

# SISTEMAS DE SANEAMENTO

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

HEBER PIMENTEL GOMES  
organizador



---

# **SISTEMAS DE SANEAMENTO**

Eficiência Energética

---

Heber Pimentel Gomes  
Organizador

Editora Universitária – UFPB  
João Pessoa, Brasil - 2010

1ª Edição: 2010 Editora da Universidade Federal da Paraíba

Capa, diagramação e arte final:

Heber Pimentel Gomes, Moisés Menezes Salvino, Roberta Macêdo Marques Gouveia e  
Paulo Sérgio Oliveira de Carvalho

Impresso no Brasil/Printed in Brazil

#### FICHA CATALOGRÁFICA

G 633 a Gomes, Heber Pimentel

Sistemas de Saneamento – Eficiência Energética

1ª Edição. 366p.

ISBN 978-85-7745-607-9

Heber Pimentel Gomes (organizador) – João Pessoa  
Editora Universitária/UFPB, 2010

1. Saneamento 2. Eficiência Energética 3. Energia

UFPB/BC

DU 628.1

## PREFÁCIO

As ações de eficiência energética para o setor de saneamento são, atualmente, imperativas, em virtude do alto consumo de energia provocado pelos sistemas de bombeamento, necessários para impulsionar a água para as redes de abastecimento e para evacuar as águas servidas dos esgotamentos sanitários. Deve-se considerar, também, o alto consumo de energia gasta nas estações de tratamento de água e nas instalações prediais.

Os sistemas de abastecimento e de esgotamento sanitário, são responsáveis por, aproximadamente, 3% da energia consumida no mundo. No Brasil a situação não é diferente e, de acordo com dados de 2008 do Programa Nacional de Conservação de Energia para o setor de Saneamento – PROCEL SANEAR –, entre 2 e 3% do consumo total de energia elétrica no nosso país, o equivalente a cerca de 10 bilhões de kWh/ano, são consumidos por prestadoras de serviços de água e esgotamento sanitário. Este consumo refere-se aos diversos usos nos processos de abastecimento de água e de esgotamento sanitário..

O propósito deste livro é o de reunir, em um único compêndio, diversos capítulos, que abordam o desenvolvimento de avançadas tecnologias, atualmente disponíveis à engenharia de sistemas de saneamento. Os autores dos capítulos são profissionais que vêm trabalhando nesta área há muitos anos, e que pertencem a instituições científicas de consagrada reputação. Os capítulos possuem um caráter científico e prático, onde se busca apresentar determinados estudos de caso referentes aos temas abordados.

Este livro é o resultado das atividades da rede de cooperação técnica internacional LENHS/PROSUL - **Eficiência Hidráulica e Energética em Sistemas de Abastecimento Urbano de Água**. Esta rede, apoiada pelo Conselho nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Brasil (CNPq), é formada por profissionais das Universidades Federal da Paraíba, de Minas Gerais, do Pará, do Rio Grande do Sul, do Mato Grosso do Sul, de Itajubá, do Paraná, da Universidad Técnica de Loja (Equador) e da Universidad Autónoma de Entre Ríos (Argentina).

As atividades da rede LENHS/PROSUL se integram às ações da rede LENHS/PROCEL, que vem sendo apoiada pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica para o Setor de Saneamento, das Centrais Elétricas do Brasil (Eletrobras).

Heber Pimentel Gomes





# SUMÁRIO

<b>Prefácio</b>	3
<b>Universidade Federal da Paraíba</b>	
1 - Controle automático de pressão em sistemas de distribuição de água <i>Saulo de Tarso Marques Bezerra, Simplicio Arnaud da Silva e Heber Pimentel Gomes</i>	9
2 - Otimização Operacional dos Sistemas Adutores Prata e Jucazinho, Pernambuco, Brasil <i>Heber Pimentel Gomes, Saulo de Tarso Marques Bezerra, Wil Lavor Lucena Camboim e Gênnisson Batista Carneiro</i>	29
3 - Diagnóstico Energético de Sistemas de Distribuição de Água da Paraíba <i>Heber Pimentel Gomes, Saulo de Tarso M. Bezerra, Wil Lavor e Paulo Sergio O. Carvalho</i>	37
4 - Sistema de Apoio à Decisão Aplicado ao Setor de Abastecimento de Água de João Pessoa – Paraíba <i>Roberta Macêdo M. Gouveia, Heber Pimentel Gomes e Moisés Menezes Salvino</i>	53
5 - Eficiência Energética no Dimensionamento Econômico de Redes de Distribuição de Água <i>Moisés Menezes Salvino, Paulo Sérgio Oliveira de Carvalho, Gênnisson Batista Carneiro e Heber Pimentel Gomes</i>	61
<b>Universidade Federal do Pará</b>	
6 - Estimativa da energia elétrica consumida no bombeamento do volume de água não faturado no 3º setor de distribuição de água de Belém - Pará <i>Gilberto Caldeira Barreto, Rodrigo Santos de Sá, João Henrique Macedo Sá e José Almir Rodrigues Pereira</i>	75
7 - Utilização de modelo matemática para simulação da operação de sistema de bombeamento de água <i>Petrônio Vieira Júnior, André Luiz A. Mesquita, Vitor Hugo Pereira de Souza e Gleiciane Costa Moraes</i>	87
8 - Utilização de Sistema de Informações Geográficas para controle da ocorrência de vazamentos em redes de distribuição de água potável <i>Aline Christian Pimentel Almeida Santos, José Almir Rodrigues Pereira</i>	99
9 - Informação estratégica para a gestão hidroenergética de sistemas de abastecimento de água <i>Marise Teles Condurú e José Almir Rodrigues Pereira</i>	111
10 - Variação da pressão dinâmica em redes de distribuição de água com e sem setorização <i>José Almir Rodrigues Pereira, Daniel Mescoito Gomes, Davi Edson Sales de Souza e Luciano Louzada do Couto</i>	123
<b>Universidad Autonoma de Entre Ríos</b>	
11 - Eficiencia hidroenergética como objeto de cooperación internacional <i>Mario Alejandro Nudelman, Fernando Diego Bach e Victorio Giorgini</i>	135

**Universidade Federal do Rio Grande do Sul**

- 12 - Redução do consumo de energia elétrica em um sistema de abastecimento de água mediante a utilização de variador de frequência em sistemas de bombeamento 165  
*Liane de Azevedo Saffi, Dieter Wartchow e Natal de Avila Antonini*

**Universidad Técnica Particular de Loja**

- 13 - Gestión para la eficiencia hidráulica y energética en sistemas de distribución de agua 179  
*Holger Benavides Muñoz e José Sánchez Paladines*
- 14 - Manejo de aguas de tormenta: Validación de alternativas mediante un modelo físico 199  
*Fernando Oñate-Valdivieso*

**Universidade Federal do Paraná**

- 15 - Reflexão sobre a rede de distribuição de água - vazamento como mecanismo hidráulico de proteção 207  
*Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes, Alex Johnny Simplicio, Sérgio Michelotto Braga, Roberto Suse e Daniel Costa dos Santos*
- 16 - Reflexões sobre medidas de variáveis hidráulicas em laboratório – Caso LENHS-UFPR 217  
*Alex Johnny Simplicio, Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes, Sérgio Michelotto Braga, André Luiz Tonso Fabiani e Daniel Costa dos Santos*

**Universidade Federal do Mato Grosso do Sul**

- 17 - Tecnologias de suporte a decisão para auxiliar a gestão hidroenergética em sistemas de abastecimento de água 227  
*Peter B. Cheung; Keila R. F. O. Dassan; Agustín M. E. A. Pérez; Ricardo Coutinho; Guilherme V. Girol; Katheryne L. N. Bardales; Paulo A. Oliveira e Carlos Nobuyoshi Ide*

**Universidade Federal de Minas Gerais**

- 18 - Instrumentação e controle de uma bancada de bombeamento 247  
*Bruno H. G. Barbosa, Luis A. Aguirre e Carlos B. Martinez*
- 19 - Avaliação de parâmetros técnicos e econômicos na aquisição e substituição de motores de indução trifásicos de 1 CV a 10 CV 255  
*Marcos Antonio da Silva, Manuel Losada y Gonzalez, Selênio Rocha Silva e Carlos B. Martinez*
- 20 - Comparação de modelos caixa-branca e caixa-preta de um sistema de bombeamento hidráulico real utilizando conversores de frequência 293  
*Erlon Cavazzana, Bruno Henrique Barbosa, Leonardo Antônio Borges Tôrres e Carlos Barreira Martinez.*

**Universidade Federal de Itajubá**

- 21 - Avaliação técnica do potencial de eficiência energética em sistemas de ar comprimido 303  
*Jamil Haddad, Roberto Akira Yamachita, Eduardo Crestana Guardia*
- 22 - Estudo de racionalização do consumo de energia elétrica em sistemas de tratamento e abastecimento de água 309  
*Jamil Haddad, Augusto Nelson Carvalho Viana, Afonso Henriques Moreira Santos, Edson da Costa Bortoni, Roberto Akira Yamachita e André Ramon Silva Martins*
- 23 - Capacitação laboratorial para eficiência energética em sistemas de bombeamento 317

*Mateus Ricardo Nogueira Vilanova e Augusto Nelson Carvalho Viana*

- 24 - Caso prático de eficiência energética em uma edificação pública: projeto, implementação e análise do resultado 325  
*Jamil Haddad, Roberto Akira Yamachita, Eduardo Crestana Guardia, Laura Porto, Paulo Leonelli e Paulo T. A. Cruz<sup>2</sup>*
- 25 - Concepção e desenvolvimento do Projeto Piloto de Conservação de Energia no Meio Rural: estudo de caso nas Terras Altas da Mantiqueira 333  
*Mateus Ricardo Nogueira Vilanova, Roberto de Mattos, Augusto Nelson Carvalho Viana, Emerson Salvador e Moises Antônio Dos Santos<sup>2</sup>*
- 26 - Ensaaios em instalações de bombeamento in situ através de um Laboratório Móvel 341  
*Augusto Nelson Carvalho Viana e Mateus Ricardo Nogueira Vilanova*
- 27 - Possibilidades de conservação e eficientização hidroenergética em sistemas de irrigação 351  
*Augusto Nelson Carvalho Viana e Mateus Ricardo Nogueira Vilanova*
- 28 - Redução do consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento através da redução das perdas de água: estudo de caso no município de Lavras-MG 359  
*Mateus Ricardo Nogueira Vilanova, Augusto Nelson Carvalho Viana, Emerson Salvador, George Camargo dos Santos e Josimar Cornélio da Pascoa*



---

# 1 Controle automático de pressão em sistemas de distribuição de água

---

Saulo de Tarso M. Bezerra<sup>1</sup>, Simplício Arnaud da Silva<sup>2</sup> e Heber Pimentel Gomes<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pernambuco - UFPE - Caruaru - Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal da Paraíba – UFPB – João Pessoa – Brasil

## INTRODUÇÃO

O controle da pressão é fundamental para a redução de perdas reais (ou físicas) em sistemas urbanos de distribuição de água (SDA). A influência da pressão nas perdas é conhecida há muito tempo pelos pesquisadores e técnicos das companhias de saneamento. Durante anos, utilizou-se no cálculo de estimativas de perdas de água o princípio baseado na raiz quadrada, onde a vazão perdida é proporcional a raiz quadrada da pressão na rede hidráulica. Em 1994 foi apresentada a teoria *Fixed and Variable Area Discharge paths* (FAVAD) com a vazão perdida variando conforme a Eq. (1). Essa teoria apontou que furos em tubulações flexíveis aumentam de diâmetro conforme a pressão aumenta, influenciando o valor de N1.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{N1} \quad (1)$$

onde:

Q é a vazão do vazamento.

P é a pressão no sistema.

N1 é o expoente que depende do tipo de material.

Segundo análises realizadas na Inglaterra, Malásia, Canadá, Chipre, Brasil, EUA, Austrália e Nova Zelândia, os valores obtidos para o coeficiente N1 oscilam entre 0,5 e 1,5, ocasionalmente alguns valores são acima de 1,5. Um modo prático de avaliar o volume de vazamentos em setores de abastecimento é assumir uma linearidade entre a pressão e a vazão, ou seja, N1 igual a 1, geralmente, se obtém valores próximos aos reais. Todavia, sempre que possível o coeficiente deve ser determinado *in loco*.

Uma das maiores vantagens do gerenciamento da pressão em SDA é muitas vezes esquecida, que é a redução significativa da frequência de novos arrebentamentos. Bragalli e Sacchi (2002) ressaltaram que a diminuição do número de novos rompimentos nas tubulações é, geralmente, o resultado mais impactante economicamente na gestão de pressões. Lambert (2002) apresentou dados de diferentes sistemas, no mundo, para demonstrar o impacto da pressão excessiva sobre a frequência de rompimentos:

- Austrália: a redução em 40% na pressão do setor de uma cidade resultou na redução da frequência de rompimentos em 55%.
- Nova Zelândia: a redução na pressão média de 71 para 54 mca em um SDA de Auckland resultou na redução da frequência de rompimentos para o valor mais baixo observado em 8 anos.
- Brasil: a aplicação da gestão da pressão em 8 setores de São Paulo, com 140 km de tubulações, resultou numa redução da frequência de rompimentos de 38,7%.

As principais ações para o controle de pressão em sistemas de distribuição de água (SDA) são: a setorização das redes hidráulicas, instalação de válvulas redutoras de pressão e a operação de bombas com velocidade de rotação variável.

## SETORIZAÇÃO DE REDES HIDRÁULICAS

Para o gerenciamento da pressão em SDA é necessário que a rede esteja dividida em setores. O controle de pressão parte do zoneamento piezométrico, ou seja, da divisão do sistema em setores com comportamento piezométrico homogêneo, cada um com fronteiras conhecidas e bem delimitadas, onde se controlam todas as entradas de alimentação. Estes setores são chamados de Zonas de Medição e Controle (ZMC).

A setorização é proveniente da escola de engenharia anglo-saxônica e tem vindo progressivamente sendo preconizada internacionalmente. As ZMC podem ter dimensões muito variadas dependendo da topologia da rede, densidade populacional e densidade de ramais, podendo conter entre 500 a 5000 ligações (WRC, 1994). Estes fatores também influenciam no número de pontos de entrada de alimentação, que por razões de economia e simplicidade de operação se procura uma configuração com um menor número possível. No Brasil é incomum a adoção de setores com mais de uma entrada de alimentação.

A setorização possibilita a administração da pressão em cada distrito ou grupo de distritos de forma que a rede é operada no nível ótimo de pressão, além de facilitar o monitoramento das perdas de água. A Figura 1 apresenta um desenho esquemático mostrando a setorização, com a utilização de reservatórios, *booster* e válvulas.

