the average velocity over conduit cross section, Q is the net rate of heat added to the system and K is the total kinetic energy in the system.

Using the Gauss Divergence Theorem:

$$\int_V (\nabla \cdot q) dV = \int_S (n \cdot q) dS = Q \quad (\text{A.5})$$

Using Eqs. A.3, A.4 and A.5 in Eq. A.2:

$$\Delta \left[\left(u + \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} \cdot \langle v \rangle^2 + g \cdot z \right) \cdot w \right] + \int_V (\tau : \nabla v) dV + \frac{dK}{dt} = 0 \quad (\text{A.6})$$

Using Eq. 2 and expressing $K = \int_V \frac{1}{2} \rho v^2 dV$ and $\int_V (\tau : \nabla v) dV = \int_V \rho \hat{E}_v dV$, where

\hat{E}_v denotes the friction loss per unit of mass rate flow:

$$\Delta \left[\left(u + g \cdot H + \frac{1}{2} \cdot \langle v \rangle^2 \right) \cdot w \right] + \int_V \rho \hat{E}_v dV + \int_V \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 \right) dV = 0 \quad (\text{A.7})$$

For incompressible and isothermal flow, $\Delta \mathbf{u} = \mathbf{0}$. The other net rate added can be expressed as volume integrals:

$$\Delta \left[\left(g \cdot H + \frac{1}{2} \cdot \langle v \rangle^2 \right) \cdot w \right] = \int_S (n \cdot gH \rho v) dS + \frac{1}{2} \int_S (n \cdot \langle v \rangle^2 \rho v) dS =$$

$$\int_V (\nabla \cdot gH \rho v) dV + \frac{1}{2} \int_V (\nabla \cdot \langle v \rangle^2 \rho v) dV \quad (\text{A.8})$$

Replacing in Eq. A.7:

$$\int_V \left\{ (\nabla \cdot gH \rho v) + \frac{1}{2} (\nabla \cdot \langle v \rangle^2 \rho v) + \rho \hat{E}_v + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 \right) \right\} dV = 0 \quad (\text{A.9})$$

For an incompressible and one-dimensional flow, Eq. A.9 provides the following equation:

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + v_x \cdot \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\hat{E}_v}{v_x} = 0 \quad (\text{A.10})$$

v_x is the component of velocity in the x -direction.

The Eq. 6 is derived directly from Eq. A.10 considering that the term $v_x \cdot \partial v_x / \partial x$ is significantly smaller than the term $\partial v_x / \partial t$ (Chaudhry 1979), using Darcy-Weisbach formula to compute the friction loss and writing Eq. A.10 in terms of volumetric flow (Q).

References

- Abe, D. S., et al. (2005). Carbon gas cycling in these sediments of serra da mesa and manso reservoirs, central Brazil. *Verhandlungen-Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, 29, 567-572.
- Afshar, M. H., and Rohani, M. (2008). Water hammer simulation by implicit method of characteristic. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 85(12), 851-859.
- Ahonen, T., et al. (2008). Pump operation monitoring applying frequency converter. In: *Proc. IEEE Symp. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion (SPEEDAM)*, Ischia, Italy.
- Barán, B., Lüken, C. V., & Sotelo, A. (2005). Multi-objective pump scheduling optimization using evolutionary strategies. *J. Advances in Engineering Software*, 36(1), 39-47.
- Beckwith, S. F., and Wong, K. P. (1995). A genetic algorithm approach for electric pump scheduling in water supply system. In: *Proc. of the IEEE Conference on Evolutionary Computation*, 21-26, Perth, Australia.
- Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (1960). *Transport phenomena*. New York: John Wiley and Sons.
- Bortoni, E. A., Almeida, R. A., & Viana, A. N. C. (2008). Optimization of parallel variable-speed-driven centrifugal pumps operation. *Energy Efficiency*, 1(3), 167-173.
- Boulos, P. F., et al. (2005). Hydraulic transient guidelines for protecting water distribution systems. *J. American Water Works Assoc.*, 97(5), 111-124.
- Bounds, P., Kahler, J., & Ulanicki, B. (2006). Efficient energy management of a large-scale water supply system. *J. Civil Eng. and Environ. Systems*, 23(3), 209-220.
- BRASIL (Ministério de Minas e Energia) (2011). *Balanço Energético Nacional – BEN*. Brasília: MME.
- Brion, L. M., and Mays, L. W. (1991). Methodology for optimal operation of pumping stations in water distribution systems. *J. of Hydraulic Engineering*, 117(11), 1551-1569.
- Carravetta, A., et al. (2012). Energy Production in Water Distribution Networks: A PAT Design Strategy. *Water Resources Management*, 26(13), 3947-3959.
- Chase, D. V., and Ormsbee, L. E. (1989). Optimal pump operation of water distribution system with multiple storage tanks. In: *Proc. Conf. on Water Resour. Plann. Manag.*, 733-736.
- Chaudhry, M. H. (1979). *Applied hydraulic transients*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Chen-Shan, L. (2006). An efficient backward group preserving scheme for the backward in timeburgers equation. *Computer Modeling in Engineering and Science*, 12, 55-65.
- Christoph, T. S., and Waymond, R. S. (2002). On the Stability of the FDTD algorithm for elastic media at a material interface. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(2), 474-481.

- COELBA (Companhia Elétrica do Estado da Bahia) (2011). Tabela de tarifa e preço final de energia elétrica. Salvador: COELBA.
- Coulbeck, B., and Orr, C. H. (1984). Optimized pumping in water supply systems. In: Proc. of IFCA, IX Triennial World Congress, 3175-3180, Budapest, Hungary.
- Coulbeck, B., et al. (1988). A hierarchical approach to optimized control of water distribution systems: part 1 decomposition. *J. Optimal Control Applications and Methods*, 9(1), 51-61.
- Demoyer, R., and Horowitz, L. (1975). A systems approach to water distribution modeling and control. Boston: Lexington books.
- Ebacher, G., et al. (2011). Transient modeling of a full-scale distribution system: comparison with field data. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 137(2), 173-182.
- Fenghua, Z., Zhizhang, C., & Jiazong, Z. (1999). A finite-difference time-domain method without the Courant stability conditions. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 9(11), 441-443.
- Fleming, K. K., et al. (2006). Susceptibility of distribution systems to negative pressure transients. New York: American Water Works Assoc.
- Gupta, I., and Khanna, G.P. (1999). Genetic algorithm for optimization of water distribution systems. *Environmental Modeling and Software*, 14(5), 437-446.
- Haddad, O., Afshar, A., & Mariño, M. A. (2006). Honey-Bees Mating Optimization (HBMO) algorithm: a new heuristic approach for water resources optimization. *J. Water Resour. Manage.*, 20(5), 661-680.
- IEA (International Energy Agency) (2011). World Energy Outlook. Paris: OECD/IEA.
- Ismaier, A., and Schlücker, E. (2009). Fluid dynamic interaction between water hammer and centrifugal pumps. *Nuclear Engineering and Design*, 239, 3151-3154.
- Izquierdo, J., and Iglesias, P. L. (2002). Mathematical modeling of hydraulic transients in simple systems. *J. Mathematical and Computer Modeling*, 35(7-8), 801-812.
- Jowitt, P. W., and Germanopoulos, G. (1992). Optimal pump scheduling in water-supply networks. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 118(4), 406-422.
- Kessler, A., and Shamir, U. (1989). Analysis of the linear programming gradient method for optimal design of water supply networks. *J. Water Resour. Research*, 25(7), 1469-1480.
- Kwon, H. J. (2007). Analysis of Transient Flow in a Piping System. *J. Civil Engineering*, 11(4), 209-214.
- Lambeth, J., and Houston, J. (1991). Adjustable frequency drives saves energy. *Water Envir. and Technol.*, 3(5), 34.
- Lansley, K. E., and Awumah, K. (1994). Optimal pump operations considering pump switches. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 120(1), 17-35.
- Lansley, K. E., and Zhong, Q. (1990). A methodology for optimal control of pump station. In: Proc. Conf. on Water Resour. Plann. Manage., 58-61.
- Lansley, K. E., et al. (1989). Water distribution system design under uncertainties. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 115(5), 630-645.
- LeChevallier, M. W., et al. (2003). The potential for health risks from intrusion of contaminants into the distribution system from pressure transients. *J. Water and Health*, 1, 3-14.
- Lingireddy, S., and Wood, D. J. (1998). Improved operation of water distribution systems using variable-speed pumps. *Journal of Energy Engineering*, ASCE 124 (3), 90-103.
- López-Ibáñez, M., Prasad, T. D., & Paechter, B. (2008). Ant colony optimization for optimal control of pumps in water distribution networks. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 134(4), 337-346.
- Maier, H. R., et al. (2003). Ant colony optimization for design of water distribution systems. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 129(3), 200-209.
- Marques, C. A. X., et al. (2009). Efficiency control in a commercial counter flow wet cooling tower. *J. Energy Conversion and Management*, 50(11), 2843-2855.
- Mays, L. W. (2004). *Water distribution systems handbook*. New York: McGraw-Hill.
- Ormsbee, L. E., and Lansley K. E. (1994). Optimal control of water supply pumping systems. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 120(2), 237-252.
- Ormsbee, L. E., et al. (1987). Techniques for improving energy efficiency at water supply pumping stations. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Jackson: Technical report.
- Ormsbee, L. E., Walski, T. M., & Sharp, W. W. (1989). Methodology for improving pump operation efficiency. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 115(2), 148-164.
- Ozdemir, E. (2003). Energy conservation opportunities with a variable speed controller in a boiler house. *Applied Thermal Engineering*, 24(7), 981-993.
- Pinto, J. C., and Lage, P. L. C. (2001). *Mathematical methods in chemical engineering problems*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, E-papers.
- Quindry, G. E., Brill, E. D., & Liebman, J. C. (1981). Optimization of looped water distribution systems. *J. Environ. Eng.*, 107EE4, 665-679.

- Ramos, J. S., and Ramos, H. M. (2010). Multi-criterion optimization of energy management in drinking systems. *Water Science and Technology: Water Supply*, 10(2), 129-144.
- Ramos, H. M., Kenov, K. N., & Vieira, F. (2011). Environmentally friendly hybrid solutions to improve the energy and hydraulic efficiency in water supply systems. *Energy for Sustainable Development*, 15 (4), 436-442.
- Reis, L. F. R., et al. (2005). Multi-reservoir operation planning using hybrid genetic algorithm and linear programming: an alternative stochastic approach. *J. Water Resour. Manage.*, 19(6), 831-848.
- Sanks, R. L. (1998). *Pumping stations-design and construction* (2nd ed). New York: Butterworth-Heinemann.
- Schiesser, W. E. (1991). *The numerical method of lines: integration of partial differential equations*. San Diego: Academic Press.
- Schittkowski, K. (1997). Parameter Estimation in one-dimensional time-dependent partial differential equations. *Optimization Methods and Software*, 7(3-4), 165-210.
- Swamee, P. K., and Sharma, A. K. (2008). *Design of water supply pipe networks*. New Jersey: John Wiley and Sons Inc.
- Tarquin, A. J., and Dowdy, J. (1989). Optimal pump operation in water distribution. *J. hydraulic Eng.*, 115(2), 158-168.
- Tiainen, R., et al. (2006). Utilization possibilities of frequency converter in electric motor diagnostics. In: *Proc. International Symp. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion (SPEEDAM)*, Taormina, Italy.
- Ulanicki, B., Kahler, J., & Coulbek, B. (2008). Modeling the efficiency and power characteristics for a pump group. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 134(1), 88-93.
- Vieira, F., and Ramos, H. M. (2008). Hybrid solution and pump-storage optimization in water supply system efficiency: A case study. *Energy Policy*, 36(1), 4142-4148
- Vieira, F., and Ramos, H. M. (2009). Optimization of the energy management in water supply systems. *Water Science and Technology: Water Supply*, 9 (1), 59-65.
- Viholainen, J., et al. (2012). Energy-efficient control strategy for variable speed-driven parallel pumping systems. *Energy Efficiency*, 6(3) 495-509.
- Vilela, O. C., and Fraidenraich N. (2001). A methodology for the design of photovoltaic water supply systems. *Progress in photovoltaics: research and applications*, 9(5), 349-361.
- Walski, T. M. (1984). *Analysis of water distribution systems*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Wanakule, N., Mays, L. W., & Lasdon, L. S. (1986). Optimal management of large-scale aquifers: methodology and applications. *J. Water Resour. Research*, 22(4), 447-465.
- Wang, H., and Guo, W. (2010). ACO optimizing neural network for macroscopic water distribution system modeling. In: *Proc. International Conf. on Intelligent Computing and Cognitive Informatics*, 367-370, Washington, USA.
- Wood, D. J., et al. (2005). Numerical methods for modeling transient flow in distribution systems. *J. American Water Works Assoc.*, 97(7), 104-115.
- Worthington (1988). *Catálogo de bombas*. Rio de Janeiro: Worthington do Brasil.
- Wylie, E. B., and Streeter, V. L. (1978). *Fluid transients*. New York: McGraw-Hill.
- Yu, G., Powell, R. S., & Sterling, M. J. H. (1994). Optimized pump scheduling in water distribution systems. *J. of Optimization Theory and Application*, 83(3), 463-488.
- Zessler, U., and Shamir, U. (1989). Optimal operation of water distribution systems. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 115(6), 735-752.

