



*Universidade Federal da Paraíba*

*Centro de Tecnologia*

*Programa de pós-graduação em engenharia urbana e  
ambiental*

*- Mestrado -*

**EFICIÊNCIA HIDRÁULICA E ENERGÉTICA DA OPERAÇÃO DO  
BOMBEAMENTO PARA O ABASTECIMENTO DO BAIRRO DE  
MANGABEIRA EM JOÃO PESSOA**

*Por*

**Leonardo Leite Brasil Montenegro**

*Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba  
para obtenção do grau de Mestre*

*João Pessoa - Paraíba*

*Setembro, 2009*

*Universidade Federal da Paraíba*

*Centro de Tecnologia*

*Programa de pós-graduação em engenharia urbana e  
ambiental*

*- Mestrado -*

**EFICIÊNCIA HIDRÁULICA E ENERGÉTICA DA OPERAÇÃO DO  
BOMBEAMENTO PARA O ABASTECIMENTO DO BAIRRO DE  
MANGABEIRA EM JOÃO PESSOA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre.

**Leonardo Leite Brasil Montenegro**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Heber Pimentel Gomes**

*João Pessoa – Paraíba*

*Setembro, 2009*

M777e Montenegro, Leonardo Leite Brasil.  
Eficiência Hidráulica e Energética da Operação do  
Bombeamento para o Abastecimento do Bairro de  
Mangabeira em João Pessoa./ Leonardo Leite Brasil  
Montenegro. - João Pessoa;[s.n.] 2009.  
93 p.: il.  
Orientador: Heber Pimentel Gomes.  
Dissertação (Mestrado).  
UFPB/CT.  
1.Energia Elétrica. 2.Eficiência Hidráulica  
3. Eficiência Energética.

UFPB/BC

CDU: 621.8.037(043)

**EFICIÊNCIA HIDRÁULICA E ENERGÉTICA DA OPERAÇÃO DO  
BOMBEAMENTO PARA O ABASTECIMENTO DO BAIRRO DE  
MANGABEIRA EM JOÃO PESSOA**

**Por**

**Leonardo Leite Brasil Montenegro**

Dissertação aprovada em 29 de setembro de 2009

Período Letivo: 2009.2

**Prof. Dr. Heber Pimentel Gomes - UFPB**

**Orientador**

**Prof. Dr. Tarciso Cabral da Silva - UFPB**

**Examinador Interno**

**Prof. Dr. José Abner Guimarães Júnior – UFRN**

**Examinador Externo**

*João Pessoa – Paraíba*

*Setembro, 2009*

Dedicatória,

Aos meus pais Francisco Brasil Montenegro (*in memoriam*) e Divany Leite Brasil Montenegro.

As minhas Filhas Karen Pequeno Brasil Montenegro, Thais Pequeno Brasil Montenegro e Paula Moniquy de Lima Montenegro.

As minhas amigas e amigos da CAGEPA e da UFPB.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado a vida e a oportunidade de poder chegar até aqui.

Aos meus familiares, amigos, colegas de mestrado e professores, e a todos aqueles que participaram direta ou indiretamente da minha caminhada.

Ao professor Heber Pimentel Gomes pela orientação, disponibilidade, estímulo para atingir os objetivos da pesquisa, paciência e, principalmente, a amizade construída e consolidada ao longo deste trabalho.

Ao professor Tarciso Cabral da Silva, pelo acolhimento e orientações quando decidi me submeter à seleção do mestrado.

Aos professores José Reynolds Cardoso de Melo e Helly Campos Silva, cujos incentivos foram fundamentais para o meu ingresso no mestrado.

À Companhia de Água e Esgotos da Paraíba – CAGEPA, pelo apoio e viabilização da minha liberação para a conclusão dos créditos que ajudaram na minha formação acadêmica.

Aos meus queridos colegas da equipe do LENHS-UFPB, Paulo Sergio Oliveira de Carvalho e Saulo de Tarso Marques Bezerra, pelo desprendimento, companheirismo, amizade e préstimos.

Aos prestimosos e competentes colegas: Daniela da S. Santos e João Silvino O. P. da Silva.

# **EFICIÊNCIA HIDRÁULICA E ENERGÉTICA DA OPERAÇÃO DO BOMBEAMENTO PARA O ABASTECIMENTO DO BAIRRO DE MANGABEIRA EM JOÃO PESSOA**

## **RESUMO**

O presente estudo tem o objetivo de apresentar alternativas de controle operacional na estação de bombeamento de abastecimento de água do bairro de Mangabeira em João Pessoa, proporcionando uma maior eficiência energética e hidráulica e, conseqüentemente, a redução dos custos com energia elétrica. O sistema é composto por duas estações elevatórias que bombeiam a água até um reservatório elevado, que faz a distribuição por gravidade. Primeiramente foi realizado um diagnóstico da configuração atual do sistema, onde analisou-se o atendimento da demanda, o levantamento das instalações e as condições de operação. A modelagem da situação atual e das alternativas propostas foram realizadas com o software EPANET 2.00.12, de maneira a comparar as diversas configurações. Os resultados alcançados mostram que é possível utilizar apenas uma estação elevatória para a demanda existente, com eficiência energética necessitando apenas o acionamento de mais uma bomba em paralelo no horário de pico de consumo.

**Palavras-chave:** energia elétrica; EPANET 2; eficiência hidráulica; eficiência energética.

# **HYDRAULIC AND ENERGY EFFICIENCY OF THE OPERATION OF PLUMBING TO SUPPLY OF THE WATER SUPPLY OF MANGABEIRA IN JOÃO PESSOA**

## **ABSTRACT**

This study aims to present alternatives to the operational control at the pumping station to supply water to the district of Mangabeira in Joao Pessoa, providing greater energy efficiency and water and thus reducing the cost of electricity. The system consists of two pumping stations that pump water to a conduit head high, making the distribution by gravity. First we carried out a diagnostic of the current configuration of the system, where it was analyzed to meet the demand, the survey of facilities and operating conditions. The modeling of the current situation and the proposed alternatives were performed with the software EPANET 2.00.12, in order to compare the various settings. The results show that it is possible to use only one lift station for the existing demand, requiring only the touch of another pump in parallel during the peak hours of consumption.

**Keywords:** electricity; EPANET 2; hydraulic efficiency; energy efficiency.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Sistemas de abastecimento de água (TSUTYIA, 2001) .....	6
Figura 2.2 - Curvas característica de uma bomba centrífuga .....	9
Figura 2.3 - Representação típica de um sistema de bombeamento de água.....	11
Figura 2.4 - Distribuição percentual dos gastos com energia elétrica na CAGEPA (PEDROSA FILHO, 2006) .....	17
Figura 3.1 - Bacia Hidrográfica de Gramame/Mamuaba .....	28
Figura 3.2 - Estação de Tratamento de Gramame .....	29
Figura 3.3 - Reservatório elevado R-7 .....	30
Figura 3.4 - Tubulação de chegada no Reservatório Apoiado R-7 .....	30
Figura 3.5 - Estação Elevatória “A” .....	32
Figura 3.6 - Estação Elevatória “B” .....	33
Figura 3.7 - Conjuntos motor-bomba em operação ao longo do dia 1 de julho de 2009 .....	34
Figura 3.8 - Esquema do sistema de abastecimento de água do Conjunto Mangabeira.....	31
Figura 3.9 - Interface do software EPANET 2.00.12 .....	35
Figura 3.10 - Exemplos de janelas de propriedades do EPANET 2.....	37
Figura 3.11 - (a) Curva característica do sistema (b) Efeito das perdas à curva do sistema (ANDRADE FILHO, 2009) .....	40
Figura 3.12 - Definição do ponto de trabalho através da superposição da curva do sistema e da bomba .....	43
Figura 4.1 - Curva e equação de uma bomba da Elevatória “A” - Bomba KSB ETA 100-16.53	53
Figura 4.2 - Curva e equação de duas bombas KSB ETA 100-16 em paralelo da EEA.....	53
Figura 4.3 - Curvas das bombas e do sistema da Elevatória “B” .....	55
Figura 4.4 - Curva de demanda média diária.....	56
Figura 4.5 - Editor de curva da bomba .....	63
Figura 4.6 - Editor de curva do rendimento da bomba.....	64
Figura 4.7 - Editor de Padrão para a variação de demanda na saída do reservatório .....	65
Figura 4.8 - Consumo na saída do reservatório simulado durante 72 horas.....	66
Figura 4.9 - Editor do padrão da variação da tarifa de energia .....	67
Figura 4.10 - Variação do nível do reservatório elevado .....	69

Figura 4.11 - Variação da média do consumo do bairro e a vazão fornecida pelo sistema de bombeamento .....	69
Figura 4.12 - Energia e custo do bombeamento ao longo de um dia .....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Subsistemas de um sistema de abastecimento de água .....	6
Tabela 2.2 - Velocidades indicadas na literatura e correspondentes valores de K.....	14
Tabela 2.3 - Aplicação de inversores de frequência - objetivos e vantagens .....	22
Tabela 4.1 - Coeficiente de perda localizada e hl para cada peça do sistema “A” .....	49
Tabela 4.2 - Coeficiente de perda localizada e hl para cada peça do sistema “B” .....	51
Tabela 4.3 - Coordenadas das curvas características da bomba KSB ETA 100-16 operando isoladamente e em paralelo.....	53
Tabela 4.4 - Vazões de operação das bombas das elevatórias “A” e “B” .....	54
Tabela 4.5 - Controle de nível do reservatório elevado R7 do Conjunto Mangabeira (Mês de referência: Julho/2006).....	57
Tabela 4.6 - Controle operacional (liga/desliga) das bombas das elevatórias “A” e “B” do sistema de abastecimento de água de Mangabeira (Mês de referência: Julho/2006) .....	58

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>v</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>vi</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>x</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo Geral e Objetivos Específicos.....	2
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
2.1 Sistemas de Abastecimento de Água.....	5
2.2 Instalações de Bombeamento (Estação Elevatória).....	8
2.3 Dimensionamento Econômico de Sistemas de Bombeamento de Água .....	12
2.4 Caracterização do Setor de Saneamento Básico.....	16
2.5 Alternativas para a Redução dos Custos com Energia Elétrica.....	17
2.6 Controle Operacional versus Eficiência do Sistema.....	18
2.7 Utilização de Inversor de Frequência .....	21
2.8 O Estado da Arte.....	22
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>27</b>
3.1 Estudo de Caso .....	28
3.2 EPANET 2.00.12.....	34
3.3 Metodologia Empregada.....	38
3.3.1 Diagnóstico da configuração atual da estação de bombeamento.....	39
3.3.2 Determinação das curvas dos sistemas .....	39
3.3.3 Determinação da curva de demanda da rede hidráulica.....	44
3.3.4 Modelagem da alternativa proposta através do programa EPANET 2.00.12.....	44
3.3.5 Simulação dinâmica dos cenários de operação no EPANET 2.00.12.....	44
3.3.6 Comparação dos custos energéticos da situação atual e da alternativa proposta .....	45

3.4	Análise Econômica dos Custos Envolvidos .....	45
3.4.1	Custos de investimento .....	45
3.4.2	Custos de operação da estação de bombeamento .....	46
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>47</b>
4.1	Definição das Vazões Aduzidas .....	48
4.2	Definição da Curva de Demanda da Rede Hidráulica .....	56
4.3	Modelagem da Alternativa Proposta através do Programa EPANET 2.00.12 .....	61
4.4	Simulação Dinâmica dos Cenários de Operação no EPANET 2.00.12.....	64
4.5	Paralisação das Bombas no Horário de Ponta .....	71
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>72</b>
5.1	Recomendações .....	73
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>75</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica é necessária para tornar a água potável e movê-la através dos sistemas de tubos. Por isto, tão importante quanto as medidas de diminuição do consumo de água, são as ações operacionais no processo de melhoria dos sistemas de distribuição. Os gastos com energia elétrica representam valores significativos no orçamento das empresas de saneamento. No mundo, o setor de abastecimento de água, coleta e tratamento de esgotos caracteriza-se como grande consumidor de energia elétrica. Os gastos da energia de bombeamento, na grande maioria das vezes, ultrapassam, ao longo da vida útil dos projetos, os custos de investimento das instalações (GOMES, 2005). Segundo Tsutiya (2004) mais de 90% dos gastos com energia elétrica das concessionárias de água devem-se às elevatórias dos sistemas de abastecimento público.

Cerca de dois a três por cento do consumo de energia do mundo é usada no bombeamento e tratamento de água para residências, comércio, indústrias e setor público (ALLIANCE, 2002). Clingenpeel (1983) afirma que, geralmente, em torno de 50% das despesas das empresas de saneamento são com energia elétrica.

Em nosso país, o setor de saneamento básico, que engloba os serviços de água e esgoto, detém cerca de 2,5% do consumo global de energia elétrica, segundo a última informação disponibilizada pelo Departamento de Mercado da ELETROBRÁS em 2008. Os gastos com energia elétrica nas empresas de saneamento constituem normalmente o segundo maior item no orçamento das despesas de exploração.

Assim, verifica-se a necessidade de revisar os processos de atender a crescente demanda por energia, através de medidas mais sistêmicas e consistentes, e a possibilidade de gerar alternativas que tragam menores custos econômicos e impactos para a sociedade. De acordo com a tendência mundial da conservação do meio ambiente, no sentido de minimizar impactos ambientais causados pelas construções de novas usinas e linhas de transmissão. Uma das formas existentes para contribuir nessa questão é através de técnicas e processos focados na eficiência energética para reduzir o consumo de energia elétrica.

O termo eficiência energética é bastante amplo e genérico, cuja definição em geral pode se referir à possibilidade de se utilizar quantidades menores de energia para produzir a mesma quantidade de serviços ou produção. Significa obter a mesma qualidade de serviços ou benefícios advindos dos usos finais de energia, com a utilização de uma menor quantidade da mesma, não sendo um racionamento nem a "racionalização forçada", que visam à redução do serviço energético em vez da redução da energia para o mesmo serviço.

Devido aos fatores apresentados, o estudo da redução do custo energético em sistemas de bombeamento através de medidas de controle operacional deve buscar soluções que visem melhorar a eficiência energética e hidráulica dos sistemas de abastecimento de água urbano.

## **1.1 Objetivo Geral e Objetivos Específicos**

Apresentar uma alternativa para o controle operacional que possa proporcionar uma maior eficiência energética e hidráulica no sistema de distribuição de água do bairro de Mangabeira da cidade de João Pessoa, visando à redução dos custos de energia elétrica em sistemas de bombeamento e o mantimento da oferta necessária para suprir o consumo da população.

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- Diagnosticar o sistema de bombeamento de água do bairro de Mangabeira;
- Analisar o sistema de bombeamento, a reservação atual, verificar o controle da operação e o atendimento das demandas de água;
- Investigar economicamente os cenários da operação do sistema de bombeamento;
- Analisar a possibilidade da desativação de uma das estações elevatória do sistema.





## CAPÍTULO 2

---

### **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **2.1 Sistemas de Abastecimento de Água**

Os sistemas de abastecimento de água são formados por conjuntos de equipamentos, obras e serviços que se integram de maneira a suprir a necessidade de água dos diversos segmentos da sociedade (uso doméstico, comercial e público).

Segundo Tsutyia (2001), a concepção de um sistema de abastecimento de água varia com as características de cada projeto, sendo considerados o porte da cidade a ser abastecida, sua posição em relação aos mananciais, a topografia local, entre outros fatores.

De uma maneira geral, os sistemas são compostos pelo manancial e por unidades de captação, estação elevatória, adutora, estação de tratamento, reservatório, rede de distribuição e ligações de água. O Tabela 2.1 apresenta um resumo destes subsistemas.

Tabela 2.1 - Subsistemas de um sistema de abastecimento de água

Manancial	É o corpo de água superficial ou subterrâneo, de onde é retirada a água para o abastecimento.
Captação	Estrutura montada junto ao manancial, para a retirada de água destinada ao sistema de abastecimento.
Estação elevatória	Sistema destinado a elevar a água para a unidade seguinte.
Adutora	Canalização destinada a conduzir água entre as unidades que precedem a rede de distribuição.
Estação de tratamento de água	Conjunto de unidades destinadas a tratar a água adequando as suas características aos padrões de potabilidade.
Reservatório	Elemento destinado ao armazenamento de água, responsável pela regularização das variações entre as vazões de adução e de distribuição, promovendo pressões adequadas na rede de distribuição.
Rede de distribuição	Parte do sistema formada por tubulações e órgãos acessórios, destinado a disponibilizar água nos nós da rede, de modo a atender as demandas exigidas pelo projeto.
Ligações domiciliares	Disponibiliza água potável aos consumidores.

Pode-se visualizar na Figura 2.1 duas concepções típicas de sistemas de abastecimento de água, uma com uso de reservatório elevado e outra utilizando uma estação de bombeamento direto para a rede de distribuição.

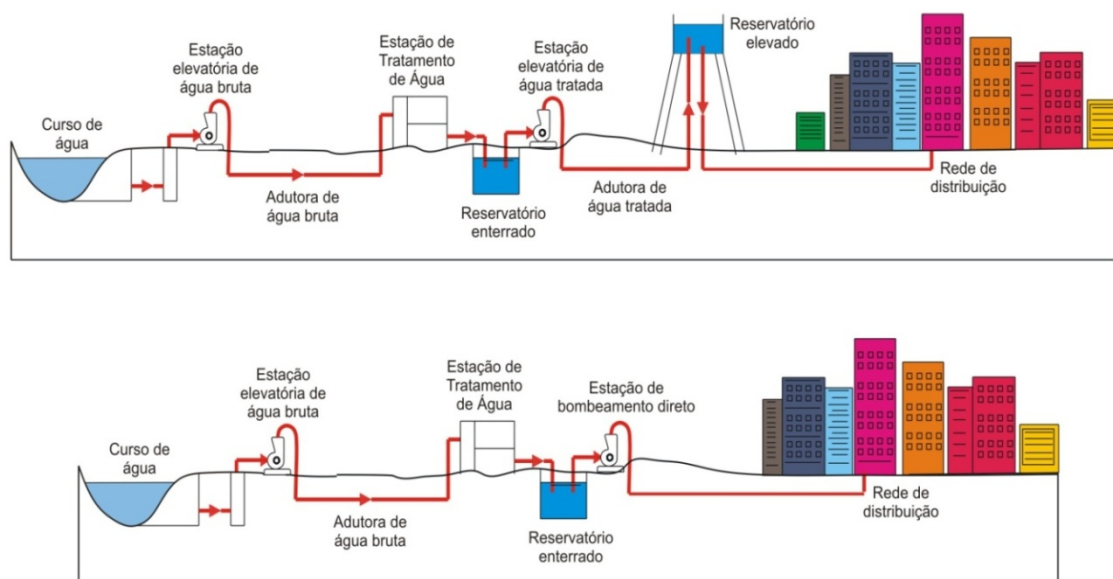


Figura 2.1 - Sistemas de abastecimento de água (TSUTYIA, 2001)

Os sistemas de abastecimento de água com utilização de reservatórios tem a finalidade de regularizar a vazão, dotar o sistema de segurança no abastecimento quando de paralizações, conter reserva para incêndios e regularizar as pressões da rede de distribuição, além de permitir uma possível parada do bombeamento no horário de pico elétrico e um aumento no rendimento da estação elevatória. O aumento do rendimento é devido a altura manométrica e vazão permanecerem praticamente com valores constantes possibilitando os conjuntos motor-bomba operar próximo ao ponto de melhor rendimento.

Os sistemas com bombeamento direto na rede de distribuição de água, normalmente são utilizados com reservatórios de jusante, o conjunto motor-bomba trabalha com o ponto de funcionamento móvel, percorrendo sua curva característica conforme a demanda aumenta ou diminui. A pressão na rede de distribuição com a utilização de bombeamento direto deve ser monitorada para que em determinados momentos de baixo consumo não se obtenha um grande número de rompimentos na rede de distribuição, aumentando as perdas de água e energia. Segundo Bezerra (2009), a utilização de sistemas automáticos para o controle da pressão de sistemas de distribuição de água por meio do uso de válvulas de controle e conversores de frequência acoplados a conjuntos motor-bomba se mostra satisfatório, podendo ser implementado facilmente em sistemas de distribuição. O uso destes equipamentos proporciona a redução das perdas e do consumo de água e energia elétrica.

Segundo Gomes (2004), no dimensionamento de cada componente, o fator econômico que leva em conta os custos de investimento e de operação do sistema, exerce um papel marcante e diferenciado, principalmente nas unidades onde a água é conduzida ao longo das tubulações, sujeita a perdas acentuadas de energia no seu transporte. O estudo econômico é necessário, já que o dimensionamento hidráulico de sistemas de tubulações é hidraulicamente indeterminado, admitindo inúmeras soluções de cálculo ou alternativas de projeto. Portanto, é preciso encontrar a alternativa de custo mínimo correspondente à solução ótima, que será a resposta a ser encontrada pelos métodos de dimensionamento econômico.

Como alternativas de redução de custo nas Companhias de Saneamento, temos as que combatem as perdas de energia elétrica, as perdas físicas de água (reais e aparentes) e as que envolvem a gestão da demanda, visando o controle do uso da água e energia junto aos consumidores, proporcionando benefícios para as empresas e para os usuários do sistema.

Nos últimos anos o custo da energia elétrica nos sistemas de bombeamento do setor de saneamento no Brasil tem se acentuado significativamente e já constitui o segundo item de despesas nas empresas prestadoras de serviço (GOMES, 2005).

Por outro lado, devido à limitação, a curto e médio prazo, do aumento da disponibilidade energética, é necessário que haja uma redução da energia consumida no setor de saneamento.

Uma maneira de diminuir o consumo e reduzir os custos sem diminuir a funcionalidade do sistema está fundamentada na redução dos desperdícios de energia elétrica, que, nos sistemas de abastecimento de água, podem ser decorrentes de erros de concepção de projetos e tecnologias mal utilizadas, mau dimensionamento dos sistemas, procedimentos operacionais inadequados, formas contratuais indevidas, manutenções precárias, idade avançada dos equipamentos e desperdícios de água.

## **2.2 Instalações de Bombeamento (Estação Elevatória)**

As instalações de bombeamento ou elevatórias são sistemas compostos por bombas e tubulações que pressurizadas, transportam a água a fim de conduzi-la aos pontos de consumo e outras unidades, vencendo os desníveis topográficos e as perdas de carga ao longo das tubulações. Estas instalações são usadas, principalmente, nos sistemas de abastecimento urbano de água, em projetos de irrigação, em estações elevatórias de esgotos, em instalações prediais, etc.