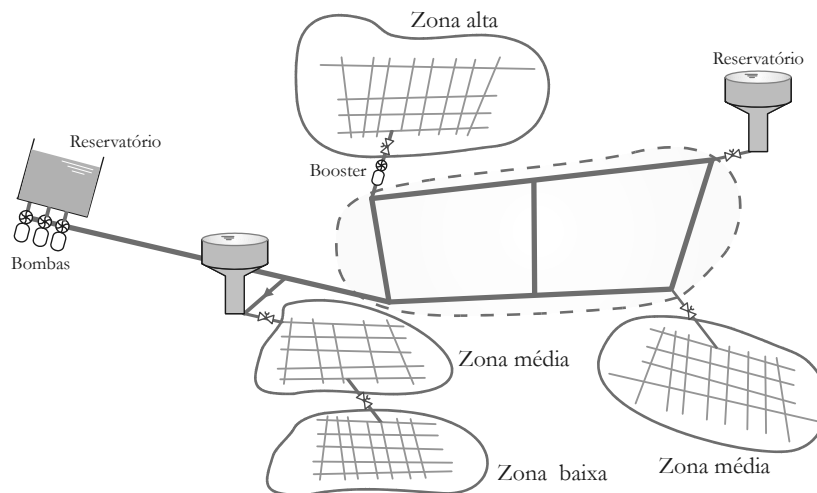


Figura 1 - Exemplo de um sistema de distribuição de água setorizado

Verifica-se que, na setorização clássica, o desnível geométrico máximo recomendado é 50 metros. Em regiões de topografia mais acidentada é necessária a utilização de um reservatório intermediário. Níveis piezométricos adequados, além de reduzir o volume perdido em vazamentos, possibilitam, de maneira geral, o aumento da vida útil da infra-estrutura do sistema; redução da frequência de novos rompimentos na rede hidráulica; redução de vazamentos em instalações privadas e transbordamentos de reservatórios domiciliares; redução do consumo relacionado com a pressão da rede (LAMBERT, 2002).

O uso da setorização visando o controle da pressão, de acordo com Bragalli e Sacchi (2002), deve considerar os seguintes critérios: a) definição de zonas homogêneas, do ponto de vista hidráulico, ou seja, estado de conservação da rede (incluindo os ramais) e tipologia dos padrões de consumo; b) definição de zonas vulneráveis analisadas a partir de dados de arrebentamento de tubos; c) minimização do uso de válvulas para isolamento do setor; e d) garantia dos níveis de serviço relacionados com o funcionamento hidráulico e a qualidade da água em cenários normais e de emergência.

## VÁLVULAS DE CONTROLE AUTOMÁTICAS

Diversos autores têm sugerido a alocação de válvulas como a principal alternativa para o controle de pressão em SDA. As válvulas utilizadas em sistemas de distribuição de água são chamadas, nos países de língua portuguesa, de Válvulas Redutoras de Pressão, ou simplesmente, VRP. As VRP, como estruturas dissipadoras, são utilizadas nos sistemas hidráulicos como forma de uniformização e controle das

pressões, dando origem a uma perda de carga localizada, mediante a dissipação de energia hidráulica, através do abaixamento dos valores de pressão a jusante.

A VRP é um dispositivo mecânico que permite reduzir, automaticamente, uma pressão variável de montante a uma determinada pressão a jusante. O mecanismo de controle de uma VRP pode ser mecânico ou eletrônico. No caso de controle mecânico da válvula, a regulação previamente determinada é fixa, ou seja, garante uma pressão de jusante pré-estabelecida independentemente das condições de vazão e pressão de montante. Em se tratando de controle eletrônico, a atuação da VRP é feita através de programas pré-estabelecidos, que permitem monitorar e controlar as vazões e as pressões, garantindo condições adequadas de abastecimento ao longo das 24 horas do dia.

Atualmente, as VRP podem ser controladas não apenas para um único valor de pressão, mas para diversos patamares de pressão, permitindo, assim, uma gestão mais eficiente dos níveis de serviço e um melhor desempenho hidráulico do sistema. Segundo Bezerra (2009), os principais tipos de VRP utilizadas no setor de saneamento são:

- VRP com pressão de saída fixa (sem controlador eletrônico): é usada quando o sistema a ser controlado não tem mudanças significativas de demanda, bem como perdas de carga relativamente pequenas; os parâmetros de regulação são fixados por um circuito de pilotagem (Figura 2a).
- VRP com pressão proporcional (sem controlador eletrônico): a pressão de saída (a jusante da VRP) é proporcional a pressão de montante (Figura 2b).
- VRP com modulação por tempo: é usada para controlar um sistema que apresenta grande perda de carga, porém de perfil regular de consumo. Assim, a VRP irá trabalhar com patamares de pressão de saída ajustadas para um ciclo de 24 horas (Figura 2c).
- VRP com modulação por vazão: é usada para controle em sistemas que apresentam grande perda de carga e mudanças no perfil de consumo, que podem ser no tipo de uso, na sazonalidade ou na população (Figura 2d).

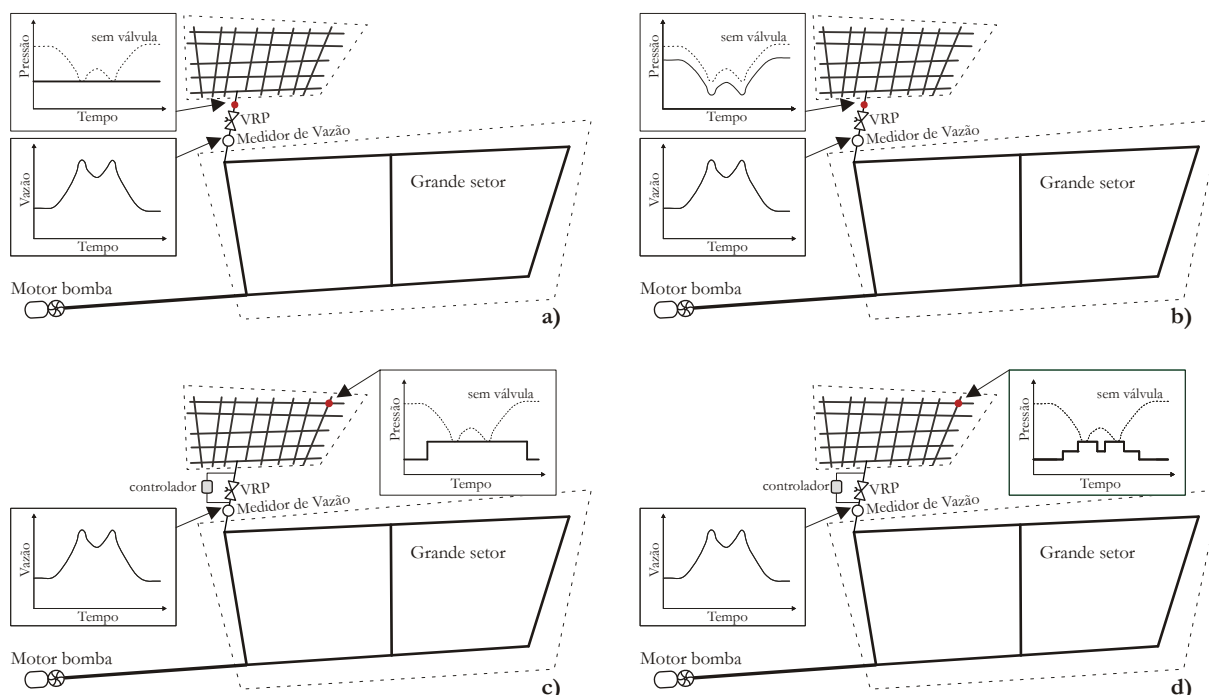


Figura 2 - Representação de operação de uma VRP com: a) pressão de saída fixa; b) pressão de saída proporcional; c) pressão de saída modulada por tempo com duas atribuições; d) pressão de saída modulada pela vazão com três atribuições<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Os dois últimos casos de modulação (controle eletrônico) podem ter como referência um transdutor localizado logo após a VRP ou em um ponto determinado conforme as características hidráulicas da rede (ponto crítico).



No ano de 2001, a SABESP tinha cerca de 500 válvulas redutoras de pressão instaladas, com uma abrangência de 22% dos sistemas da companhia, que, segundo avaliações internas, proporcionou a recuperação da vazão de 2900 L/s (CONEJO et al., 2004), o que corresponde a aproximadamente o dobro do consumo da cidade de Campina Grande - PB (cerca de 400 mil habitantes). Anecchini et al. (2007) avaliaram o comportamento de setores controlados por VRP em municípios da Região Metropolitana da Grande Vitória - ES (Brasil), como ferramenta de combate às perdas reais de água da CESAN. A redução do consumo de água variou de 14 a 55% nos setores monitorados. Striani e Lopes (2004) descreveram a utilização de 5 VRP como ferramentas de combate as perdas físicas de água no Município de São Caetano do Sul pelo Departamento de Água e Esgoto deste Município. Com as implantações das VRP no sistema de distribuição de água houve uma economia de mais de 125 mil m<sup>3</sup> de água por mês, com um tempo de retorno do investimento de 3 meses.

## OPERAÇÃO DE BOMBAS COM VELOCIDADE DE ROTAÇÃO VARIÁVEL

A bomba centrífuga é o equipamento comumente utilizado para transportar líquidos no saneamento básico, na irrigação de lavouras, nos edifícios residenciais e na indústria, por operarem com sensível variação de vazão e pressão. A maioria dos SDA atuais possui vários conjuntos motor-bomba (CMB), seja para recalcar a água de mananciais de superfície ou de poços, seja para recalca-las 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 o líquido.

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 3. O ponto de operação é determinado pelo cruzamento das curvas vazão versus altura manométrica total e do sistema.

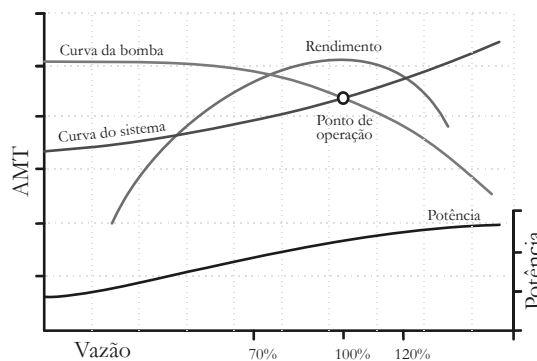


Figura 3 - Curvas característica de uma bomba centrífuga

Determinados sistemas de bombeamento requerem algum tipo de controle de vazão e pressão, principalmente quando há variação da demanda. O controle da vazão/pressão é necessário quando a carga requerida ao sistema de bombeamento varia ao longo do dia, o que ocorre, geralmente, quando há injeção direta no sistema. De acordo com a variação da curva de consumo ao longo do tempo, em redes hidráulicas, geralmente, a vazão atinge um valor máximo entre às nove horas e às quinze horas e um valor mínimo durante a madrugada (pressões máximas).

As alternativas mais usuais para a variação da vazão/pressão dos sistemas de bombeamento são o **by-pass**, **válvulas de manobras** ou **variadores de velocidade de rotação de bombas**.

O controle de vazão/pressão através de válvulas de manobras é feita por meio do acréscimo de perda de carga, deslocando o ponto de operação do sistema (intersecção da curva vazão versus AMT com a curva do sistema) progressivamente sobre a curva da bomba. A Figura 4a apresenta as curvas típicas da

operação com válvulas de manobras, onde se destaca a perda de energia. Além das perdas, destaca-se que a vida útil dos equipamentos é diminuída e a energia excedente pode gerar vibrações no CMB. Wood e Reddy (1994) definem muito bem o controle de vazão/pressão através de válvulas, afirmando ser o mesmo que “[...] *conduzir um carro com o freio de mão acionado: o resultado é o desperdício desnecessário de energia*”.

Outro método “convencional” e ainda comum em sistemas de bombeamento é o uso do *by-pass*. O *by-pass* é a instalação de uma tubulação que tem a função de transportar parte da água bombeada (recalcada) ao reservatório de sucção. A Figura 4b apresenta as curvas características típicas do controle de vazão através de *by-pass*.

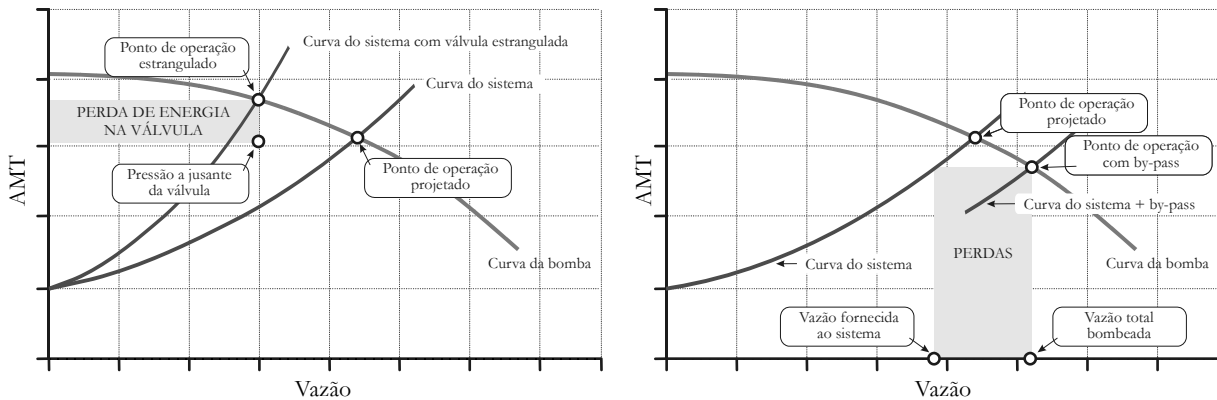


Figura 4 - Curvas características com controle de vazão e pressão através de válvulas (a) e *by-pass* (b)

É fato que a alternativa mais eficiente para a variação da vazão e pressão é o controle de velocidade de rotação de bomba (EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE, 2004). À medida que a velocidade de rotação decresce, a energia consumida diminui gradativamente. A Figura 5 apresenta a comparação entre os consumos de bombas centrífugas “típicas” dos três métodos de controle de vazão/pressão mais utilizados. Pode-se verificar nitidamente a economia do uso de conversores de frequência acoplados a CMB sobre os outros dois métodos. As equações que relacionam a vazão, AMT e a potência com a velocidade de rotação são conhecidas como Leis de Similaridade (Eq. 2, Eq. 3 e Eq. 4).