APÊNDICE C – *Dynamic modeling and simulation of a water supply system with applications for improving energy efficiency* artigo aceito para publicação no periódico *Journal of Engineering Science and Technology*

IMPROVEMENTS IN WATER SUPPLY SYSTEMS BASED ON OPTIMIZATION AND RECOGNITION OF CONSUMPTION PATTERNS

ALEXANDRE M. F. DINIZ*, CRISTIANO H. O. FONTES, CAIUBY A. COSTA,
ADONIAS M.S. FERREIRA, PEDRO Í. DOS SANTOS

Graduate Program in Industrial Engineering, Polytechnic School,
Federal University of Bahia, Rua Aristides Novis, nº 2,
6º andar - Federação, EP-UFBA, Salvador, Bahia,
CEP 40.210-630 – Brazil

*Corresponding Author: alexdiniz@ifba.edu.br
Phone: (71) 3283-9800

Abstract

Water supply systems consume large amounts of energy because of the pumping processes involved. The operational strategy of using frequency converters enables the system to work with better adjusted discharge rate to meet demand. In this case, an optimization strategy can establish an optimal procedure in order to schedule the rotational speed of pumps over a period and guarantee a volume of water in the supply tank. This work presents and solves an optimization problem that provides the optimal schedule for the rotational speed of pumps in a real water supply system considering minimizing the use of electricity and the cost thereof and maintenance. The optimization problem is based on two Artificial Neural Networks (ANN) models that provide the total power consumption in the pumping system and level of water in the tank. Pattern recognition techniques in univariate time series based on the real data are used to forecast the demand curve according to the season of the year. The results show the potential savings generated by the proposed method and show the feasibility of scheduling the rotational speed of the pumps to ensure the minimum energy cost without affecting hourly demand and the security of the supply system.

Keywords: Optimization, Energy efficiency, Water supply system, Pattern recognition.

Nomenclatures

c	Number of clusters
d	Demand of water, m ³ /h
F	Neural model
H	Piezometric head, m
$h(t)$	Water level at time t , m
\hat{h}_k	Water level at discrete time k , m
i	Index
k	Discrete time, h
n	Number of demand curves (objects)
$P(t)$	Power consumed at time, kW
Q	Flow, m ³ /h
rot_i	Rotational speed of pump i , rpm
t	Time, h
t_c	Time of work cycle, h
t_{tr}	Tariff rate, US\$
u	Membership degree
<i>Greek Symbols</i>	
η_b	Efficiency of the pump
γ	Specific weight of water, kN/m

1. Introduction

The growing demand for electricity has a direct impact on the environment, especially considering that the global model of electric power generation is based mainly on fossil fuels [1]. Economic impacts are also felt from power cuts, poor power quality, high electricity prices and tariff increases in periods of high consumption. Industry is a large consumer of electricity and the pumping process of a water supply system too. Intervention to improve the energy efficiency of such systems provides economic and environmental benefits to the organization and society as a whole.

In general, a water supply system comprises a pumping station, storage tank and pipeline. It is a typical dynamic system where the flow and pressure profiles over the pipeline and water level in the tank vary according to the demand flow and the discharge flow controlled in the pumping station. In general, the volume of extra water in the storage tank within a work cycle constitutes a waste of energy because the pumped flow rate is higher than the water demand [2]. In this case, the operational policy seeks to maintain the water level unchanged throughout a work cycle (usually 24 hours). In most cases, the procedure of flow control in the pumping station comprises traditional methods of pumping using an on/off switch. In other words, the operational policy establishes the number of pumps in operation at each hour to replenish the volume of water in the tank (in each work cycle) to meet the daily demand [3, 4]. Fixed speed pumping is widely used in water supply systems. On the other hand, the use of frequency converters (variable speed pumping) can minimize power consumption more efficiently, enabling the discharge rate to be better adjusted to meet daily demand without excess water in the tank or excessive power consumption [5-8].

Some works present optimization strategies for water supply systems with other objectives not just to cut the cost of energy. Lansey and Awumah [9], Lopez-Ibanez *et al.* [10] and Vladimir *et al.* [11] consider the maintenance costs associated with pumps. These costs are directly related to the number of changes in the state (on/off). If the pump is kept running for a long time this minimizes maintenance costs [9]. Wang and Guo [12] also consider the problem of siltation of a water well in a multi-objective function. Jowitt and Germanopoulos [4] and McCormick and Powell [13] include a soft constraint in order to minimize the event of exceeding the maximum energy demand. Georgescu *et al.* [14] consider a soft constraint to minimize the difference between the initial and final level of the storage tank during a work cycle.

Optimization problems in water supply system can be solved by classical optimization methods such as linear and nonlinear programming [4, 15, 16] and dynamic programming [13, 17, 18]. Some works use methods based on combinatorial optimization [11, 14, 19, 20]. In larger water supply systems the use of conventional or traditional methods for solving optimization problems, based on the phenomenological models, implies high computational effort.

Alternatively, most recently optimization models use artificial intelligence techniques based on Artificial Neural Network (ANN) as a replacement for traditional methods of optimization. Rao *et al.* [21] present an optimal control problem applied to supply system and water distribution networks. A dynamic model based on ANN was developed to predict the combination of pumps and valves to meet the demand considering a work cycle of 24 hours. This model is used in an optimization algorithm that considers operating costs of pumping together with hydraulic constraints.

The demand curve is an input in the modelling of water supply systems and a disturbance in optimal control problems. The demand curve effects the operation of the pumps directly, the energy consumption and it can also be used to support decision-making in procedures of pumping operation [22]. In general, the daily demand for water is predicted in a heuristic and intuitive way based on the knowledge and experience of operators in water supply systems [23-25]. On the other hand, the prediction of the demand curve depends on seasonal aspects associated to the climate records of the region throughout the year.

This work presents and solves a dynamic optimization problem to provide an optimal schedule for the rotational speed of pumps in a water supply system so as to minimize electricity and maintenance costs. The case studied comprised a real case of a segment of the water supply and distribution system in Salvador (Brazil). The pumping procedure considers the use of frequency converters and the dynamic behaviour of the system is represented by two MISO (Multiple Input Single Output) ANN's capable of predicting the level of the storage tank and power consumption at any time. Patterns of demand curves are recognized based on the real data using the Fuzzy-C-Means (FCM) method, a well-known method belonging to the C-Means families of batch clustering models [26, 27], suitable for clustering objects represented by time series [28].

2. The case study and optimization problem

The pumping station selected, called PS High Load, works continuously and is composed of four identical centrifugal pumps (Fig. 1) operating in parallel. The PS High Load has a maximum capacity of 8800 m³/h (all the pumps operate at nominal rotational speed of 1175 rpm). The PS High Load pumps are arranged in parallel. In addition, the flow of water in the suction inlet of the pump occurs by gravity.

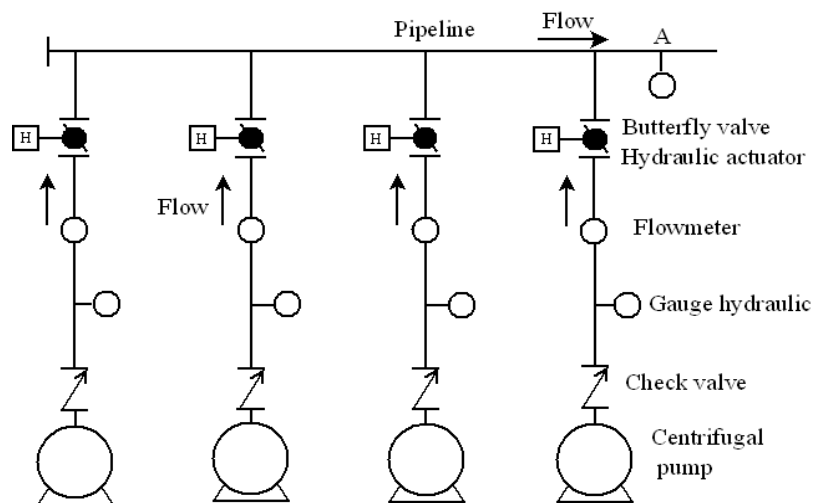


Fig. 1. Simplified hydraulic scheme of the PS High Load.

All treated water is pumped and flows along a large diameter pipe (main line, 1.5 m in diameter and pipe wall thickness of 0.04 m) to the reservoir (storage tank). The water main line is made of carbon steel and has a total length of 5600 m. The quota profile of the water pipeline is shown in Fig. 2. In practice, lower energy costs are achieved by reducing pumping during periods when electricity rates (tariffs) are higher.

In addition, a reduction in the maintenance costs is based on the approach described by Lansley and Awumah [9] limiting the change in the pump status (on/off) to just once at the beginning of each hour in the work cycle (24 hours).

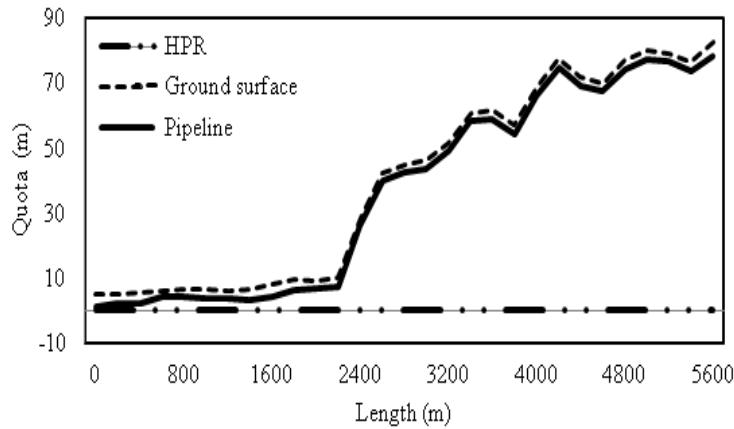


Fig. 2. The quota profile – water main pipeline (HPR - Horizontal Plane of Reference).

Diniz *et al.* [29] present a complete phenomenological model of distributed parameters for the PS High Load (Fig. 1 and 2), capable of predicting the hydraulic behaviour and the energy consumption. This model comprises design parameters and properties of the real system. The simulation results show piezometric head and flow profiles consistent with the reality and the comparison with real data (volumetric flow rate at the beginning of the main line and water level in the tanks) shows that the model describes the dominant dynamic of the system well. The simulation also considers the use of frequency converters in pumps in order to vary the rotational speed of pump between maximum and minimum limits of operation. The numerical approach to simulate this system is based on the phenomenological model (one-dimensional time-dependent partial differential equations) which comprises the use of the line method [30-32]. The spatial domain of the problem (main-line) was divided into segments of same length. Considering the higher dimensions of the case studied, this numerical strategy results in a system of 224 differential equations.

The optimization model proposed in order to provide the optimal operational schedule for the pumping station (variable speed) is similar to that developed by Brion *et al.* [17].

The power consumed at time t is a function of the flow and piezometric head in the discharge of the pumping station ($Q(0,t)$ and $H(0,t)$) and also of the global efficiency of the pumping station ($\eta_b(t)$).

$$P(t) = \gamma \cdot \frac{Q(0,t) \cdot H(0,t)}{\eta_b(t)} \quad (1)$$

At any time, the global efficiency is the product of the efficiency of all pumps in operation. Equation (1) establishes that the power consumed is directly related to the dynamic profiles of flow and pressure over the pipeline.