A maioria dos sistemas de distribuição de água atuais possui vários conjuntos motor-bomba, seja para recalcar a água de mananciais de superfície ou de poços, seja para recalculas a pontos distantes ou elevados.

A bomba centrífuga funciona da seguinte maneira: uma fonte externa à bomba, geralmente um motor elétrico, gira um ou mais rotores dentro do corpo da bomba, movimentando o líquido e criando a força centrífuga que se transforma em energia de pressão e cinética. A diferença de pressão na sucção e no recalque da bomba é conhecida como altura manométrica total (AMT) e determina a capacidade da bomba em transferir líquido, em função das pressões que deverá vencer, expressa em energia de pressão.

A escolha de uma bomba centrífuga é feita essencialmente através da determinação da vazão e da AMT. As curvas características das bombas relacionam a vazão recalçada com a AMT, com a potência absorvida, com o rendimento e, às vezes, com a altura máxima de sucção. De modo geral, as curvas características têm o aspecto apresentado na Figura 2.2. O ponto de operação é determinado pelo cruzamento das curvas vazão versus altura manométrica total e do sistema.

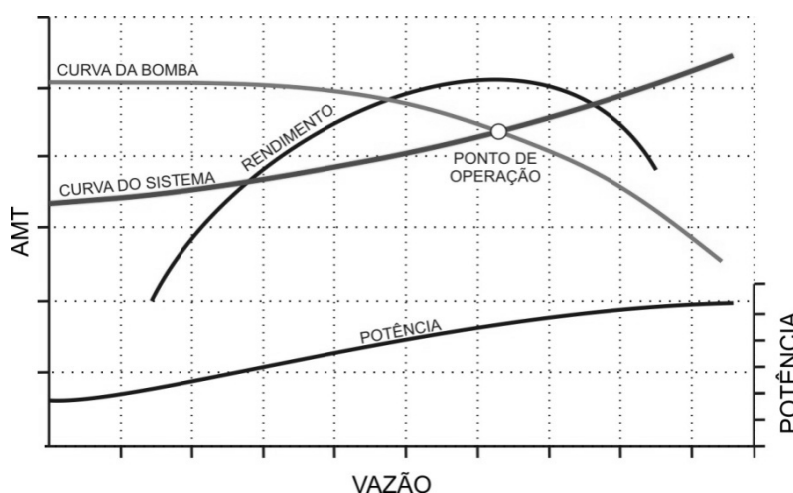


Figura 2.2 - Curvas característica de uma bomba centrífuga

A AMT corresponde ao desnível geométrico entre os níveis da água na tomada e na chegada acrescido das perdas de energia. A perda de energia, também denominada de perda de carga, é a energia dissipada devido ao efeito da viscosidade ou atrito interno, unido ao efeito da turbulência ou dos choques entre as partículas do fluido, mais as perdas localizadas (perdas nas conexões, peças, válvulas, etc).

A *velocidade de rotação* é caracterizada pela velocidade que a máquina de acionamento imprime à bomba. No caso de motor elétrico, essa velocidade é função direta da frequência e do número de pólos do motor. De acordo com a rotação, as bombas podem ser classificadas em:

- Bombas de baixa rotação                      menor ou igual a 1.200 rpm
- Bombas de média rotação                    1.500 a 1.800 rpm
- Bombas de alta rotação                      maior que 3.000 rpm

A *eficiência* ou *rendimento* da bomba é a razão entre a potência útil (potência hidráulica) e a potência fornecida no eixo da bomba para realizar o trabalho. O rendimento é expresso pela Equação (2.1) e a potência útil pela Equação (2.2).

$$\eta_b = \frac{P}{P_{\text{eixo}}} \quad (2.1)$$

$$P_{\text{ot}} = \frac{Q \cdot \rho \cdot g \cdot H}{\eta_b} \quad (2.2)$$

Onde:

$\eta_b$  - rendimento da bomba;

Pot - potência, em kW;

Peixo - é a potência fornecida pelo motor elétrico ao eixo da bomba, em kW;

Q - vazão, em m<sup>3</sup>/s;

$\rho$  - densidade do líquido bombeado;

g - aceleração da gravidade, em m/s<sup>2</sup>; e

H - altura manométrica total, em mca.

A Figura 2.3 uma instalação típica de bombeamento de água.

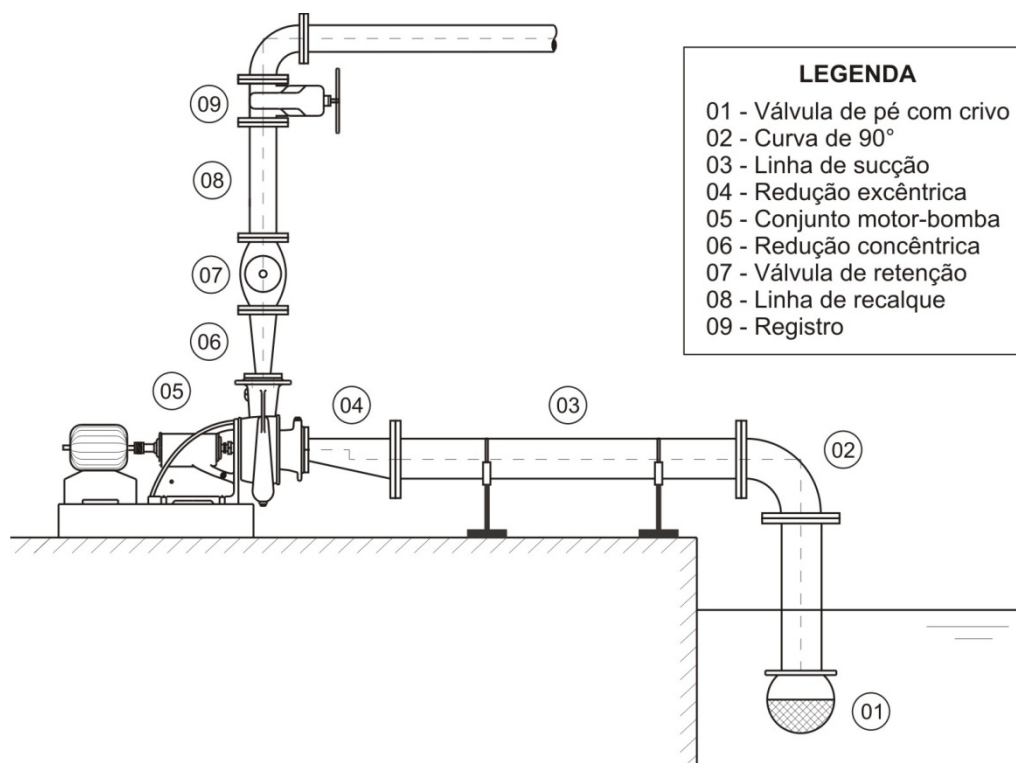


Figura 2.3 - Representação típica de um sistema de bombeamento de água

Para o projeto de uma estação elevatória de água devemos verificar a melhor localização, que pode ser próximo ao manancial, sobre manancial (captação flutuante), junto às estações de tratamento de água, junto aos reservatórios de distribuição de água ou para reforço na adução ou na rede de distribuição de água. Quanto à escolha do terreno deve-se verificar:

- as dimensões satisfazem as necessidades atuais e as possíveis ampliações;
- o custo e a facilidade de desapropriação; a disponibilidade de energia elétrica;
- o terreno e a topografia da área;
- a facilidade de acesso;
- o desnível geométrico e o trajeto mais curto da tubulação de recalque;
- o mínimo remanejamento de interferências; e
- a harmonização da obra com o ambiente circunvizinho.



Para a determinação da vida útil de um projeto de estação elevatória de água deve ser observada alguns fatores limitantes como a maior ou menor dificuldade de ampliação das instalações, a população futura e a característica do crescimento, taxas de juros e amortização do financiamento, nível econômico da população atendida, facilidades ou dificuldades na obtenção de financiamento, funcionamento da instalação nos primeiros anos, quando trabalha com folga. A vida útil dos equipamentos normalmente é de 50 anos para as tubulações e de 25 anos para as bombas, motores e válvulas.

As estações elevatórias podem ser do tipo EEAB (estação elevatória de água bruta), EEAT (estação elevatória de água tratada), BOOSTER (estação elevatória utilizada para reforço na adução ou na distribuição).

Com relação à instalação das bombas, as elevatórias podem ser classificadas em estações elevatórias de poço seco e estações elevatórias de poço úmido, quando a bomba localiza-se fora da água é denominada de poço seco, caso contrário, de poço úmido.

### **2.3 Dimensionamento Econômico de Sistemas de Bombeamento de Água**

O projeto de uma instalação de recalque abrange o dimensionamento das tubulações de recalque e de sucção, com o consequente cálculo da potência do conjunto elevatório. O projeto, sob o ponto de vista técnico e econômico, está condicionado, primordialmente, ao dimensionamento hidráulico da tubulação de recalque, já que esta constitui, na grande maioria dos projetos, no componente mais importante pela sua magnitude econômica, em comparação com o sistema de sucção e bombeamento. Conforme o diâmetro encontrado para a adutora, os custos de implantação e de operação do sistema poderão variar, obtendo-se assim projetos mais ou menos onerosos.

No dimensionamento de um conduto de recalque há mais *incógnitas* do que equações disponíveis, podendo haver inúmeras soluções para o diâmetro (e para a velocidade) que atendem à vazão demandada. Essa indeterminação pode ser superada admitindo-se uma restrição hidráulica ao problema, que pode ser uma perda de carga máxima admissível no conduto, uma velocidade recomendada de escoamento, ou então, admitindo-se um diâmetro já normalizado, dentre os comercialmente disponíveis. No entanto, a metodologia mais adequada para resolver esse problema constitui-se na introdução do critério econômico de se

obter a alternativa de projeto que minimize o custo total do sistema, composto pelo de implantação e o de operação.

O custo total do sistema composto pela implantação e operação é antagônico, ou seja, quando um aumenta o outro diminui e vice-versa. Ao se escolher um diâmetro menor para a adutora, haverá uma diminuição no seu custo de implantação, mas, em contrapartida, o custo de operação (energético) será maior. De modo oposto, ao se optar por um diâmetro maior, haverá uma diminuição no custo de operação, devido à diminuição das perdas de carga, e um consequente aumento no custo de implantação da tubulação de recalque. Para uma mesma vazão há uma considerável diminuição da perda de carga quando se aumenta o diâmetro da tubulação de recalque, pois esta varia aproximadamente com o inverso da quinta potência do diâmetro, barateando assim, a energia que será gasta no decorrer da utilização da instalação. Quando ocorre um aumento do diâmetro utilizado, aumentar-se-á o custo total de investimento da tubulação, pois quanto maior o diâmetro de um tubo, constituído por um mesmo material e de uma mesma classe, maior será o custo da implantação. Assim sendo, faz-se necessário determinar um diâmetro ótimo para a tubulação de recalque, de tal forma que se obtenha, para uma vazão determinada, o menor custo do sistema, composto este pela soma do custo de implantação, e o de operação. O maior peso deste último corresponde ao gasto de energia elétrica. O custo de implantação abrange a soma do custo dos tubos, das peças de conexão, do conjunto motor-bomba, e as despesas com escavação e montagem.

Há, na literatura, vários métodos desenvolvidos para se calcular o diâmetro economicamente ideal para a tubulação em sistemas de saneamento (CAMP, 1952; CUOMO e VILLELA, 1961; DEB, 1978, COIADO e RIVELLI, 1993; GOMES, 2001; ZOCOLER *et al.*, 2004). Uma das primeiras fórmulas da hidráulica para o dimensionamento econômico de tubulações de recalque, que ainda, é comumente usada pelos engenheiros hidráulicos, é a de Bresse<sup>1</sup> (Equação (2.3)), na qual o diâmetro ótimo da tubulação de recalque está relacionado à vazão requerida do sistema através de um coeficiente “K”.

---

<sup>1</sup> Jaques Antoine Charles Bresse, engenheiro francês, civil e hidráulico, professor de matemática, nascido em 1822, em Vienne, Isère. Estudou na Escola Politécnica de Paris e na École des Ponts et Chaussées, tendo posteriormente entrado para o seu quadro sucedendo Belanger como professor de Matemática. Iniciou-se na pesquisa no campo da elasticidade, mas sua primeira publicação notável foi Cours de mécanique appliquée, que continha formulações precisas sobre ressaltos hidráulicos e movimentos gradualmente variados. Posteriormente, criou a famosa fórmula de Bresse, para o dimensionamento econômico de tubulações de recalque, uma das primeiras fórmulas da hidráulica, que, ainda hoje, é amplamente utilizada. Eleito, em 9 de outubro de 1880, membro da seção de mecânica da Académie des Sciences. Jaques Bresse faleceu no dia 22 de maio de 1883 em Paris, na França.

$$D = K \times \sqrt{Q} \quad (2.3)$$

Onde:

D - diâmetro interno da tubulação, em m;

Q - vazão, em m<sup>3</sup>/s; e

K - coeficiente de Bresse.

Comumente, a adoção da fórmula de Bresse equivale à fixação de uma velocidade, que seria a mais recomendada em termos de economia e segurança do sistema. Os valores dessa velocidade média e do respectivo valor de “K”, segundo vários autores, são mostrados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Velocidades indicadas na literatura e correspondentes valores de K

Autor	Velocidade (m/s)	Coefficiente de Bresse “K”
SILVESTRE (1979)	0,65 - 2,26	0,75 - 1,40
AZEVEDO NETTO (1998)	0,57 - 2,60	0,70 - 1,50
PORTO (1998)	0,75 - 2,61	0,70 - 1,30
MUÑOZ (2000)	0,57	1,50
TSUTYIA (2004)	1,00 - 1,50	0,92 - 1,13
ZOCOLER <i>et al.</i> (2004)	0,75 - 2,61	0,70 - 1,30

Porém, o critério de dimensionamento desenvolvido por Bresse é passível a incertezas, uma vez que o coeficiente “K” é função de diversos fatores e tem que ser arbitrado conforme a experiência do projetista, o que tornar esse método vulnerável à obtenção do diâmetro econômico.

Com o advento de novas ferramentas metodológicas, principalmente nas áreas de pesquisa operacional, tem-se desenvolvido critérios mais precisos de dimensionamento de sistemas de recalque, dentre os quais se pode destacar o Método Baseado na Variação Linear dos Custos das Tubulações. O método é bastante simples e parte do princípio, admitido por

Mendiluce (1966), de que o custo da tubulação varia linearmente com o seu diâmetro, conforme a Equação (2.4).

$$C(D) = \lambda D \quad (2.4)$$

Onde:

$C(D)$  - preço da tubulação por metro de comprimento (\$/m);

$D$  - diâmetro normalizado do tubo, em metros;

$\lambda$  - custo do tubo, por metro de comprimento, e por metro de diâmetro (\$/m/m).

Como os custos de implantação e de operação da instalação incidem em tempos distintos, já que o custo de implantação é fixo e atua no início do empreendimento, enquanto que o custo energético incide ao longo da vida útil do projeto. Nesse caso, para que se possam somar os dois custos, deve-se amortizar o custo atual de implantação e adicionar ao custo anual de energia, ou calcular o valor presente (atualizado) do custo energético, adicionando-o, posteriormente, ao custo fixo de implantação.

O custo atualizado da energia é dado pelo produto entre o custo energético anual e o coeficiente de atualização da energia “ $F_a$ ”, expresso pela Equação (2.5).

$$F_a = \frac{(1+e)^n - (1+i)^n}{(1+e) - (1+i)} \times \frac{1}{(1+i)^n} \quad (2.5)$$

Onde:

$i$  - a taxa de juros anual;

$e$  - taxa de aumento anual da energia;

$n$  - período de amortização (em anos), que normalmente considera-se como sendo igual à vida útil da instalação.

Logo, o diâmetro mínimo (ótimo teórico) será dado pela Equação (2.6).

$$D_{\text{ótimo}} = 1,913 \left( \frac{\beta p n_b F_a}{\lambda \eta} \right)^{0,166} \sqrt{Q} \quad (2.6)$$

Na determinação do valor de “ $\lambda$ ” da Equação (2.4) devem ser computados, além do preço unitário do tubo, incluindo transporte e impostos, os gastos com a escavação e montagem. O parâmetro de custo “ $\lambda$ ” e a variável de perda “ $\beta$ ” variam com o diâmetro da tubulação, o que poderia, a princípio, dificultar o cálculo do diâmetro ótimo através da Equação (2.6). No entanto, esse aspecto não se constitui em um problema para a obtenção do diâmetro ótimo, já que, para qualquer valor de “ $\lambda$ ” e “ $\beta$ ”, obtidos a partir de um determinado diâmetro, entre os comercialmente disponíveis, o valor de  $D_{\text{ótimo}}$  se situará em torno de um diâmetro nominal, que será o ótimo definitivo para o projeto.

Como objetivo de analisar o comportamento de “ $K$ ” em relação às várias possibilidades de operação e implantação de instalações de recalque, Bezerra *et al.* (2005) realizou um estudo comparativo de dimensionamento entre seis elevatórias através da fórmula de Bresse, variando-se o valor de “ $K$ ” segundo a equação 13. Para cada estudo de caso, variou-se cada um dos parâmetros da equação 13 para verificar a correspondente variação de “ $K$ ”. Foram encontrados valores que situados entre 1,0 e 1,3, diferindo do intervalo citado, normalmente, na literatura (compreendido entre 0,7 e 1,5, ver Tabela 2.2), podendo-se concluir que para os casos estudados a amplitude de variação do valor de “ $K$ ” é menor que a indicada na literatura.

## 2.4 Caracterização do Setor de Saneamento Básico

O setor de saneamento básico, que engloba os serviços de água e esgoto, detém cerca de 2,5% do consumo global de energia elétrica do Brasil, segundo a última informação disponibilizada pela ELETROBRÁS. Este consumo refere-se aos diversos usos nos processos de abastecimento de água e de esgotamento sanitário, com destaque para os equipamentos

motor-bomba, que são normalmente responsáveis por 90% do consumo nestas instalações. Mantidas a proporção, isto significa um consumo aproximado de 10 bilhões de kWh/ano.

Os gastos da energia de bombeamento, na grande maioria das vezes, chegam a ultrapassar, ao longo da vida útil dos projetos, os custos de investimento das instalações. Brailey e Jacobs (1980) relatam que em torno de 7% da energia elétrica consumida nos Estados Unidos são utilizados pelas empresas de saneamento.

Os custos de energia representam valiosos recursos orçamentários para outras funções municipais também importantes assim como educação, transporte público, e assistência médica. O consumo de energia na maioria dos sistemas de água em todo o mundo poderia ser reduzido em pelo menos 25%, por meio de ações de efficientização de sistemas na área de saneamento básico (ALLIANCE, 2002).

De acordo com relatório publicado em 2003 pela CAGEPA (LEITE, 2003), da fatura mensal de energia elétrica paga pela empresa, constata-se que em média 93% devem-se aos gastos com as elevatórias de água, sendo o restante atribuído às elevatórias de esgotos e atividades administrativas, conforme ilustra a Figura 2.4. As estratégias ultrapassadas de funcionamento de bombas são responsáveis por uma parcela considerável daquele percentual.

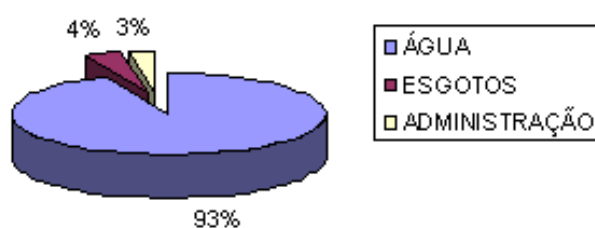


Figura 2.4 - Distribuição percentual dos gastos com energia elétrica na CAGEPA  
(PEDROSA FILHO, 2006)

## 2.5 Alternativas para a Redução dos Custos com Energia Elétrica

A fim de reduzir os gastos com energia elétrica no setor de saneamento, surge a necessidade de implementação de ações que se iniciam pelo diagnóstico do sistema, passando às ações administrativas seguidas da otimização dos equipamentos, que geralmente consiste

na última ação na redução dos custos. Porém, para que se obtenha maiores reduções dos custos de energia elétrica, faz-se necessário considerar também a otimização hidráulica, que leva em conta os aspectos operacionais. Entretanto, para isso, há necessidade de estudos e investimentos que nem sempre são pequenos, razão pela qual esta ação é desconsiderada pela maioria concessionárias do setor.

Segundo Tsutyia (2001), a maior parte dos métodos utilizados para a redução do custo de energia em sistemas de abastecimento de água, pode ser agrupada em uma das seguintes categorias:

- Conhecimento do sistema tarifário,
- Redução da potência do equipamento;
- Alteração do sistema operacional;
- Automação do sistema de abastecimento de água;
- Geração de energia elétrica.

Nesta pesquisa serão abordadas medidas de redução do consumo de energia elétrica nos sistemas de bombeamento através da alteração do sistema operacional.

## **2.6 Controle Operacional versus Eficiência do Sistema**

De acordo com Gomes (2005), as principais medidas operacionais que visam a diminuição do custo energético dos sistemas de abastecimento englobam a alteração do sistema de bombeamento-reservação, dos procedimentos operacionais das ETAs e a utilização de inversor de frequência.

De uma maneira geral, os médios e grandes sistemas públicos adutores de água possuem um elevado número de bombas hidráulicas e válvulas de controle, o que torna a definição de regras operacionais, para um período estendido, uma tarefa bastante complicada (TSUTIYA, 2001), fazendo com que o administrador não tenha pleno domínio do comportamento do sistema e, conseqüentemente, adote uma política operacional sujeita a um

maior grau de empirismo, objetivando principalmente a garantia da continuidade do abastecimento público, sem a preocupação de alcançar uma eficácia operacional e econômica do sistema.

Grande parte dos administradores dos sistemas públicos, ao adotar uma política de agendamento do estado de bombas, desconsidera a preocupação com os quilowatts consumidos pelos motores em funcionamento e as tarifas diferenciadas pelo horário estabelecidas para grandes consumidores pelas concessionárias, contribuindo para que o gasto com energia elétrica seja o segundo maior item no orçamento das despesas de exploração.

A fim de reverter este quadro, vem surgindo o interesse por parte das empresas de implementar ações através de ferramentas que ajudem a compreender o funcionamento do conjunto de forma sistêmica e minimizem os efeitos adversos.