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad \text{relação vazão x rotação} \quad (2)$$

$$\frac{AMT_1}{AMT_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad \text{relação AMT x rotação} \quad (3)$$

$$\frac{Pot_1}{Pot_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad \text{relação potência x rotação} \quad (4)$$

Em certos casos particulares, a aplicação de bombas operando com variação da velocidade de rotação oferecem grande potencial para a redução do consumo de energia. Os resultados vão frequentemente bem além do ganho quantitativo de energia, e pode incluir aumento do desempenho e confiabilidade do SDA.

Variar a velocidade de rotação tem efeito direto sobre o desempenho das bombas. Europump e Hydraulic Institute (2004) sugerem, para o melhor aproveitamento do rendimento da bomba, que o ponto referente à demanda máxima esteja situado a direita da curva de melhor rendimento, com isso na maior parte do tempo o ponto de operação do sistema se mantém próximo do ótimo. A Figura 6a apresenta um exemplo onde se diminui a velocidade de rotação do conjunto motor-bomba e o ponto de operação permanece próximo à curva de rendimento máximo.

Nos sistemas onde o desnível geométrico é predominante na variação da altura manométrica, a curva do sistema começa a partir do valor da perda estática e, conseqüentemente, uma pequena redução

na velocidade de rotação da bomba proporciona uma grande variação da vazão e na eficiência da bomba (Figura 6b). Nestes casos, deve-se ter cautela na aplicação das Leis de Similaridade para dimensionamento de equipamentos.

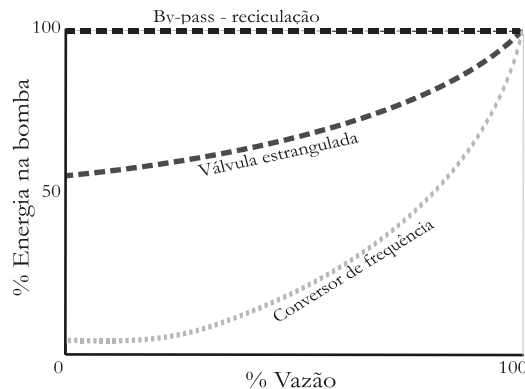


Figura 5 - Gráfico típico de comparação do consumo de energia para os métodos de controle de pressão/vazão: *by-pass*, válvula de manobra e conversor de frequência

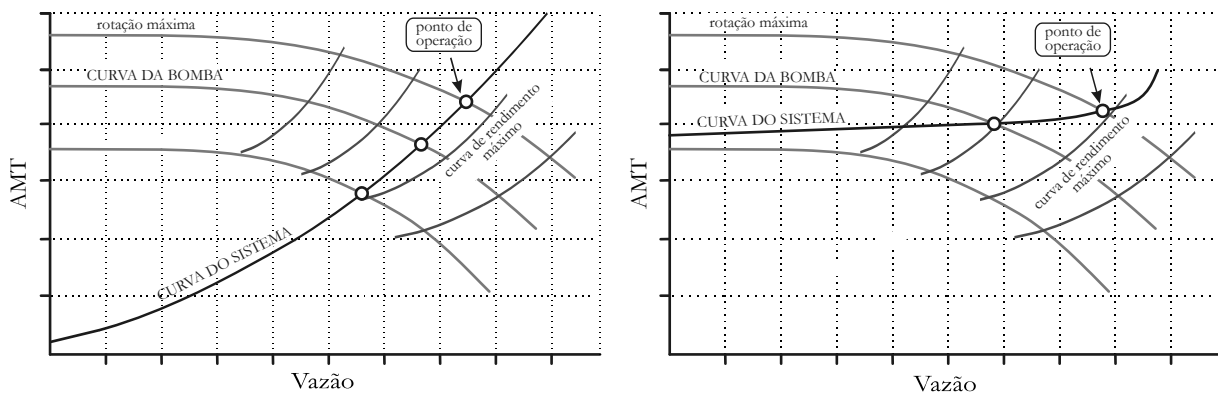


Figura 6 - Exemplo de curvas características de um sistema com predominância de perda de carga na AMT (a) e de um sistema com predominância do desnível geométrico na AMT (b)

Não obstante ser recente a comercialização em grande escala de conversores de frequência, o seu uso já possui décadas. Em 1989, Dewinter e Kedrosky (1989) descreveram a expansão do sistema de bombeamento de petróleo de *Betume Blend Cold Lake Pipeline* (Canadá), que mudou a capacidade de uma estação elevatória de 130 mil para 185 mil barris por dia, através da instalação de um novo conjunto motor-bomba de 3.500 HP com velocidade de rotação variável através de um conversor de frequência (VFD). O VFD foi fornecido pela GE, sendo a primeira aplicação do tipo no Canadá e o maior motor de indução da época operando com frequência de tensão variável em uma unidade de petróleo bruto na América do Norte. As principais preocupações dos engenheiros com relação ao uso do conversor de frequência foram: custo de investimento versus a economia de energia, aceitação prática industrial, manutenção e confiabilidade. O conversor, filtro harmônico, contactores, sistema de ar condicionado, peças sobressalentes, instalação e engenharia custou aproximadamente \$ 800.000 (Canadá). Apesar do preço da energia elétrica da época ser baixa no Canadá, a TIR descontada foi de 18%.

Os conversores são compostos, em geral, por uma ponte retificadora (diodos), um circuito intermediário de barramento de corrente contínua (filtro capacitivo) e um bloco conversor constituído de transistores de potência. O diagrama esquemático do conversor é apresentado na Figura 7. Os conversores devem ser dimensionados pela corrente do motor, porém é importante observar o tipo de conjugado (constante, linear, ou quadrático), precisão de controle, partidas e frenagens, regime de trabalho, e tipo de aplicação. A ponte retificadora de diodos transforma a tensão alternada de entrada em uma tensão contínua que é filtrada por um banco de capacitores. A tensão contínua alimenta uma ponte conversora formada por transistores de potência e diodos. O controle das tensões de base dos transistores é feito pelo circuito de comando (que possui um microcontrolador), que permite a geração de pulsos de

tensão elétrica que alimenta o motor com tensão e frequência controladas. Essa técnica é conhecida como modulação por largura de pulso – PWM. A estratégia PWM gera ondas senoidais de frequência variável com resolução de até 0,01 Hz. O conversor é composto de seis chaves eletrônicas implementadas numa configuração como mostrada na Figura 8. Dependendo da combinação de chaves abertas ou fechadas pode-se obter na saída do conversor formas de ondas diferentes. Estas chaves são implementadas no conversor de frequência com dispositivos semicondutores chamados de IGBT - transistor bipolar com porta isolada. Na prática, o controle não é tão simples, porque o fluxo magnético gera correntes no rotor, e as interferências externas, tais como a temperatura ou mudança da carga, podem comprometer o processo. No entanto, a tecnologia atual supera com eficácia estes problemas.

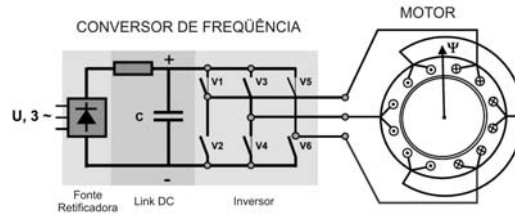


Figura 7 - Circuito esquemático de um conversor de frequência

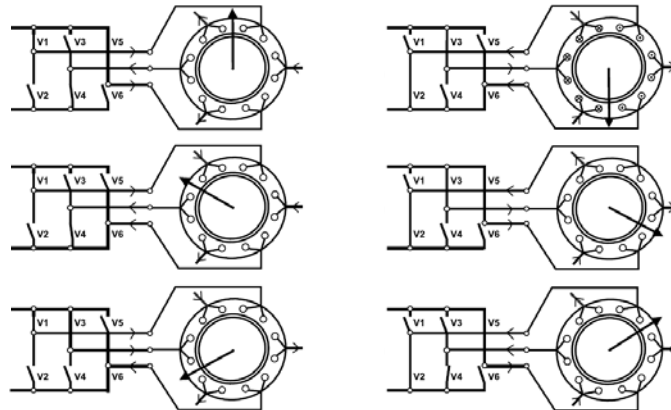


Figura 8 - Esquema de chaveamento do conversor de frequência

Existem dois tipos de conversores de frequência (VFD) disponíveis no mercado: o escalar e o vetorial. A diferença entre o controle escalar e o vetorial consiste, basicamente, na relação entre o torque e a velocidade de rotação. O VFD escalar opera baseado numa estratégia de comando “U/f constante”, ou seja, a razão entre a tensão e a frequência é constante até a tensão atingir a tensão nominal. Quando a tensão atinge o valor nominal, esta permanece constante e há então apenas a variação da frequência que é aplicada ao enrolamento do estator. O conversor com controle vetorial possui uma maior precisão de regulação de velocidade de rotação; maior performance dinâmica; controle de torque linear para aplicações de posição ou de tração; operação suave em baixa velocidade de rotação e sem oscilações de torque, mesmo com variação de carga. Este tipo de controle é indicado para conversores que vão operar com torque elevado em baixa velocidade de rotação, controle preciso de velocidade e torque regulável. Com isto, determina-se uma área acima da frequência nominal que é conhecida como região de enfraquecimento de campo, onde o fluxo começa a decrescer e, portanto, o torque também começa a diminuir.

Nota-se, na Figura 9a, que o conjugado permanece constante até a frequência nominal e, acima desta, começa a decrescer. A potência de saída do conversor de frequência comporta-se da mesma forma que a variação  $U / f$ , ou seja, cresce linearmente até alcançar a frequência nominal e permanece constante acima desta (Figura 9b).

No que diz respeito à faixa de rotação recomendada, há uma tendência entre os projetistas adotar a faixa de 50 a 100% da velocidade de rotação nominal. Na aplicação de VFD em motores já em funcionamento, deve-se ter cuidado com as características elétricas reais do motor e do conversor, caso contrário, há um considerável risco de fracasso. Conversores de frequência geram picos de tensão e

produzem harmônicos que causam aquecimento nos rolamentos do motor. Há fabricantes de motores que fornecem motores específicos para uso com conversores.

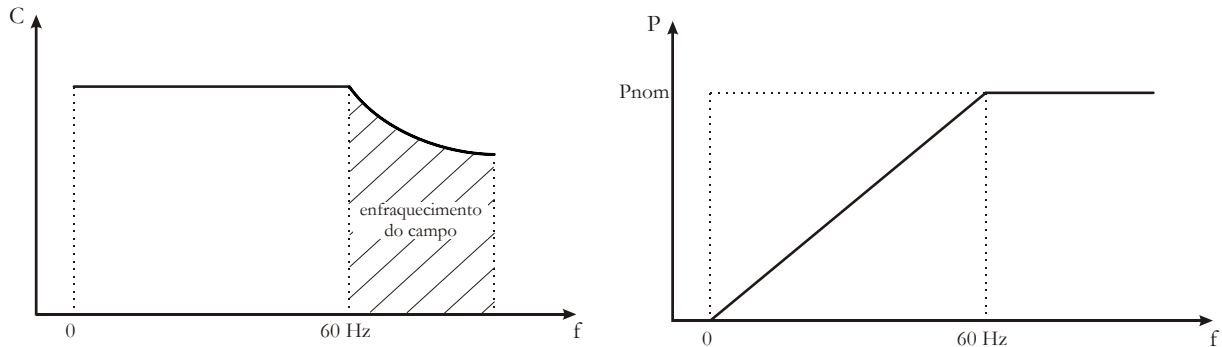


Figura 9 - Curvas características do conjugado (a) e da potência (b) em função da frequência de alimentação

Na prática, no setor de saneamento, é necessária a análise cautelosa do uso de motores com a frequência de alimentação variando de 0 a 60 Hz, porque na maioria dos casos é mais viável, tecnicamente e economicamente, a instalação de conjuntos motor-bomba trabalhando em paralelo, com apenas um ou dois sendo acionados por conversores. O ideal é a avaliação técnica e econômica de cada caso.

As principais vantagens dos conversores de frequência em sistemas de bombeamento são:

- Aumento da confiabilidade do sistema.
- Aumento da vida útil da bomba, mancais e vedações.
- Controle da corrente do motor elétrico.
- Economia de energia.
- Aumento do fator de potência.
- Elimina a necessidade de válvulas para partir e parar o bombeamento.
- Melhor controle do processo.
- Minimiza a necessidade de paradas do sistema ou elimina os saltos de produção.
- Possibilita a automação do sistema.
- Diminuição do número de rompimentos nos tubos.

Esta última vantagem foi citada por Bezerra (2009) como resultado direto da aplicação de VFD. Covas (1998) verificou que a probabilidade de ocorrência de rompimentos aumenta mais com a amplitude de oscilação de pressão do que com o seu valor médio e máximo. Portanto, como a oscilação de pressão na rede praticamente é eliminada com o uso de VFD, há a minimização da ocorrência de novas rupturas nas redes hidráulicas. Como desvantagens da aplicação de conversores de frequência, têm-se:

- Alteração das condições de operação das bombas, tais como o rendimento, o NPSH etc.
- Custo inicial relativamente alto.
- Elevação da temperatura na superfície dos motores; em algumas aplicações, como na indústria petroquímica, é necessária a instalação de ventilação forçada, para que não haja risco de explosão.
- Geração de distorções harmônicas da tensão.
- Limitação da distância entre o conversor de frequência e o motor, contudo, há equipamentos adicionais para superar este problema, e.g. o filtro de interferência de frequência de rádio.
- Os componentes eletrônicos do conversor não são tolerantes a locais corrosivos e com umidade.
- Possibilidade, em alguns casos, de danos na isolamento dos motores.
- Requer manutenção especializada em eletrônica.

A implantação VFD em estações de bombeamento nem sempre é viável técnica e economicamente. Para se atestar a viabilidade técnica e econômica deve-se efetuar um estudo detalhado da hidráulica operacional do SDA, complementado com estudos eletro-mecânico, além dos quantitativos de custos e da economia proporcionada de energia elétrica. Em alguns casos, o vendedor do equipamento alega

vantagens da implantação do equipamento sem considerar as condições operacionais específicas do sistema de bombeamento em pauta. Para finalizar, ressalta-se que é fortemente recomendado o uso de VFD em SDA com variação significativa da vazão e injeção direta na rede hidráulica.

## SISTEMAS DE CONTROLE

A indústria da água no Brasil vem tentando acompanhar o desenvolvimento tecnológico dos demais setores industriais, onde a presença da automação é uma realidade. A automação pode ser definida como qualquer aplicação de técnica computadorizada ou mecânica para diminuir ou suprimir a interferência humana em qualquer processo. Mecanismos automáticos podem ser adotados tanto no auxílio de controle de processos simples como no controle automático de grandes sistemas.