The optimization model comprises the following objective function:

$$\min_{rot_i(t)(i=1,\dots,4)} \int_0^{t_c} P(t) \cdot t_{rr}(t) \cdot dt \quad (2)$$

Subject to the following constraints:

- a) Limits on the rotational speed to avoid problems of over-pressure or cavitation:

For the pump number 1:

$$1120 \text{ rpm} \leq rot_1(t) \leq 1175 \text{ rpm}$$

This pump is always working in order to avoid a break in supply.

For the other three pumps ($i=2,3,4$):

$$0 \leq rot_i(t) \leq 1175 \text{ rpm}$$

whereas $rot_i(t) = 0$ if $rot_i(t) < 1120 \text{ rpm}$

b) Limits on the water level inside the storage tank

$$3.0 \text{ m} \leq h(t) \leq 15.5 \text{ m}$$

The objective function is the total cost of power consumption (kWh) in a work cycle (t_c) (24 hours). The t_{tr} is the tariff rate established for the time instant t . $rot_i(t)$ ($i=1, \dots, 4$) is the solution to the problem (optimal schedule for the rotational speed in each pump).

This optimization problem comprises two outputs of the PS High Load, namely, the power consumed $P(t)$ and the water level in the storage tank $h(t)$. The former is a function of the state variables (flow and piezometric head along the pipeline) and the second is a state variable of this model related to the mass balance in the storage tank [29]. Considering that the size of the phenomenological model makes it inappropriate for the optimization purposes, a strategy of model reduction is adopted using empirical models based on Neural Networks (NN). Therefore two additional equality constraints must be included in the optimization model in order to consider the model of the PS High Load.

$$h(t) = f_1(rot_1(t), rot_2(t), rot_3(t), rot_4(t), d(t)) \quad (3)$$

$$P(t) = f_2(rot_1(t), rot_2(t), rot_3(t), rot_4(t), d(t)) \quad (4)$$

f_1 and f_2 represent the respective neural models and d is the demand (input). The use of NN of optimization has advantages over traditional modeling approaches. This model structure enables efficient handling of large amounts of data with high generalization capability [33-35].

The NN model associated to the water level in the storage tank comprises a typical NARX (Non-linear AutoRegressive with eXogenous inputs) structure which was identified (network training) feeding back the output predicted at a previous time (recurrent topology).

$$\hat{h}_k = f_3(rot_{1,k-1}, rot_{2,k-1}, rot_{3,k-1}, rot_{4,k-1}, d_{k-1}, \hat{h}_{k-1}) \quad (5)$$

where \hat{h}_k is the water level predicted by the NN model at discrete time k .

Based on the operational features of the case studied (disturbances caused by the maneuvers in the pump operation based on the measurement of the hourly demand throughout the day), a sampling period of one hour is considered in the model identification and also in the optimization problem.

Unlike the NN model for the water level, the smaller time constant associated to the power consumed suggests a quasi-stationary approach and the NN model comprises a typical feedforward topology.

$$\hat{P}_k = f_4(rot_{1,k}, rot_{2,k}, rot_{3,k}, rot_{4,k}, d_k) \quad (6)$$

Both NN models comprise only one hidden layer (neurons with sigmoidal activation functions) and one output layer with one neuron (linear transfer activation function) so that these are equivalent to MISO (Multiple Input Single Output) model structures. All data were obtained through simulation of the phenomenological model. A cross validation procedure (Magalhães *et al.* [36] and Santos *et al.* [37]) was adopted using samples of training and test data (each one with 714 points).

The best results were obtained with eight and four neurons in the hidden layer for the NN models associated to the power consumed and water level in the storage tank, respectively. The comparison between the NN predictions and model data (Fig. 3 and 4) shows the suitability of the use of NN models directly in the optimization problem.

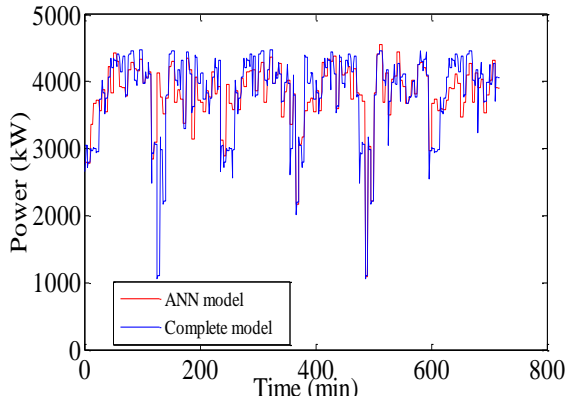


Fig. 3. Power consumed – (test sample).

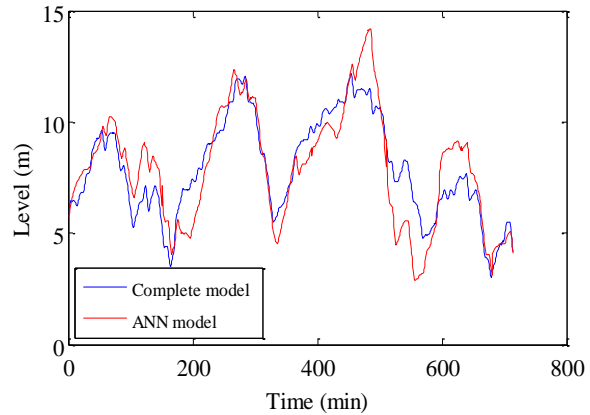


Fig. 4. Water level in the tank (test sample).

3. Pattern recognition - demand profiles

Multivariate analysis is a powerful tool for knowledge extraction especially when applying pattern recognition techniques based on data [38]. Data Mining methods (DM) that can extract useful information from data can be used to develop decision-making tools so as to improve production systems and management technology [36, 39, 40].

The pattern recognition of demand curves enables prediction and decision-making in operational maneuvers in pumping stations to provide greater reliability and efficiency for the supply system. Pattern recognition may also be useful for the prediction of chemicals for water treatment, for the planning of the network infrastructure and to support the operation of the pumping station. Furthermore, it can be used for long-term planning and design of infrastructure for a water supply system, and short-term (hours or days) use for the definition of operational procedures of pumping [41, 42].

In this work pattern recognition in demand profiles is treated as clustering of univariate time series (daily demand of water consumption) [28] according to the season of the year. There are few works based on pattern recognition applied to predict consumption profiles in water supply systems. Greenaway *et al.* [23] apply a pattern recognition technique based on univariate time series to predict demand profiles (short and long-term) for a supply and distribution water company in a region with about 900,000 people. Based on the model applied to a short-term (24 h) scenario an optimization approach was developed for energy consumption. It reduced pumping at hours of high rates and also minimized the volume of water in the tank within a work cycle. The model was also used in a long-term scenario to support planning and financial management. Shvartser *et al.* [43] developed models of hourly demand curves based on the combination of two methods, namely, pattern recognition and time series analysis using the Markov process. The daily demand curve, considered a stochastic process, is modeled by the Markov chain process based on three segments (states) (patterns of increasing, decreasing and oscillating).

The initial sample comprised daily demand curves for the case studied (PS High Load) throughout 2010. A total of 335 daily consumption profiles were available. Clustering and pattern recognition was performed using the Fuzzy C-Means (FCM), a well-known method

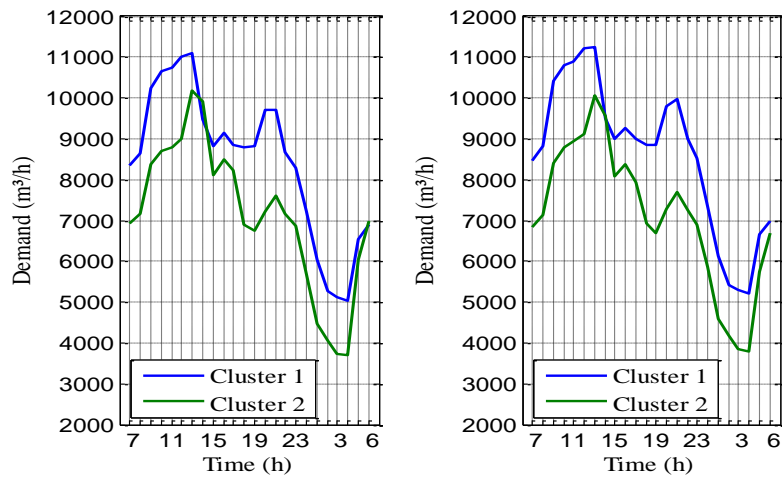
belonging to the C-Means families of batch clustering models [26, 27], suitable for clustering objects (in this case demand curves) represented by time series [28].

Based on the climatic features of the case study, the annual sample of daily demand profiles was arranged into three seasons, namely, spring (85 curves), autumn-winter (183 curves) and summer (67 curves). Autumn and winter were put together because of the historical similarity between these two seasons. Furthermore, this clustering (selection of seasons) was based on the average daily water demand associated to each of these seasons according to Table 1.

Table 1. Initial clusters – water demand.

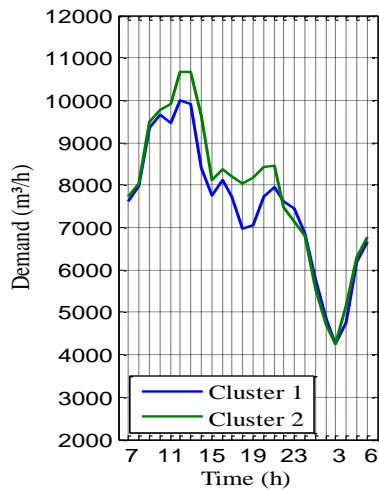
Seasons	Average daily (m ³ /h)	Period
Spring	7843	September 23 th to December 21 th
Autumn-winter	7485	March 20 st to September 22 th
Summer	6933	December 22 th to March 20 th

Weekends and holidays are not considered in this analysis (this does not mean that a pattern for non-working days cannot be recognized). Initially, the set of demand curves associated with each season (Table 1) was divided into validation and work samples, both randomly generated. The best results (using FCM method) were obtained considering two clusters (and two patterns) for each season. Figure 5 presents the demand patterns (center of each cluster) recognized.

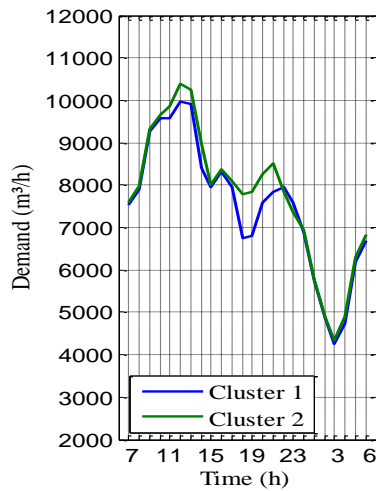


(a) Spring– work sample

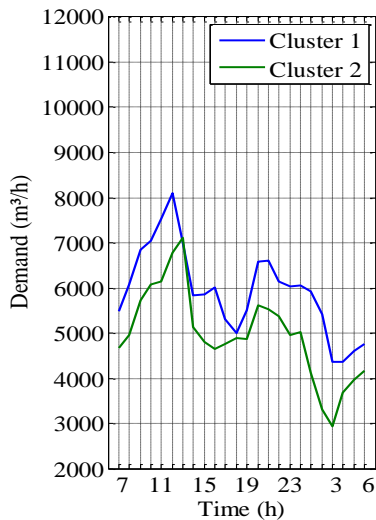
(b) Spring– validation sample



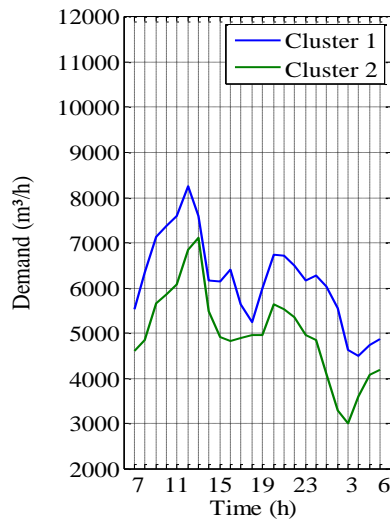
(c) Autumn-winter -
work sample



(d) Autumn-winter-
validation sample



(e) Summer - work sample



(f) Summer - validation sample

Fig. 5. Patterns of daily demand by season.