Para um aproveitamento melhor e mais racional do fornecimento de energia elétrica, a ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica criou as tarifas diferenciadas. São modalidades tarifárias estruturadas para aplicação de preços diferenciados para a demanda de potência e consumo de energia elétrica, conforme o horário de utilização durante o dia (ponta e fora de ponta) e nos períodos do ano (seco e úmido). As tarifas praticadas no horário de ponta, ou no período seco, são mais caras.

Esta atribuição de preços diferenciados se justifica pela necessidade de se estimular o deslocamento de parte da carga para horários em que o sistema elétrico estiver menos carregado e de se orientar o consumo para períodos do ano em que houver maior disponibilidade de água nos reservatórios das usinas. Isso representa grande economia para o país, racionalizando e garantindo o fornecimento regular da energia.

O horário de ponta refere-se ao período definido pela concessionária e composto por 3 (três) horas diárias consecutivas, exceção feita aos sábados, domingos, terça-feira de carnaval, sexta-feira da Paixão, *Corpus Christi*, dia de finados e os demais feriados definidos por lei federal, considerando as características do seu sistema elétrico.

O horário fora de ponta trata do período composto pelo conjunto das horas diárias consecutivas e complementares àquelas definidas no horário de ponta. As três horas de ponta, geralmente, estão compreendidas entre as 17:00 e 21:00 h, podendo ser das 17:30 às 20:30 h, das 18:00 às 21:00 h, dependendo da região.



A maior ou menor qualidade da operação de um sistema de abastecimento de água está diretamente ligada a sua eficiência, refletida pela qualidade do serviço prestado e pela racionalização do uso da água e da energia. A eficiência do serviço pode ser mensurada pela adequação das vazões e pressões disponíveis aos pontos de consumo, pela garantia da água potável fornecida ao consumidor, pela intermitência ou não do abastecimento, pelos níveis de perdas de água e pelo uso racional da energia.

O conhecimento da eficiência do sistema de abastecimento, como também as decisões a serem tomadas com o objetivo de aumentá-la, depende do conhecimento e controle da operação do sistema como um todo. Durante muito tempo o controle operacional de sistemas de abastecimento, por parte das empresas de saneamento, foi executado com o apoio de equipamentos de comunicação e, principalmente, da experiência da mão-de-obra encarregada do serviço. Nos últimos anos surgiram softwares que vêm sendo aplicados, cada vez mais, para representarem os sistemas físicos e auxiliarem nas tomadas de decisão com o propósito de melhorar a eficiência da operação. Trata-se de modelos computacionais que representam o sistema de abastecimento como um todo e simulam sua operação ao longo do tempo.

O surgimento destes modelos, baseados nas leis físicas que regem o escoamento de fluidos em redes de abastecimento, é ainda recente. Ainda assim, existem atualmente dezenas de modelos hidráulicos desenvolvidos em vários países, destinados à simulação da operação de sistemas de abastecimento de água. No entanto, o conhecimento e o domínio desta importante ferramenta ainda é uma novidade para a grande maioria dos profissionais que trabalham nesse setor. Através das simulações hidráulicas muitas análises podem ser feitas sobre o comportamento da operação do sistema de abastecimento. Dessa maneira, poderão ser tomadas decisões sobre possíveis intervenções físicas ou operacionais, visando melhorar a eficiência do sistema.

A importância do emprego de um modelo de simulação na fase de planejamento do sistema de abastecimento é inquestionável, por permitir ao projetista antever as inúmeras situações operacionais do sistema e assim optar por alternativas de projeto que possam melhorar a qualidade do serviço, associada à minimização dos custos de energia.

Dentre os modelos hidráulicos de simulação e análises já desenvolvidos, um se destaca por sua qualidade e pela quantidade de seus usuários em muitos países. Trata-se do

EPANET 2.00.12, que além de ter interface Windows, facilitando o seu emprego, é um programa de domínio público, que pode ser utilizado livremente por qualquer usuário.

## **2.7 Utilização de Inversor de Frequência**

Em sistemas de abastecimento onde a utilização de reservatórios elevados reflete em custos mais elevados ou a altura geométrica de recalque é menor que o somatório das perdas de carga ao longo da tubulação, o bombeamento da água é feito diretamente ao consumidor, com o uso de variadores de rotação, que irão controlar a vazão em função da demanda, o que implica em manter a pressão constante ou em um valor pré-estabelecido.

Este controle deve ser cuidadosamente efetuado, pois ao passo que a demanda diminui, a pressão de descarga da bomba aumenta, levando a vazamentos e comprometimento da resistência das tubulações na rede e pressões elevadas nas cotas mais baixas. No entanto, se a demanda aumentar, a pressão de descarga da bomba irá diminuir, provocando déficit de pressão e prejudicando principalmente os consumidores localizados nas cotas mais altas.

O tipo de variador de rotação mais utilizado em sistemas de abastecimento de água é o inversor de frequência, que é um equipamento elétrico capaz de produzir uma variável nos valores da frequência elétrica que alimenta o motor, promovendo uma variação de sua rotação de forma contínua.

Como descreve David (1998, *apud* TSUTIYA, 2001), a variação da frequência é feita em um painel que recebe a energia na frequência da rede, 60 Hz no Brasil, comandada por um sinal elétrico proveniente de um sensor que pode ser de pressão para o caso de redes de distribuição de água ou de nível para estações elevatórias de esgotos. Esse sinal, gerado no sensor pode ser convertido por um transdutor na faixa de 4 a 20 mA e transmitido mesmo a distância para o painel para controle da variável da frequência, de modo a provocar a mudança de rotação no conjunto motor-bomba.

Na Tabela 2.3 podemos relacionar os objetivos e as vantagens da utilização de inversores de frequência em sistemas de abastecimento de água.

Tabela 2.3 - Aplicação de inversores de frequência - objetivos e vantagens

Aplicação de inversores de frequência	
Objetivos	Vantagens
Proporcionar à estação elevatória operar da forma mais eficiente possível, atendendo a demanda com o menor gasto de energia	Permite partida suave de motores
Redução da potência efetiva equivalente à redução da rotação	Fator de potência próximo a 1
Redução da energia consumida pela estação elevatória	Rampa de aceleração e desaceleração ajustável
Evitar saltos operacionais quando necessário aumentar a vazão aduzida pela estação elevatória	Alta eficiência (forma de onda da corrente da saída podendo ser considerada praticamente senoidal)
Economia de energia	

## 2.8 O Estado da Arte

A revisão da literatura apontou que a maioria dos trabalhos científicos do setor de saneamento é voltada para a modelagem numérica da otimização da operação de sistemas de distribuição de água. Diversos trabalhos têm utilizado o EPANET concomitantemente com módulos de otimização para a determinação da operação ótima de sistemas de distribuição de água (SAKARYA e MAYS, 2000; OSTFELD e SALOMONS, 2003; GOLDMAN e MAYS, 2005; CARRIJO, 2004; PEDROSA FILHO *et al.*, 2007). ZAHED FILHO (1990) destacou que os modelos de simulação devem ser usados na operação em tempo real, de forma a verificar a resposta dos sistemas às alterações impostas. A seguir são apresentadas algumas pesquisas recentes.

Com o propósito de gerenciar reservatórios de abastecimento de água foi desenvolvido por León *et al.* (2000) um modelo para supervisionar o sistema da cidade de Sevilha na Espanha. Os autores afirmam que a aplicação do sistema de apoio à decisão, denominado EXPLORE, resultou numa redução de custos de energia da ordem de 25%. O modelo de controle do nível de água nos reservatórios funciona com base em regras heurísticas organizadas a partir do conhecimento físico do sistema, do histórico da variação de demandas, das tarifas de energia elétrica e da experiência prática dos operadores. O estudo

resultou num sistema inteligente de definição da melhor regra de operação, como função da vazão das bombas, das demandas instantâneas e do modelo de cálculo do comportamento da água nos reservatórios.

Um programa computacional semelhante, denominado PILOTE, foi estudado por Lannuzel e Ortolano (1989), para otimizar a operação de recalque a partir de dois reservatórios de armazenamento, utilizando dez bombas de capacidades variadas que abastecem um reservatório elevado localizado num subúrbio de Paris. O programa integra um modelo matemático, com regras heurísticas, que reduzem o número de estratégias de combinações possíveis, produzindo ótimos resultados para o problema num tempo considerado razoável. Com base no consumo horário calculado estatisticamente, o PILOTE define a operação das bombas buscando o custo mínimo.

Segundo o raciocínio de que a operação de sistemas de distribuição de água afeta a qualidade do líquido, Sakarya e Mays (2000) incorporaram as funções de qualidade da água presentes no *Toolkit* do EPANET 2 ao método de otimização do gradiente reduzido generalizado, GRG2, para encontrar uma combinação horária de uma bomba instalada numa rede hipotética que viesse minimizar três diferentes funções objetivo: 1) desvio dos valores de concentração das substâncias químicas presentes na água em relação a valores tolerados de concentração; 2) tempo de funcionamento das bombas; 3) custo total de energia elétrica. As restrições do problema foram tratadas pelo Método Langrangiano. A eficiência e a tarifa de energia foram consideradas constantes no modelo. Com essa metodologia não só as restrições hidráulicas são levadas em consideração, mas também as restrições de qualidade da água reguladas pelos órgãos governamentais. Segundo PEDROSA FILHO (2006), os resultados mostraram que a otimização foi alcançada para os objetivos propostos, entretanto a custa de muitos acionamentos e desligamentos da bomba o que torna a metodologia pouco viável de implementação prática.

Nas cidades em que mananciais subterrâneos são explorados como fonte principal de suprimento de água potável, tem-se investigado as melhores condições de operação dos vários poços construídos com aquela finalidade (PEDROSA FILHO, 2006). Um exemplo é o estudo desenvolvido por Ribeiro (2000) na cidade paulista de Araraquara que testou a técnica dos Algoritmos Genéticos (AG) como ferramenta para definir controles operacionais para uma bateria de poços existentes de forma a minimizar os custos de energia elétrica utilizada na produção da água subterrânea. Para tanto, testou a influência da vazão bombeada, períodos de operação, capacidade dos reservatórios e demandas de água no sistema..

Sotelo *et al.* (2001) considerou a minimização simultânea de quatro objetivos através de dois métodos: SPEA e NSGA. O objetivo do trabalho era otimizar o custo de energia elétrica, o custo de manutenção de bombas, o custo de recuperação do nível inicial do reservatório e o custo da demanda de potência em uma rede teórica formada por 5 bombas e 1 reservatório. Através de métricas de comparação, aplicadas aos resultados de várias aplicações, chegaram a conclusão que o SPEA supera amplamente o NSGA e a solução manual de um especialista em problemas de bombeamento.

Barbosa *et al.* (2002) utilizaram parte do Sistema Adutor de Bodocongó, localizado em Campina Grande-PB (Brasil), para desenvolver um estudo de verificação do melhor desempenho energético das estações de bombeamento para várias condições iniciais de nível de água nos reservatórios. Os gastos com energia elétrica para cada cenário pesquisado e também para diferentes tarifas de energia elétrica mostraram que as diferentes estratégias operacionais resultaram numa discrepância de até 26% entre o melhor e o pior cenário pesquisado.

Kazantzis *et al.* (2002 *apud* CARRIJO, 2004) propuseram uma metodologia para a otimização da operação de uma estação elevatória considerando dois objetivos: maximização do bombeamento no período de tarifa mínima e minimização das cargas das bombas com a racionalização dos níveis dos reservatórios. Foi desenvolvida uma ferramenta de otimização utilizando Algoritmos Genéticos para encontrar os controles ótimos para uma faixa de demandas diárias. A nova metodologia foi testada em parte do sistema de abastecimento de água de *Murray Bridge* na Austrália. Segundo os autores, os resultados apresentaram uma redução entre 15 e 20% nos custos relativos à energia elétrica do sistema em questão.

Biscos *et al.* (2003) apresentaram um método de otimização, que utiliza Programação Mista-Inteira Não-Linear, para controlar o processo de distribuição de água potável. Foram considerados, prioritariamente, o regime operacional dos conjuntos motor-bomba e a manutenção do nível de concentração de cloro nos pontos mais desfavoráveis. O primeiro objetivo é considerado pela manutenção de volumes de emergência mínimos em todos os reservatórios, enquanto o segundo objetivo minimiza a dosagem de cloro e exigências de redosagem. A combinação de elementos dinâmicos (*e.g.* reservatórios) e elementos discretos (bombas, válvulas, etc.) torna o processo de otimização complexo. Segundo os autores, os resultados experimentais foram bastante satisfatórios.

López-Ibáñez *et al.* (2005) estudaram a operação ótima de conjuntos motor-bomba, consideraram como principal objetivo a ser minimizado os custos elétricos de bombeamento e como segundo objetivo a maximização do tempo médio que uma bomba fica desligada. O EPANET 2 foi utilizado como simulador para verificar as restrições hidráulicas da rede e um algoritmo evolucionário multiobjetivo foi empregado para otimizar o problema, utilizando critérios novos de dominância e operadores genéticos adaptados. Os autores aplicaram a metodologia a uma rede hipotética utilizada por Zyl *et al.* (2004).

Carrijo (2004) utilizou uma parte do sistema de distribuição de água da cidade de Goiânia (GO) para aplicar um estudo de otimização operacional desenvolvido com dois objetivos principais: minimização dos custos de energia elétrica e maximização dos benefícios hidráulicos (índice de atendimento da demanda; níveis adequados de água nos reservatórios e as pressões mínimas e máximas nos pontos de demanda). O modelo computacional tem como base um módulo simulador, que utiliza os códigos do EPANET 2; um módulo otimizador que utiliza algoritmos genéticos multiobjetivo e um módulo indutor de regras através do algoritmo de aprendizado de máquina.

Trautwein Júnior e Vieira (2007) apresentaram o resultado da avaliação da aplicação de redes neurais artificiais para previsão de consumo de água em intervalos menores que uma hora, como apoio ao planejamento da operação de sistemas de abastecimento de água. Os autores afirmam que os resultados foram satisfatórios e que apesar de não poderem ser generalizados, devido à dinâmica e a diversidade operacional dos sistemas de distribuição de água, eles mostram que a técnica deve ser explorada pelos pesquisadores do setor.

Ingeduld *et al.* (2006) desenvolveram um *EPANET modificado* para simulação de sistemas de distribuição de água rurais e/ou intermitentes. Estes sistemas não são bem modelados pelo EPANET porque estão sujeitos a pressões muito baixas e esvaziamento dos tubos, além de possuírem, geralmente, problemas estruturais graves que interferem nos parâmetros hidráulicos. O *EPANET modificado* foi ajustado para modelar corretamente sistemas com pressões baixas e tubulações “secas”. O modelo hidráulico proposto foi aplicado ao sistema de distribuição de água de *Shillong* na Índia e de *Dhaka* em Bangladesh.

Bounds *et al.* (2006) apresentaram um programa computacional chamado de FINESSE, desenvolvido para a gestão energética de um sistema de distribuição de água de grande escala. O sistema de distribuição de água gerido pelo FINESSE é responsável pelo fornecimento de água para diversas cidades, sendo formado por 35 bombas, 63 válvulas de

controle e 16 reservatórios de nível variável. A aplicação do programa resultou em uma redução de 14% no consumo de energia elétrica.

Pedrosa Filho *et al.* (2007) desenvolveram um sistema de apoio a decisão com vistas à definição da melhor estratégia diária dos estados das bombas e válvulas de um sistema adutor, de forma a resultar na minimização dos gastos com energia elétrica. A metodologia empregada na busca do ótimo operacional ao longo de 24 horas, fundamentou-se na técnica estocástica dos Algoritmos Genéticos acoplada ao simulador hidráulico EPANET 2. A minimização da função representada pelos custos de bombeamento é tratada pelo Método de Penalidades. A aplicabilidade da metodologia proposta foi avaliada por meio de simulações realizadas no Sistema Adutor Marés, responsável pelo abastecimento de grande parte da cidade de João Pessoa - PB (Brasil). O trabalho apresentou resultados que comprovam a eficácia do modelo proposto em encontrar estratégias de operação viáveis de serem aplicadas a um sistema adutor real com múltiplas estações de bombeamento e reservatórios. A redução do consumo elétrico alcançada nas simulações evidencia a importância da aplicação de um modelo de otimização como instrumento para melhorar a eficiência energética do sistema.

Farmani *et al.* (2007) apresentaram a experiência de desenvolver um sistema de apoio a decisão para o plano mestre de sudoeste de *Moravia* - República Tcheca. O sistema englobou a modelagem hidráulica, a qualidade da água e a programação ótima de bombas e válvulas. Um programa de modelagem *on-line* foi desenvolvido e instalado no centro de controle operacional, sendo calibrado para simulações estáticas e de períodos estendidos. O objetivo principal do modelo *on-line* proposto é a diminuição do custo operacional através da otimização da operação dos conjuntos motor-bomba.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

A elaboração de um planejamento operacional otimizado de um sistema de distribuição de água requer a análise do comportamento hidráulico dos seus vários elementos constituintes, para vários cenários factíveis.

Este trabalho apresenta uma avaliação técnica e econômica da otimização da operação-reservação do sistema de abastecimento do bairro de Mangabeira, em João Pessoa - PB. São analisados os custos de energia elétrica para a situação existente e para a proposta de desativação de uma das elevatórias. Para a determinação da viabilidade da proposta será levado em consideração além da garantia da continuidade do abastecimento e a capacidade do reservatório elevado, o custo energético, de modo a traçar uma rotina operacional mais eficiente e econômica.



### 3.1 Estudo de Caso

O sistema de abastecimento de água atual do bairro de Mangabeira foi implantado em 1985 pelo Governo do Estado da Paraíba, com acompanhamento técnico da CAGEPA, em prosseguimento ao programa de construção de novas moradias no conjunto habitacional de Mangabeira em sua primeira etapa. Em 1988 foi executada uma ampliação do sistema com a construção da segunda estação elevatória, para abastecimento das demais etapas do conjunto habitacional e distrito industrial de Mangabeira.

Em linhas gerais, o sistema de abastecimento de água do bairro pode ser assim descrito:

#### Manancial

A captação de água bruta do sistema é realizada em barragem de nível no rio Gramame, que foi regularizado pelo complexo de barragens de Gramame/Mamuaba (ver Figura 3.1). O manancial possui uma estação elevatória de água bruta que eleva a água para estação de tratamento de água.



Figura 3.1 - Bacia Hidrográfica de Gramame/Mamuaba

### Estação de Tratamento de água

Estação de tratamento tipo convencional, possibilita a distribuição da água tratada por gravidade para vários bairros de João Pessoa e para toda a cidade de Cabedelo, com tubulação de saída no diâmetro de 1400 mm. A Figura 3.2 apresenta um foto área da ETA de Gramame.



Figura 3.2 - Estação de Tratamento de Gramame

### Reservação

A capacidade atual de reservação é de 4700 m<sup>3</sup>, dividida em dois reservatórios semi-enterrados de 2000 m<sup>3</sup> cada e um reservatório elevado de 700 m<sup>3</sup> (ver Figura 3.3), com 19,22 m de altura.

O suprimento de água para o abastecimento do bairro de Mangabeira vem de duas adutoras que chegam no complexo do reservatório R-7 e de dois poços tubulares profundo, sendo a primeira adutora com 1000 mm de diâmetro com derivação de 300 mm que abastece o reservatório apoiado “A” e para o reservatório apoiado “B” (através de *by-pass*) e a segunda adutora com 700 mm de diâmetro com derivação de 250 mm que abastece o reservatório apoiado “B” e o reservatório apoiado “A” (através de *by-pass*). As duas adutoras podem abastecer a rede diretamente sem passar pelo reservatório, porém está é uma opção emergencial, em caso de pane no complexo de distribuição R-7, sendo que, neste caso, algumas áreas com cotas altas ficam desabastecidas. A Figura 3.4 apresenta uma das

tubulações de chegada do R-7 e na Figura 3.5 temos o esquema do sistema de abastecimento. Do reservatório elevado partem duas canalizações de 500 mm e 600 mm de diâmetro que alimentam várias redes de distribuição isoladas de cada núcleo habitacional.



Figura 3.3 - Reservatório elevado R-7



Figura 3.4 - Tubulação de chegada no Reservatório Apoiado R-7

R-7

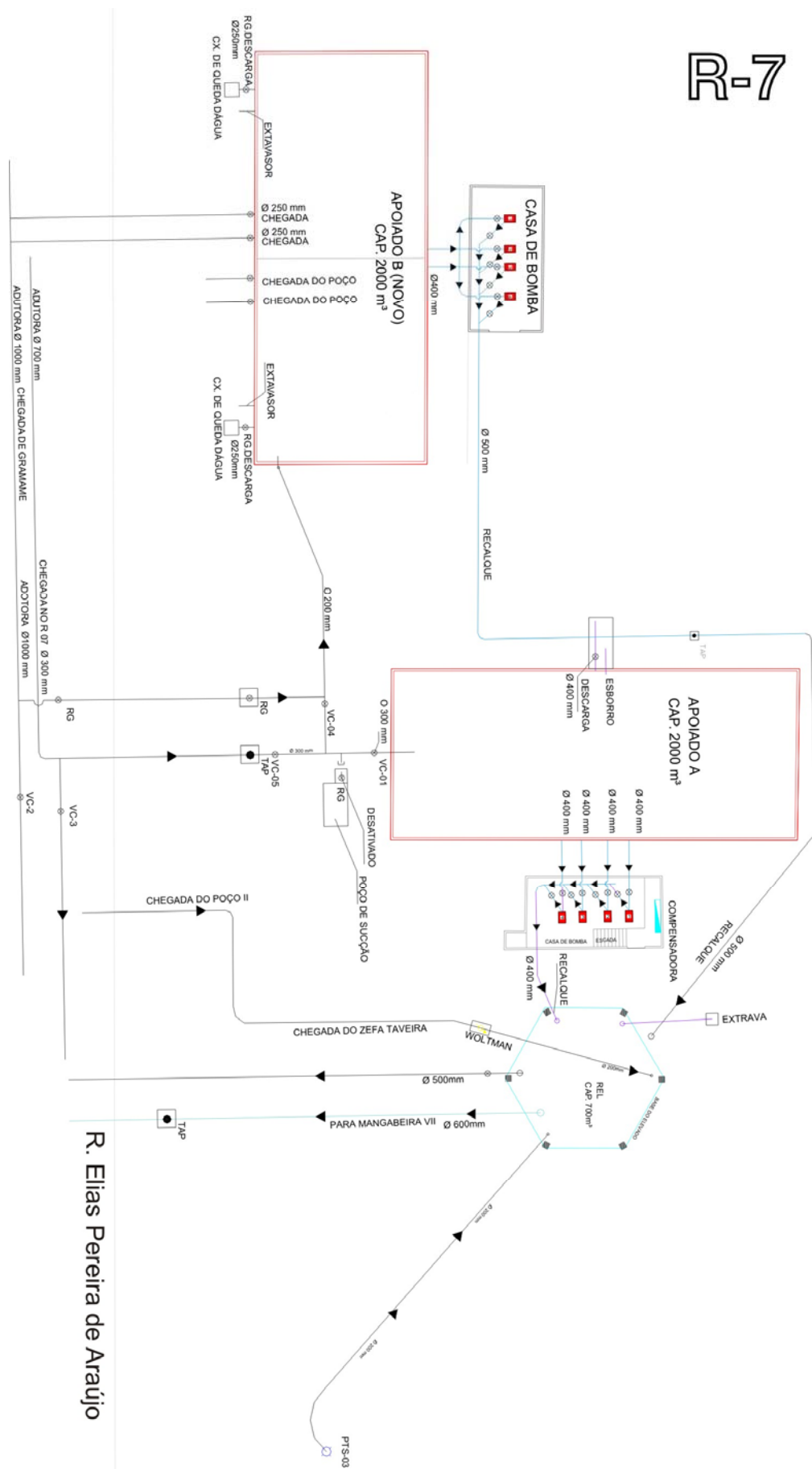


Figura 3.5 - Esquema do sistema de abastecimento de água do Conjunto Mangabeira

Rua Romário C. De Morais



## Estações elevatórias

Atualmente, existem duas estações elevatórias funcionando, que serão denominadas de EEA (estação elevatória A) e EEB (estação elevatória B). Estas se encontram ao lado de cada reservatório semi-enterrado e são responsáveis pelo recalque da água para o reservatório elevado (ver Figura 3.).