Um sistema de controle é uma disposição de componentes físicos, conectados ou relacionados de tal maneira a comandar, dirigir ou regular a si mesmo ou a outros sistemas. A excitação aplicada a um sistema é conhecida como entrada -  $U(s)$ , enquanto a resposta obtida é chamada de saída -  $C(s)$ . Os sistemas de controle podem ser de “malha aberta” e “malha fechada”. O sistema de controle em malha aberta utiliza um atuador para controlar o processo sem a utilização de realimentação (*feedback*). Um sistema com várias bombas em paralelo, onde se determina com base no horário e na experiência dos técnicos quantas bombas devem ser ligadas, sem nenhuma variável sendo medida, é um exemplo de controle em malha aberta tipo liga/desliga (*on/off*).

Os sistemas em malha fechada, conhecidos também como sistemas retroalimentados, determinam a ação corretiva mais apropriada com base em variáveis medidas. Para tanto, são utilizados controladores que, por meio da execução algorítmica de um programa ou circuito eletrônico, comparam o valor atual com o valor de referência, efetuando o cálculo para ajuste e correção. O valor de referência também é conhecido como valor desejado e *set-point* (em inglês). Nos sistemas de malha fechada, a ação de controle depende, de alguma maneira, da variável controlada. Como exemplo, pode-se citar o controle da pressão através da variação da velocidade de rotação do conjunto motor-bomba; o sistema de controle do conversor de frequência verifica o valor da pressão e decide se aumenta ou diminui a frequência de acionamento do motor. A diferença entre o valor de referência e o sinal da malha de realimentação é chamada de erro -  $E(s)$ . A saída do sistema de controle, geralmente, é definida como variável de controle -  $U(s)$ . A Figura 10 apresenta o diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada.

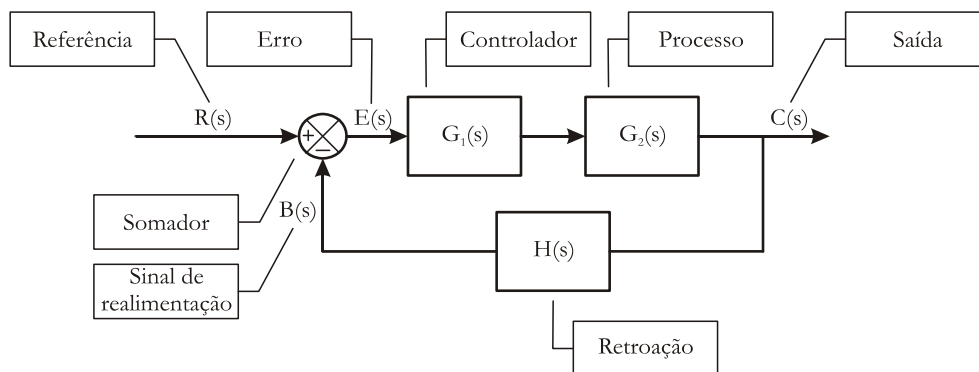


Figura 10 - Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada

De maneira geral, no controle clássico, a relação “entrada-saída” representa a relação “causa-efeito” do processo e pode ser descrita matematicamente através de equações diferenciais, equações de diferença, funções de transferência. Logo, para compreender e controlar sistemas deve-se determinar modelos matemáticos destes sistemas. Torna-se necessário, por conseguinte, analisar as relações entre as variáveis do sistema e obter um modelo matemático. Geralmente, os sistemas são dinâmicos e as equações que os descrevem são equações diferenciais. No estudo do controle “convencional” a abordagem aos problemas de sistemas dinâmicos pode ser resumida em:

- Definir os sistemas e seus componentes.
- Formular o modelo matemático e listar as hipóteses necessárias.

- Escrever as equações diferenciais que descrevem o modelo.
- Resolver as equações em função das variáveis de saída desejáveis.
- Examinar as soluções e as hipóteses.
- Se necessário, reanalisar ou reprojeter o sistema.

Dentre os diversos tipos de controladores, os mais utilizados são o Proporcional Integral Derivativo (PID), Regulador Linear Quadrático (LQR), Regulador Linear Gaussiano (LQG), Controle H Infinito ( $H^\infty$ ) e Fuzzy. O tipo de controlador mais utilizado em processos industriais é o chamado PID (Proporcional Integral Derivativo). A técnica de controle PID consiste em calcular um valor de atuação sobre o processo a partir das informações do valor desejado e do valor atual da variável do processo. Cubillos (2008) apresenta um resumo sobre a teoria dos métodos de controle LQR, LQG e  $H^\infty$ .

Dentre os sistemas inteligentes podem-se destacar os sistemas fuzzy. O sucesso deste tipo de sistema no controle de processos em diversas áreas da engenharia tem conduzido inúmeros pesquisadores a utilizar esta técnica no desenvolvimento de seus controladores. Não é raro, encontrarmos sistemas fuzzy desenvolvidos para processos que, até então, não tinham resultados satisfatórios.

Em 1965, Lotfi Asker Zadeh publicou uma pesquisa sobre as virtudes da imprecisão, lançando as bases da *Fuzzy Logic* (ZADEH, 1965). Esta teoria apresentava a proposta do uso de funções que operassem dentro de um intervalo de números reais. O cientista mostrava que a vida está sujeita às imprecisões, e que o universo que nos envolve é complexo para as cartesianas conclusões. Por exemplo, no trânsito, cada motorista estipula a velocidade do automóvel de acordo com critérios que não podem ser expressos matematicamente.

A teoria da Lógica Fuzzy enfrentou forte resistência por parte da comunidade científica no seu início, principalmente por parte dos estatísticos norte-americanos. Entretanto, a despeito de todo “preconceito” muitos pesquisadores vislumbraram as possibilidades que esta teoria oferecia e trabalhos surgiram em todo o mundo (ORTEGA, 2001). Zadeh é personalidade marcante na ciência e tecnologia da nossa época, cujos trabalhos têm impacto em muitas áreas da ciência, com uma influência marcante nas áreas de controle de processos e tomada de decisão.

Em 1972 formou-se no Japão o primeiro grupo de pesquisas em Lógica Fuzzy, coordenado por Toshiro Terano. Em 1974, o professor Mamdani, do Queen Mary College - Universidade de Londres, aplicou pela primeira vez a Lógica Fuzzy no controle de sistemas; segundo Reyero e Nicolás (1995), após inúmeras tentativas frustradas em controlar uma máquina a vapor com diversos tipos de controladores, incluindo o controle PID. A partir daí, surgiram várias aplicações no controle de sistemas. A primeira aplicação industrial foi o controle de um forno para produção de cimento pela F. L. Smidth em 1976, na Dinamarca. Em 1977, Didie Dubois, na Alemanha, aplicou a Lógica Fuzzy em um estudo sobre condições de tráfego, surgindo o primeiro sistema especialista fuzzy. Em 1984, surgiu um controlador fuzzy para o tratamento de água no Japão. Em 1985 foi desenvolvido o primeiro chip fuzzy por Masaki Togai e Hiroyuke Watanabe, nos EUA. Em 1987 foi inaugurado com sucesso um trem controlado com Lógica Fuzzy (Japão) e um helicóptero não tripulado, totalmente controlado por um sistema fuzzy. Em 1988, começou a operar no Yamaichi um sistema de comércio financeiro fuzzy. Mas foi em 1990 que a teoria atingiu a popularidade com o lançamento no mercado da máquina de lavar roupas da Matsushita, da televisão da Sony e a câmera fotográfica da Fujitsu (ORTEGA, 2001).

Apesar do extenso uso da Lógica Fuzzy, ainda há pesquisadores que questionam o seu uso. ZADEH (2008) respondeu em seu artigo “*Is there a need for Fuzzy Logic?*”: “*Fuzzy Logic is not fuzzy*” - a Lógica Fuzzy é uma lógica precisa de imprecisão e raciocínio aproximado. Mais especificamente, a lógica deve ser vista como a formalização de duas capacidades humanas notáveis. A primeira, a aptidão de tomar decisões racionais em um ambiente de imprecisão, incerteza e informação incompletas - em resumo, em um ambiente imperfeito. E segundo, a habilidade para executar uma grande variedade de tarefas físicas e mentais sem qualquer cálculo matemático. Ainda segundo Zadeh, a maior e mais importante contribuição da lógica, que é extensamente não reconhecida, é seu alto poder de exatidão.

O grande alcance do impacto da Lógica Fuzzy no meio científico é comprovado quando se analisa o número de trabalhos na literatura que contêm a palavra fuzzy no título. Há mais de 53 mil documentos listados no banco de dados do *Database for Physics, Electronics and Computing* - INSPEC e mais de 15 mil no *Mathematical Reviews*. Atualmente, existem quase 5 mil patentes no Japão e mais de 1500 patentes nos EUA.

As teorias de controle “convencionais” se aplicam a uma grande variedade de sistemas onde o processo é bem definido. Várias técnicas de controle foram desenvolvidas e aplicadas com sucesso em diversos problemas. Entretanto, estas técnicas não são capazes de resolver problemas reais cuja modelagem matemática é impraticável. Isto ocorre devido ao fato das expressões matemáticas (equações diferenciais, equações à diferença, funções de transferência) se tornarem muito complicadas de serem definidas, ou seja, as relações entre as variáveis do sistema são desconhecidas ou “inexatas”. Os sistemas fuzzy (SF) se apresentam como uma alternativa de controle bastante eficiente para sistemas cujas plantas são de difícil modelagem, tempo morto elevado e/ou zona morta alta.

Nos casos de sistemas de distribuição de água, quando se deseja o controle de mais de uma variável (podendo ser a mesma grandeza, por exemplo, dois pontos de pressão), a modelagem matemática não é possível, já que para cada ponto de operação as equações mudam. Este fato indica fortemente para a utilização de técnicas de controle fuzzy e sistemas de controle adaptativos. Em alguns casos práticos, há aplicação de técnicas de controle PID, que são implementadas com procedimentos metodológicos simples, todavia o sistema não pode sofrer grandes alterações, com o risco de o controle ser instável.

## LÓGICA FUZZY E SISTEMAS FUZZY

A Lógica Fuzzy é baseada na teoria dos conjuntos fuzzy e difere da teoria clássica do filósofo grego Aristóteles. Braga et al. (1995 *apud* SILVA, 2005) definiu a Lógica Fuzzy como uma tentativa de se aproximar a precisão característica da matemática à inerente imprecisão do mundo real, nascida no desejo profundo de se conhecer melhor os processos mentais do raciocínio. Informações vagas, incertas, qualitativas, comunicações verbais, capacidade de aprendizado e de formulação de estratégias de tomadas de decisão são características humanas. Portanto, a teoria fuzzy é freqüentemente referida como “inteligente”. A Teoria de Conjuntos Fuzzy (ZADEH, 1965) e os Conceitos de Lógica Fuzzy (ZADEH, 1973) são uma alternativa para a solução de problemas de controle envolvendo não linearidades nas dinâmicas inerentes aos sistemas.

O conceito básico dos conjuntos fuzzy é relativamente fácil de ser assimilado, já que, no mundo real, as pessoas interpretam e utilizam instruções vagas e dados imprecisos todos os dias. A lógica tradicional, booleana, apresenta apenas valores “0” ou “1”, não há “meio termo”, a teoria fuzzy apresenta uma proposta do uso de funções que operem dentro de um intervalo de números reais [0,1]. A lógica é uma técnica de caracterização de classes que não define limites rígidos entre elas.

Quando se raciocina com base na teoria clássica dos conjuntos, o conceito de pertinência de um elemento a um conjunto fica bem definido. Os elementos  $x$  de um conjunto  $A$  em um determinado universo simplesmente pertencem ou não pertencem àquele conjunto. Para explicar o conceito de conjunto fuzzy e a abordagem booleana, a Figura 11 apresenta o exemplo clássico da idade de uma pessoa. Observa-se, na abordagem booleana, que as transições entre os conjuntos “jovem” e “adulto”, e entre os conjuntos “adulto” e “idoso”, são bruscas. Uma pessoa que passar dos 24 anos e 11 meses para os 25 anos e um dia, sai de uma categoria de “jovem” diretamente para “adulto”; essa abordagem é incompatível com a lógica de pensamento humano. Já na abordagem fuzzy, vê-se que as transições são suaves, sendo que o indivíduo a partir dos 18 anos deixa de ser 100% “jovem” e começa a pertencer parcialmente aos conjuntos “jovem” e “adulto”. É importante observar o conceito de grau de pertinência, este define o “quanto” uma variável pertence a um determinado conjunto, variando geralmente no intervalo [0, 1].

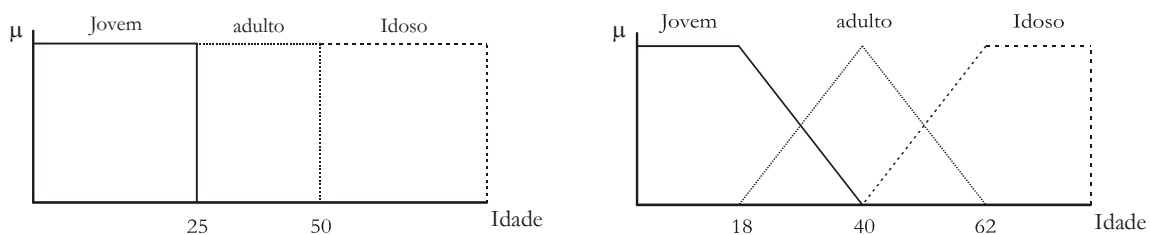


Figura 11 - Conjunto idade: abordagem booleana (a) e fuzzy (b)



Uma variável fuzzy é uma variável cujos valores são rótulos (*labels*) de conjuntos fuzzy. Por exemplo, a pressão do sistema pode ser uma variável fuzzy que assume os valores “muito pequena”, “pequena”, “média”, “alta” e “muito alta”. Estes valores são descritos por intermédio de conjuntos fuzzy. Nesse caso, pode-se dizer que a variável fuzzy pressão do sistema é uma variável lingüística. Considerando que  $u$  é a pressão do sistema, então seu conjunto de termos  $T(u)$  poderia ser “ $T(\text{pressão do sistema}) = \{\text{muito pequena, pequena, média, alta, muito alta}\}$ ”.

A principal função das variáveis lingüísticas é fornecer uma sistemática para caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos. Os valores assumidos pela variável lingüística são representados por conjuntos fuzzy definidos por funções de pertinência. Essas indicam quanto um elemento pertence a um dado conjunto. O conjunto fuzzy  $A$  é o conjunto de elementos no universo  $X$  para os quais  $\mu_A(x) > 0$ . Assim, um conjunto fuzzy também pode ser visto como o mapeamento do conjunto suporte no intervalo  $[0, 1]$ , o que implica em expressar o conjunto fuzzy por sua função de pertinência.