The similarity between the patterns recognized in the work and validation samples in the same season shows the consistency of the results. Furthermore, for each season the two consumption patterns present similar dynamic behavior throughout the day.

As expected for tropical regions, as in our case, the climatic differences among the seasons of the year are not very sharp and the total thermal amplitude observed is lower than for other regions with more well-defined seasons. In the region considered, the occurrence of milder temperatures is closely associated with higher rainfall. Based on the patterns recognized (Fig. 5) the maximum average daily demand of water in the spring, autumn-winter and summer is equal to 7792 m³/h, 7342 m³/h, 5452 m³/h, respectively. The greatest demand for water in the spring (7 am and 1 pm) (Fig. 5(a) and (b)) is associated to the low rainfall levels in this period, compared with the autumn-winter season. On the other hand, in the summer the temperatures are the highest and sporadic rains occur. Despite this, the demand for water is quite low compared to that in spring and autumn-winter. This is because in summer many

people are on vacation and leave the city which reduces demand significantly. Furthermore, schools are closed, therefore a specific operational policy for supply in this period is justified.

Another analysis comprises the evaluation of demand curves belonging to each cluster. The FCM method is a typical soft partition unlike other hard clustering methods based on crisp models such as the K-means algorithm [27, 44]. Considering n demand curves (objects), c clusters and the probabilistic approach, the partition matrix obtained by the FCM method contains the membership degree of each object $\left(u_{ki} \in [0,1], i=1,\dots,n \quad k=1,\dots,c \quad \text{and} \quad \sum_{k=1}^c u_{ki}=1 \quad \forall i\right)$ to each

of the clusters recognized. Figure 6 presents the membership degree of each demand curve (spring and summer) to cluster 1. The set of membership degrees shows a good level of polarization in both cases (few values in the range [0.4, 0.6]) which also highlights the good quality of the clustering.

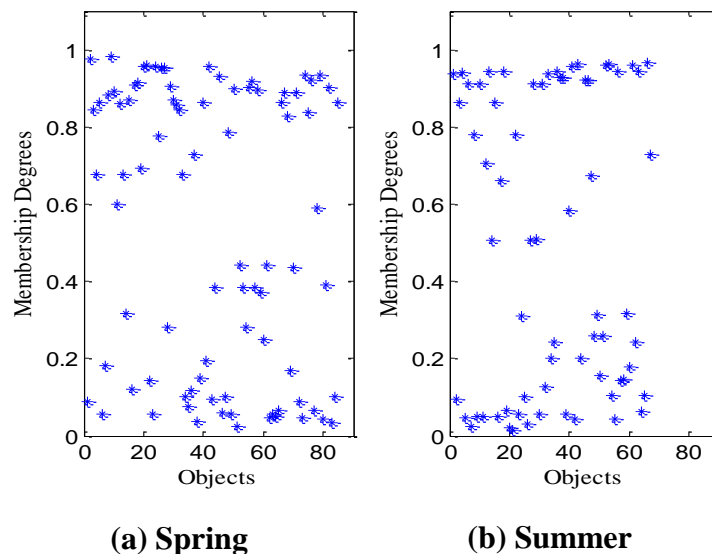


Fig. 6. Membership degree – cluster 1.

Table 2 presents the number of objects belonging to each cluster (both samples – work and validation) based on the membership degrees associated to each object.

Table 2. Number of objects (demand curves) in each cluster.

Seasons	Cluster 1		Cluster 2	
	Objects	Curves (%)	Objects	Curves (%)
Spring	45	52.9	40	47.1
Autumn-winter	83	45.4	100	54.6
Summer	34	50.7	33	49.3

According to Table 2 the number of objects belonging to each cluster are quite similar (mainly in spring and summer) which does not justify the choice of a modal cluster (cluster with the highest number of demand curves) (Ferreira *et al.* [38]) to represent each season. Fig. 7 presents the mean demand profiles of each season.

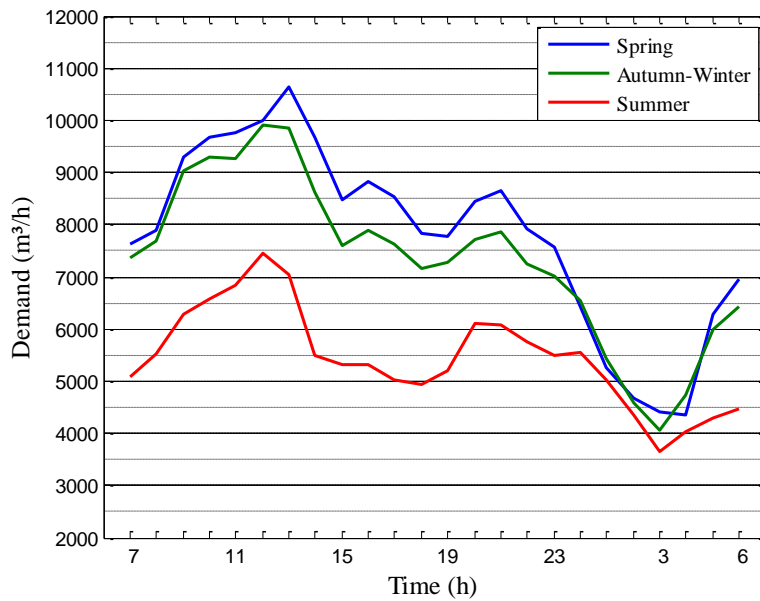


Fig. 7. Demand profiles.

Despite the similar dynamic behavior of daily consumption among the three patterns presented in Fig. 7, which is also a consequence of the climatic features of the region under study, quantitative differences in demand may require different policies or operating procedures of pumping. According to Fig. 7, the demand profile for spring is the highest in the whole cycle. The small difference among the average temperatures in the seasons (low thermal amplitude throughout the year) contributes to the uniformity of consumption. Even in autumn-winter water consumption is high in the early morning (5 to 8 am).

The greatest demand for electricity in the entire electrical system of the region considered occurs in the period from 5 pm to 8 pm. The electricity tariffs in this period increase in order to avoid overloading. According to Fig. 7 the highest water demand in this period occurs in the spring. The efficient management, planning and control of supply in these peak hours especially in this season can lead to a reduction in the operational costs of pumping.

4. Results and discussions

4.1 Optimization tests

The first optimization tests compare results obtained with variable speed pumping (optimal schedule using frequency converters) and real data from the system studied (fixed speed pumping), considering a typical demand curve for both cases (Figure 9(b)). Figure 8 presents the optimal schedule for the rotational speed of pumps together with the schedule used in the real case (fixed speed pumping) according to the operational policy.

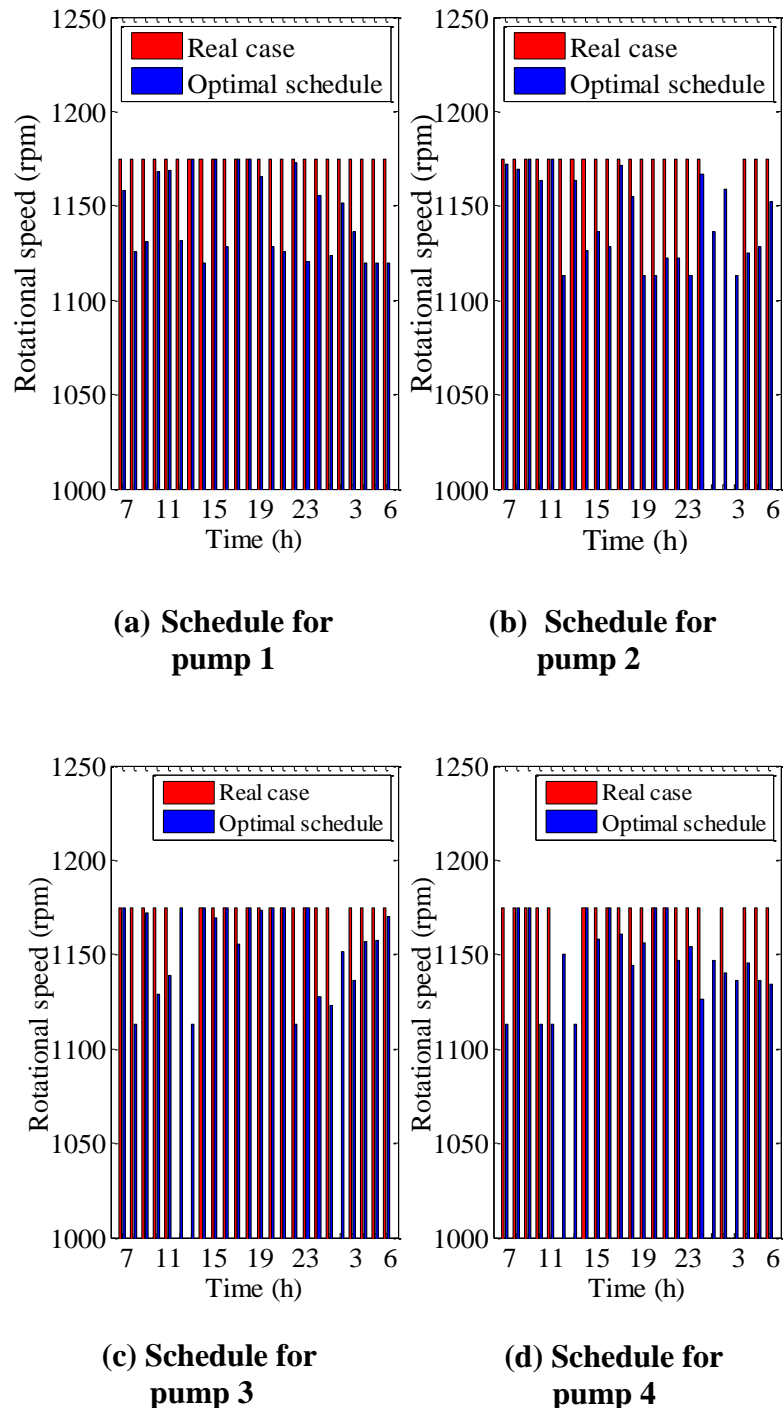
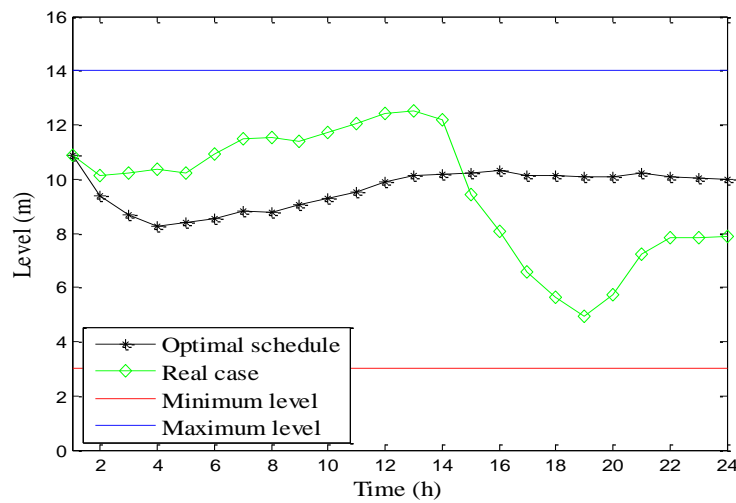


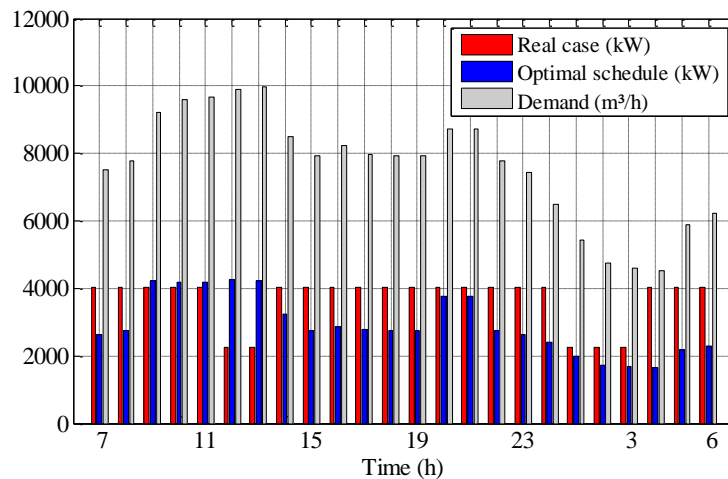
Fig. 8. Pumping schedule.