A estação elevatória A (EEA) é formada por 4 conjuntos motor-bomba tipo KSB ETA 100-16 3500 rpm de eixo horizontal e operam afogadas (ver Figura 3.). A EEA apresenta péssimo estado de conservação e atualmente dois conjuntos motor-bomba estão fora de operação. Verifica-se *in loco* um forte barulho provocado pelos motores, que, inclusive, impossibilita a permanência dos operadores, sem protetor auricular, dentro da casa de bombas.

A estação elevatória B (EEB) é formada por 4 conjuntos motor-bomba tipo Worthington 8 DBE 135 1770 rpm de eixo horizontal e operam afogadas (ver Figura 3.). A EEB foi instalada mais recentemente e os conjuntos motor-bomba apresentam condições de conservação bem superiores aos da EEA.



Figura 3.6 - Estação Elevatória “A”



Figura 3.7 - Estação Elevatória "B"

A Figura 3.8 apresenta um esquema completo do sistema de impulsão de água estudado (sistema de bombeamento mais reservação). Na construção do modelo digital algumas simplificações são implementadas.

No planejamento operacional do sistema adotado pela CAGEPA procura-se manter o reservatório com o nível de água próximo ao limite máximo, para garantir pressão suficiente nos pontos de consumo da rede hidráulica. A estação elevatória A opera com duas bombas acionadas (Bombas 1 e 2) e a estação elevatória B com uma bomba acionada nos horários de maior consumo (Bomba 3), apesar da estação elevatória "B" possuir conjuntos com melhores rendimentos. Para exemplificar a rotina operacional do sistema de bombeamento, a Figura 3. mostra os conjuntos motor-bomba em operação ao longo do dia 1 de julho de 2009. O gráfico foi ajustado para apresentar as bombas em funcionamento a cada meia hora.

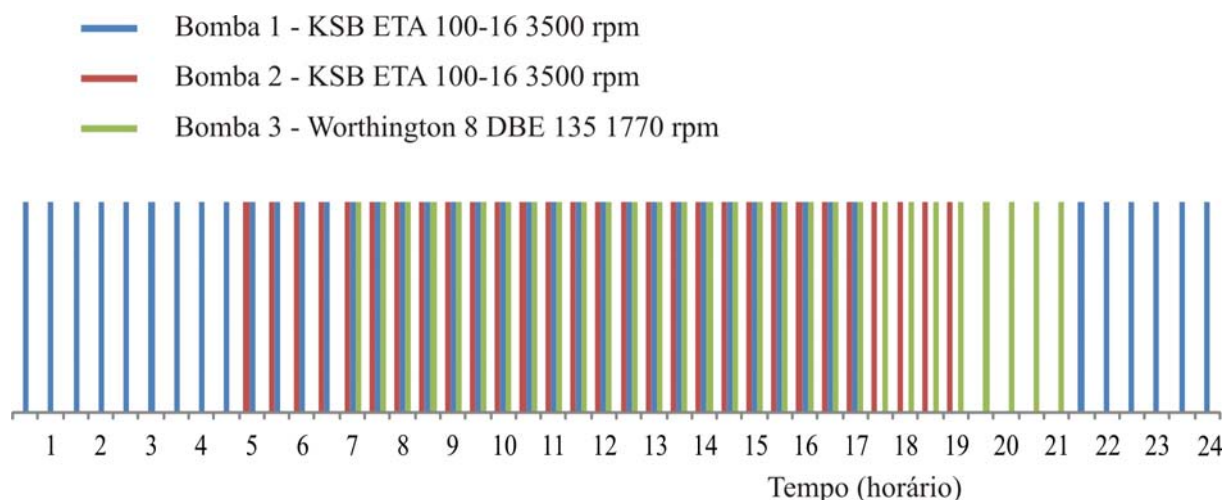


Figura 3.8 - Conjuntos motor-bomba em operação ao longo do dia 1 de julho de 2009

### 3.2 EPANET 2.00.12

A modelagem numérica de sistemas de distribuição de água se tornou uma prática padrão e essencial em qualquer tentativa séria para a avaliação hidráulica, de qualidade de água e aspectos econômicos (FARMANI *et al.*, 2007). Os modelos de simulação são ferramentas eficazes e necessárias não só na fase de planejamento e projetos, mas, principalmente, na fase de operação dos sistemas de distribuição de água (CARRIJO, 2004).

Os modelos de simulação de sistemas de transporte e distribuição de água classificados como simuladores hidráulicos são instrumentos computacionais, utilizados em larga escala no campo do planejamento, do projeto e do diagnóstico de funcionamento dos sistemas de abastecimento, sendo um complemento na tomada de decisão do projetista e empresas. O desenvolvimento de um modelo de simulação confiável não é uma tarefa fácil. Ademais, os disponíveis no mercado possuem um custo de investimento elevado. A utilidade de um modelo de simulação, tanto para a correta exploração dos sistemas - na procura da garantia do atendimento das condições hidráulicas - como também para um melhor planejamento das suas expansões e outras intervenções, é incontestável.

Atualmente, entre os simuladores utilizados pelos projetistas, segundo BISCOS *et al.* (2003), o EPANET 2 é aceito amplamente como “padrão mundial” na modelagem hidráulica e de qualidade de água. Desenvolvido pela *Water Supply and Water Resources Division* (Divisão de Abastecimento de Água e Recursos Hídricos) da *US Environmental*

*Protection Agency* (Agência de Proteção Ambiental Americana), o EPANET 2.00.12 (ROSSMAN, 2008) (ver Figura 3.5) é um programa de domínio público para simulação hidráulica, estática e dinâmica, de sistemas pressurizados de distribuição de água. A partir do emprego de códigos computacionais do EPANET 2 surgiram alguns programas de caráter comercial muito bem difundidos no exterior, mas com pouca penetração no território brasileiro. Dentre eles, destacam-se: SARA e MIKE NET. Outros pacotes comerciais não derivados do EPANET 2 mostram-se bastante competitivos, entre eles: WATERCAD, KYPIPE e WADISO.

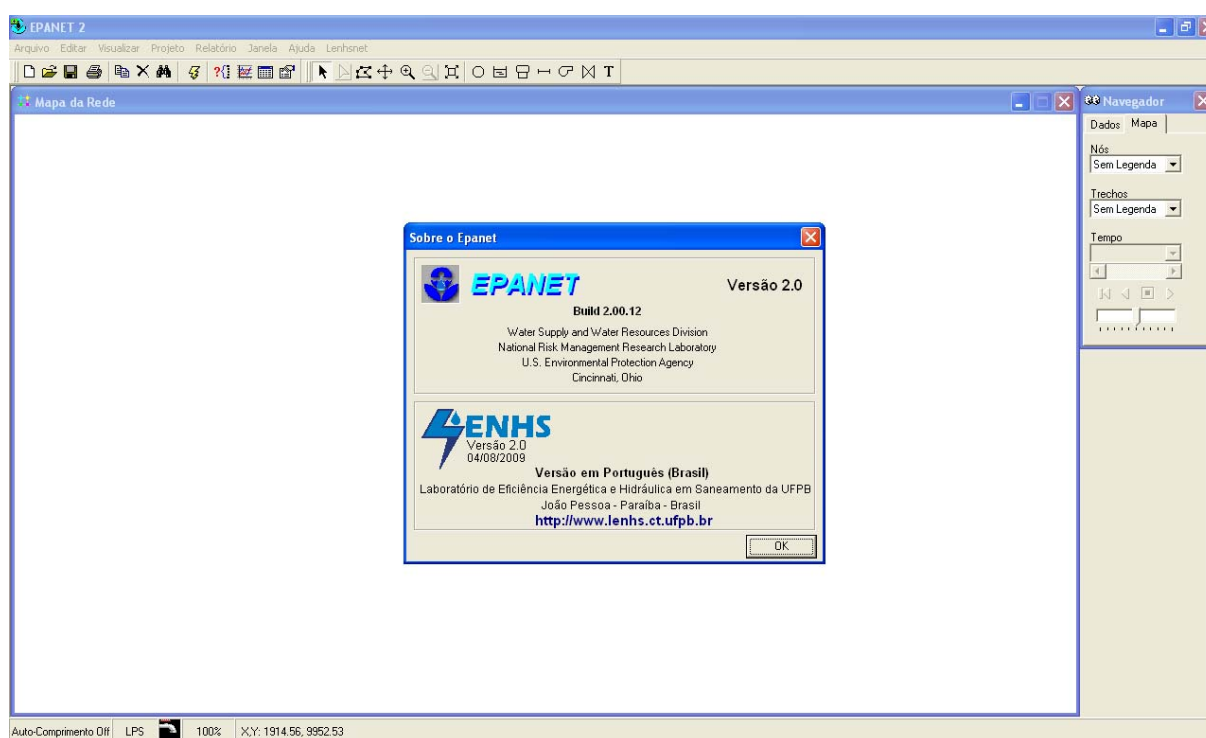


Figura 3.5 - Interface do software EPANET 2.00.12

O programa foi concebido para ser uma ferramenta de apoio à análise de sistema de distribuição de água para abastecimento urbano, sistemas de irrigação, de combate a incêndios, etc.; e permite obter valores de vazão, de pressão, do nível de água nos reservatórios e da concentração de elementos químicos ao longo da rede hidráulica, etc. O EPANET auxilia na análise de alternativas de gestão, de modo a melhorar a qualidade do sistema de abastecimento, em termos de quantidade e qualidade da água fornecida, assim como permite avaliar possíveis ações que possam diminuir o consumo de energia elétrica das estações de bombeamento. Ele permite obter os valores das variáveis de estado, tais como:



vazões, pressões, nível da água nos reservatórios, concentração de elementos químicos, etc. É indicado para verificar o desempenho dos sistemas de distribuição para diversas configurações. Dentre as várias características do programa, Rossman (1993) destaca:

- Podem ser consideradas as perdas de carga em curvas, alargamentos e estreitamentos, associando à tubulação um coeficiente de perda de carga singular.
- As bombas podem ser modeladas como sendo de velocidade constante ou variável. Tal como as tubulações, as bombas podem ser ligadas ou desligadas em determinados períodos de tempo ou quando ocorrem determinadas condições de operação na rede.
- As condições de operação da bomba podem ser descritas associando-lhe um padrão temporal relativo à variação da regulação da velocidade.
- Pode-se determinar o consumo de energia e o custo de bombeamento.
- Permite a modelação de reservatórios de nível variável, cuja secção transversal varia com a altura, através de curvas de volume em função da altura de água.
- Capacidade de associar múltiplas categorias de consumo num nó, cada categoria com um padrão próprio de variação no tempo.
- As condições de operação do sistema podem ser baseadas em controlos simples, dependentes de uma só condição (período do dia, altura de água num reservatório de nível variável), ou em controlos com condições múltiplas.

Recentemente, o EPANET 2.00.12 foi traduzido para o português do Brasil pelo Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento - LENHS, da Universidade Federal da Paraíba - Brasil. O EPANET 2 possui uma interface gráfica que possibilita ao usuário cadastrar um projeto e configurá-lo com todos os seus elementos e características. Desta forma, estando o projeto devidamente cadastrado e configurado, o EPANET 2 é capaz de calcular as perdas de carga por atrito através das fórmulas de *Hazen-Williams*, *Darcy-Weisbach* ou *Chezy-Manning*; perdas de cargas localizadas; simulação de bombas, com velocidade de rotação fixa ou variável; calcula a energia de bombeamento e o seu respectivo custo, modela os principais tipos de válvulas, modela reservatórios de nível fixo ou variável; possibilita a simulação com diversas regras de operação do sistema, dentre outras.

O programa permite que sejam feitos dois tipos de simulações hidráulicas: a simulação estática e a dinâmica. A estática permite reproduzir as características do sistema simulado para um dado cenário de consumos. A dinâmica é uma simulação de evolução do sistema ao longo do tempo, através de uma sequência de soluções de equilíbrio hidráulico obtidas para sucessivos instantes. Para a execução desta deve-se criar um Padrão Temporal que represente a variação periódica dos consumos dos pontos de consumo ao longo do tempo.

A modelação através do EPANET, permite representar um sistema como sendo um conjunto de trechos ligados a nós. Os trechos representam as tubulações, bombas e válvulas de controle e os nós representam pontos de consumo, junções, reservatórios de nível fixo (RNF) e reservatórios de nível variável (RNV). A Figura 3.6 apresenta as janelas do EPANET de configuração das propriedades dos nós e trechos da rede hidráulica.

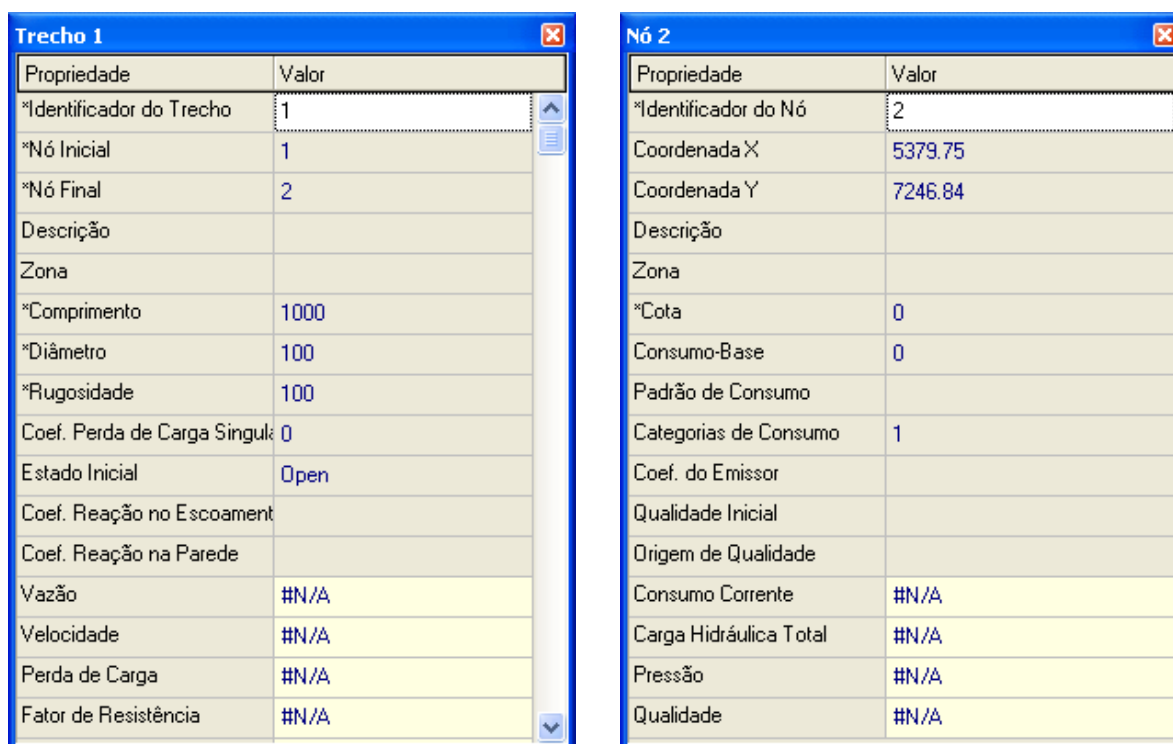


Figura 3.6 - Exemplos de janelas de propriedades do EPANET 2

Adicionalmente aos componentes físicos dos sistemas, o EPANET permite definir três categorias de informação sobre a rede:

- Curvas da bomba, de rendimento, de volume e de perda de carga.
- Padrões de variação do consumo, de funcionamento de bombas, de preço de energia, etc.

- Controles (que descrevem o comportamento e os aspectos operacionais do sistema de distribuição de água).

O EPANET pode, assim, ajudar a analisar alternativas de gestão, de modo a melhorar a qualidade do sistema de abastecimento, em termos de quantidade e qualidade da água fornecida, como também permite avaliar possíveis ações que possam diminuir o consumo de energia elétrica das estações de bombeamento.

### **3.3 Metodologia Empregada**

O projeto de efficientização de sistemas de bombeamento de água pode ser dividido em duas fases: diagnóstico e implantação de medidas corretivas. A elaboração prévia de um diagnóstico é imprescindível em qualquer metodologia empregada na análise de sistemas de distribuição de água, devendo esta apresentar todas as características físicas e hidráulicas do sistema, indicando assim, os dados que irão alimentar o modelo. Tais dados podem ser divididos em dados cadastrais, dados experimentais e dados estimados. Os dados cadastrais envolvem os estudos referentes à simplificação do sistema: consumos demandados; características topográficas; inclusão de componentes da rede (válvulas, acessórios, hidrantes, elementos de medição, elementos de controle, etc. Os dados experimentais são aqueles coletados *in loco* e são obtidos através de instrumentação (por exemplo, através de medidores de vazão e pressão). Os dados estimados são encontrados a partir de análises dos dados cadastrais, como por exemplo, determinação do ponto de operação através da curva da bomba.

Após a obtenção do diagnóstico deve-se estabelecer estratégias que levem em conta os aspectos técnicos e econômicos (minimização de custos), sempre observando o atendimento satisfatório dos consumidores.

Neste trabalho é analisado o custo da energia de bombeamento para um sistema composto por duas estações elevatórias e um reservatório elevado de distribuição de água. Após diagnosticar a situação atual, verifica-se através de simulações no programa EPANET a possibilidade de desativação de uma das elevatórias, fazendo uma análise técnica e econômica das alterações propostas, sendo possível planejar uma rotina operacional que permita o funcionamento satisfatório do sistema, atendendo a demanda exigida, porém, com um menor

consumo de energia do sistema de bombeamento. A metodologia se divide nas seguintes etapas:

- Diagnóstico da configuração atual da estação de bombeamento.
- Determinação das curvas dos sistemas.
- Determinação da curva de demanda da rede hidráulica.
- Modelação da alternativa proposta através do programa EPANET 2.00.12.
- Simulação dinâmica dos cenários de operação no EPANET 2.00.12.
- Comparação dos custos energéticos da situação atual e da alternativa proposta

### **3.3.1 Diagnóstico da configuração atual da estação de bombeamento**

O diagnóstico da configuração atual da estação de bombeamento englobará o levantamento in loco das instalações através de fotos e croquis; a verificação das atuais condições de operação e o levantamento da alternativa de melhora da eficiência energética e hidráulica do sistema.

### **3.3.2 Determinação das curvas dos sistemas**

A altura manométrica ( $H$ ) pode ser expressa em função da altura geométrica ( $H_g$ ) e da vazão (Equação 3.3). A representação gráfica da Equação 3.4 é obtida lançando-se a vazão nas abscissas e a altura manométrica nas ordenadas, como demonstrada na Figura 3.7-a. A curva resultante recebe o nome de curva característica do sistema ou da tubulação.

$$H = H_g + K \times Q^{1,85} \quad (3.3)$$

A curva do sistema é uma parábola centrada em  $H$  e com vértice em  $H_g$ . Ela mostra a altura manométrica da instalação a partir da vazão nula até um valor superior à de operação. Sua inclinação, em qualquer ponto, depende de  $K$ , que representa um coeficiente de perdas de carga. Este coeficiente se divide em duas parcelas:

**Perdas lineares** - Referente aos trechos de tubo reto. Cresce com o comprimento total equivalente da tubulação,  $L$ , e diminui com seu diâmetro  $D$  (na verdade, com a quinta potência dele). Além disso, a inclinação da curva depende principalmente do coeficiente de atrito  $f$ , que por sua vez varia com a rugosidade relativa do material,  $\varepsilon/D$ , e com as condições do escoamento, caracterizadas através do número de Reynolds.

**Perdas localizadas** - Relacionada aos acessórios de tubulação (válvulas, curvas, reduções etc.), e é calculada através de coeficientes  $k$  e ou de comprimento equivalente das peças presentes.