Nas teorias de controle clássica e moderna, o primeiro passo para implementar um controlador é a determinação do modelo matemático que descreve o processo. Este procedimento requer que se conheça detalhadamente o processo a ser controlado, o que nem sempre é factível em processos complexos (ZADEH, 1973). Ao contrário dos controladores convencionais, os sistemas fuzzy (SF) não requerem a definição da função de transferência do sistema. Os controladores fuzzy são robustos, versáteis e de grande adaptabilidade. Se um operador humano for capaz de articular sua estratégia de ação através de um conjunto de regras da forma SE ENTÃO, então é possível a implementação de um algoritmo computacional fuzzy. Um SF é tipicamente composto dos seguintes blocos funcionais: **fuzzificação**, **inferência fuzzy** e **defuzzificação**.

A fuzzificação é o processo de transformação da entrada em graus de pertinência ou de certeza no conceito, produzindo uma interpretação ou adjetivação da entrada. Ou seja, é a transformação de um número ou conjunto da lógica tradicional em um conjunto fuzzy.

Segundo Turksen (1984 *apud* SILVA, 2005), as funções de pertinência são definitivas com base nos seguintes métodos:

- Avaliação e dedução subjetivas: como os conjuntos fuzzy pretendem geralmente modelar a percepção e o conhecimento das pessoas, eles podem ser determinados por meio de procedimentos de cognição simples ou sofisticados.
- Formas *ad hoc*: enquanto existe uma infinidade de formas possíveis de funções de pertinência, as mais reais operações de controle fuzzy derivam de um pequeno conjunto de tipos de curvas, como, por exemplo, os conjuntos fuzzy triangulares. Isto simplifica o problema, já que neste caso basta escolher o valor central e a inclinação das retas de ambos os lados do conjunto fuzzy.
- Conversão de freqüências ou probabilidades: às vezes, as informações tomadas na forma de histogramas de freqüências ou mesmo outras curvas de probabilidade são usadas como base para a construção da função de pertinência. Cabe destacar que funções de pertinência não são necessariamente probabilidades.
- Mensuração física: muitas aplicações da Lógica Fuzzy são mensurações físicas, mas quase nenhuma mede diretamente os graus de pertinências.

A parte mais crítica da construção de um modelo fuzzy é justamente a escolha da forma de cada conjunto fuzzy, visto que esta determina a correspondência entre os dados de entrada e os seus conceitos lingüísticos correspondentes. As funções de pertinência podem assumir diversos formatos, as principais funções matemáticas são: triangular, trapezoidal, gaussiana, Bell generalizada, sigmoideal, polinomial assimétrica, S-shape. As funções mais utilizadas são as triangulares e trapezoidais, por serem mais fácil de implementação. A Figura 12 apresenta um exemplo de funções de pertinência para uma variável chamada erro. É importante ressaltar que os termos complexos não, necessariamente, apresentam resultados melhores.

Para situações que requerem uma resposta numérica, o conjunto fuzzy da saída é transformado num valor único pelo processo de defuzzificação, ou seja, o valor da variável lingüística de saída inferida pelas regras fuzzy será traduzido em um valor discreto. Os métodos mais utilizados são Centro de Gravidade (C-o-A), Centro do Máximo (C-o-M) e Média do Máximo (M-o-M).

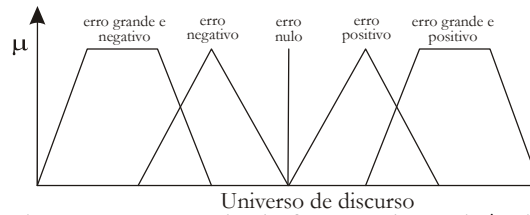


Figura 12 - Exemplo de funções de pertinência

As principais vantagens dos sistemas fuzzy são:

- A modelagem é tolerante com dados imprecisos, o que pode possibilitar o desenvolvimento do controlador sem dados experimentais.
- As equações envolvidas no processo de controle são não-lineares.
- As tarefas de processamento computacional não envolvem muitos cálculos.
- São sistemas flexíveis.
- Funcionam com qualquer conjunto de entradas e de saídas de dados.
- Os conceitos matemáticos da lógica são, relativamente, simples.
- São de fácil manutenção pelo pessoal de manutenção.
- Podem ser integrados, de maneira relativamente simples, a outras técnicas de controle.
- Possibilitam a incorporação de conhecimento de especialistas.
- Possibilitam lidar com dados inexatos.
- Regras combinam-se formando uma estrutura que permite controlar sistemas complexos.
- São inerentemente confiáveis e robustos, resistentes a perturbações e alterações na planta.
- Todas as funções de controle associadas com uma regra podem ser testadas individualmente.

A inferência fuzzy é utilizada para se obter conclusões sobre um conjunto de leis **SE ENTÃO**. Existem duas importantes formas para regras de inferência: *Modus Ponens* e *Modus Tollens*, descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Regras de inferência

Modus Ponens	Premissa 1 (fato):	$x_1$ é A
	Premissa 2 (lei):	<b>SE</b> $x_1$ é A <b>ENTÃO</b> $x_2$ é B
	Conseqüência (conclusão):	$x_2$ é B
Modus Tollens	Premissa 1 (fato):	$x_2$ não é B
	Premissa 2 (lei):	<b>SE</b> $x_1$ é A <b>ENTÃO</b> $x_2$ é B
	Conseqüência (conclusão):	$x_1$ não é A

Além disso, em geral, os sistemas fuzzy podem ser agrupados em dois modelos de sistema de inferência fuzzy: Mamdani e Takagi-Sugeno, que diferem fundamentalmente em suas habilidades para representar diferentes tipos de informação. O primeiro grupo é constituído por modelos lingüísticos, ou seja, a base das regras é estritamente lingüística e baseia-se na utilização da linguagem natural para descrever o comportamento dos sistemas. O modelo Mamdani apresenta como característica básica o fato de tanto os antecedentes como os conseqüentes serem mapeados por conjuntos lingüísticos. Para cada regra de inferência, caso tenhamos mais de uma variável de entrada, é necessário aplicar uma técnica de agregação dos conjuntos antecedentes, a fim de que seja gerado um conjunto conseqüente. No caso de existirem “n” regras, serão gerados “n” conjuntos conseqüentes, que são combinados.

Os controladores fuzzy baseados em regras relacionam os conjuntos fuzzy do seguinte modo:

**SE** <condições> **ENTÃO** <conclusão>

**SE** <antecedente> **ENTÃO** <conseqüente>

**SE** pressão = <baixa> **ENTÃO** válvula = <abrir um pouco>

## ESTUDO DE CASO - BANCADA EXPERIMENTAL DO LENHS UFPB

Para exemplificar a aplicação do controle de pressão em SDA é apresentada neste tópico uma pesquisa cujo objetivo foi o desenvolvimento de um sistema fuzzy, no ambiente Labview™, para o acionamento automático e simultâneo de válvulas de controle e de um conversor de frequência. Atualmente, estes são os principais equipamentos utilizados para o controle de pressão nas redes hidráulicas. O controle de velocidade de rotação, realizado pelo VFD acoplado ao motor, propicia apenas o controle de pressão em um ponto do sistema, o que faz com que os níveis piezométricos do sistema de distribuição diminuam ou aumentem de forma proporcional. Neste caso a determinação da rotação fique vinculada a um determinado ponto. As válvulas de controle utilizadas para reduzir a pressão são chamadas de válvulas redutoras de pressão e geralmente são localizadas nas entradas dos setores das redes hidráulicas. Conquanto acrescentem perda de carga ao sistema, aquelas propiciam uma redução do volume de água fornecida (diminuição do consumo mais perdas de água) ao setor de jusante, reduzindo indiretamente o consumo de energia. Por outro lado, com o crescimento dos sistemas de distribuição de água, surgiram situações onde há uma variação significativa da pressão ao longo da rede hidráulica; nestes casos, para garantir o controle piezométrico (vários pontos) é interessante a aplicação simultânea de válvulas de controle e conversores de frequência.

Diante do exposto acima, a principal contribuição desta pesquisa está em desenvolver um sistema fuzzy para o controle piezométrico de SDA, em tempo real, minimizando o consumo de energia elétrica e o volume de água fornecido ao sistema. O conversor de frequência atua mantendo a altura manométrica do sistema de bombeamento em um valor ótimo (mínimo possível), enquanto as válvulas de controle têm a função de eliminar o excesso de pressão em diversos pontos do sistema; obviamente a diminuição da velocidade de rotação prevalece sobre o acréscimo da perda de carga através das válvulas. A fim de testar o sistema de controle proposto, foi projetada e implantada uma bancada experimental de distribuição de água (Figura 13) no LENHS UFPB.

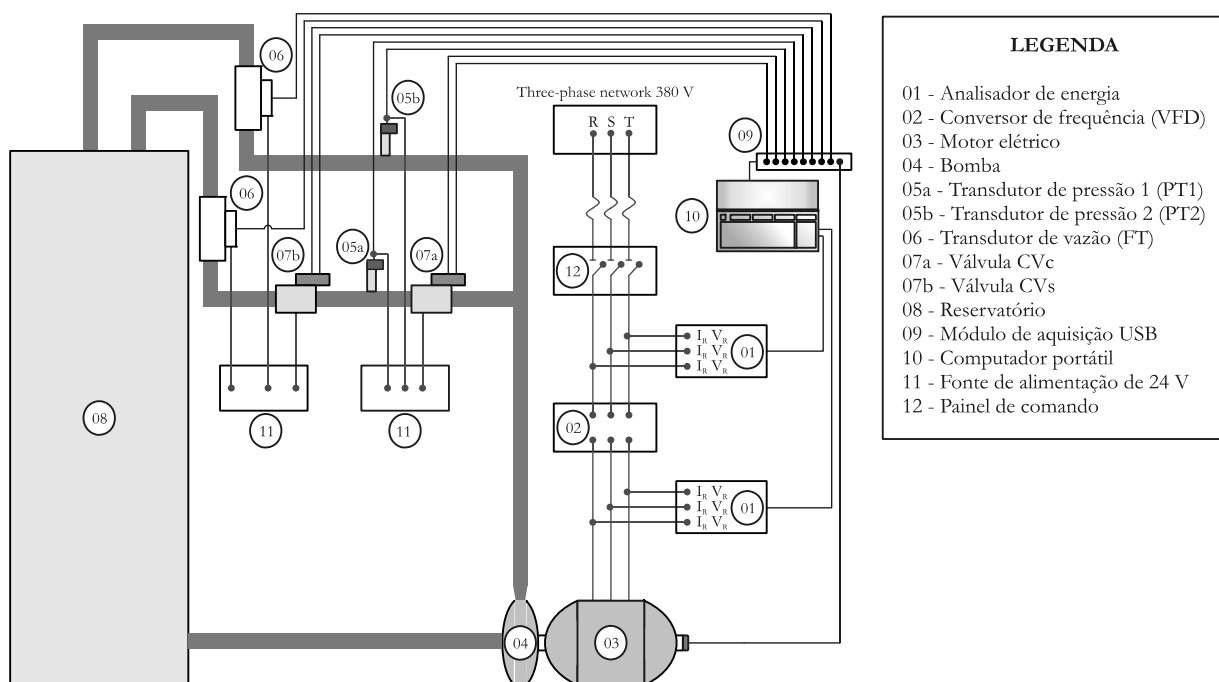


Figura 13 - Bancada experimental de distribuição de água

A bancada experimental de distribuição de água é composta por um reservatório, um conjunto motor-bomba, um conversor de frequência, duas válvulas de controle (CVc e CVs), dois transdutores de pressão (PT1 e PT2), dois medidores de vazão (FT1 e FT2), além dos acessórios hidráulicos e elétricos. A bancada contém dois ramais que simulam a alimentação de setores em SDA reais. A CVs, a jusante do PT1, tem a função de alterar as condições de operação do sistema, proporcionando a variação da

demanda. À medida que a CVs fecha, a vazão diminui e, conseqüentemente, a pressão a montante da válvula aumenta. Os PT1 e PT2 são responsáveis pelas medições das pressões.

O VFD usa tecnologia PWM e as válvulas são do tipo proporcionais, esfera, acionadas por um motor elétrico com tensão de alimentação de 24 V. O sistema de aquisição de dados é composto de um computador portátil e um módulo de aquisição (DAQ). A DAQ possui 32 entradas e 4 saídas analógicas com taxa de transferência de 1,25 MS/s para as entradas e taxa de transferência de 2,86 MS/s para as saídas. Foram utilizados dois analisadores de energia para medir e monitorar as grandezas elétricas de entrada e de saída do conjunto VFD + motor elétrico com precisão de 0,5% e valor *true RMS*.

O sistema de controle foi desenvolvido no programa computacional LabView e é formado por dois controladores fuzzy que trabalham simultaneamente; o primeiro é responsável pela determinação da frequência de acionamento do CMB, enquanto que o segundo atua na válvula CVc.

O uso de conjuntos fuzzy permite o desenvolvimento do sistema de controle sem o conhecimento prévio do modelo matemático correspondente à planta controlada. O sistema fuzzy utiliza 4 entradas e 3 saídas analógicas da DAQ. As entradas analógicas recebem o sinal dos transdutores de pressão PT1 e PT2, e das válvulas CVc e CVs. As saídas analógicas são utilizadas para variar a posição/abertura das válvulas de controle e a frequência de alimentação do motor elétrico.

As variáveis lingüísticas foram escolhidas de modo a possibilitar o controle da pressão nos dois pontos de medição da bancada experimental. As variáveis lingüísticas de entrada são:

- PRES - pressão no ponto mais desfavorável da rede hidráulica.
- FREQ - sinal de controle do VFD, que é proporcional à frequência de acionamento do CMB.
- DIF - variável que representa o déficit ou excesso de pressão a jusante da CVc.
- VALVE - posição angular da CVc.

As variáveis lingüísticas de saída do sistema fuzzy são:

- $\Delta F$  - acréscimo ou decréscimo no sinal de controle do VFD.
- $\Delta V$  - acréscimo ou decréscimo no ângulo de abertura da CVc.

As variáveis lingüísticas de entrada e de saída do fuzzy controller, a quantidade e o formato das funções de pertinência foram escolhidos com base em recomendações da literatura, análises heurísticas e ensaios experimentais. O universo de discurso (U) pode ser normalizado ou determinado em função da sua aplicação. Neste trabalho, o U foi definido com base em valores reais.