Fig. 8(a) shows that pump 1 works continuously for 24 hours. This avoids the interruption of the water supply. Unlike the standard procedure (fixed speed pumping), the speed rotation of pump 1 may be reduced according to the constraints considered (equation 2). In optimal scheduling the rotational speed of pumps are reduced in the peak period of electricity consumption. All pumps operate at below maximum speeds for at least one hour during the peak period. Apart from the economic impact of the optimal schedule, it also improves the safety of the electrical system reducing the need for investment to expand power generation.

Fig. 9 presents the water level in the storage tank and the power consumed by the pumping station.



(a)



(b)

Fig. 9. (a) Water level in the tank - (b) Power consumption and water demand.

The water level profile in the case of optimal schedule suggests that there is no excess in the flow discharge of the pumping station during the work cycle. The initial and final levels are very close unlike in reality. Large differences between initial and final levels can lead to water shortage causing a need for daily monitoring.

The reduction in the power consumed in the real case (Fig. 9(b) - 12am, 1 pm and 1am to 3am) is associated with the shutdown of pumps. The schedule of the real case does not seek to minimize the cost of energy in the period of greatest demand for electricity in the entire electrical system (5 pm to 8 pm), the period when electricity is the most expensive. All pumps were in operation during this period before. Furthermore, the four pumps operated simultaneously with the maximum speed for a long period (73% of the work cycle). The profile of power consumption associated to the optimal schedule has a dynamic behavior similar to the demand curve. From 5 pm to 8 pm (consumption peak) the optimal schedule results in a reduction in electricity consumption.

Figure 10 presents the electricity saved resulting from the use of frequency converters and the optimal pumping scheduling.

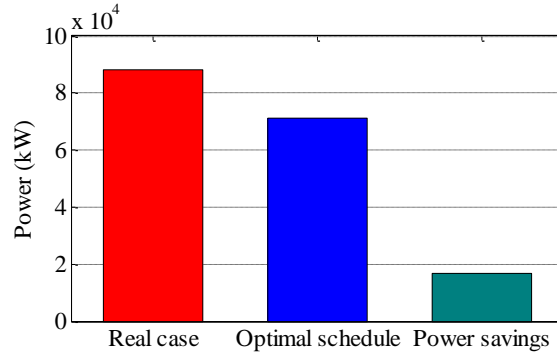
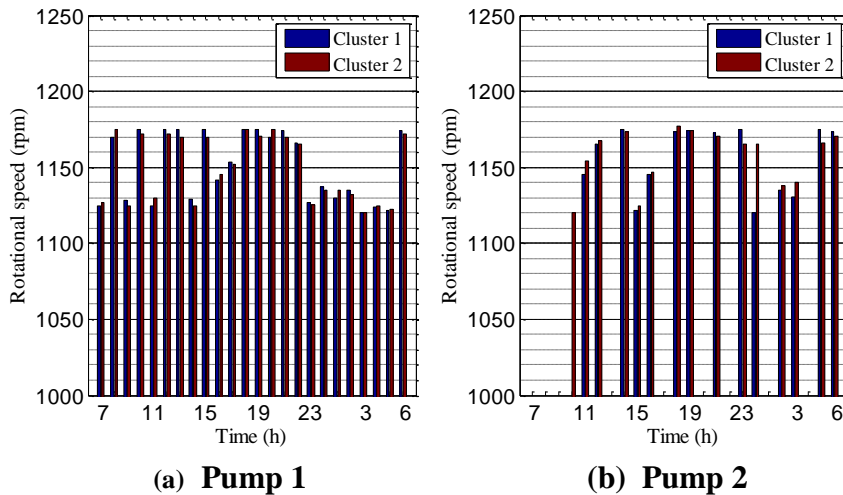


Fig. 10. Power saving.

According to Fig. 10, considering an efficiency of frequency converters equal to 97% of the total power consumed by the pumps [45], the results show a power saving approximately equal to 17.1%. Based on an average tariff of US\$ 0.108/kWh [46] and an average monthly consumption of electricity of 2,646,000 kW (or 88,200 kW/day). The estimated monthly cost of electricity is US\$ 285,768.00. The average monthly amount of energy saved is equal to US\$ 48,980.64. Considering the initial investment of US\$ 284,000.00 for the purchase, building and installation of frequency converters, the estimated payback time is 6 months.

The differences in demand values between the patterns of the same season (Fig. 5) would suggest the need for different operational schedules. Fig. 11 presents the optimization results considering the two demand patterns of spring (season with the highest Euclidean distance between the patterns, Fig. 5 a-b).



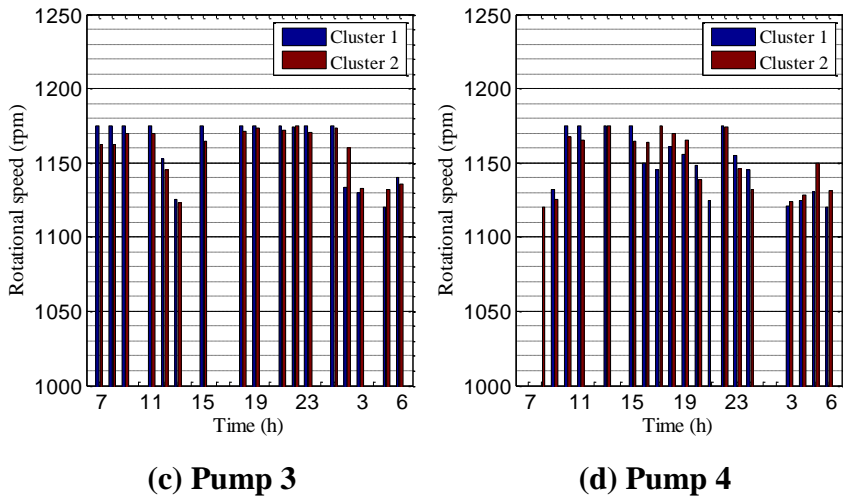
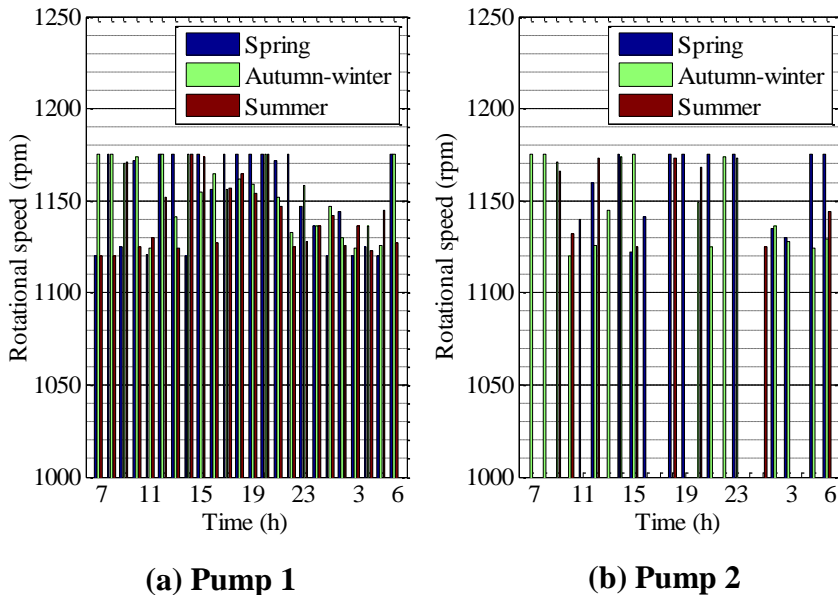


Fig. 11. Pumping schedule - spring season.

Fig. 11 shows that the optimal schedule of pumps are similar in most of the work cycle. With few exceptions, the pumps are switched (on/off) in the same instants. Also, for each pump there are small differences between the rotational speed. Therefore, for the purposes of determining the optimal pumping schedule associated to each season, any of the patterns could be considered or a mean demand profile (such as in Fig. 7) can also be used as input for the optimization problem. This reasoning can be applied for the other seasons (autumn-winter and summer) with greater similarity between the patterns.

Fig. 12 compares the optimization results for the three seasons considered, based on the pattern of higher average demand for each one.



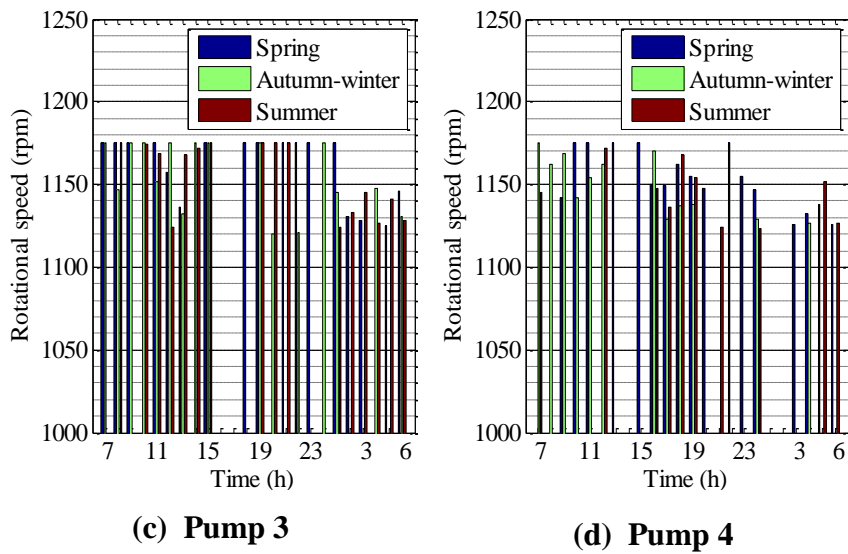


Fig. 12. Pumping schedule for each season.

The differences between the pumping schedule of each season suggests a change in operational policy for the PS High Load. Table 3 presents the daily power consumed in each season. The difference between spring and summer (higher and lower average daily water demand respectively) (20,322 kW) confirms that the same demand profile should not be considered throughout the year.

Table 3. Power consumed by pumps.

Seasons	Power kW
Spring	92,282
Autumn-winter	83,137
Summer	71,960

4.2 Advantages and disadvantages

Beyond the satisfactory results obtained, the proposal for dynamic optimization of a water supply system integrated into a strategy of pattern recognition in consumption profiles presents some advantages:

- Effectiveness and feasibility. Besides the need for frequency inverters, the implementation of the method does not require the installation or acquisition of complex systems. Pattern recognition can be updated periodically from data consumption curves;
- Change in the operating culture of the supply unit. The previous operating procedures, based on a heuristic approach, would be replaced by a new approach which is justified by the gain in energy efficiency together with the rational meeting of demand;
- Applicability. Despite having been applied and tested in an urban unit supply, the procedure and approach adopted can be applied to other water supply systems where specific hydraulic supply or operational features can be considered as additional constraints in the optimization problem;

- Model reduction approach. The reduction model strategy using two empirical models based on neural networks (NN) is important in enabling the implementation of real-time optimization.

Other aspects (or disadvantages) must be highlighted:

- Increased operating costs. Although the payback time associated with the purchase, building and installation of frequency converters is only 6 months, the cost of maintenance, improvement of data acquisition systems and training must be considered;
- Modeling and simulation. The impact of any change in the optimization problem or in the consumption patterns should be evaluated through simulation. In this case, empirical models must be identified or updated in offline mode using a phenomenological model or real data.

5. Conclusions

This work presents and solves a dynamic optimization problem that provides an optimal schedule for the rotational speed of pumps in a water supply system designed to reduce the amount spent on electricity and maintenance. The optimization strategy considers the use of frequency converters to meet the water demand without excessive accumulation of water in the storage tank within a work cycle. Patterns of demand curves were recognized based on real data using a well-known method suitable for pattern recognition in univariate time series.