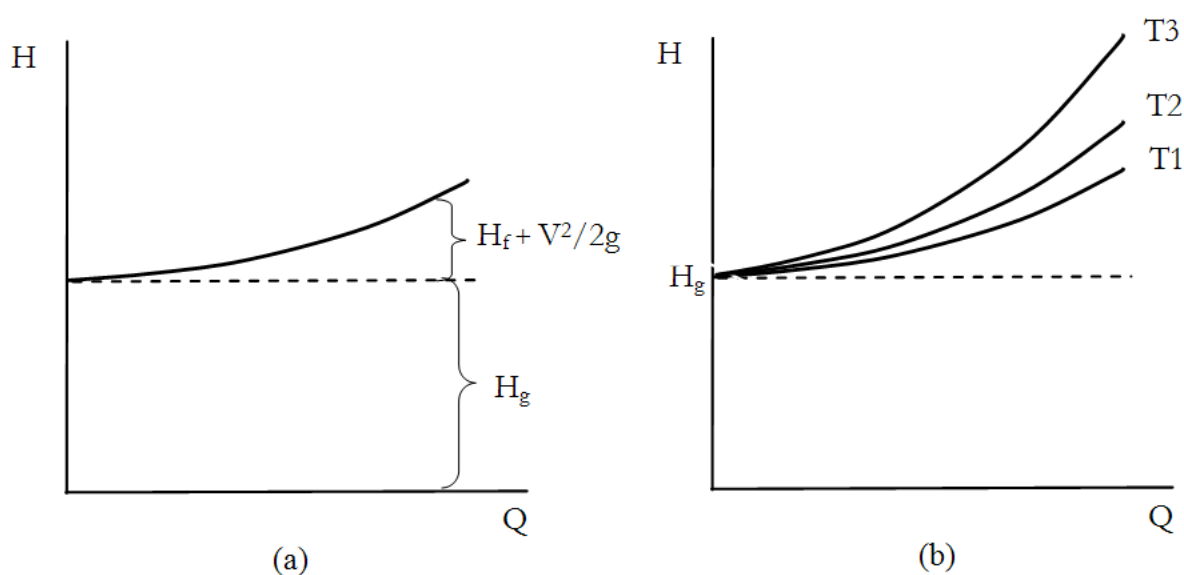


Figura 3.7 - (a) Curva característica do sistema (b) Efeito das perdas à curva do sistema  
(ANDRADE FILHO, 2009)

A taxa de crescimento de  $H$  seguirá o comportamento destes fatores, de modo que a variação de pelo menos um deles dará origem a uma nova parábola mais ou menos íngreme, sempre passando por  $H_g$ . A minimização ideal desses efeitos tornaria a tubulação isenta de perdas e a curva do sistema seria uma reta horizontal de ordenada  $H_g$ . Por outro lado, numa instalação em que a altura geométrica fosse desprezível, como é o caso de algumas bombas de incêndio, a curva do sistema passaria pela origem indicando que esta opera sem elevar o fluido no conduto, mas tão somente para vencer as perdas e produzir um jato de alta energia cinética.

Fica claro que o ato de adicionar perdas ao sistema eleva a inclinação de sua curva e que o ato de obstruir o escoamento fechando parcialmente uma válvula tem o mesmo efeito. Sendo a curva do sistema dependente das perdas, sua construção só é possível depois de fixado o diâmetro e material das linhas de aspiração e recalque, inclusive do barrilete. Na prática, tomam-se algumas vazões e calcula-se a perda de carga para cada uma delas. Em seguida, soma-se a esta a altura geométrica e a energia cinética remanescente, se necessário, e tem-se a ordenada da curva do sistema.

Em resumo, o traçado das curvas dos sistemas de adução é de acordo com o seguinte procedimento:

- Cálculo da perda de carga ao longo das tubulações ( $H_f$ ), que pode ser através das fórmulas de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach, Chezy-Manning etc. Neste caso, adotamos a fórmula de Hazen-Williams (Equação 3.4).

$$H_f = 10,65 \times \frac{L}{D^{4,87}} \times \left( \frac{Q}{C} \right)^{1,852} \quad (3.4)$$

Onde:

$H_f$  - perda de carga ao longo do conduto, em m

$Q$  - vazão, em  $m^3/s$

$L$  - comprimento da tubulação, em m

$D$  - diâmetro interno da tubulação, em m

$C$  - coeficiente de rugosidade que depende da natureza das paredes do tubo.

- Cálculo das perdas de carga localizadas ao longo das tubulações ( $H_l$ )

A perda de carga localizada “ $H_l$ ” em uma singularidade, ou peça especial do conduto, pode ser avaliada como uma porcentagem da carga cinética ( $V^2/2g$ ), existente imediatamente a jusante do ponto onde se produz a perda:

$$H_1 = K \frac{V^2}{2g} \quad (3.5)$$

O coeficiente da perda de carga “K” é determinado experimentalmente e seu valor varia segundo o tipo e diâmetro da peça especial. A padronização dos valores de “K” é bastante complexa, tendo em vista que para cada peça existe uma grande variedade de modelos e de fabricantes. Os valores de “K” podem ser facilmente encontrados nos livros de Hidráulica.

Existe também a possibilidade de estimar a perda de carga localizada mediante a obtenção de um comprimento fictício de tubulação de diâmetro igual ao da peça considerada, que produza uma perda por atrito equivalente à perda singular provocada pela peça. Como resultado, a perda de carga total (por atrito e localizadas) se determina através de alguma das fórmulas empíricas de perda de carga contínua, onde o comprimento total L será igual ao comprimento real da tubulação, mais os comprimentos equivalentes correspondentes a cada uma das peças especiais existentes no conduto.

- Cálculo da altura manométrica total;

A energia cedida pela bomba ao líquido na forma de energia por unidade de peso de fluido bombeado denomina-se altura manométrica, H, ou altura manométrica total, ATM. Pode ser determinada aplicando-se a equação da energia entre um ponto na superfície livre do reservatório inferior e a descarga da tubulação de recalque (quando a descarga for livre) ou em um ponto na superfície livre do reservatório elevado (quando a descarga for abaixo do nível da água). De modo geral, tem-se:

$$H = H_g + H_r + H_1 + \frac{V^2}{2g} \quad (3.6)$$

Onde:

H - Altura manométrica total;

H<sub>g</sub> - Desnível geométrico;

$H_f$  - Perda de carga ao longo dos condutos;

$H_l$  - Somatória das perdas de carga localizadas.

- Cálculo da equação da curva do sistema.

Quando à curva do sistema sobrepõe a curva da bomba, Figura 3.8, obtém-se o ponto de trabalho - PT, que determina a vazão bombeada e a pressão fornecida ao sistema. Este ponto nada mais é que a interseção entre as duas curvas. Operar em qualquer outro ponto do plano HQ só é possível alterando-se a bomba, a curva do sistema ou ambos.

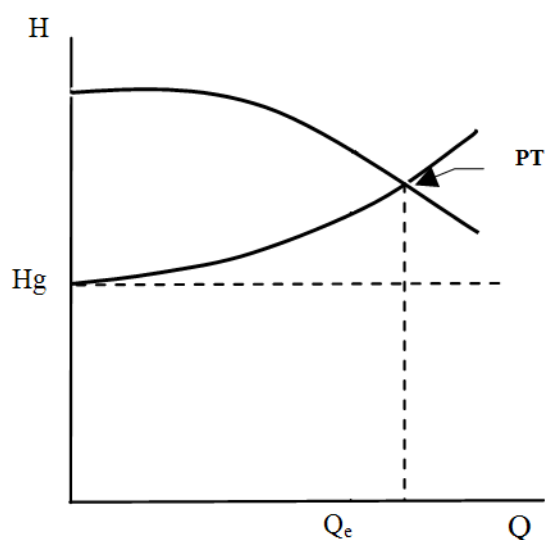


Figura 3.8 - Definição do ponto de trabalho através da superposição da curva do sistema e da bomba

Evidentemente, a bomba deve operar preferencialmente no seu ponto de máxima eficiência. Fora deste ponto, podem surgir problemas de recirculação, choques, vibrações e principalmente de cavitação - fenômeno a ser tratado em seção posterior. Estes problemas além de reduzirem o rendimento da bomba, podem causar danos em vários de seus elementos. É compromisso do processo de seleção de uma bomba que o ponto de trabalho coincida com o seu ponto de máxima eficiência. Naturalmente, nem sempre é possível que isto ocorra.



### 3.3.3 Determinação da curva de demanda da rede hidráulica

A partir do controle de nível do R-7, do funcionamento de cada uma das bombas das elevatórias “A” e “B”, (informações obtidas das planilhas de controle da estação) e das vazões de operação, calcula-se a variação da demanda diária da área abastecida através do balanço de massas. A Equação (3.7) determina a vazão para cada hora.

$$Q_i = \Delta V - Q_b \quad (3.7)$$

Onde:

$Q_i$  - demanda no tempo  $i$ , em  $m^3/h$ ;

$\Delta V$  - diferença de volume do reservatório em  $m^3$  para o tempo de 1 hora. Se for positivo, significa que a vazão bombeada foi maior que a demanda.

$Q_b$  - vazão da bomba em  $m^3/h$ .

### 3.3.4 Modelagem da alternativa proposta através do programa EPANET 2.00.12

Como forma de extrair o máximo benefício na construção do modelo, deve-se identificar em campo as características construtivas, hidráulicas e elétricas de todos os elementos da rede adutora, de forma que nas operações de simulação hidráulica, o modelo represente o mais fielmente possível todas as complexas relações funcionais verificadas no dia-a-dia do sistema real. Essa fidelidade garante a exploração de uma grande faixa de cenários operacionais, tornando mais robusta a pesquisa pela configuração mais racional. Tão importante quanto introduzir as propriedades corretas de um elemento é promover a interconexão correta entre eles, sem a qual poderão ocorrer sérias imprecisões no modelo

### 3.3.5 Simulação dinâmica dos cenários de operação no EPANET 2.00.12

Após diagnosticar a situação atual e de posse dos dados do sistema e da curva de consumo médio diário, utiliza-se o EPANET para fazer a análise da alternativa que propõe desativar o conjunto elevatório “A” (que apresenta péssimo estado de conservação e grandes desperdícios) e, em contrapartida, acionar mais uma bomba existente na estação elevatória “B” (Bomba 4), a fim de que haja manutenção da vazão demandada.

Com a adição do conjunto motor-bomba tipo Worthington 8 DBE 135, obviamente, ocorre à alteração do ponto de trabalho do sistema de bombeamento. A nova curva do sistema é criada através do EPANET a partir da inserção dos pares de dados de vazão e altura manométrica das duas bombas.

De posse da modelagem do cenário atual e da alternativa proposta, fazem-se as simulações dinâmicas e verifica-se se a nova configuração atende satisfatoriamente a demanda do sistema.

### **3.3.6 Comparação dos custos energéticos da situação atual e da alternativa proposta**

As estatísticas sobre a energia consumida pelas bombas e os respectivos custos ao longo da simulação serão fornecidas pelo EPANET através dos Relatórios de Energia. Para que exista uma variação no custo da tarifa de energia ao longo do dia, isto é, valores diferentes da tarifa para horários de ponta, deve-se criar um padrão temporal para a energia. Nesse padrão, introduz-se os fatores multiplicativos 1,841 para as três horas que compreendem o horário de ponta e 1 para as demais dentro dos respectivos períodos de tempo de 1 a 24, os quais traduzem o padrão com duração de 24 horas.

## **3.4 Análise Econômica dos Custos Envolvidos**

A análise econômica dos projetos de sistemas de bombeamento de água envolvem os *custos fixos* (investimentos) e os *custos variáveis* (operação e manutenção do sistema). Os custos de investimentos são aqueles realizados na fase de implantação das ações corretivas, com a aquisição e instalação de novos equipamentos para as instalações hidráulicas (tubulações, bombas, válvulas, etc.), enquanto os custos variáveis são os que incidem no decorrer do alcance do projeto ou da vida útil dos equipamentos (energia, reparação nas tubulações e nas peças de controle, reposição de equipamentos, etc.).

### **3.4.1 Custos de investimento**

Os custos de investimento para a retomada do funcionamento em condições satisfatórias são determinados em função da ou das opções a serem implantadas: compra e

instalação de conjuntos motor-bomba, limpeza e substituição das tubulações, duplicação dos trechos, etc. Neste caso, optou-se por adotar alternativas que não requerem custos de investimento. O estudo é baseado na otimização da reservação-operação, alternativa que requer baixo investimento.

### 3.4.2 Custos de operação da estação de bombeamento

Segundo TSUTIYA (2004), as despesas com operação nos projetos abastecidos com sistemas de bombeamento são, de maneira predominante, relativas aos gastos de energia das estações elevatórias. Neste trabalho, não serão considerados os demais custos, por não apresentarem relevância no custo total, ou seja, não influenciam significativamente nos resultados.

O custo anual do consumo de energia elétrica da estação de bombeamento dos sistemas de distribuição de água é estimado pela Equação (3.1).

$$C_{\text{energia}} = P \times Tc \times n_b \quad (3.1)$$

Onde:

$C_{\text{energia}}$  - custo anual com consumo de energia elétrica, em R\$/ano;

$P$  - potência requerida do motor elétrico, em kW;

$Tc$  - preço da tarifa relativa ao consumo de energia elétrica, em R\$/kWh; e

$n_b$  - número de horas de bombeamento anual, em horas/ano.

Substituindo a potência (Equação (2.2)) na Equação (3.1), tem-se o custo anual do consumo de energia elétrica calculado pela Equação (3.2).

$$C_{\text{energia}} = \frac{Q \cdot \rho \cdot g \cdot H}{\eta_b} \times Tc \times n_b \quad (3.2)$$

## CAPÍTULO 4

---

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A elaboração de um planejamento operacional otimizado de uma rede hidráulica requer uma análise contínua do comportamento hidráulico dos seus vários elementos constituintes, para vários cenários factíveis. Para validar os resultados alcançados pela é necessário a modelagem do sistema real no programa de simulação EPANET 2 (descrito no Capítulo 3), de forma a avaliar o comportamento dos parâmetros hidráulicos resultantes e diagnosticar a viabilidade operacional das alternativas propostas.

O estudo do caso em modelo dar validade aos resultados, e servirá de suporte a estudos maiores e mais complexos, nos quais a ordem de redução de custos de operação, foco principal deste trabalho, tenha uma maior magnitude.

O diagnóstico do sistema acarretou dificuldades adicionais, além daquelas inerentes ao tema da pesquisa, uma vez que, para viabilizar a elaboração do modelo hidráulico do sistema, todo cadastro técnico das unidades físicas foi levantado. Inúmeras consultas a técnicos da CAGEPA foram realizadas. Para os parâmetros físicos, hidráulicos e elétricos que não puderam ser medidos in loco, por falta de equipamentos apropriado ou pessoal qualificado, foram consultados os dados dos fabricantes ou adotados valores de uso generalizado na área de abastecimento de água.

Após diagnosticar a situação atual determinou-se a desativação dos conjuntos motor-bomba pertencentes à estação elevatória “A” (que apresentam péssimo estado de conservação e grandes desperdícios) e, em contrapartida, o acionamento de mais uma bomba, que já existe, na estação elevatória “B” (Bomba 4), a fim de que haja o mantimento do fornecimento da demanda. Com isto, a estação elevatória B passa a operar sozinha, com até 3 conjuntos motor-bomba em funcionamento simultaneamente.

#### 4.1 Definição das Vazões Aduzidas

O diagnóstico indicou que o sistema de bombeamento não possui equipamentos de medição de vazão e pressão. Logo, para se determinar as vazões bombeadas pelos conjuntos é necessário o levantamento dos pontos de operação das bombas através da avaliação das curvas características das bombas e das curvas dos sistemas.

O processo começa pelo traçado das curvas dos sistemas para cada elevatória. Para encontrar a equação que dá origem a esta curva, tomou-se o seguinte procedimento:

- Cálculo da perda de carga ao longo das tubulações ( $H_f$ );
- Cálculo das perdas de carga localizadas ao longo das tubulações ( $H_l$ );
- Cálculo da altura manométrica total ( $H$ );
- Cálculo da equação da curva do sistema.

#### Estação Elevatória A

Os dados da estação elevatória A são:

- $H_g = 21,263$  metros;
- $C = 130$  (ferro fundido);
- $DN = 400$  mm  $\Rightarrow$   $D_i = 0,3946$  metros;
- $L = 43$  metros.

Tomando como referência, para efeito de cálculo da altura manométrica total, uma vazão de  $150$  m<sup>3</sup>/h ( $0,0417$  m<sup>3</sup>/s), tem-se:

Cálculando a **perda de carga ao longo da tubulação** ( $H_f$ ) através da Equação (3.4), tem-se:

$$H_f = 10,65 \times \frac{L}{D^{4,87}} \times \left( \frac{Q}{C} \right)^{1,852}$$

$$H_f = 10,65 \times \frac{43}{0,3946^{4,87}} \times \left( \frac{0,0417}{130} \right)^{1,852} = 0,0146 \text{ m}$$

O levantamento das peças singulares do sistema de adução A com seus respectivos valores de K são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Coeficiente de perda localizada e hl para cada peça do sistema “A”

Peça	Quant.	K
Ampliação DN 200x300	1	0,30
Curva 45° DN 400	1	0,20
Curva 90° DN 200	1	0,40
Curva 90° DN 400	2	0,80
Entrada DN 400	1	0,50
Junção DN 300x400	1	0,40
Redução DN 250x150	1	0,15
Redução DN 400x250	1	0,15
Saída DN 400	1	1,00
Tês de passagem direta DN 400	4	2,40
Válvula de gaveta DN 200	1	0,20
Válvula de gaveta DN 250	1	0,20
Válvula de retenção DN 200	1	2,50
Somatório de K =		9,20

Cálculo do **somatório das perdas de carga localizadas** ao longo das tubulações ( $H_l$ ) através da Equação (3.5), tem-se:

$$H_l = \sum \left( K \times \frac{v^2}{2g} \right) = 0,3650 \text{ m}$$

Calculando a **altura manométrica total** através da Equação (3.6), tem-se:

$$H = H_g + H_f + H_l = 21,263 + 0,0146 + 0,3650 = 21,643 \text{ m}$$

Observa-se que possíveis erros na estimativa das perdas de carga não influenciam o resultado, pois a sua parcela na altura manométrica é muito pequena.

A fórmula geral para a determinação da **curva do sistema** da adutora é dada pela Equação (3.3). Logo, a equação da curva do sistema da elevatória A é:

$$H = H_g + K \times Q^{1,85} = 21,263 + K \times 0,041667^{1,85}$$

$$H_A = 21,263 + 135,886 \times Q^{1,85}$$

### Estação Elevatória B

Os dados da estação elevatória B são:

- $H_g = 21,908$  metros;
- $C = 130$  (ferro fundido);
- $DN = 500$  mm  $\Rightarrow$   $D_i = 0,4894$  metros;
- $L = 129$  metros.

Tomando como referência, para efeito de cálculo da altura manométrica total, uma vazão de  $180 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$ ), tem-se:

Cálculo da **perda de carga ao longo da tubulação** ( $H_f$ ) através da Equação (3.4), tem-se:

$$H_f = 10,65 \times \frac{L}{D^{4,87}} \times \left( \frac{Q}{C} \right)^{1,852}$$

$$H_f = 10,65 \times \frac{129}{0,4894^{4,87}} \times \left( \frac{0,05}{130} \right)^{1,852} = 0,0215 \text{ m}$$

O levantamento das peças singulares do sistema de adução B com seus respectivos valores de K são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Coeficiente de perda localizada e hl para cada peça do sistema “B”

Peça	Quant.	K
Ampliação DN 200x250	1	0,30
Ampliação DN 250x300	1	0,30
Curva 45° DN 400	1	0,20
Curva 90° DN 200	1	0,40
Curva 90° DN 400	3	1,20
Entrada DN 500	1	0,50
Junção DN 300x400	1	0,40
Redução DN 300x250	1	0,15
Redução DN 400x300	1	0,15
Redução DN 500x400	1	0,15
Tês de passagem direta DN 400	3	1,80
Válvula de gaveta DN 250	1	0,20
Válvula de gaveta DN 300	1	0,20
Válvula de retenção DN 250	1	2,50
Somatório de K =		9,45

Cálculo do **somatório das perdas de carga localizadas** ao longo das tubulações ( $H_l$ ) através da Equação (3.5), tem-se:

$$H_l = \sum \left( K \times \frac{v^2}{2g} \right) = 0,3026 \text{ m}$$

Calculando a **altura manométrica total** através da Equação (3.6), tem-se:

$$H = H_g + H_f + H_l = 21,9080 + 0,0215 + 0,3026 = 22,2321 \text{ m}$$

Observa-se que possíveis erros na estimativa das perdas de carga não influenciam o resultado, pois a sua parcela na altura manométrica é muito pequena.

A fórmula geral para a determinação da **curva do sistema** da adutora B de DN500, ver Figura 4.1 é dada pela Equação (3.3). Logo, a equação da curva do sistema da elevatória B é:

$$H = H_g + K \times Q^{1,85} = 21,908 + K \times 0,05^{1,85}$$

$$H_B = 21,908 + 82,690 \times Q^{1,85}$$



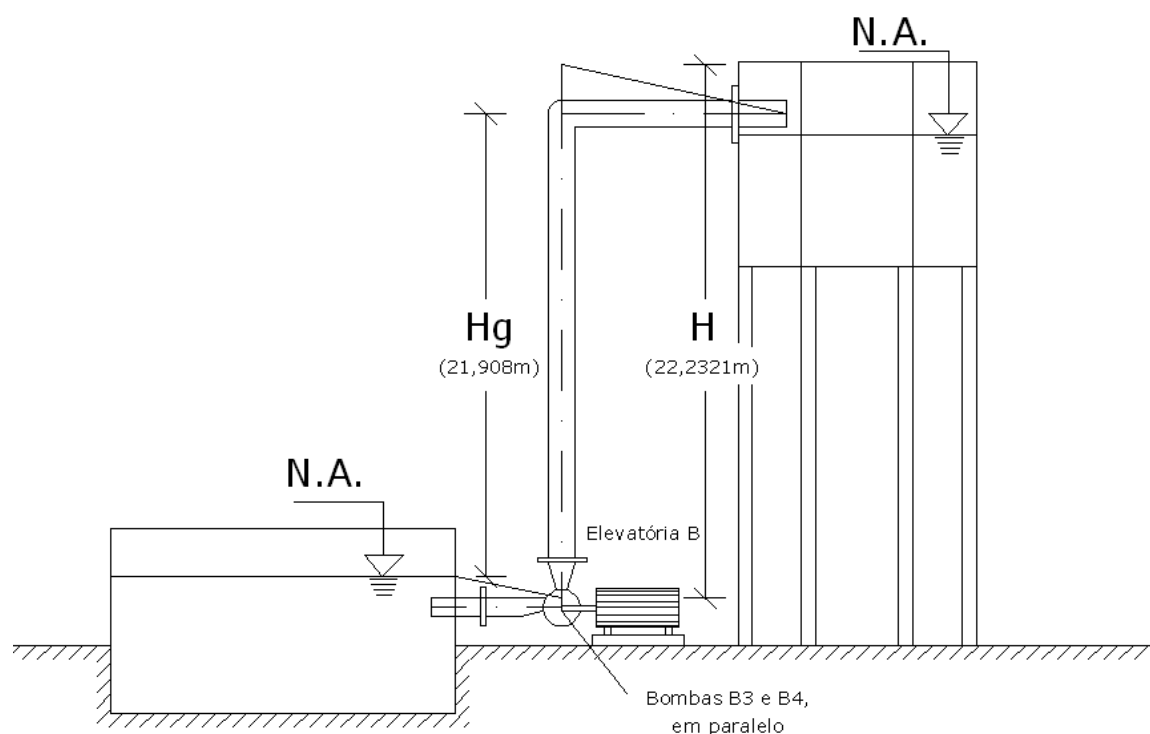


Figura 4.1 – Representação da altura geométrica e altura dinâmica de recalque, sendo esta considerada para uma vazão de  $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Para a estação elevatória “A”, porém, não foi possível traçar a curva das duas bombas trabalhando em paralelo diretamente sobre o catálogo, pois os valores de vazão fornecidos pelo fabricante são de pequena magnitude. Foi necessário obter, através da ferramenta de gráfico do Microsoft Excel, a equação da bomba com base nos dados de vazão e altura manométrica encontrados no catálogo (Figura 4. e Figura 4.).