O número de conjuntos funções de pertinência, recomendado pela literatura, está entre 2 e 7. Quanto maior o número de conjuntos, maior a precisão; entretanto, segundo Simões e Shaw (2007), a partir de valores maiores que 7, não há melhorias significativas. Portanto, adotou-se, com exceção da variável  $\Delta F$ , o número de 7 conjuntos fuzzy para cada variável. Para a exceção (variável  $\Delta F$ ) optou-se por 9 termos para sua caracterização qualitativamente a fim de suavizar o sinal de saída. Esta suavização é importante para minimizar picos de correntes no motor elétrico causados pelos VFD.

Os formatos das funções de pertinência mais frequentes são triangulares e trapezoidais, pois são geradas facilmente. Através de uma análise qualitativa do comportamento da pressão em função da variação da velocidade de rotação do CMB, determinou-se duas entradas para o controlador fuzzy do VFD - PRES e FREQ. A primeira representa o déficit ou excesso de pressão no ponto mais desfavorável do sistema, enquanto que a segunda indica o valor da frequência de acionamento do motor.

A variável lingüística de entrada PRES foi definida como valor de referência padrão igual a 20. Para valores de referência diferentes de 20 mca, é necessário que as medições de pressão tenham seus valores alterados para a compatibilização com o valor de referência do controlador. Esta nova pressão foi denominada de pressão equivalente e é a soma do valor medido mais a diferença entre 20 e a pressão requerida (valor de referência). A variável PRES deverá ser igual à menor das pressões equivalentes.

A variação da frequência de acionamento do CMB é realizada através de um conversor de frequência, cujo controle é realizado por uma tensão elétrica contínua que varia de 0 a 8,8 V. A relação da frequência da tensão de alimentação do CMB, em função do sinal de controle enviado para o VFD é linear. Deste modo, foi escolhido o intervalo [0, 8,8] como universo de discurso para a variável lingüística de entrada FREQ. A primeira saída do sistema fuzzy é a variável  $\Delta F$ , que está diretamente relacionada com as medições de pressão do sistema e a velocidade de rotação do motor. A forma heurística de

procura da variável de saída é baseada na seguinte afirmação:

*Se a pressão no ponto mais desfavorável do sistema é inferior à desejada, o controlador aumenta a velocidade de rotação do CMB; se a pressão no ponto mais desfavorável do sistema é superior à desejada, o controlador diminui a velocidade de rotação do CMB.*

O universo de discurso da variável cobre valores negativos e positivos, e está compreendido no intervalo  $[-0,30, 0,30]$ , que corresponde a valores reais de tensão elétrica. A soma do valor de  $\Delta F$  mais FREQ (que varia entre 0 e 8,8) corresponderá ao valor da tensão enviada ao conversor através da DAQ. Foram estabelecidas 34 regras de inferência fuzzy para determinação da variável de saída  $\Delta F$  ( $\Delta NVL$  - delta negativo e muito grande;  $\Delta NL$  - delta negativo e grande;  $\Delta NM$  - delta negativo e médio;  $\Delta NS$  - delta negativo e pequeno; ZERO - delta zero;  $\Delta PS$  - delta positivo e pequeno;  $\Delta PM$  - delta positivo e médio;  $\Delta PL$  - delta positivo e grande;  $\Delta PVL$  - delta positivo e muito grande), que relacionam as 7 funções de pertinência da PRES (VL - pressão muito baixa; L - pressão baixa; SL - pressão pouco baixa; O - pressão ótima; SH - pressão pouco alta; H - pressão alta; VH - pressão muito alta) com as 7 funções da FREQ (F1 - faixa de rotação 1; F2 - faixa de rotação 2; F3 - faixa de rotação 3; F4 - faixa de rotação 4; F5 - faixa de rotação 5; F6 - faixa de rotação 6; F7 - faixa de rotação 7). A Tabela 2 apresenta a matriz associativa do controlador fuzzy do VFD.

Tabela 2 - Matriz associativa do controlador fuzzy do VFD

		PRES						
		VL	L	SL	O	SH	H	VH
FREQ	F1	$\Delta PVL$	$\Delta PVL$					
	F2	$\Delta PVL$	$\Delta PL$	$\Delta PM$	ZERO			
	F3	$\Delta PVL$	$\Delta PL$	$\Delta PM$	ZERO	$\Delta NS$		
	F4	$\Delta PVL$	$\Delta PM$	$\Delta PS$	ZERO	$\Delta NS$	$\Delta NM$	$\Delta NM$
	F5	$\Delta PL$	$\Delta PM$	$\Delta PS$	ZERO	$\Delta NS$	$\Delta NL$	$\Delta NL$
	F6			$\Delta PS$	ZERO	$\Delta NM$	$\Delta NL$	$\Delta NVL$
	F7				ZERO	$\Delta NM$	$\Delta NVL$	$\Delta NVL$

Para a modelagem do controlador fuzzy da CVc torna-se fundamental definir as variáveis de entrada e de saída. Através de uma análise qualitativa dos padrões de comportamento da pressão em função da abertura da válvula, determinaram-se duas entradas para o controlador fuzzy da válvula de controle - DIF e VALVE. A variável linguística de entrada DIF é definida com base nas medições dos transdutores de pressão e definirá a variação angular válvula CVc. A variável DIF corresponde ao excesso ou déficit de pressão a jusante da válvula CVc. A DIF tem zero como valor desejado. O U foi estabelecido o intervalo  $[-5, 5]$ ; que corresponde à faixa em valores reais.

A válvula de controle utilizada na pesquisa é do tipo proporcional e tem seu ângulo de abertura variando linearmente com a tensão elétrica de controle imposta à mesma, que varia de 2 a 10 V. Porém, observou-se que só há variação de pressão no intervalo de  $17^\circ$  a  $60^\circ$ ; entre  $0^\circ$  e  $17^\circ$  a CVc está praticamente fechada e entre  $60^\circ$  a  $90^\circ$  a CVc está praticamente aberta (a perda de carga se aproxima de zero). Logo, o U adotado é  $[17, 60]$ .

A saída linguística, denominada de  $\Delta V$ , refere-se ao acréscimo/decréscimo de graus no ângulo de abertura da válvula CVc instalada a montante do transdutor de pressão (PT1). A forma heurística de procura da variável de saída  $\Delta V$  é baseada no seguinte conceito:

*Se há excesso de pressão a jusante da válvula de controle, esta deve diminuir o ângulo de abertura; se há déficit de pressão a jusante da válvula de controle, esta deve aumentar o ângulo de abertura.*

Foram estabelecidas 43 regras de inferência fuzzy para determinação da variável de saída  $\Delta V$  ( $\Delta NL$  - delta negativo e grande;  $\Delta NM$  - delta negativo e médio;  $\Delta NS$  - delta negativo e pequeno; ZERO - delta zero;  $\Delta PS$  - delta positivo e pequeno;  $\Delta PM$  - delta positivo e médio;  $\Delta PL$  - delta positivo e grande), que relacionam as 7 funções de pertinência da DIF (NL - valor negativo e grande; NM - valor negativo e médio; NS - valor negativo e pequeno; ZE - zero; PS - valor positivo e pequeno; PM - valor positivo e médio; PL - valor positivo e grande) com as 7 funções da VALVE (V1 - faixa de abertura 1; V2 - faixa de abertura 2; V3 - faixa

de abertura 3; V4 - faixa de abertura 4; V5 - faixa de abertura 5; V6 - faixa de abertura 6; V7 - faixa de abertura 7). A Tabela 3 apresenta a matriz associativa do controlador fuzzy do VFD.

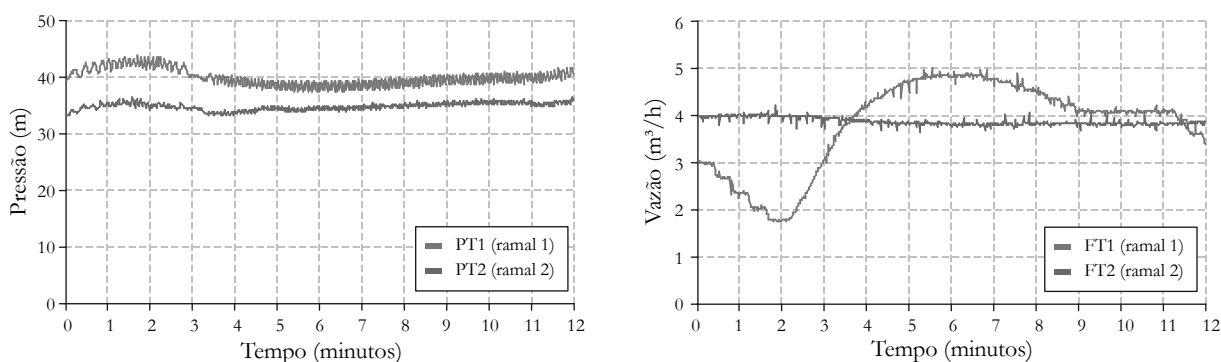
Tabela 3 - Matriz associativa do controlador fuzzy do CVc

		DIF						
		NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
VALVE	V1	$\Delta$ PL	$\Delta$ PL	$\Delta$ PM	ZERO			
	V2	$\Delta$ PL	$\Delta$ PL	$\Delta$ PS	ZERO	$\Delta$ NS	$\Delta$ NS	$\Delta$ NS
	V3	$\Delta$ PL	$\Delta$ PL	$\Delta$ PS	ZERO	$\Delta$ NS	$\Delta$ NM	$\Delta$ NM
	V4	$\Delta$ PL	$\Delta$ PM	$\Delta$ PS	ZERO	$\Delta$ NS	$\Delta$ NM	$\Delta$ NL
	V5	$\Delta$ PM	$\Delta$ PM	$\Delta$ PS	ZERO	$\Delta$ NS	$\Delta$ NL	$\Delta$ NL
	V6	$\Delta$ PS	$\Delta$ PS	$\Delta$ PS	ZERO	$\Delta$ NS	$\Delta$ NL	$\Delta$ NL
	V7				ZERO	$\Delta$ NM	$\Delta$ NL	$\Delta$ NL

Maiores detalhes sobre o sistema fuzzy desenvolvido podem ser consultados em Bezerra (2009). Foram realizados cinco experimentos para validar o sistema de controle desenvolvido. São eles:

- Experimento 1 - Ensaio em malha aberta (sem controle) com a válvula a jusante do PT1 (CVs) variando sua abertura de forma a simular a demanda de vazão de um SDA urbano.
- Experimento 2 - Ensaio em malha fechada, com uma entrada tipo degrau igual a 20 para a variável PRES, apenas com o controlador fuzzy do conversor de frequência atuando. Experimento realizado com as mesmas condições de operação do experimento 1<sup>2</sup>.
- Experimento 3 - Ensaio em malha fechada para excitação tipo degrau, com valor igual a 20 mca para os dois pontos de medição de pressão.
- Experimento 4 - Ensaio em malha fechada para excitação tipo degrau, com valor igual a 15 mca para o ponto de medição do ramal 1 e 20 mca para o ponto de medição 2.

O **experimento 1** foi realizado com o sistema em malha aberta, ou seja, sem nenhum tipo de controle atuando para posterior comparação com o experimento 2. A Figura 14 apresenta a pressão e a vazão nos ramais 1 e 2 para o experimento 1. Como era esperado, a vazão do ramal 1 segue o mesmo padrão da curva de abertura da CVs. A vazão média foi 3,84 m<sup>3</sup>/h no ramal 1 e 3,89 m<sup>3</sup>/h no ramal 2, perfazendo uma vazão total de 7,73 m<sup>3</sup>/h. Considerando a pressão de projeto de 20 mca, as pressões médias em PT1 (40 mca) e PT2 (34,94 mca) são 100% e 75%, respectivamente, superiores à ideal.



O **experimento 2** foi realizado com as mesmas condições de operação do experimento 1, porém com o controlador fuzzy do conversor de frequência atuando. Trata-se de um ensaio em malha fechada, com uma entrada tipo degrau igual a 20 mca para a variável PRES. Inicialmente, a frequência da tensão de alimentação do motor foi 50 Hz e a CVc totalmente aberta. A variação do ângulo de abertura da CVs foi a

<sup>2</sup> Foi desenvolvido no Labview um instrumento virtual para simular a demanda de um SDA através da operação remota da CVs. A curva de abertura da CVs foi baseada em um perfil de consumo de água de um setor da Região Metropolitana de São Paulo.

mesma do experimento 2, assim, pode-se analisar, além da resposta dos controladores a alterações no sistema, a redução do consumo de energia elétrica.

A Figura 15 apresenta a pressão e a vazão nos ramais 1 e 2 do experimento 2. A curva de vazão do FT2 manteve o mesmo padrão da curva de abertura da CVC, pois o medidor FT2 está localizado no mesmo ramal da válvula. A vazão média foi 3,22 m<sup>3</sup>/h no ramal 1 e 3,71 m<sup>3</sup>/h no ramal 2, perfazendo uma vazão média total de 6,93 m<sup>3</sup>/h. As pressões médias nos pontos de medição PT1 e PT2 foram, respectivamente, 27 mca e 20 mca. O VFD, atuando de maneira isolada, não tem capacidade de otimizar a pressão em mais de um ponto de um SDA, conforme se observa na Figura 15, houve um excesso de pressão de 35% (7 mca) no ponto de medição 1.

O sistema de controle apresentou uma resposta satisfatória, o erro de regime permanente foi de 3,11% (0,62 mca), com erro médio de 1,02%.

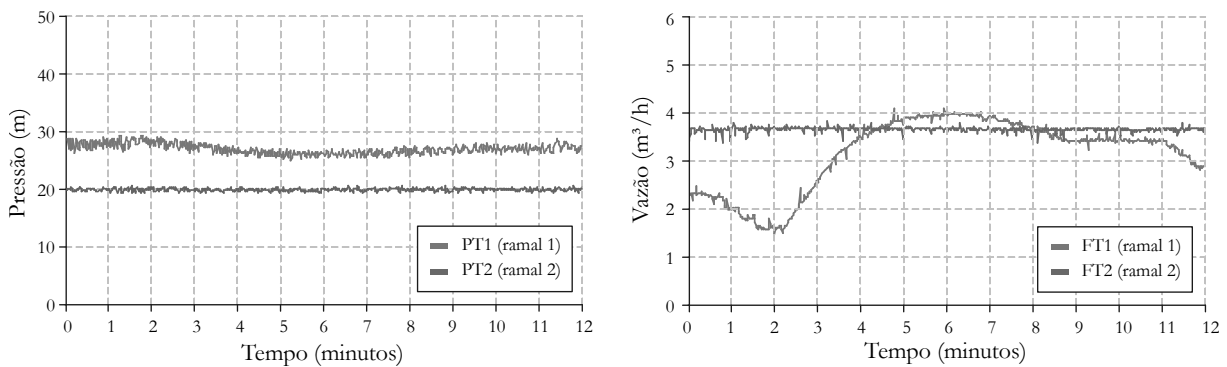


Figura 15 - Resultados do experimento 2 - curvas de pressão e vazão

Utilizando a equação sugerida pela teoria FAVAD (Eq. 1), com N1 igual a 1,5, e extrapolando os resultados para um SDA real com vazamentos, tem-se que o sistema fuzzy desenvolvido para o controle simultâneo do VFD e da CV proporcionaria uma redução potencial de 64,67% (ramal 1) e 56,69% (ramal 2) do volume de vazamentos quando comparado com o sistema sem nenhum controle de pressão. Tabela 4 apresenta a sinopse do potencial de volume de vazamentos e as pressões da rede hidráulica para as diversas condições citadas.