Considering a typical demand curve and additional aspects associated to the efficiency, purchase and installation costs of frequency converters, the optimization results present savings in average monthly consumption of energy equal to US\$ 48,980.64 for the case studied (PS High Load with maximum capacity of 8,800 m³/h, main line with 1.5 m in diameter and total length of 5,600 m). These results demonstrate the improvement in energy efficiency of the water supply system through the use of an optimal control strategy. A 17.1% reduction (daily consumption) in the power consumed is achieved in the pumping system.

Pattern recognition applied to demand in a water supply system over a year is a useful way to optimize the pumping schedule and support planning and decision-making at operational level. The difference between the daily amount of electricity consumed in each season, according to the optimal pumping schedule, demonstrates that the same demand profile should not be considered throughout the year.

Lastly, the results and the method presented demonstrate the improvements in energy efficiency in the water supply system, the feasibility of predicting consumption patterns in a non-heuristic way and the use of these patterns directly in the optimization problem.

References

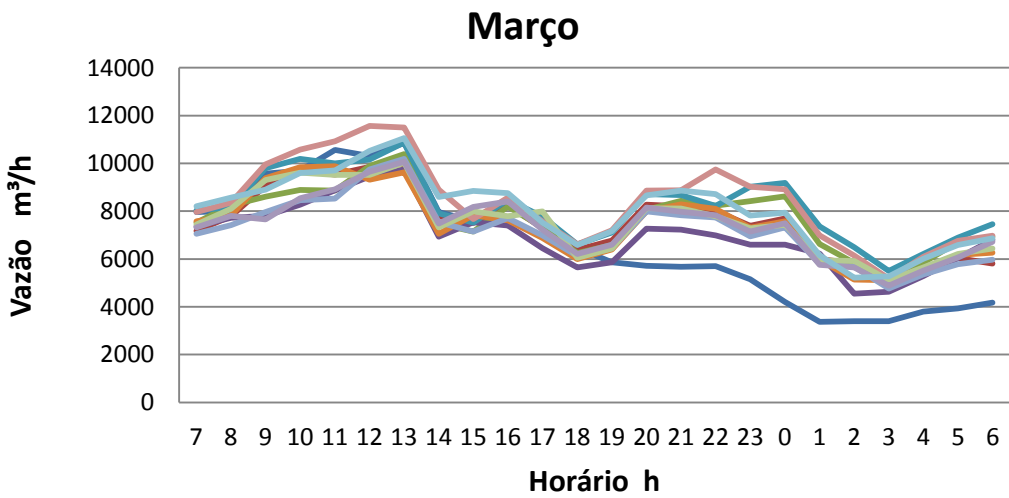
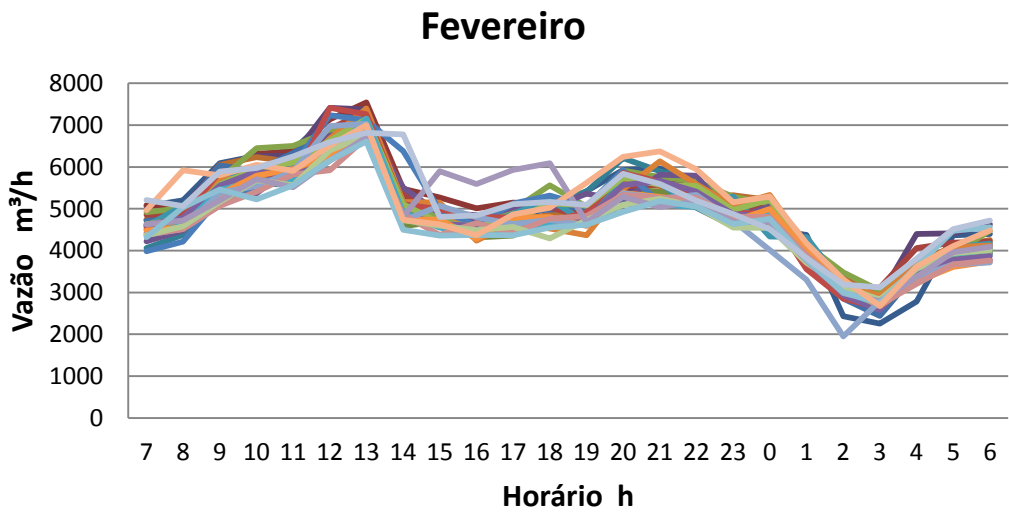
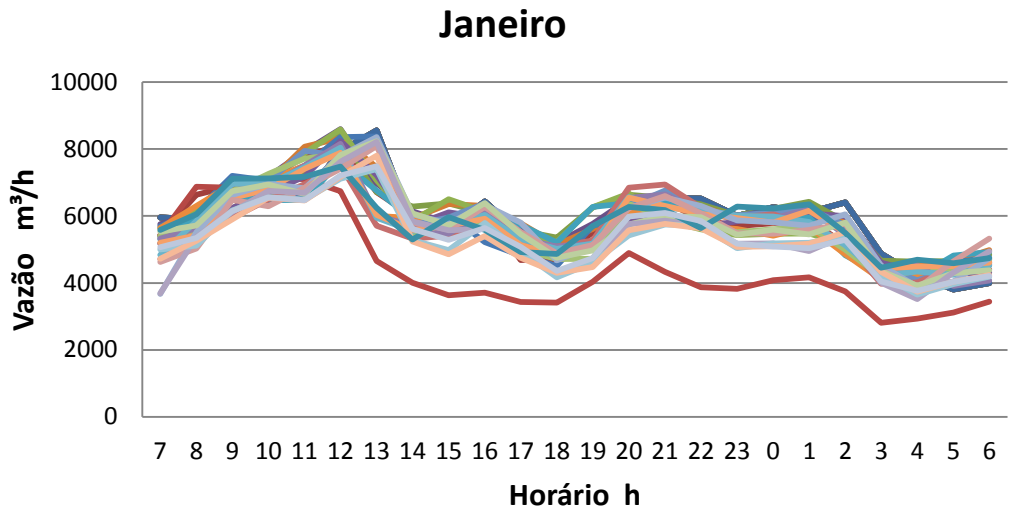
1. IEA- International Energy agency. (2011). World Energy Outlook, Paris, International Energy Agency.
2. Ormsbee, L.E.; Walski, T.M.; and Sharp, W.W. (1989). Methodology for improving pump operation efficiency. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 2, 148-164.
3. Zessler, U.; and Shamir, U. (1989). Optimal operation of water distribution systems. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 6, 735–752.
4. Jowitt, P.W.; and Germanopoulos, G. (1992). Optimal pump scheduling in water-supply networks. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 4, 406–422.

5. Lingireddy, S.; and Wood, D.J. (1998). Improved operation of water distribution systems using variable-speed pumps. *Journal of Energy Engineering, ASCE*, 124(3), 90-103.
6. Collins, S. (1991). Variable-speed drive boosts pump efficiency. *Power*, 135, 164-165.
7. Lambeth, J.; and Houston, J. (1991). Adjustable frequency drives saves energy. *Water Envir. and Technol.*, 3(5), 34-45.
8. Bortoni, E.A.; Almeida, R.A.; and Viana, A.N.C. (2008). Optimization of parallel variable-speed-driven centrifugal pumps operation. *Energy Efficiency Journal*, 1, 167–173.
9. Lansey, K.E.; and Awumah, K. (1994). Optimal pump operations considering pump switches. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 1, 17–35.
10. López-Ibáñez, M.; Prasad, T.D.; and Paechter, B. (2008). Ant colony optimization for optimal control of pumps in water distribution networks. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 4, 337-346.
11. Vladimir, Ć.; Heiliö, M.; Krejić, N.; and Nedeljkovic, M. (2010). Mathematical model for efficient water flow management. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 11(3), 1600–1612.
12. Wang, H.; and Guo, W. (2010). ACO optimizing neural network for macroscopic water distribution system modeling. In: *Proc. International Conf. on Intelligent Computing and Cognitive Informatics, Washington, USA*, 367-370.
13. McCormick, G.; and Powell, R.S. (2013). Optimal pump scheduling in water supply systems with maximum demand charges. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 129(5), 372-379.
14. Georgescu, S.; Popa, R.; and Georgescu, A. (2010). Pumping stations scheduling for a water supply system with multiple tanks. *U.P.B. Sci. Bull., series d*, 72(3), 129-140.
15. Chase, D.V.; and Ormsbee, L.E. (1989). Optimal pump operation of water distribution system with multiple storage tanks. In: *Proc. Conf. on Water Resour. Plann. and Manag., ASCE*, 733-736.
16. Yu, G.; Powell, R.S.; and Sterling, M.J.H. (1994). Optimized pump scheduling in water distribution systems. *J. of Optimization Theory and Application*, 3, 463-488.
17. Brion, L.M.; and Mays, L.W. (1991). Methodology for optimal operation of pumping stations in water distribution systems. *J. of Hydraulic Engineering*, 11, 1551-1569.
18. Nitivattananon, V.; Sadowski, E.C.; and Quimpo, R.G. (1996). Optimizatón of water supply system operation. *Journal of water resources planning and management*, 122(5), 374-384.
19. Tarquin, A.J.; and Dowdy, J. (1989). Optimal pump operation in water distribution. *J. hydraulic Engineering*, 2, 496–501.
20. Barán, B.; Lücken, C.V.; and Sotelo, A. (2005). Multi-objective pump scheduling optimization using evolutionary strategies. *J. Advances in Engineering Software*, 36(1), 39–47.
21. Rao, Z.F.; Wicks, J.; and West, S. (2007). Optimising water supply and distribution operations. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Water Management*, 160(2), 95–101.
22. Ghiassi, M.; Zimbra, D.K.; and Saidane, H. (2008). Urban water demand forecasting with a dynamic artificial neural network model. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 134(2), 138-146.

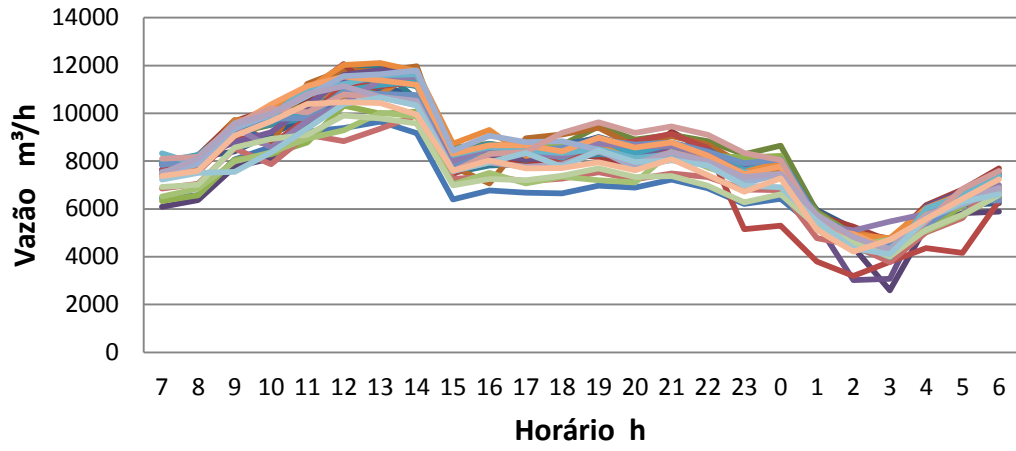
23. Greenaway, G.; Guanlao, R.; Bayda, N.; and Zhang, Q. (2008). Water distribution systems demand forecasting with pattern recognition. *Water distribution systems analysis symposium*, 1-16.
24. Walski, T.M.; Chase, D.V.; Savic, D.A.; Grayman, W.; Beckwith, S; and Koelle, E. (2003). *Advanced water distribution modeling and management*. Haestad Methods, Inc. Waterbury, CT.
25. Mays, L.W. (2000). *Water distribution systems handbook*. New York: McGraw-Hill.
26. Bensaid, A.; Lawrence, O.H.; Bezdek, J.C.; and Clarke, L.P. (1996). Partially supervised clustering for image segmentation. *Pattern Recognition*, 29(5), 859–871.
27. Bezdek, J.C.; Keller, J.; Krisnapuram, R.; and Pal, N.R. (2005). *Fuzzy models and algorithms for pattern recognition and image processing*. Springer, 0-38724-515-4 York.
28. Liao, W.T. (2005). Clustering of time series data - a survey. *Pattern Recognition*, 38(11), 1857–1874.
29. Diniz, A.M.F.; Fontes, C.H.O.; Costa, C.A.; and Costa, G.M.N. (2013). Dynamic modeling and simulation of a water supply system with applications for improving energy efficiency. *Journal of Energy Efficiency*, submitted (under review).
30. Pinto, J.C.; and Lage, P.L.C. (2001). *Mathematical methods in chemical engineering problems*, COPPE/UFRJ, E-papers.
31. Marques, C.A.X.; Fontes, C.H.; Embiruçu, M.; and Kalid, R.A. (2009). Efficiency control in a commercial counter flow wet cooling tower. *J. Energy Conversion and Management*, 50(11), 2843–2855.
32. Schiesser, W.E. (1991). *The numerical method of lines: integration of partial differential equations*. Academic Press: San Diego.
33. Ding, S.; Li, H.; Su, C.; Yu, J.; and Jin, F. (2013). Evolutionary artificial neural networks: A review. *Artificial Intelligence Review*, 39(3), 251-260.
34. Ahmadi, A.; and Mashoufi, B. (2012). A new optimized approach for artificial neural networks training using genetic algorithms and parallel processing. *International Review on Computers and Software*, 7 (5), 2195-2199.
35. Farmaki, E.G.; Thomaidis, N.S.; and Efstathiou, C.E. (2010). Artificial neural networks in water analysis: Theory and applications. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 90(2), 85-105.
36. Magalhães, R.S.; Fontes, C.H.O.; Almeida, L.A.L.; and Embiruçu, M. (2011). Identification of hybrid ARX–neural network models for three-dimensional simulation of a vibroacoustic system. *Journal of Sound and Vibration*, 330(21), 5138-5150.
37. Santos, R.; Almeida Neto, J.F.; Campos, M; Embiruçu, M.; Fontes, C.H.O.; and Kalid, R.A. (2009). Multivariable correlation analysis with low sampling rate in output and its application in an LNG plant. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 66(1-2), 33-41.
38. Ferreira, A.M.S.; Cavalcante, C.A.M.T.; Fontes, C.H.O.; and Marambio, J.E.S. (2013). A new method for pattern recognition in load profiles to support decision-making in the management of the electric sector. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 53, 824-831.
39. Monedero, I.; Biscarri, F.; León, C.; Guerrero, J.I.; Biscarri, J.; and Millán, R. (2012). Detection of frauds and other non-technical losses in a power utility using Pearson coefficient, Bayesian networks and decision trees. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 34(1), 90–98.