Ao igualar a equação do sistema “A” ( $H_A = 21,263 + 135,886 \times Q^{1,85}$ ) com a equação de uma bomba (Figura 4.), obteve-se a vazão de  $Q = 279 \text{ m}^3/\text{h}$ , para uma bomba tipo KSB ETA 100-16 3500 rpm trabalhando isoladamente.

Da mesma forma, igualando a do sistema “A” ( $H_A = 21,263 + 135,886 \times Q^{1,85}$ ) com a equação de duas bombas (ver Figura 4.) foi encontrada uma vazão de  $Q = 260,5 \text{ m}^3/\text{h}$ , para cada bomba tipo KSB ETA 100-16 3500 rpm trabalhando em paralelo, totalizando uma vazão de  $521 \text{ m}^3/\text{h}$ .

As coordenadas das curvas características das bombas utilizadas para traçar os gráficos das Figura 4. e Figura 4. são apresentadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Coordenadas das curvas características das bombas KSB ETA 100-16

H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	
	1 bomba isolada	2 bombas em paralelo
38,5	0,016667	0,033333
38,0	0,022222	0,044444
37,5	0,027778	0,055556
36,0	0,041667	0,083333
32,0	0,055556	0,111111
26,5	0,069444	0,138889
19,5	0,083333	0,166667
15,5	0,088889	0,177778

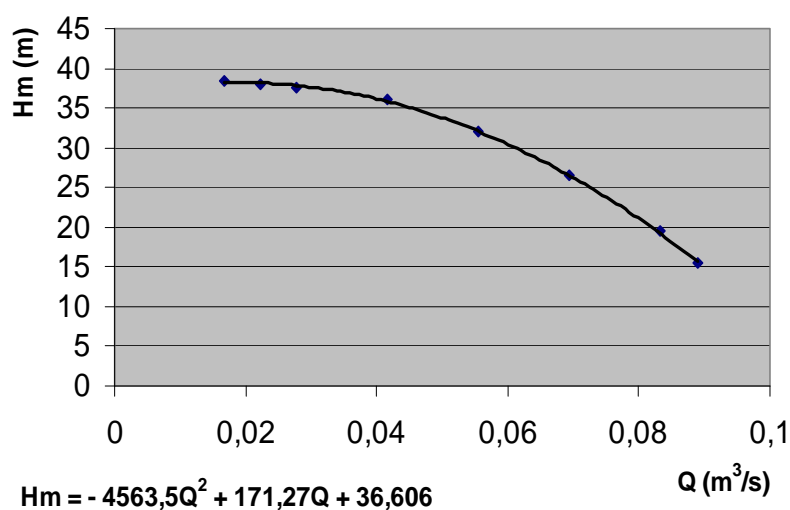


Figura 4.2 - Curva e equação de uma bomba da Elevatória “A” - Bomba KSB ETA 100-16

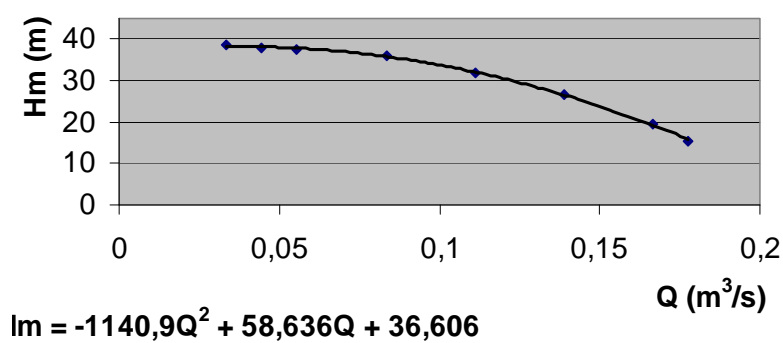


Figura 4.3 - Curva e equação de duas bombas KSB ETA 100-16 em paralelo da EEA

Os **pontos de trabalho** das bombas da estação **elevatória B** foram determinados a partir do traçado da curva do sistema e da curva das bombas em paralelo sobre o catálogo fornecido pelo fabricante (ver Figura 4.4). A vazão de operação de uma bomba funcionando isoladamente é 683 m<sup>3</sup>/h, enquanto que duas bombas em paralelo a vazão total é de 940 m<sup>3</sup>/h.

Finalmente, das equações e curvas anteriormente descritas temos as vazões de operação apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Vazões de operação das bombas das elevatórias “A” e “B”

Bombas em operação	Vazão de Operação (m <sup>3</sup> /h)	Altura Manométrica (mca)
1 bomba KSB ETA 100-16 3500 rpm	279	22,46
2 bombas KSB ETA 100-16 3500 rpm em paralelo	260,5 (cada)	25,07
1 bomba Worthington 8 DBE 135 1770 rpm	683	25,85
2 bombas Worthington 8 DBE 135 1770 rpm em paralelo	480 (cada)	29,05

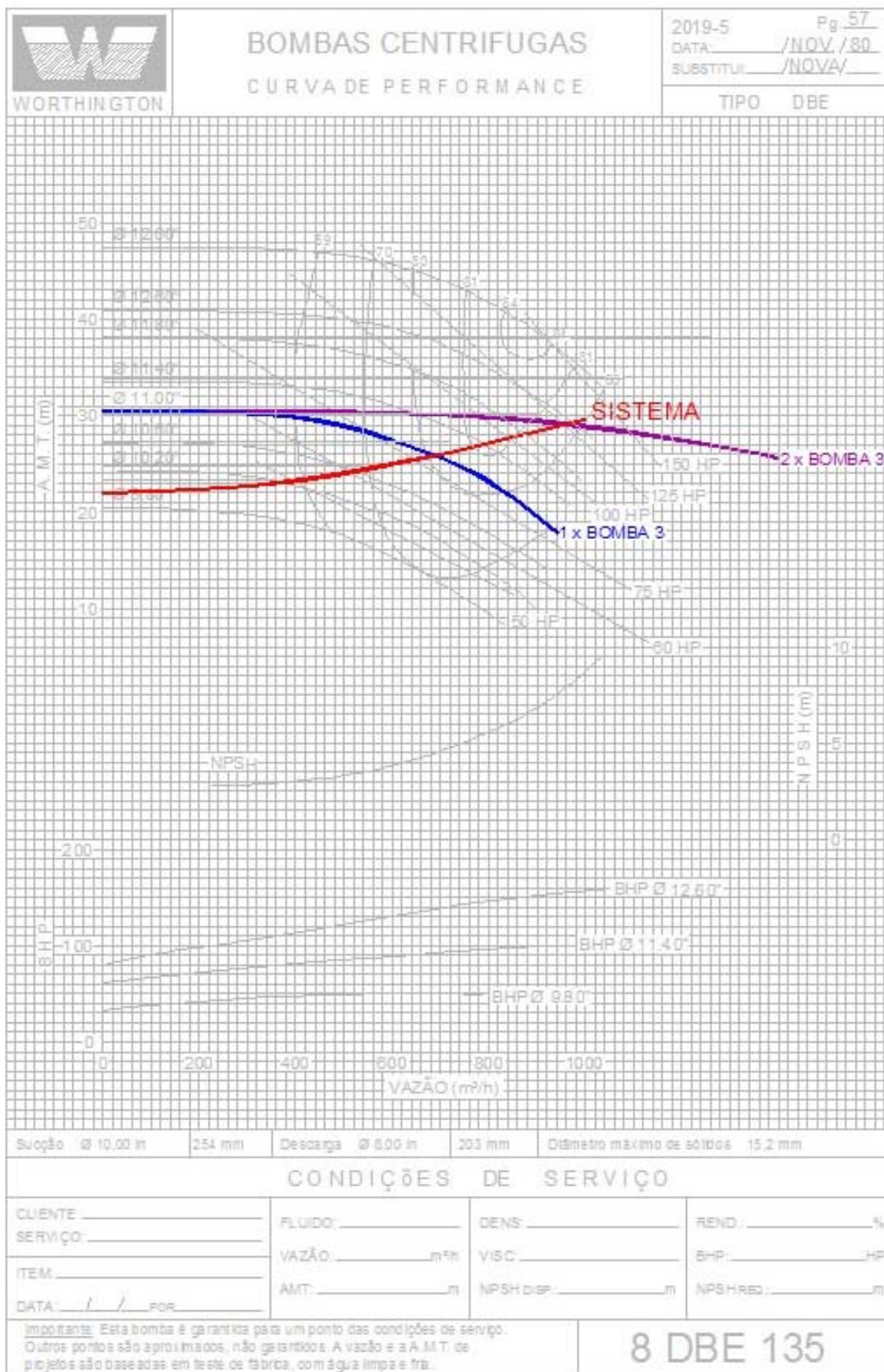


Figura 4.4 - Curvas das bombas e do sistema da Elevatória “B”

## 4.2 Definição da Curva de Demanda da Rede Hidráulica

Como constatou-se que o reservatório elevado (R-7) não possui instrumento que possibilite determinar a vazão fornecida à rede de distribuição, estimou-se a curva de demanda média a partir do controle de nível do R-7 (Tabela 4.5), das vazões de operação (Tabela 4.4) e do funcionamento de cada uma das bombas das elevatórias “A” e “B” (Tabela 4.6), trabalhando isoladamente ou em paralelo, através do balanço de massas (Equação (3.7)). Para tal, tomamos como base os dados de operação do mês de julho de 2006.

A Tabela 4.4 apresenta a curva de demanda média da rede hidráulica abastecida pelo reservatório R-7.

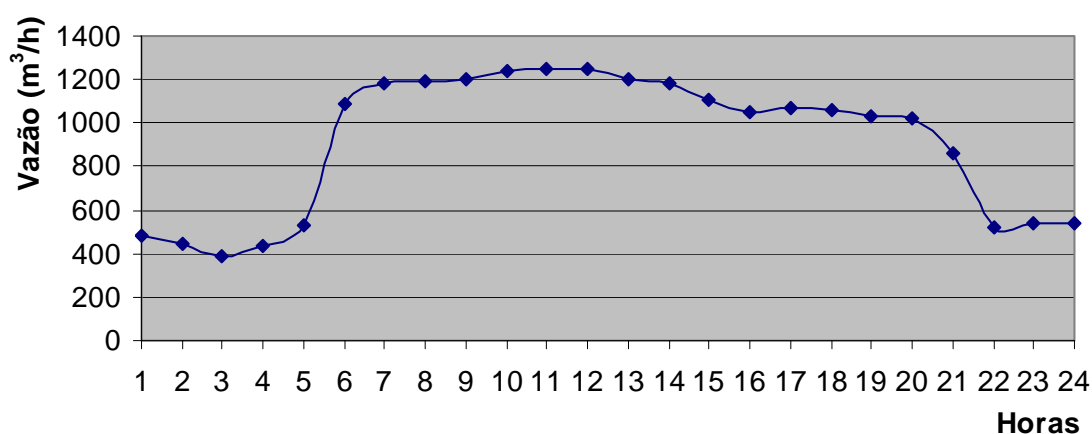


Figura 4.1 - Curva de demanda média diária

Tabela 4.5 - Controle de nível do reservatório elevado R7 do Conjunto Mangabeira (Mês de referência: Julho/2006)

Hora/Dia	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª	9ª	10ª	11ª	12ª	13ª	14ª	15ª	16ª	17ª	18ª	19ª	20ª	21ª	22ª	23ª	24ª	25ª	26ª	27ª	28ª	29ª	30ª	31ª	
1:00	5,50	5,50	5,50	5,00	6,00	5,00	5,80	5,00	5,50	5,00	5,40	5,50	5,00	5,70	6,00	5,00	4,90	5,50	5,00	4,90	5,50	4,50	5,50	5,50	5,00	5,40	5,50	5,00	5,00	6,00	4,50	
2:00	5,50	5,50	5,70	5,50	5,50	5,20	5,90	5,50	5,50	5,00	5,50	6,00	5,50	5,80	6,00	5,00	4,80	6,00	5,50	4,90	6,00	4,50	5,10	6,00	5,00	5,00	5,50	5,00	5,00	5,50	5,00	
3:00	5,50	5,50	5,80	6,00	5,50	5,50	5,90	6,00	6,00	5,50	5,80	5,50	6,00	5,90	5,50	5,50	4,70	5,50	6,00	5,00	5,50	5,00	5,30	5,50	6,00	5,00	5,50	5,50	5,20	5,50	5,50	
4:00	6,00	6,00	5,80	5,50	5,00	5,50	5,80	5,50	5,50	6,00	5,70	5,00	5,50	5,80	5,00	5,50	4,70	5,00	5,50	5,00	6,00	6,00	5,50	5,40	6,00	5,50	4,90	5,00	6,00	5,40	5,50	6,00
5:00	6,00	6,00	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,00	5,50	5,00	5,00	5,50	5,50	5,00	5,50	5,00	5,00	5,50	5,40	6,00	5,50	5,20	6,00	5,50	4,90	5,00	5,50	5,20	5,00	5,50	5,50
6:00	6,00	5,50	5,00	5,00	5,00	5,50	5,70	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,10	5,00	5,00	5,50	5,00	5,00	5,00	6,00	6,00	5,00	5,00	6,00	5,00	4,80	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
7:00	5,50	5,50	4,80	5,50	5,50	5,50	5,00	5,50	5,00	5,50	4,90	5,00	5,50	4,90	5,50	5,50	5,60	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,00	5,50	5,50	5,50	4,70	5,50	5,50	5,30	5,50	5,50
8:00	5,50	5,30	5,50	5,50	5,00	5,50	5,50	6,00	5,20	5,50	5,00	5,10	5,50	5,00	5,20	5,50	5,50	5,70	5,50	5,50	5,60	5,50	5,50	5,50	5,70	5,50	5,00	5,70	5,50	5,50	5,50	5,30
9:00	5,00	5,00	5,50	5,50	5,00	5,50	5,50	6,00	5,00	5,50	5,50	4,80	5,50	4,50	5,00	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,00	5,50	5,50	5,80	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,30	5,20
10:00	4,50	4,70	5,00	5,00	5,70	5,50	5,00	5,50	5,10	5,00	5,50	4,80	5,00	4,00	5,20	5,00	5,50	5,50	5,50	5,00	5,10	3,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,20	5,00	5,00	4,00	5,00
11:00	4,00	4,80	4,50	5,00	5,00	5,00	4,50	5,00	4,90	5,00	5,50	4,50	4,50	3,50	3,70	3,50	5,00	5,00	5,00	4,50	5,00	3,50	5,00	5,00	5,00	5,50	5,50	4,00	5,00	4,00	5,00	5,00
12:00	4,00	4,70	4,00	4,50	4,80	4,50	4,00	5,00	4,80	4,50	5,00	4,00	4,50	3,50	3,00	3,50	5,00	4,00	4,00	4,00	4,80	3,50	4,50	4,30	5,50	5,00	5,00	3,40	4,50	3,00	3,50	4,50
13:00	4,00	4,50	4,00	4,50	4,70	4,50	4,00	4,50	4,50	4,50	5,00	3,50	4,50	4,00	2,90	5,00	5,00	4,00	4,00	4,00	4,50	4,00	4,00	4,00	4,50	5,00	5,00	3,10	4,00	3,50	3,50	4,30
14:00	4,50	4,50	4,50	5,00	5,00	5,00	4,50	4,50	3,30	5,00	5,50	3,30	5,00	5,00	2,50	5,00	5,50	4,20	4,50	4,50	4,00	4,50	4,00	4,00	4,50	5,50	5,50	3,00	4,50	4,00	3,50	4,00
15:00	5,00	4,10	5,00	5,50	5,50	5,50	5,00	4,50	3,10	5,50	6,00	3,50	6,00	5,50	2,50	5,50	6,00	4,50	5,00	5,00	3,90	5,00	4,50	4,60	5,50	6,00	3,00	5,00	4,50	4,00	3,70	
16:00	5,50	4,00	6,00	5,50	5,60	6,00	6,00	5,00	3,00	6,00	6,00	4,40	5,50	6,00	3,50	6,00	6,00	4,80	6,00	6,00	3,60	5,50	5,00	5,00	5,50	5,50	3,30	6,00	5,00	4,00	3,80	
17:00	6,00	4,10	5,50	5,00	5,80	5,50	5,50	5,50	3,50	5,50	5,50	4,80	5,50	5,50	4,40	5,50	5,50	5,00	5,50	6,00	3,60	5,50	6,00	4,50	5,00	5,50	3,70	5,50	5,50	4,50	4,30	
18:00	5,50	4,70	5,00	5,00	5,70	5,50	5,50	5,50	4,20	5,60	5,00	5,10	5,00	5,00	4,60	5,00	5,50	5,20	5,00	5,50	4,70	5,50	5,50	5,50	5,00	5,50	4,20	5,50	5,50	4,50	5,00	
19:00	5,00	5,30	4,50	5,00	5,50	5,30	5,00	5,50	4,50	5,40	5,00	5,20	5,00	5,00	4,50	5,20	6,00	5,00	5,10	5,00	4,50	5,50	5,00	5,00	5,30	6,00	4,50	5,30	5,00	5,50	5,00	
20:00	5,50	5,00	4,50	5,00	5,50	5,50	5,00	6,00	5,00	5,50	5,00	5,00	5,20	5,00	4,50	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	4,50	5,50	5,00	5,00	5,50	6,00	4,50	5,50	5,50	5,50	5,50	
21:00	6,00	5,30	5,00	5,00	6,00	5,80	5,00	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,00	5,70	5,50	5,50	5,20	5,50	5,00	5,60	5,50	5,50	5,50	5,80	5,50	5,00	5,70	5,50	6,00	5,50
22:00	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	6,00	5,60	6,00	6,00	5,40	6,00	6,00	5,30	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	5,70	6,00	6,00	6,00	5,50	6,00	6,00	5,50	6,00	5,50	6,00
23:00	5,00	5,60	5,50	6,00	5,00	5,70	5,50	6,00	5,50	5,20	5,50	5,50	5,20	5,50	5,50	5,20	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,90	5,50	5,50	5,50	5,70	5,60	5,50	5,10	5,50	5,00	5,50
0:00	5,00	5,50	5,00	5,50	5,00	5,80	5,00	5,50	5,00	5,00	5,00	5,00	5,50	6,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,50	6,00	5,00	5,50	5,00	5,00	5,00	5,00	4,50	5,00	5,00

Tabela 4.6 - Controle operacional (liga/desliga) das bombas das elevatórias “A” e “B” do sistema de abastecimento de água de Mangabeira (Mês de referência: Julho/2006)

Dia	Data	Hora	Bomba		
			1	2	3
Sáb	1	00:00		Lig	
		04:30	Lig		
		06:30			Lig
		17:00		Deslig	
		19:00	Deslig		
		21:00		Lig	Deslig
Dom	2	00:00	Lig		
		04:00	Deslig		
		05:00	Lig		Lig
		06:40			
		22:00			Deslig
Seg	3	06:30			Lig
		15:40	Deslig		
		22:30	Lig		Deslig
Ter	4	00:00			
		03:00		Deslig	
		04:00		Lig	
		06:00			Lig
		15:00	Deslig		
		23:00	Lig		Deslig
Qua	5	01:00		Deslig	
		04:30		Lig	
		06:30			Lig
		19:00		Deslig	
		21:00	Deslig		Deslig
Qui	6	00:00	Lig	Lig	
		06:40			Lig
		16:00	Deslig		
		21:00	Lig		Deslig
Sex	7	00:00			
		06:00			Lig
		16:00	Deslig		
		22:30	Lig		Deslig
Sáb	8	03:00		Deslig	
		04:30		Lig	
		06:00			Lig
		19:50	Deslig		
		22:40	Lig		Deslig
Dom	9	02:30		Deslig	
		04:30		Lig	
		07:00			Lig
		22:00			Deslig

Continuação da Tabela 4.6

Dia	Data	Hora	Bomba		
			1	2	3
Seg	10	04:00	Deslig		
		05:00	Lig		
		06:00			Lig
		15:40	Deslig		
		21:00			Deslig
		21:30	Lig		
Ter	11	06:30			Lig
		15:00		Deslig	
		22:00		Lig	Deslig
Qua	12	00:00			
		02:00	Deslig		
		04:40	Lig		
		06:20			Lig
		22:00			Deslig
Qui	13	03:00		Deslig	
		04:30		Lig	
		06:00			Lig
		15:00	Deslig		
		21:00	Lig		Deslig
Sex	14	06:00			Lig
		16:00		Deslig	
		22:00		Lig	Deslig
Sáb	15	02:00	Deslig		
		04:30	Lig		
		06:30			Lig
		22:00			Deslig
Dom	16	00:00			
		06:00			Lig
		15:40	Deslig		
		21:00	Lig		Deslig
Seg	17	06:00			Lig
		15:00	Deslig		
		21:50	Lig		
		22:00			Deslig
Ter	18	01:40		Deslig	
		04:50		Lig	
		06:00			Lig
		22:00			Deslig
Qua	19	03:00	Deslig		
		04:30	Lig		
		06:00			Lig
		15:50	Deslig		
		22:00	Lig		Deslig
Qui	20	06:00			Lig
		16:00		Deslig	
		22:00		Lig	Deslig



Continuação da Tabela 4.6

Dia	Data	Hora	Bomba		
			1	2	3
Sex	21	02:00	Deslig		
		04:30	Lig		
		06:00			Lig
		22:00			Deslig
Sáb	22	06:00			Lig
		17:30	Deslig		
		22:00	Lig		Deslig
Dom	23	00:00	Deslig		
		02:00	Lig		
		06:30			Lig
		17:00		Deslig	
		22:00		Lig	Deslig
Seg	24	01:40	Deslig		
		04:50	Lig		
		06:00			Lig
		22:00			Deslig
Ter	25	03:00		Deslig	
		04:30		Lig	
		06:00			Lig
		08:30	Deslig		
		10:00	Lig		
		14:00	Deslig		
		21:00	Lig		Deslig
Qua	26	00:00			
		06:00			Lig
		15:00	Deslig		
		22:00	Lig		Deslig
Qui	27	01:30		Deslig	
		04:30		Lig	
		06:10			Lig
		22:00			Deslig
Sex	28	04:00	Deslig		
		05:00	Lig		
		06:00			Lig
		16:00		Deslig	
		21:30		Lig	Deslig
		22:00	Deslig		

Continuação da Tabela 4.6

Dia	Data	Hora	Bomba		
			1	2	3
Sáb	29	00:00	Lig		
		06:00			Lig
		15:30		Deslig	
		22:00		Lig	Deslig
Dom	30	03:30	Deslig		
		05:00	Lig		
		06:30			Lig
		21:00			Deslig
Seg	31	04:00		Deslig	
		05:00		Lig	
		06:00			Lig
		22:00			Deslig
		00:00	Deslig	Deslig	

Tabela 4.7 – Tempos de operação das bombas das elevatórias “A” e “B” do sistema de abastecimento de água de Mangabeira (Mês de referência: Julho/2006).