Para avaliar a eficiência energética da bancada experimental foi medido *on-line* a potência consumida e calculado o consumo específico de energia elétrica. Apesar do conversor de frequência consumir cerca de 5% da energia total e ocasionar um decréscimo de rendimento do CMB, verificou-se que o controle da velocidade de rotação proporcionou uma redução no consumo de energia elétrica de 35%. A Tabela 5 apresenta os valores dos parâmetros de avaliação energética dos experimentos 1 e 2.

Tabela 4 - Resumo das pressões e volume perdido por vazamentos (estimado)

	Ramal 1		Ramal 2	
	Pressão média (mca)	Volume de vazamento potencial	Pressão média (mca)	Volume de vazamento potencial
Sistema Fuzzy (VFD + CVC)	20,00	x	20,00	y
Controlador do VFD	27,04	1,57*x	20,00	y
Sem controlador	40,02	2,83*x	34,94	2,31*y

Tabela 5 - Indicadores de consumo dos experimentos 1 e 2

	Sem controle	Sistema Fuzzy	Diferença (%)
Vazão (m <sup>3</sup> /h)	7,73	6,93	10,38
Consumo de energia (kWh/ano)	19.312	12.547	35,03
Consumo específico de energia elétrica (kWh/m <sup>3</sup> )	0,288	0,207	27,91

O **experimento 3** foi realizado com o CMB partindo do repouso, para a válvula CVC fechada e a CVs com 45° de abertura, aplicou-se uma excitação do tipo degrau de 20 mca para os dois pontos de medição de pressão. Com este procedimento obtiveram-se os índices de desempenho do sistema de controle (sobre-sinal, tempo de assentamento e erro de regime permanente). A Figura 16a mostra as curvas de resposta ao degrau obtidas nos dois pontos de medição de pressão. O tempo de assentamento foi de 90 segundos, o erro de regime permanente de 3,38% (0,68 mca) e 3,47% (0,70 mca), e o sobre-sinal de 16,80% (3,36 mca) e 33,91% (6,78 mca), ambos para os pontos de medição 1 e 2, respectivamente.

Para demonstrar que o controlador é eficiente para valores distintos de pressão, foi estipulado para o **experimento 4** um degrau de 20 mca para o ponto de medição 1 (PT1) e 15 mca para o ponto de medição 2 (PT2). O ensaio foi realizado com o valor da frequência inicial zero, a válvula de controle CVC inicialmente fechada e a CVs com 45° de abertura. A Figura 16b exibe as curvas de resposta ao degrau obtidas nos dois pontos de medição de pressão. O tempo de assentamento foi de 92 segundos, o erro de regime permanente de 3,41% (0,68 mca) e 2,67% (0,53 mca), e o sobre-sinal de 33,26% (4,99 mca) e 28,46% (7,69 mca), ambos para os pontos de medição 1 e 2, respectivamente.

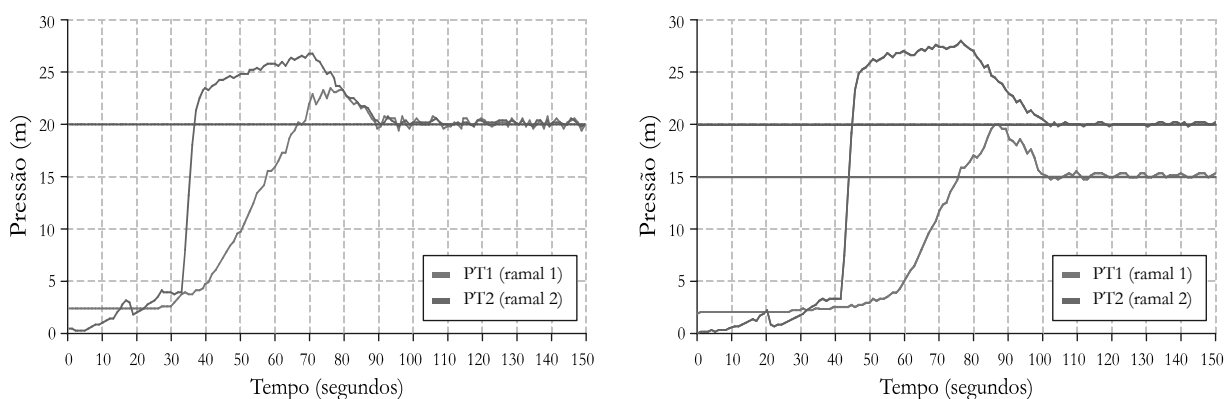


Figura 16 - Curvas de resposta do sistema em malha-fechada do experimento 3 (a) e do experimento 4 (b)

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo descreveu um sistema fuzzy aplicado ao controle de pressão em redes de distribuição de água. A pesquisa apresentou um controlador robusto, que atua com quaisquer valores de referência de pressão. Não há limite para o número de pontos monitorados e controlados, podendo, inclusive, estes variarem os valores de referência com o tempo. O controlador pode ser implementado facilmente em SDA similares.

O sistema fuzzy desenvolvido apresentou resposta satisfatória, o erro de regime permanente máximo nos experimentos foi de 3,5% (0,70 m). O controle da pressão mínima do sistema, que é prioritariamente realizado pelo conversor de frequência (velocidade de rotação da bomba), teve uma resposta rápida. No entanto, devido ao elevado tempo de resposta da válvula de controle, a resposta global do sistema tornou-se, relativamente, lenta e com sobre-sinais elevados. O tempo de assentamento dos experimentos realizados foi de aproximadamente 90 segundos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Governo do Brasil, pelo apoio financeiro concedido através das Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELETROBRÁS), da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANNECCHINI, K. P. V., ABREU, P. P. C., LABEGALINI, M. S. Comportamento de setores controlados por válvulas redutoras de pressão (VRP's) na Região Metropolitana da Grande Vitória - ES. In: **24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Belo Horizonte, MG, Brasil, Set, 2007.



- BEZERRA, S. T. M. **Sistema Fuzzy para Controle Piezométrico de Sistemas de Distribuição de Água Visando à Economia de Água e Energia**. Tese de D.Sc., PPGEM, João Pessoa, PB, Brasil, 2009.
- BRAGA, M. J. F., BARRETO, J. M., MACHADO, M. A. S. **Conceitos da Matemática Nebulosa na Análise de Risco**. Rio de Janeiro, Artes & Rabiscus, 1995 (*apud* SILVA, 2005).
- BRAGALLI, C., SACCHI, S. Burst frequency and leakage related to pressure control in water distribution network. In: **Lemosos 2002: Leakage Management - A Practical Approach**, Lemosos, Chipre, 2002.
- CONEJO, J. G. L., LOPES, A. R. G., MARCKA, E. DTA C2 - Panorama dos Sistemas Públicos de Abastecimento no País - Casos Selecionados de Estratégias de Combate ao Desperdício. **Documento Técnico do PNCDA**, Brasília, DF, Brasil, 2004.
- COVAS, D. **Detecção de Fugas em Redes de Distribuição de Água - Método de Análise Hidrodinâmica**. Dissertação de M.Sc., Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 1998.
- CUBILLOS, X. C. M. **Investigação de técnicas de controle multivariáveis no controle de atitude de um satélite rígido-flexível**. Dissertação de M.Sc., INPE/MCT, São José dos Campos, SP, Brasil, 2008.
- DEWINTER, A. D., KEDROSKY, B. J. The application of a 3500-hp variable frequency drive for pipeline pump control. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 25, n. 6, pp. 1019-1024, 1989.
- EUROPUMP, HYDRAULIC INSTITUTE. **Variable Speed Pumping - A Guide to Successful Applications**. 1 ed, Bodmin, Cornwall, Mai, Elsevier, 2004.
- LAMBERT, A. International Report on Water Loss Management and Techniques. **Water Supply**, v. 2, n. 4, pp. 1-20, 2002.
- ORTEGA, N. R. S. **Aplicação da Teoria de Conjuntos Fuzzy a Problemas da Biomedicina**. Tese D.Sc., Instituto de Física/USP, São Paulo, SP, Brasil, 2001.
- REYERO, R., NICOLÁS, C. F. **Sistemas de Control Basados em Lógica Borrosa: Fuzzy Control**, Omron Electronics S.A., Espanha, 1995.
- SILVA, M. A. B. **Sistema de Classificação Fuzzy para Áreas Contaminadas**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- SIMÕES, M. G., SHAW, I. S. **Controle e modelagem fuzzy**, Editora Edgard Blücher. São Paulo, 2007.
- STRIANI, D., LOPES, A. F. Redução e controle de perdas físicas de água através da implantação de válvulas redutoras de pressão, VRP, com controle inteligente, pesquisa e eliminação de vazamentos no município de São Caetano do Sul. In: **ASSEMAE**. Rio Grande do Sul, Brasil, 2004.
- TURKSEN, I. B. Measurement of Fuzziness: Interpretation of the Axioms of Measure, Conference on Fuzzy Information and Knowledge Representation for Decision Analysis, IFAC, Oxford, pp. 97-102, 1984 (*apud* SILVA, 2005).
- WOOD, D. J., REDDY, L. S. Control de bombas de velocidad variable y modelos en tiempo real para minimizar fugas y costes energéticos. In: **Curso Dictado en la UIMP: Mejora del Rendimiento y de la Fiabilidad en Sistemas de Distribución de Agua**, pp. 173-207, Valencia, España, 1994.
- WRC. Water Industry: Managing Leakage (Report G and J). In: **Engineering and Operations Committee**, Reino Unido, 1994.
- ZADEH, L. A., Fuzzy Sets. **Information and Control**, v. 8, n. 3 (Jun), pp. 338-353, 1965.
- ZADEH, L. A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. **IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics**, v. SMC-3, n. 1 (Jan), pp. 28-44, 1973
- ZADEH, L. A., Is there a need for Fuzzy Logic?. **Information Sciences**, v. 178, pp. 2751-2779, 2008.

---

## **2 Otimização operacional dos sistemas adutores Prata e Jucazinho, Pernambuco, Brasil**

---

**Heber Pimentel Gomes<sup>1</sup>, Saulo de Tarso Marques Bezerra<sup>2</sup>, Wil Lavor Lucena Camboim<sup>1</sup> e Gênnisson Batista Carneiro<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal da Paraíba – UFPB – João Pessoa – Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal de Pernambuco - UFPE - Caruaru - Brasil

### **INTRODUÇÃO**

Pode-se definir reabilitação como qualquer intervenção no sistema que prolongue sua vida útil, melhorando seu desempenho hidráulico, estrutural e da qualidade da água (GOMES e BEZERRA, 2007). De acordo com Barbosa e Venturini (2002), a importância da reabilitação está intimamente ligada à diminuição dos custos operacionais, o aumento da segurança e da confiabilidade dos serviços prestados, através de medidas que retardem ao máximo os investimentos em futuras expansões e possibilitem um planejamento cauteloso das futuras ampliações do sistema.

Segundo o relatório da Alliance (JAMES et al., 2002), entre dois e três por cento do consumo de energia do mundo são usados no bombeamento e tratamento de água para residências urbanas e industriais. Este consumo de energia, na maioria dos sistemas de água em todo o mundo, poderia ser reduzido em pelo menos 25%, por meio da implantação de ações que promovam o aumento da eficiência.

As perdas de energia elétrica das companhias de saneamento ocorrem majoritariamente nas estações elevatórias e originam-se principalmente por causa da baixa eficiência dos equipamentos eletromecânicos, por procedimentos operacionais inadequados e por falha na concepção dos projetos (GOMES, 2009).

No Brasil, os gastos com energia elétrica nas empresas de saneamento constituem o segundo item no orçamento das despesas de exploração. Sendo que nos sistemas de distribuição de água a energia consumida pelas elevatórias representam de 90 a 95% do consumo total de energia elétrica do sistema. Estes custos, em muitos casos, ultrapassam, ao longo da vida útil dos projetos, os custos de investimento das instalações.

No Brasil, as iniciativas de implantação de planos de otimização para o aumento da eficiência dos sistemas são modestas, com parte das empresas de saneamento tendo pouco, ou quase nenhum controle e/ou procedimento voltado para a diminuição dos custos de energia.

Visto que os recursos financeiros disponíveis nas empresas de saneamento são, geralmente, limitados e insuficientes para reabilitar seus sistemas, estudos de viabilidade econômica são imprescindíveis para hierarquizar as medidas de reabilitação mais urgentes e eficazes a serem tomadas (BASTOS et al., 2008). O presente trabalho objetiva elaborar um diagnóstico sobre a operação de dois sistemas adutores da Companhia Pernambucana de Saneamento - COMPESA, localizada no nordeste brasileiro, que abastecem aproximadamente 600 mil habitantes, e executar uma análise de pré-viabilidade técnica e econômica da reabilitação destes. As ações de reabilitação consideradas incluem a paralisação do sistema no horário de ponta, instalação de válvulas de controle automáticas e a implantação da automação dos sistemas.

### **ÁREA DE ESTUDO**

Os dois sistemas analisados são o Sistema Prata e o Sistema Jucazinho, ambos abastecem a cidade de Caruaru e a região circunvizinha (estado de Pernambuco). Os estudos destes sistemas são apresentados conjuntamente porque possuem concepções e problemas semelhantes. Estes recalcam água através de estações elevatórias em cascata, com vazões e alturas manométricas muito elevadas, o que acarreta altíssimos consumos de energia elétrica. Os dados utilizados neste trabalho foram, na sua grande maioria, disponibilizados pela COMPESA, referentes ao ano de 2007 e aos meses de janeiro a agosto de 2008.

O Sistema Adutor do Prata abastece a estação de tratamento de água (ETA) Petrópolis, localizada e responsável pelo abastecimento da cidade de Caruaru (aproximadamente 300 mil habitantes), e é formado pelas unidades de captação e adução por recalque e gravidade. A captação é feita na barragem do rio do Prata, onde a água é aduzida por gravidade até a Estação Elevatória 01 (EE-01). A EE-01 é o ponto de partida para o transporte da água bruta para Estação Elevatória 02 (EE-02) e para a localidade de Batateiras. Da EE-02 ocorre a adução de água bruta para Estação Elevatória 03 (EE-03), que tem por destino final a ETA Petrópolis (ver Figura 1).