40. Piatetsky G. (2007). Data mining and knowledge discovery 1996 to 2005: overcoming the hype and moving from “university” to “business” and “analytics”. *Data Min, Knowled Discov.*, 15, 99–105.
41. Alvisi, S.; Franchini, M.; and Marinelli, A. (2007). A short-term, pattern-based model for water-demand forecasting. *Journal of Hydroinformatics*, 9(1), 39–50.
42. Zhou, W.; Zang, L.; and Jiao, L. (2002). Linear programming support vector machines. *Pattern Recognition*, 35, 2927–2936.
43. Shvartser, L.; Shamir, U.; and Feldman, M. (1993). Forecasting hourly water demands by pattern recognition approach. *J. Water Resour. Plann. Manage*, 611-627.
44. Vlachos, M.; Lin, J.; Keogh, E.; and Gunopulos, D. (2003). A wavelet-based anytime algorithm for k-means clustering of time series. In *Proc. workshop on clustering high dimensionality data and its applications*, 23-30.
45. Emerson Network Power (2013). *Equipment Manual – drive inverter*. Emerson International Limited. Manufacturer trading company. Guangdong.
46. COELBA (Companhia Elétrica do Estado da Bahia) (2013). *Tabela de tarifa e preço final de energia elétrica*. COELBA: Salvador.

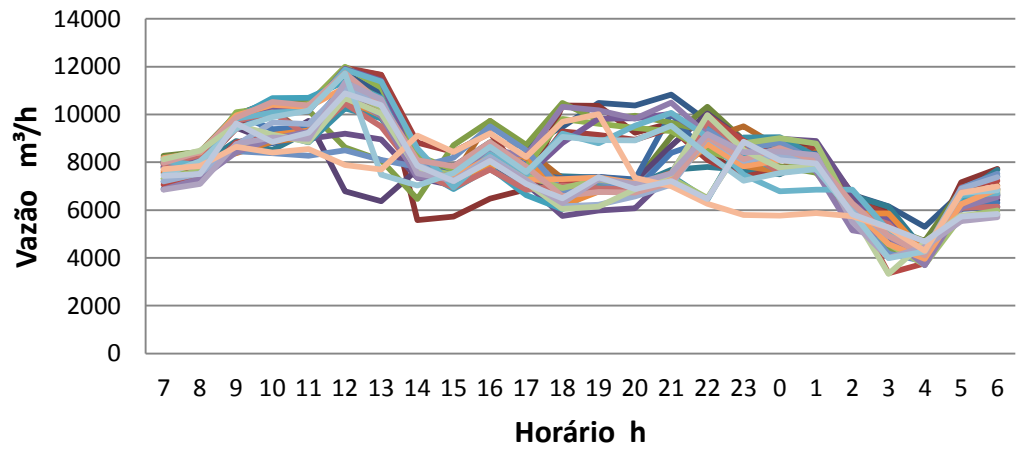
APÊNDICE D – Curvas reais de perfil de demanda horária de água do sistema estudado
a) Perfis de demanda mensal – Ano 2010.