Tempo de funcionamento	horas:min:seg/mês (31 dias)	horas/dia	Tensão (V)	Corrente (A)
Bomba 1	633:50:00	20,45	380	45
Bomba 2	686:50:00	22,16	380	45
Bomba 3	487:00:00	15,71	380	120

### 4.3 Modelagem da Alternativa Proposta através do Programa EPANET 2.00.12

Dentro do contexto deste trabalho, a representação do sistema físico escolhido dentro do EPANET se constitui numa das etapas mais importantes e delicadas da pesquisa. O modelo resultante deverá refletir o mais fiel possível o comportamento do sistema adutor em toda sua amplitude de trabalho, considerando, sempre que possível, suas particularidades físicas e operacionais, de forma que os valores obtidos nas simulações efetuadas se aproximem daqueles obtidos no sistema real, para que o mesmo possa ser considerado como ferramenta de gestão. Para o trabalho de modelação, a boa qualidade dos dados de entrada é imprescindível para que a representação redunde bem ajustada à realidade, transmitindo

confiabilidade nos seus resultados, o mapa da rede produzido pelo EPANET apresenta-se na Figura 4.5.

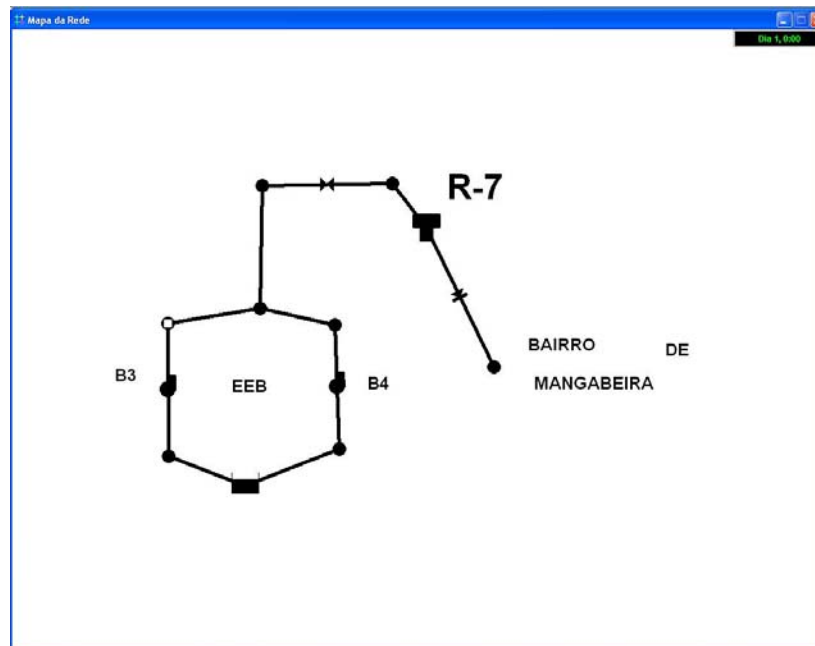


Figura 4.5 – Mapa da rede produzida pelo EPANET.

Após diagnosticar a situação atual e, de posse dos dados do sistema e da curva de consumo médio diário, utilizou-se os recursos de modelação do EPANET para fazer a análise do funcionamento da alternativa que propõe desativar o conjunto elevatório “A” (que apresenta péssimo estado de conservação e grandes desperdícios) e, em contrapartida, acionar mais uma bomba existente na estação elevatória “B” (Bomba 4). Uma vez coletados e introduzidos todos os dados no modelo computacional, este proporcionará o equilíbrio hidráulico e apresentará as variáveis hidrodinâmicas, pressão e vazão, em todos os pontos e instantes de tempo, em função das curvas de demanda conhecidas.

Para a simulação do sistema de bombeamento na solução proposta, é necessário adicionar as características dos conjuntos motor bomba Worthington. Para tanto, foi adicionada uma curva característica para a bomba tipo Worthington 8 DBE 135 1770 rpm, criada pelo programa a partir da inserção dos pares de dados de vazão e altura manométrica. Dessa maneira, a equação da curva é traduzida graficamente. Na Figura 4. é mostrada a configuração no EPANET da curva característica das bombas utilizadas (iguais).

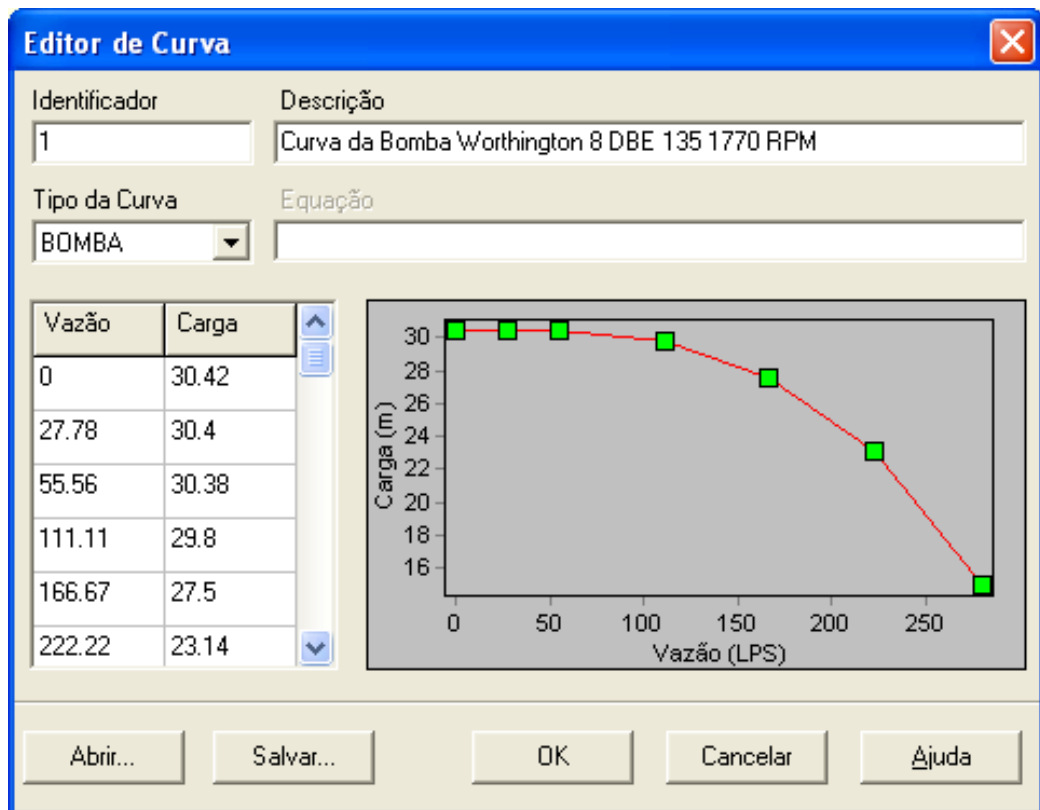


Figura 4.6 - Editor de curva da bomba

Outra informação a ser extraída diz respeito à energia consumida pela estação de bombeamento e ao custo correspondente, ao longo de uma simulação. Desta forma, é necessário adicionar uma curva de rendimento que será associada às bombas do sistema. Assim, de maneira semelhante a que foi usada para a criação da curva da bomba, é obtida a curva de eficiência do sistema de bombeamento, sendo necessário a introdução dos pares de valores de vazão e rendimento (valores fornecidos no catálogo do fabricante). Na Figura 4. é mostrada a curva de eficiência do sistema de bombeamento proposto no EPANET.

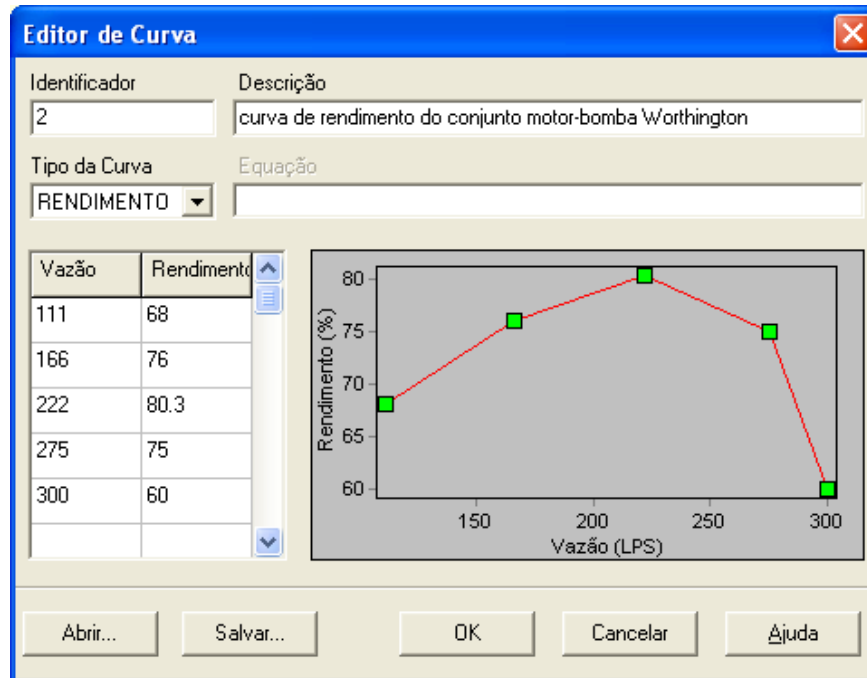


Figura 4.7 - Editor de curva do rendimento da bomba

#### 4.4 Simulação Dinâmica dos Cenários de Operação no EPANET 2.00.12

Para o caso em estudo, o cálculo do custo do bombeamento é determinado quando se efetua uma simulação dinâmica, através de uma sequência de soluções de equilíbrio hidráulico obtidas para sucessivos instantes. Na simulação dinâmica do modelo as condições de contorno serão variáveis com o tempo (p.ex. altura de água no reservatório elevado, arranque/parada de um grupo elevatório).

##### **Curva de modulação de consumo nos nós (Padrão Temporal)**

Para a execução da simulação dinâmica foi criada uma curva de modulação (Padrão Temporal), para representar a variação periódica dos consumos no nó de saída do reservatório elevado. No caso do exemplo em questão, foi utilizado o intervalo de tempo de 1 hora, promovendo uma visualização horária da variação da demanda ao longo do dia. A duração total da simulação dinâmica foi considerada para um período de 3 dias, o que corresponde a um tempo total de 72 horas.

Vale ressaltar que a discretização horária não interfere no ajuste do passo de cálculo hidráulico no simulador EPANET 2, que é o intervalo de tempo entre cálculos sucessivos com o conjunto de equações que regem o escoamento da água na rede na busca do equilíbrio

hidráulico. Nas análises feitas durante o processo de busca da melhor solução adotou-se para esse passo o valor padrão do EPANET 2 que é de 1 hora.

A Figura 4. mostra o padrão de variação do consumo, cuja determinação da variação da demanda na saída do reservatório com o tempo foi possível através da introdução dos valores de vazão (em l/s) extraídos da curva de consumo médio diário. Foram introduzidos os seguintes valores: 134,41; 122,84; 108,37; 119,65; 148,17; 303,11; 328,59; 330,64; 334,58; 345,21; 347,41; 346,57; 334,76; 327,86; 307,26; 292,48; 295,66; 293,66; 286,88; 282,57; 238,07; 144,24; 151,05 e 149,30, os quais traduzem o padrão com duração de 24 horas. Tendo a simulação uma duração total de 72 horas, o padrão se repete no início de cada intervalo de 24 horas (Figura 4.).

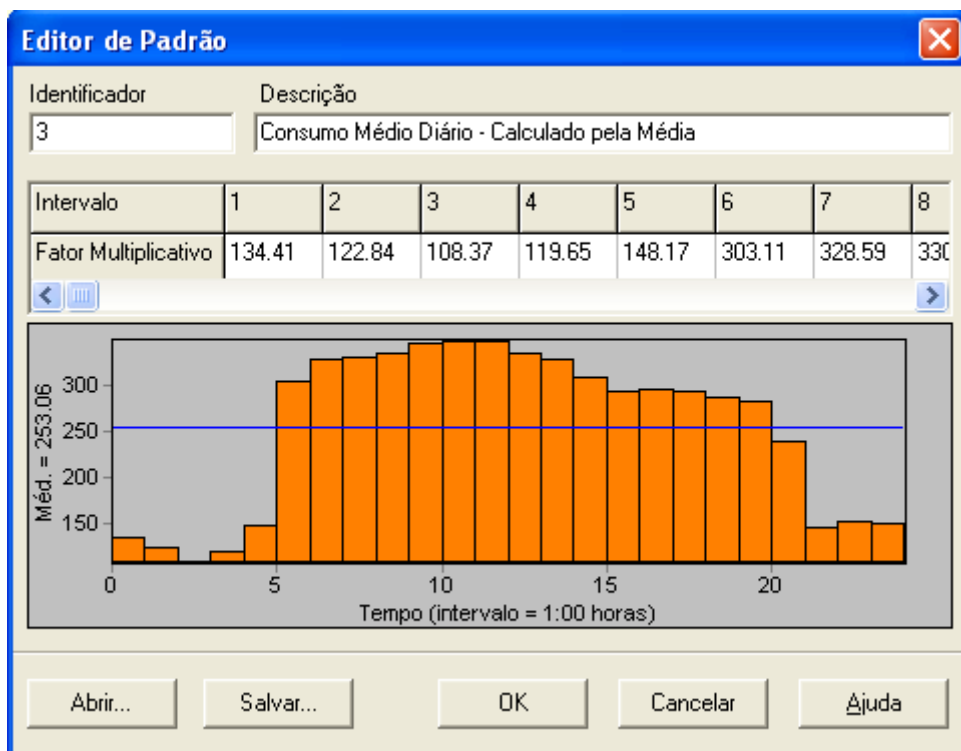


Figura 4.8 - Editor de Padrão para a variação de demanda na saída do reservatório

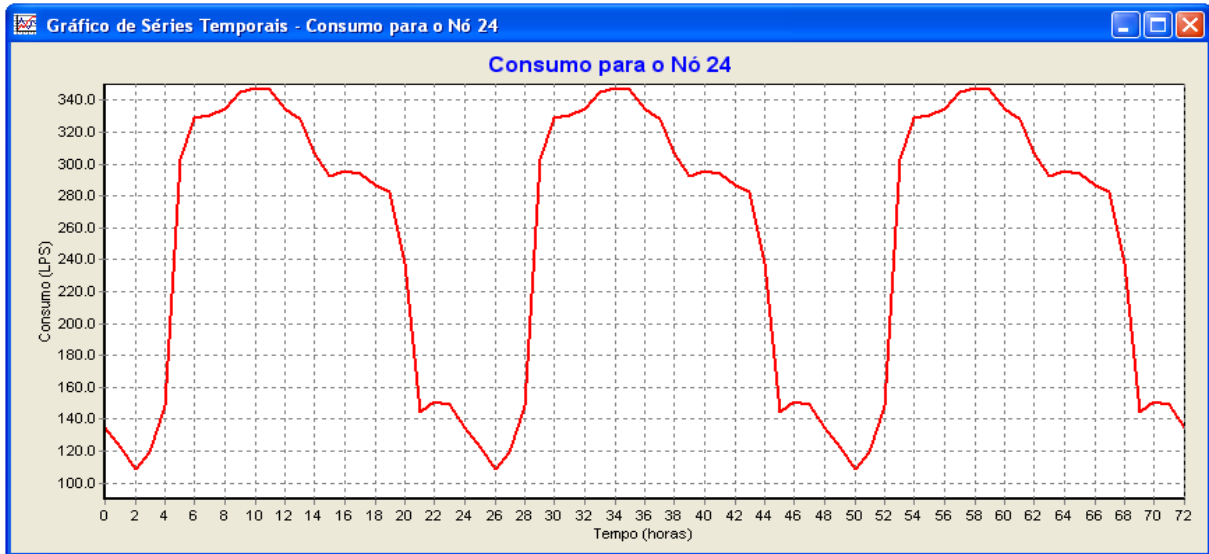


Figura 4.9 - Consumo na saída do reservatório simulado durante 72 horas

### Energia do Bombeamento

As estatísticas sobre a energia consumida pelas bombas e os respectivos custos ao longo da simulação, foram fornecidas pelo EPANET através de um *Relatório de Energia*. Para que exista uma variação no custo da tarifa de energia ao longo do dia, isto é, valores diferentes da tarifa para horários de ponta, foi criado um padrão temporal para a energia. Nesse padrão, foram introduzidos os fatores multiplicativos 1,841 para as três horas que compreendem o horário de ponta e 1 para as demais dentro dos respectivos períodos de tempo de 1 a 24, os quais traduzem o padrão com duração de 24 horas, no qual o custo da tarifa entre as 18 e 21 horas é 84,1% mais cara do que nas demais horas do dia. Na Figura 4. é mostrado o padrão do custo da tarifa de energia.

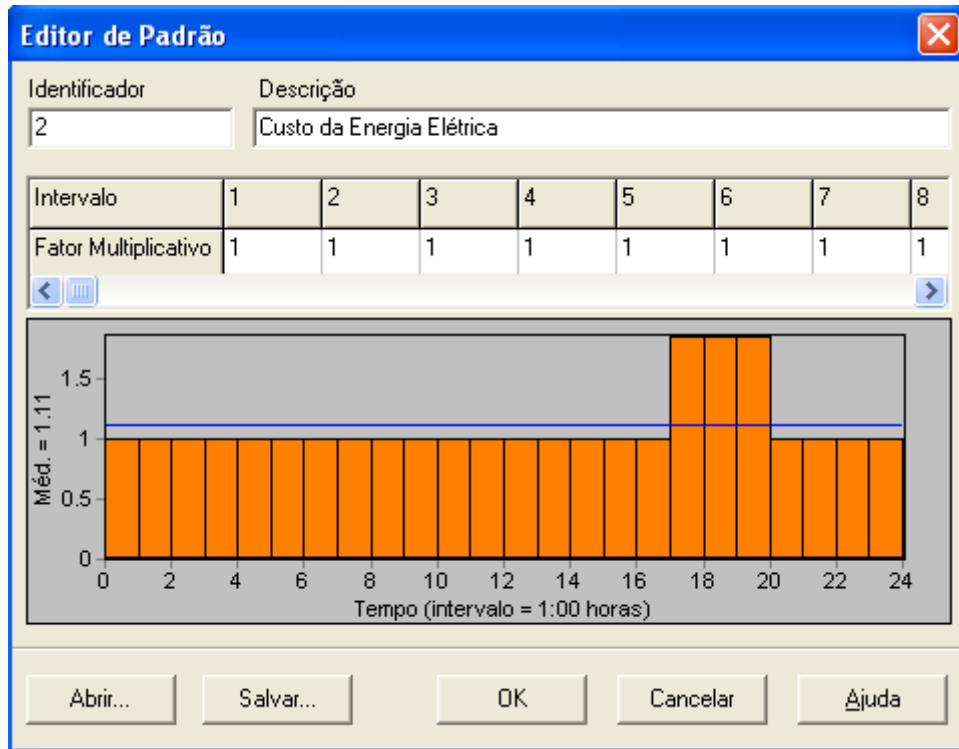


Figura 4.10 - Editor do padrão da variação da tarifa de energia

As duas bombas não funcionam durante as 24 horas do dia simultaneamente. Seu acionamento é dado em função da variação da vazão demandada pelo sistema de abastecimento. Seu acionamento é dado em função da variação da vazão demandada pelo sistema de abastecimento. A segunda bomba opera apenas quando a demanda na rede de abastecimento for alta e o nível do reservatório descer até 1,00 m e é desligada quando o consumo começar a diminuir e o nível novamente atingir 4,00 m. Para tanto, foi transmitida ao programa uma regra de operação de condições múltiplas através de um conjunto de instruções de sintaxe própria do EPANET.

As regras operacionais resultantes das aplicações da interface computacional são admitidas nos Controles Simples do programa EPANET 2, onde simulações estendidas são realizadas no arquivo “.net” que representa o modelo físico do sistema. Após o processo de simulação não foram apresentadas nenhuma mensagem de advertência ou de erro decorrente da violação das leis do equilíbrio hidráulico, o que significa em simulações válidas. As regras de operação são:



Link B3 closed IF node R-7 above 4

Link B3 open if node R-7 below 1

Link B4 closed if node R-7 above 5.9

Link B4 open if node r-7 below 4

Os significados das regras são:

REGRA 1:

*“se no reservatório R-7 o nível for superior a 4,00 metros, então a bomba B3 é desligada”*

REGRA 2:

*“se o nível do reservatório R-7 for inferior a 1,00 metros, então a bomba B3 é ligada”*

REGRA 3:

*“se no reservatório R-7 o nível for superior a 5,90 metros, então a bomba B4 é desligada”*

REGRA 4:

*“se o nível do reservatório R-7 for inferior a 4,00 metros, então a bomba B4 é ligada”.*

Concluída a entrada de dados e os controles no EPANET 2, foi simulado a alternativa proposta. A Figura 4.2 apresenta a variação do nível do reservatório elevado para a simulação de 72 horas. Figura 4.3 mostra a variação da média do consumo do bairro de Mangabeira e a vazão fornecida pelo sistema de bombeamento para o mês de julho de 2006.