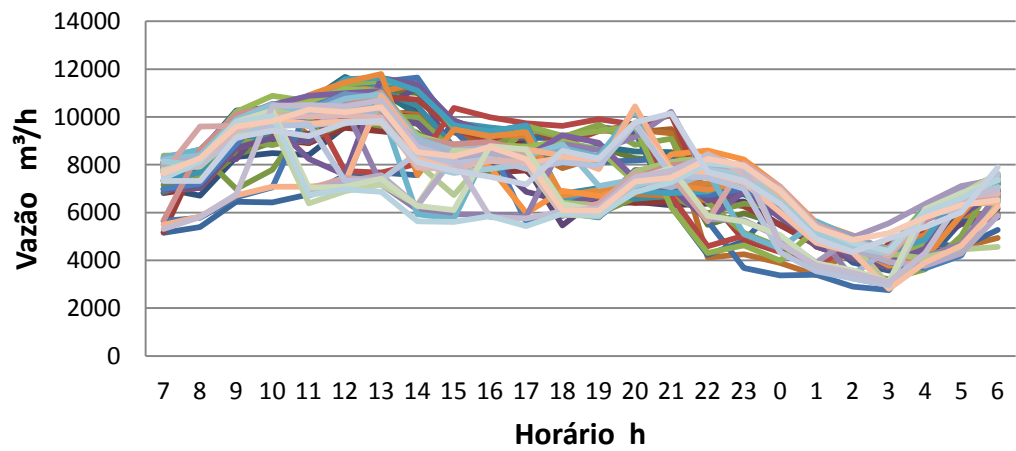
Abril



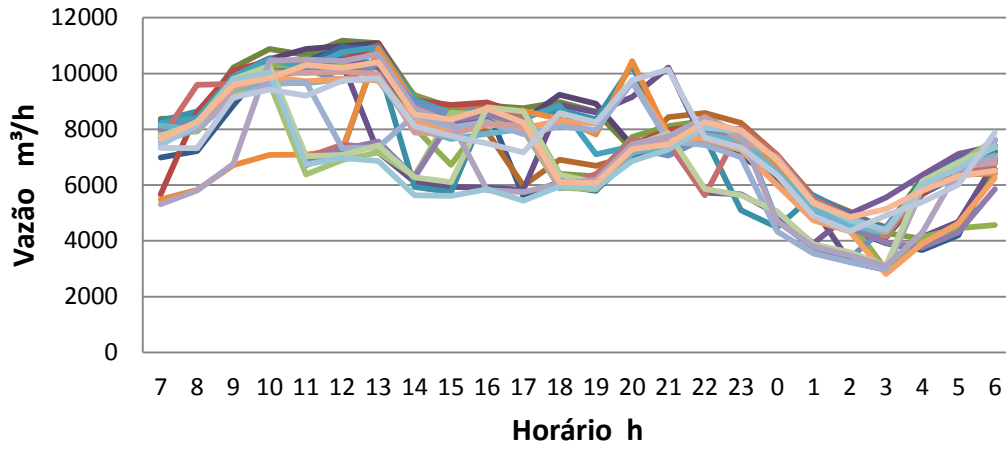
Maio



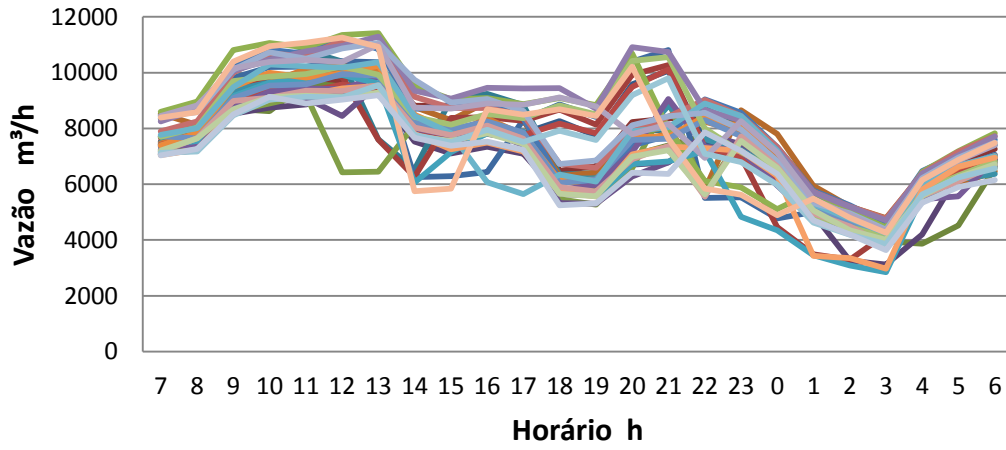
Junho



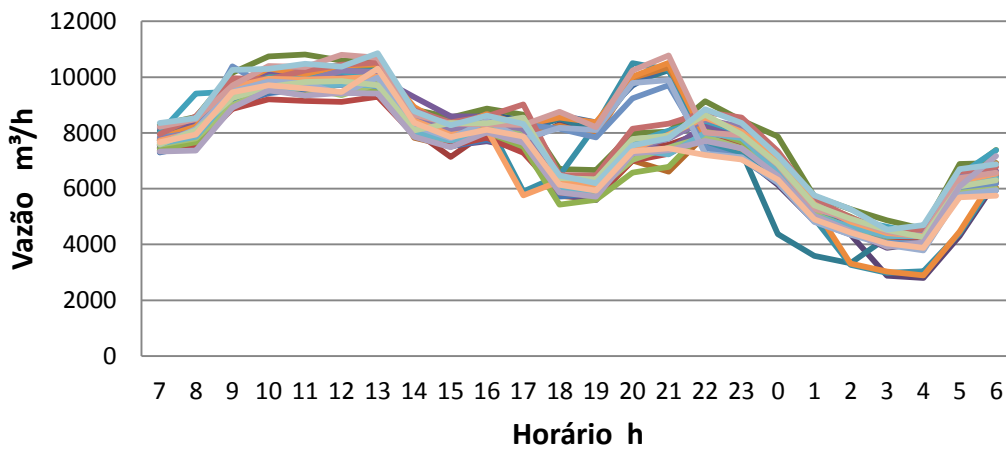
Julho

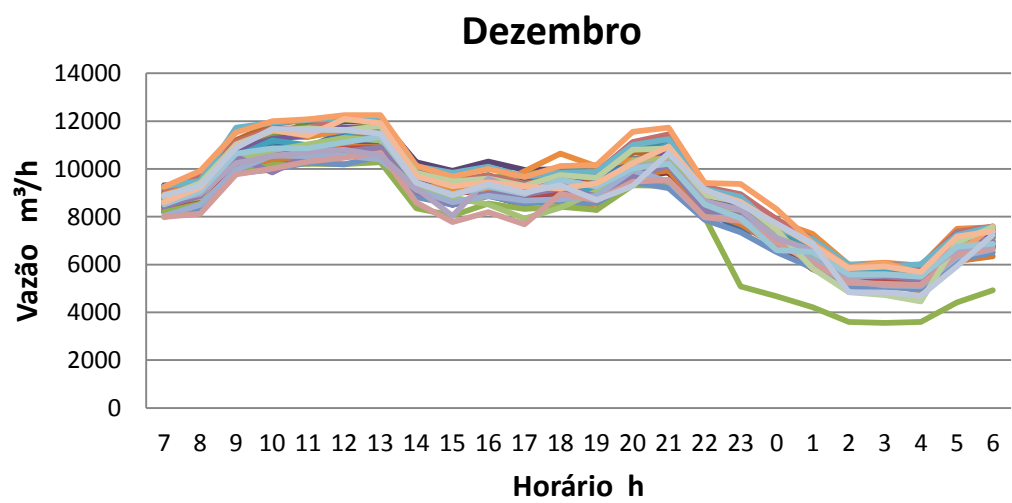
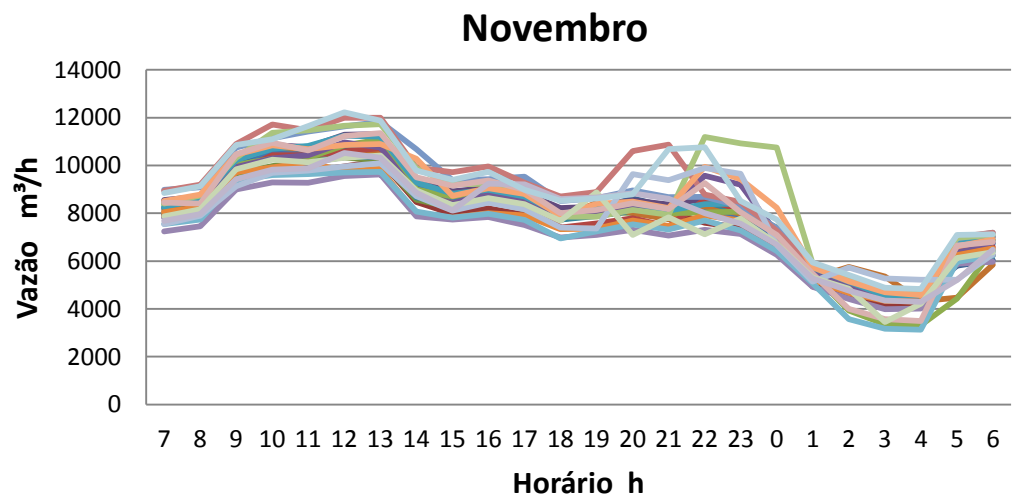
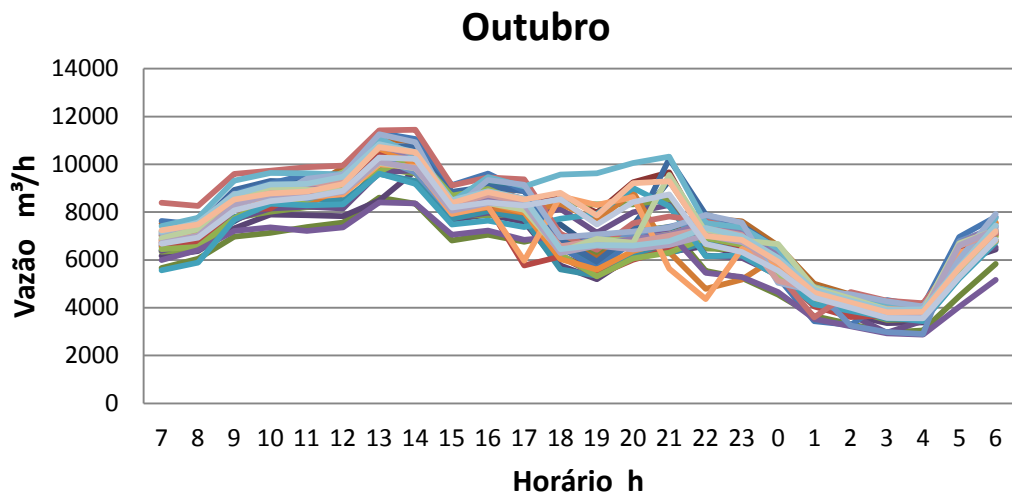


Agosto

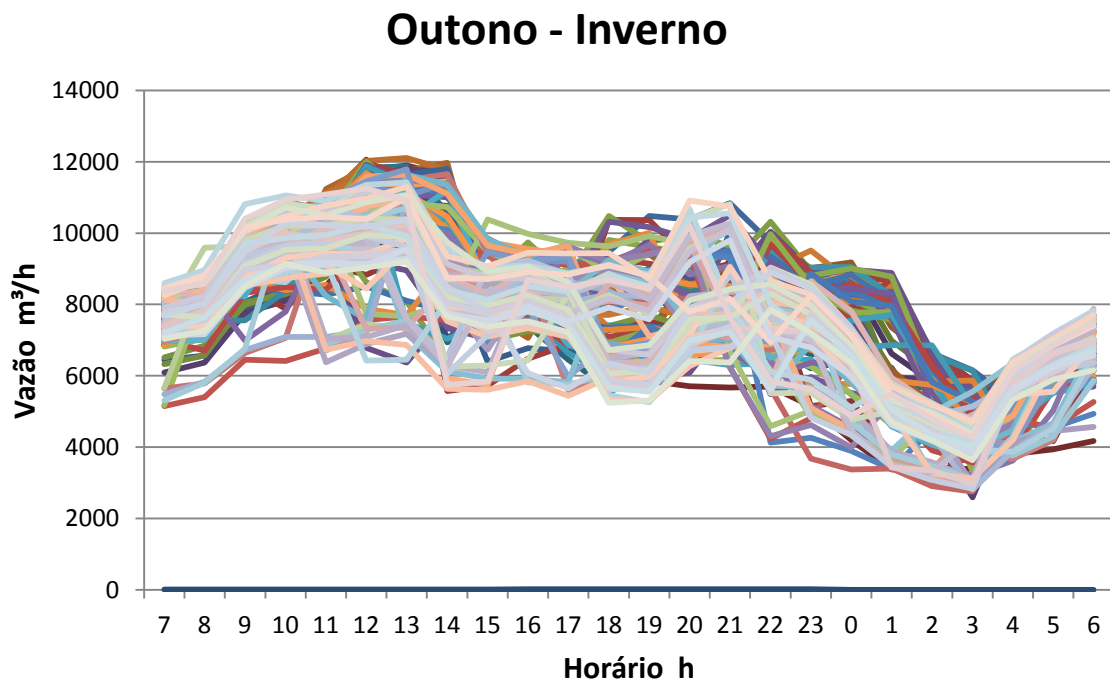
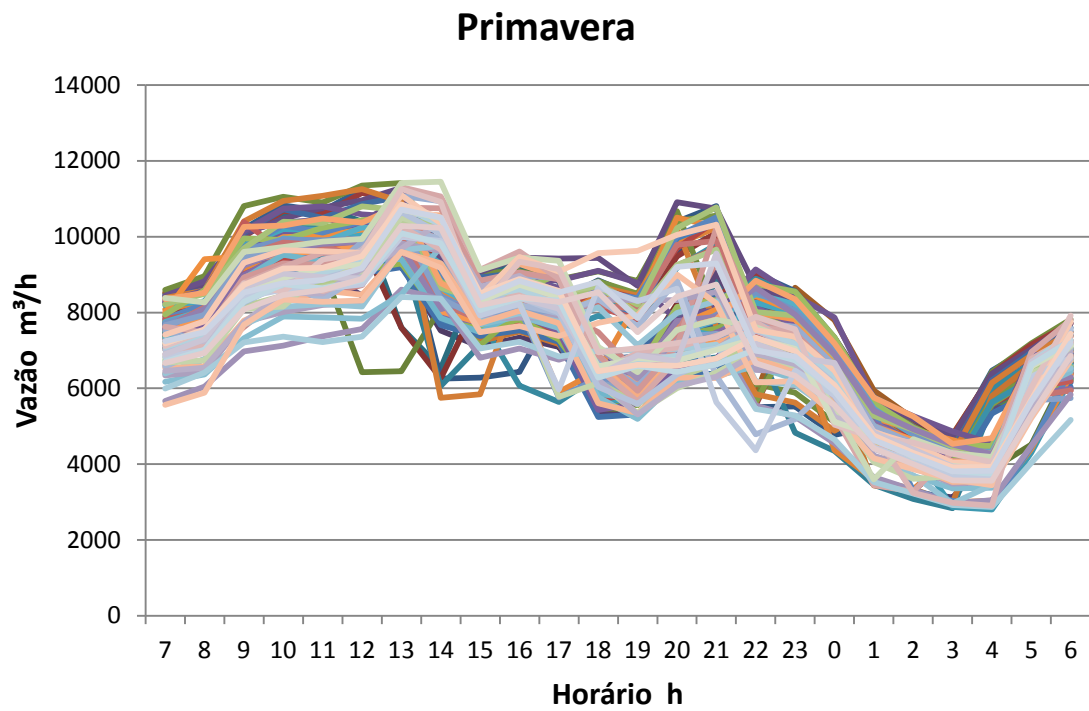


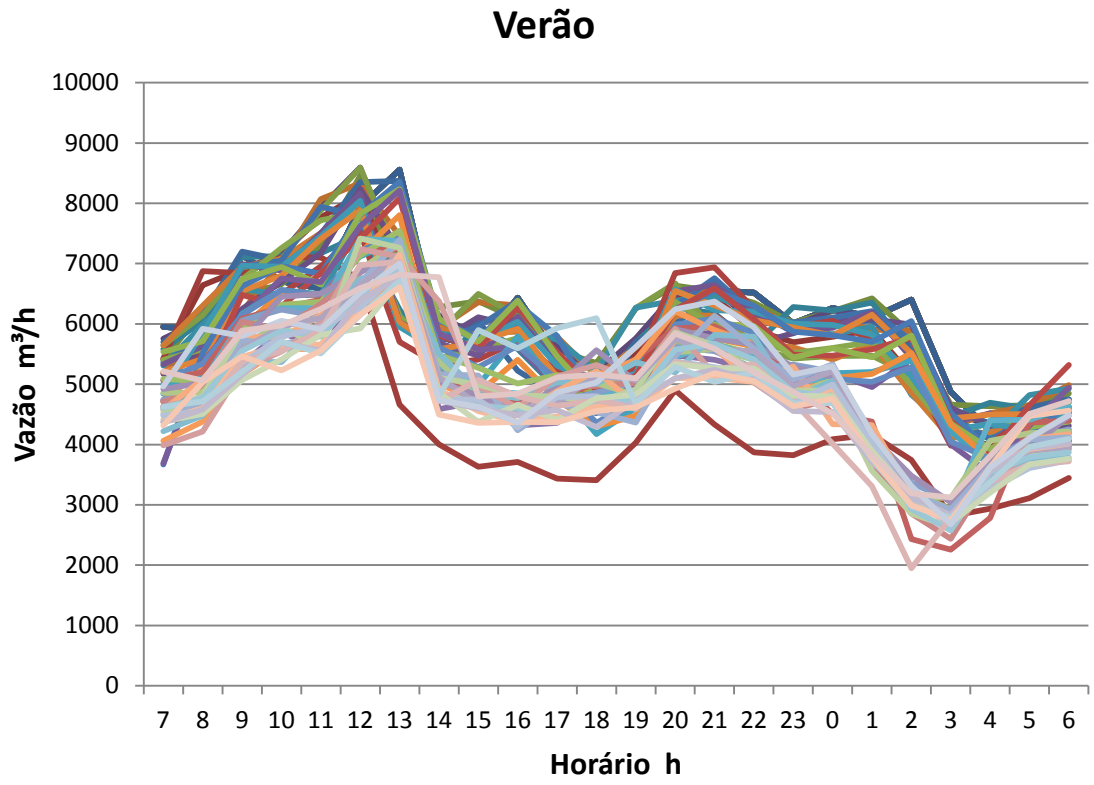
Setembro





b) Perfis de demanda por grupos de estação – Ano 2010.





UFBA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI

Rua Aristides Novis, 02, 6º andar, Federação, Salvador BA
CEP: 40.210-630
Telefone: (71) 3283-9800
E-mail: pei@ufba.br
Home page: <http://www.pei.ufba.br>