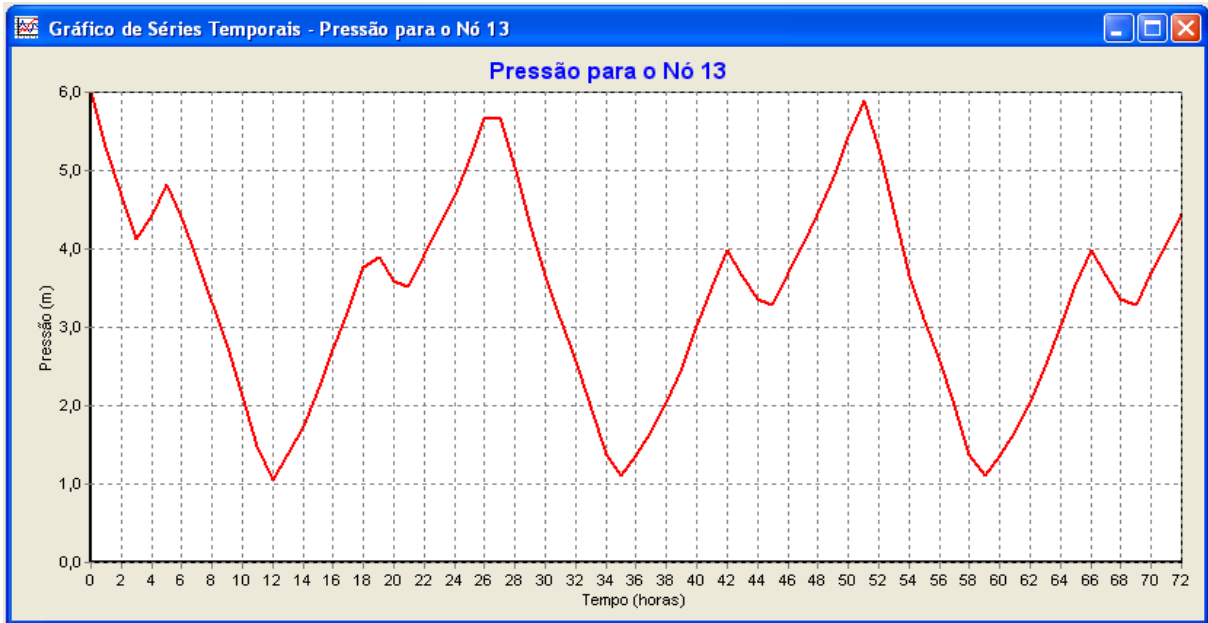


Figura 4.2 - Variação do nível do reservatório elevado

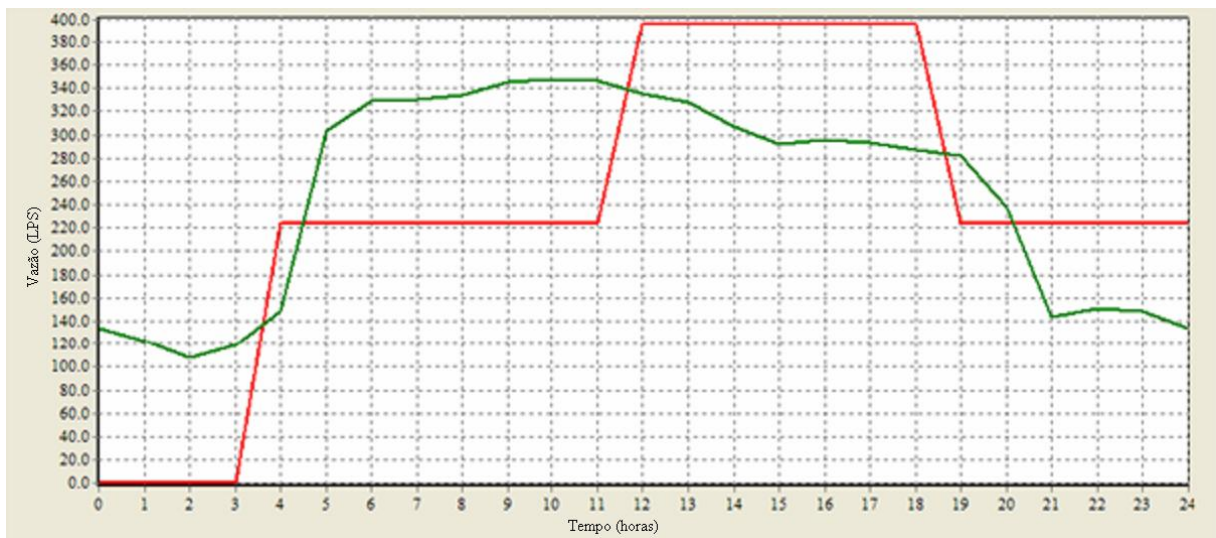


Figura 4.3 - Variação da média do consumo do bairro e a vazão fornecida pelo sistema de bombeamento

Conforme se observa nos gráficos da Figura 4.2 e da Figura 4.12 o atendimento da demanda foi atendido satisfatoriamente. Verifica-se agora se há diminuição do custo com energia elétrica.

As simulações executadas no EPANET permitiram obter os dados sobre o funcionamento do sistema de bombeamento trabalhando em função do consumo, através do Relatório de Energia do programa e da variação da vazão fornecida pelas bombas (ver Figura 4.4).

Bomba	Percentagem Utilização	Rendimento Médio	kWh /m3	kW Médio	kW Máximo	Custo /dia
1	29.17	77.77	0.09	59.92	61.96	67.04
3	87.50	79.52	0.08	62.25	62.74	205.04
Custo Total						272.08
Tarifa de Consumo Máximo						0.00

Figura 4.4 - Energia e custo do bombeamento ao longo de um dia

A tarifa de energia elétrica contratada pelo sistema elevatório de Mangabeira para consumo no horário de ponta era de R\$ 0,26169 e para consumo fora do horário de ponta de R\$ 0,14216 por kWh (SAELPA, 2006). Com base na conta de energia paga pela CAGEPA, a operação atual do sistema, ou seja, com as duas elevatórias “A” e “B” funcionando, teve um consumo de 62.894,00 kWh para o mês de julho de 2006 (período estudado), que corresponde a um custo de R\$ 10.489,76.

Para a alternativa proposta (desativar a elevatória “A” e acionar mais uma bomba na elevatória “B”), tivemos um custo diário do bombeamento de R\$ 268,14 que para o mês de julho representa R\$ 8.312,34 (ver Relatório de Energia fornecido pelo EPANET). Verificou-se uma redução de R\$ 2.177,42 no custo da energia elétrica para o mês estudado, que corresponde a 20,76% de economia.

#### **4.5 Paralisação das Bombas no Horário de Ponta**

Conforme os dados da conta de energia das elevatórias, a tarifa de energia no horário de ponta (entre as 18 e 21 horas) é 84,1% mais cara em relação ao valor cobrado nos demais horários do dia. Desta forma, é importante verificar a viabilidade, técnica e econômica, de paralisar o sistema de bombeamento durante esse horário, de maneira que a rede seja abastecida apenas pela água armazenada no reservatório elevado.

Porém, ao introduzir a regra de paralisação das bombas no horário de ponta e simular esta alternativa no EPANET, constatamos que a água armazenada no reservatório elevado é insuficiente para atender a demanda que, neste horário, ainda é alta. Outra opção seria desligar uma das bombas durante as três horas de ponta, deixando que a outra funcionasse por duas horas dentro desse intervalo. Porém, além de aumentar o número de partidas da bomba durante o dia, verificou-se que a redução do custo energético dentro de um dia seria apenas de alguns centavos.

Diante da incapacidade do reservatório elevado armazenar o volume necessário para atender a demanda durante essas três horas, e a redução do custo energético ser mínima, neste caso, não vale a pena paralisar o sistema em horário de ponta de energia elétrica.

## CAPÍTULO 5

---

### 5. CONCLUSÃO

A otimização de operação do sistema de bombeamento de Mangabeira, em João Pessoa/PB, proposto foi formulada com base na redução dos custos de bombeamento com energia elétrica, além da papel restritivo de garantir a demanda da rede hidráulica.

A alternativa de desativar a estação elevatória com baixo rendimento e vazão (que apresenta péssimo estado de conservação e grandes desperdícios) e, em contrapartida, acionar mais uma bomba existente na outra estação elevatória do sistema de bombeamento, apresentou-se como uma proposta atrativa. Ao realizar o estudo concluiu-se que é possível obter uma redução do custo energético anual em torno de 26 mil reais, mesmo sem investimentos diretos, simplesmente através da desativação de uma das elevatórias e o acionamento de uma bomba já existente nas instalações.

A utilização do modelo de simulação hidráulica EPANET 2 constitui uma ferramenta importante para a tomada de decisão durante a elaboração e análise de projetos de sistemas de

distribuição de água, assim como nas possíveis intervenções geradas por obras de manutenção e/ou ampliação de sistemas. A possibilidade de modelar e simular diversos cenários de funcionamento de sistemas aumenta as alternativas de solução para o projetista, ajudando na escolha daquela que represente a solução mais viável.

As simulações realizadas e apresentadas neste trabalho mostram a viabilidade de sua aplicação no setor de engenharia das empresas concessionárias de água, porquanto os resultados alcançados se amoldam aos procedimentos normais das regras de operação rotineiras, não apresentando, portanto, comportamentos que pudessem inviabilizar sua materialização no sistema estudado. A rotina criada demonstrou ser eficiente como ferramenta de auxílio para tomada de decisão apresentando ao usuário, de forma simples, a regra de operação otimizada de bombas para um período de 72 horas. A simulação da alternativa proposta quando submetida ao EPANET 2 revelou-se como válida.

A rotina operacional apresentada na pesquisa deve ser vista como uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão e não como uma regra absoluta a ser rigorosamente seguida pelos gestores do sistema, ao longo das 24 horas de operação. Esse raciocínio fundamenta-se nas incertezas presentes nas diversas variáveis e parâmetros envolvidos no processo de modelação do sistema físico, com destaque para as curvas de demanda de consumo que apresentam qualidade discutível, decorrente da falta de um melhor monitoramento do sistema e maior quantidade de dados históricos, essenciais ao tempo da sua construção. O padrão temporal dessa curva é inserido no EPANET 2 e desempenha forte influência na variação dos níveis de água dos reservatórios com reflexo direto nos valores de outras variáveis hidráulicas.

Desta forma, concluímos pelo sucesso da aplicabilidade da alternativa proposta. A praticidade e a confiabilidade da metodologia abordada na investigação podem ser traduzidas como um avanço tecnológico na análise de sistemas de distribuição de água, ao propor modificações na rotina operacional do estudo de caso com significativa redução dos custos com energia elétrica.

## **5.1 Recomendações**

Como trabalhos futuros utilizando essa linha de pesquisa, seria importante realizar os seguintes estudos no sistema de bombeamento de Mangabeira, João Pessoa, Brasil:

- Fazer um re-estudo do problema utilizando modelos de otimização (por exemplo, algoritmos genéticos) e levantando *in loco* as grandezas hidráulicas (por exemplo, vazões e pressões de operação) e elétricas (potência, tensão, corrente etc.).
- Ampliar a escala do modelo com a introdução dos outros sistemas que estão interligados ao sistema estudado.
- Incorporar na avaliação econômica a construção de outro reservatório elevado e os custos de manutenção dos conjuntos motor-bomba.

## CAPÍTULO 6

---

### 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[ALLIANCE] Aliança para Conservação de Energia. Água e energia: Aproveitando as oportunidades de eficiência de água e energia não exploradas nos sistemas de água municipais. PROCEL/ELETROBRAS. Rio de Janeiro, 2002.

[ANEEL] Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 10 de dezembro de 2008.

ANDRADE FILHO, L.S. Aspectos Hidráulicos e Elétricos Básicos. In: Sistemas de Bombeamento - Eficiência Energética, GOMES, H.P. (org.), João Pessoa: Editora Universitária da UFPB, 2009.

ANDRADE FILHO, L.S. Bombas e Estações Elevatórias. In: Sistemas de Bombeamento - Eficiência Energética, GOMES, H.P. (org.), João Pessoa: Editora Universitária da UFPB, 2009.



AZEVEDO NETTO, J.M.; FERNANDEZ, M.F.; ARAUJO, R.; ITO, A.E. Manual de Hidráulica. Editora Edgard Blücher Ltda. 8ª Edição. São Paulo, 1998. 669p.

BARBOSA, J.M.S.G.; GALVÃO, C.O.; GOMES, H.P.; *et al.*, Operação otimizada de parte do sistema adutor de água de Campina Grande-PB. In: Anais do Seminário Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água: O Estado da Arte e Questões Avançadas. João Pessoa, 2002.

BEZERRA, S.T.M, GOMES, H.P., PAIVA, J.S.O., SANTOS, D.S. Análise do parâmetro K da fórmula de Bresse, em função das variáveis que influenciam o dimensionamento econômico de estações de recalque, in Anais do V SEREA - Seminário Iberoamericano: Planificación, Proyecto y Operación de Sistemas de Abastecimiento de Agua, Valência, 2005.

BEZERRA, S.T.M. Sistema Fuzzy para controle piezométrico de sistemas de distribuição de água visando à economia de água e energia. Tese (doutorado) - UFPB, CT, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

BISCOS, C., MULHOLLAND, M., LANN, M.V.LE., *et al.*, Optimal operation of water distribution networks by predictive control using MINLP. Water AS, vol. 29, n. 4, 2003.

BOUNDS, P., KAHLER, J., ULANICKI, B. Efficient energy management of a large-scale water supply system. Civil Engineering and Environmental Systems, v. 23, n. 3 (Set), pp. 209-220, 2006.

BRAILEY, D., JACOBS, A. Energy management in the waterworks Industry. J. N. Eng. Water Works Association, v. 94, n. 3, p. 216-226, 1980.

BRASIL. Secretaria de Acompanhamento Econômico do Ministério da Fazenda - SEAE. Relatório de Atividades de 1997, 1998. Disponível em <<http://www.fazenda.gov.br/seae/relatorio/Relatorio97c.html>>. Acesso em: 10 de dezembro de 2004.

[CAGEPA] Companhia de Água e Esgoto do Estado da Paraíba. Projeto do sistema de abastecimento de água do bairro de Mangabeira. João Pessoa, PB, 1978.

CAMP, T.R. Water distribution, In: DAVIS, C.V. Handbook of applied hydraulics. New York: McGraw-Hill, 1952. cap.20, p.881-944, 1952.

- CARRIJO, I. Extração de Regras Operacionais Ótimas de Sistemas de Distribuição de Água Através de Algoritmos Genéticos Multiobjetivo e Aprendizado de Máquina. Tese D.Sc., Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/USP, São Carlos, 2004.
- CLINGENPEEL, W.H. Optimizing pump operating cost, Journal of American Water Works Association, v. 75, n. 10, p. 502-509, 1983.
- COIADO, E.M.; A. RIVELLI JUNIOR., A. Influência da evolução do custo da energia elétrica no diâmetro econômico de uma instalação de recalque de água de abastecimento, Revista Brasileira de Engenharia - Caderno de Recursos Hídricos, v.11, n.2, p.27-48, dez. 1993.
- CUOMO, A.R.; VILLELA, S.M. Dimensionamento econômico de tubulações em recalque. São Carlos: EESC, 1961.
- DAVID, A.C. Variadores de Rotação de Bombas. Trabalho Técnico. Curso PHD 5026-1 - Elevatórias Utilizadas em Saneamento. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- DEB, A.K. Optimization in design of pumping systems, Journal of the environmental engineering division, ASCE, v.104, n.EE1, p.127-136, 1978.
- FARMANI, R., INGEDULD, P., SAVIC, D., *et al.*, 2007, Real-time modeling of a major water supply system. Water Management. v. 160, n. 2 (Jun), pp. 103-108.
- GOLDMAN, F.E., MAYS, L.W., Water distribution system operation: application of simulated annealing. In: MAYS, L.W (ed). Water Resource Systems Management Tools, McGraw Hill, New York, 2005.
- GOMES, H.P. Dimensionamento econômico de instalações de recalque, Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, v.6, n.4, p.108-114, 2001.
- GOMES, H.P. Eficiência Hidráulica e Energética em Saneamento: Análise Econômica de Projetos. Rio de Janeiro: ABES, 114p. 2005.
- GOMES, H.P. Sistemas de Abastecimento de Água. 3ª edição. João Pessoa: Editora Universitária da UFPB, 2009. 277p.

INGEDULD, P, PRADHAN, A., SVITAK, Z., *et al.*, 2006, Modelling intermittent water supply systems with EPANET. In: Proceedings of the 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium, Cincinnati, Ohio, USA, Ago.

KAZANTZIS, M.D. *et al.* A new methodology for optimizing the daily operations of a pumping plant. In: Proceedings of Conference on Water Resources Planning and Management. Roanoke, VA, USA. Mai 2002 (*apud* CARRIJO, 2004).

LANNUZEL, P.; ORTOLANO, L. Evaluation of Heuristic Program for Scheduling Treatment Plant Pumps. Journal of Water Resources Planning and Management, vol. 115, n. 4, p. 457- 471, 1989.

LEITE, D.U. Panorama do uso de energia elétrica na CAGEPA, Relatório Técnico, p.1-32, 2003.

LEÓN, C., MARTÍN, S., LUQUE, J., 2000, Explore - Hybrid expert system for water networks management. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 126, n. 2 (mar/abr), pp. 65-74.

LÓPEZ-IBÁÑEZ, M.; PRASAD, T.D.; PAECHTER, B. Optimal Pump Scheduling: Representation and Multiple Objectives. Proceedings of the Eighth International Conference on Computing and Control for the Water Industry, Vol. 1, p. 117-122, University of Exeter, UK, 2005.

MAIA, F.C. Some regulatory tools to deal with competition in the Brazilian electricity sector. In: The Institute of Brazilian Business & Public Management Issues. The George Washington University, 1999. Disponível em <<http://www.gwu.edu/~ibi/minerva/Fall1999/Maia.Fernando.pdf>>. Acesso em: 11 de dezembro de 2004.

MENDILUCE, E. Cálculo de las tuberías de impulsión, Revista de Obras Públicas. Madrid, enero, 1966.

MUÑOZ, A.H. Abastecimiento y Distribución de Agua, Madrid: Servicio de Publicación de la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid. Colección Senior. 4ª ed. Madrid, 2000.

OSTFELD, A., SALOMONS, E. An Early Warning Detection System (EWDS) for Drinking Water Distribution Systems Security. In: World Water Congress 2003, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 2003.

PEDROSA FILHO, L.A. Um modelo de operação de sistemas adutores de abastecimento de água com vistas à minimização dos custos energéticos. Tese de D.Sc., Programa Institucional de Doutorado Temático em Recursos Naturais da UFCG. Campina Grande, 2006.

PEDROSA FILHO, L.A., GOMES, H.P., REY, P.L.I., Modelo de Otimização Operacional de Sistemas Adutores. In: GOMES H., GARCIA R., REY (eds). Abastecimento de Água - O Estado da Arte e Técnicas Avançadas. 1ª ed., capítulo 9, João Pessoa, Brasil, Editora Universitária da UFPB, 2007.

PORTO, R.M. Hidráulica Básica. EESC/USP, Projeto REENGE, São Carlos, 540p, 1998.

RIBEIRO, G. P. Custos de produção de águas subterrâneas com operação otimizada via algoritmos genéticos para o abastecimento urbano de Araraquara/SP. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo - USP - EESC, São Paulo, 2000.

ROSSMAN, L.A. EPANET 2.00.12 Programmer's Toolkit. Water Supply and Water Resources Division. U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, USA., 2008.  
<http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/wswrd/epanet.html>

ROSSMAN, L.A. EPANET: User's guide. U. S. Environment Protection Agency, Cincinnati, Ohio, USA, 1993.

SAKARYA, B.A.; MAYS, L. W. Optimal Operation of Water Distribution Pumps Considering Water Quality. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 126, N.4, p. 210 -220, 2000.

SILVESTRE, P. Hidráulica Geral, Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro, 1979. 316p, 1979.

SOTELO, A.; MASULADO, J.; DOLDÁN, P.; BARÁN, B. Algoritmos Evolutivos Multiobjetivos Combinados para la Optimización de la Programación de Bombeo em Sistemas de Suministro de Agua. Jornadas de Informática y Telecomunicaciones - Conferencia de Informática y Tecnología Aplicada (JIT-CITA 2001). Asunción-Paraguay 2001.

TRAUTWEIN JÚNIOR, B., VIEIRA, G.E. Análise de modelos de ajuste exponencial para previsão de consumo de curtíssimo prazo como apoio no planejamento da operação de um sistema de distribuição de água. In: Anais do 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, I-032, Belo Horizonte, 2007.

TSUTIYA, M.T. Abastecimento de Água. 2ª edição. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária - USP, 2005. 643p.

TSUTIYA, M.T. Abastecimento de Água: Gerenciamento de Perdas de Água e Energia Elétrica em Sistemas de Abastecimento. In: Guia do Profissional em Treinamento: Nível 2. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (eds). RECESA, Salvador, 2008.

TSUTIYA, M.T. Redução do Custo de Energia Elétrica em Sistemas de Abastecimento de Água, 1ª ed., São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001.

TSUTIYA, M.T. Uso de Inversores de Frequência para Diminuição do Consumo de Energia em Bombeamentos. In: GOMES, H.P., GARCIA, R.P., REY, P.L.I. (eds), Abastecimento de Água - O Estado da Arte e Técnicas Avançadas, 1ª ed., capítulo 6, João Pessoa, PB, Brasil, Editora Universitária da UFPB, 2007.

ZAHED FILHO, K., Previsão de Demanda de Consumo em Tempo Real no Desenvolvimento Operacional de Sistemas de Distribuição de Água. Tese de D.Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

ZOCOLER, J.L.; OLIVEIRA, L.A.F.; BAGGIO FILHO, F.C.; HERNANDEZ, F.B.T. Modelo para Determinação do Diâmetro e Velocidade de Escoamento Econômica em Sistemas Elevatórios de Água, In: Anais do 3º Congresso Temático de Dinâmica e Controle da SBMAC. 2004.

ZYL, J. V.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. Operational Optimization of Water Distribution Systems Using a Hybrid Genetic Algorithm Method. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 130, N.2, p.160-170, 2004.