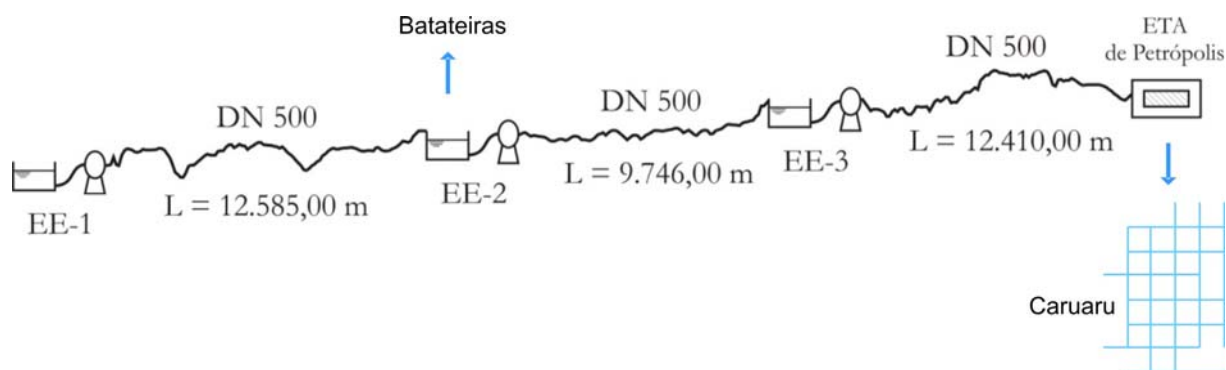


Figura 1 - Esquema do sistema adutor do Prata

O valor médio faturado das tarifas de energia elétrica (consumo mais demanda) das três elevatórias, nos meses de julho e agosto de 2008, foi de R\$ 634.962,44 (246 mil euros) com um valor médio mensal de multas de R\$ 294,85. Neste período, o consumo médio mensal de energia elétrica das três elevatórias foi superior a 2 milhões de kWh, sendo 1.995.792 kWh no horário fora de ponta e 122.870 kWh no horário ponta. Para uma vazão média de 400 L/s no período considerado, corresponderá um volume produzido mensal de 1.036.800 m<sup>3</sup> (adotando-se um período mensal com 30 dias). Com base nos dados antes mencionados, o consumo específico de energia elétrica (CE) do Sistema Prata foi de, aproximadamente, 2 kWh/m<sup>3</sup>. A potência, atualmente, contratada pela COMPESA à Companhia de Eletricidade de Pernambuco (CELPE) para as três elevatórias do Sistema Prata é de 3,35 MW para os horários ponta e fora de ponta.

O Sistema Adutor do Jucazinho compreende as unidades de captação, tratamento e adução por recalque e por gravidade. Tem como principal finalidade o abastecimento de água de 23 localidades do Agreste e Zona da Mata Norte do estado de Pernambuco, destacando-se as cidades de Caruaru, Bezerros, Surubim, Taquaritinga do Norte e Toritama.

As oito estações elevatórias do Sistema Jucazinho encontram-se entre as maiores da COMPESA, resultando numa potência total instalada de 20 MW. Para estas EEs, a vazão nominal varia de 120 L/s a 1300 L/s e as alturas manométricas de 86 mca a 150 mca. Convencionou-se o uso das nomenclaturas Tramo Norte e Tramo Sul para as adutoras deste sistema. O Tramo Norte é constituído pela ETA de Surubim e as estações elevatórias 8 e 9, responsabilizando-se pelo abastecimento das cidades de Surubim, Vertente do Lério, Santa Maria de Cambucá, Frei Miguelinho, Vertentes, Toritama e Santa Cruz do Capibaribe. O Tramo Sul é constituído pelas estações elevatórias 1, 2, 3, 4, 5 e 6, abastecendo as cidades de Cumaru, Passira, Gravatá, Bezerros, Ameixas, Riacho das Almas e Caruaru. Ambos os tramos também são responsáveis pela produção de água a vários vilarejos, distritos e povoados (ver Figura 2).

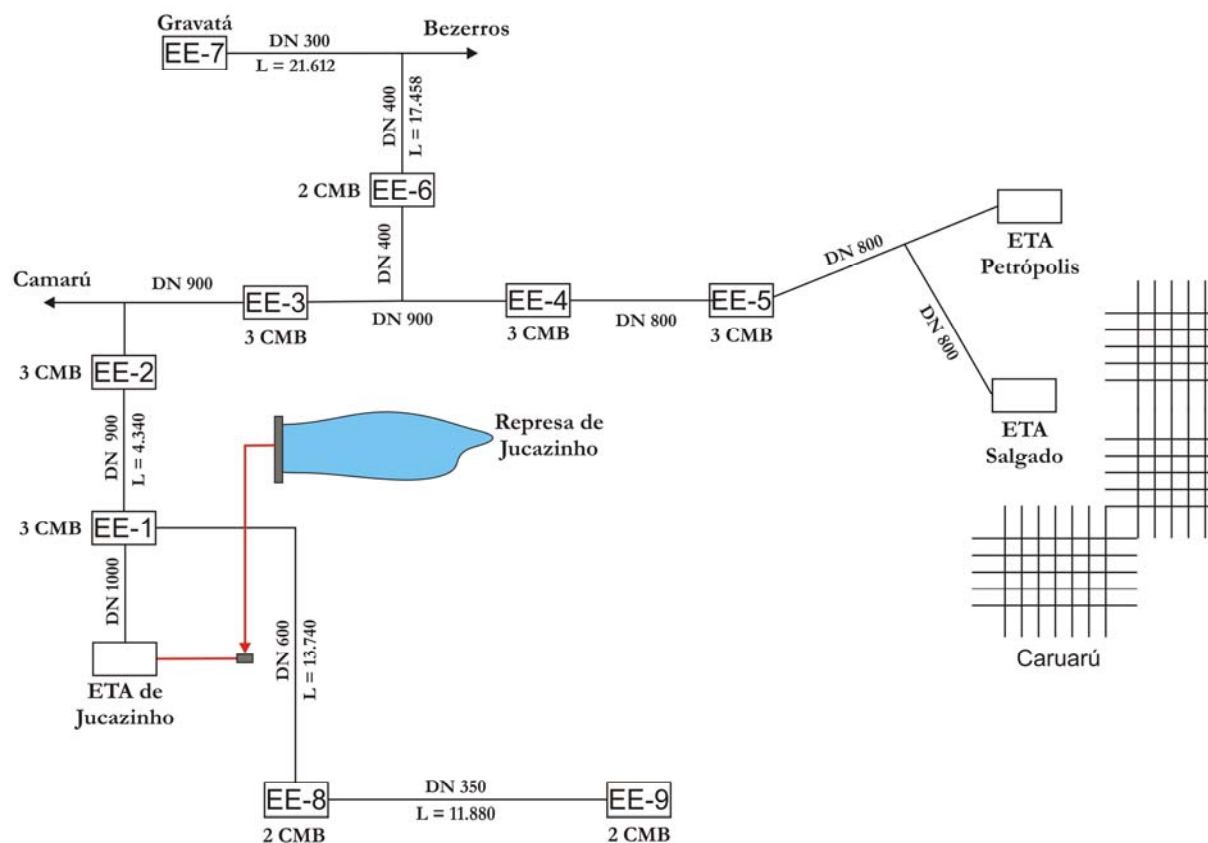


Figura 2 - Esquema do sistema adutor de Jucazinho

A captação é feita na barragem do Jucazinho, de onde a água é aduzida por gravidade para as EE-01 e ETA-Surubim, pontos de partida que distribuem água para os Tramos Sul (EE-01, EE-02, EE-03, EE-04, EE-05 e EE-06) e Norte (EE-08 e EE-09).

Levando em consideração dados de 2007 e 2008, o consumo médio mensal de energia elétrica das oito elevatórias foi superior a 6 milhões de kWh, sendo 5.754.998 kWh no horário fora de ponta e 279.151 kWh no horário ponta. O valor médio faturado das tarifas de energia elétrica (consumo mais demanda) foi de R\$ 1.323.433,09 (513 mil euros) com um valor médio mensal de multas de R\$ 10.287,79. Para uma vazão média, do Sistema Jucazinho, de 1150 L/s no período considerado, corresponderá um volume produzido mensal de 2.980.800 m<sup>3</sup>, adotando-se um período mensal com 30 dias. Com base nestes dados, o consumo específico de energia elétrica (CE) do Sistema Jucazinho foi de, aproximadamente, 2 kWh/m<sup>3</sup>. A potência, atualmente, contratada pela COMPESA à CELPE para as oito elevatórias do Sistema Jucazinho é de 11,71 MW para o horário fora de ponta e de 5,51 MW para o horário ponta.

O principal problema operacional dos sistemas adutores do Prata e de Jucazinho é o consumo excessivo de energia elétrica, nos quais os valores dos consumos específicos de energia elétrica são da ordem de 2 kWh/m<sup>3</sup>. De acordo com dados do Sistema Nacional de Informação em Saneamento do Brasil, o valor médio do consumo específico de energia elétrica para as empresas estaduais de distribuição de água do Brasil, referente ao ano de 2006, foi de 0,68 kWh/m<sup>3</sup>. A nível mundial o valor médio do CE é de 0,60 kWh/m<sup>3</sup>. A razão principal deste alto índice se deve ao valor elevado do desnível geométrico entre a captação e a cidade de Caruaru e dos consideráveis comprimentos das adutoras. A altura geométrica do recalque total das três elevatórias do Prata é de 241,1 m, sendo 378,9 m a cota do NA mínimo do poço de sucção da EE-01 e 620,0 m a cota da entrada da ETA de Petrópolis. A altura geométrica do recalque total das cinco elevatórias em série de Jucazinho é de 331,5 metros, sendo 243,5 m a cota do NA mínimo do poço de sucção da EE-01 e 575,0 m a cota da entrada da ETA de Salgado.

Pela razão antes mencionada, é necessário otimizar as operações dos dois sistemas com o aumento, também, das eficiências eletromecânicas das estações elevatórias. O Sistema Prata necessita de sincronia

operacional para evitar que as bombas trabalhem com seus registros estrangulados, o que está ocorrendo, atualmente, nas elevatórias EE-01 e EE-03. O estrangulamento dos registros na saída das bombas provoca o aumento de perdas de carga hidráulica, que se traduzem em perdas de energia no sistema. As adutoras do Prata e de Jucazinho deveriam estar operando com sistemas de automação para controlar os acionamentos dos conjuntos elevatórios, levando-se em conta que as elevatórias estão situadas em localidades com difícil acesso e a certa distância ao Centro de Controle Operacional, na cidade de Caruaru. Esta ausência de automação é prejudicial ao bom funcionamento dos sistemas de recalque em cascata, e do controle da quantidade de água bruta a ser tratada nas ETAs da cidade de Caruaru (Petrópolis e Salgado). As aberturas e fechamentos dos registros de controles dos conjuntos motor-bomba vêm sendo realizados manualmente, necessitando da participação de vários operadores para manobrar os pesados registros.

Outro problema de certa relevância nos sistemas Prata e Jucazinho é a elevada necessidade de água demandada pela cidade de Caruaru. Segundo dados do Núcleo de Controle Operacional do Agreste, pertencente à COMPESA, a cidade de Caruaru tem demandado, atualmente, aos sistemas Prata e Jucazinho, uma vazão média contínua de 1000 L/s, considerando as diferentes vazões distribuídas pelos dois sistemas durante os horários ponta e fora de ponta. De acordo com dados do censo demográfico e da análise de crescimento populacional de Caruaru, a população atual da cidade é de, aproximadamente, 275 mil habitantes. Para uma vazão média contínua de 1000 L/s, o consumo per capita bruto, atualmente distribuído para a população da cidade é de aproximadamente 300 L/hab/dia. Este valor é bastante alto, o que significa dizer que as perdas de água existentes na cidade são muito elevadas.

Em termos comparativos, de acordo com a Companhia de Água e Esgoto da Paraíba - CAGEPA (estado vizinho a Pernambuco), atualmente, a vazão média contínua distribuída para a cidade de Campina Grande, e municípios vizinhos (população de cerca de 420 mil habitantes), é de 1100 L/s. Para os valores de vazão e população mencionados, corresponderá uma vazão distribuída per capita de 226 L/hab/dia. Vale salientar que Campina Grande possui condições climáticas e sócio-econômicas semelhantes à cidade de Caruaru.

## **METODOLOGIA**

A otimização dos sistemas adutores do Prata e de Jucazinho, com vistas à minimização do consumo de energia elétrica, requer modificações nos procedimentos operacionais das estações elevatórias e possíveis intervenções físicas em partes do sistema. De uma maneira geral, as intervenções físicas poderão ocorrer através de:

- Adequação dos rotores de determinadas bombas.
- Substituição dos motores standard por motores de alto rendimento.
- Implantação de soft-starter para acionamento dos motores.
- Construção de reservatório de regularização para parada do bombeamento no horário de ponta.
- Substituição dos conjuntos motor-bomba (CMB) para se adequarem às novas características hidráulicas do sistema.
- Substituição dos registros por válvulas de controle automáticas.
- Implantação do sistema de automação e controle.

Após a análise do funcionamento operacional de ambos os sistemas pôde-se verificar que a medida mais eficaz para a diminuição dos custos com energia elétrica é a paralisação total dos bombeamentos no horário ponta (das 17:30 h às 20:30 h), pois a tarifa de energia neste horário é 7,5 vezes o valor da tarifa no horário fora de ponta. No Quadro 1 encontram-se os valores das tarifas pagas em 2008, pela COMPESA à CELPE, correspondentes à modalidade horossazonal verde, que é a aplicada ao Sistema Prata. Nesta modalidade a tarifa de demanda é idêntica para os horários ponta e fora de ponta.

Quadro 1: Tarifas de consumo e demanda aplicadas às faturas de energia

Modalidade tarifária	Consumo		Demanda	
	T <sub>cp</sub> (R\$/kWh)	T <sub>cfp</sub> (R\$/kWh)	T <sub>dp</sub> (R\$/kWh)	T <sub>dfp</sub> (R\$/kWh)
Tarifa Azul - THA (A3)	0,29449	0,17901	33,48219	7,84211
Tarifa Azul - THA (A4)	0,29449	0,17901	63,47483	19,3864
Tarifa Verde - THV	1,34136	0,17901	19,38640	19,3864

Para parar os conjuntos motor-bomba no horário ponta é necessário que seja construído reservatórios de regularização para acumular, durante o horário fora de ponta, o volume distribuído no horário de ponta. Além disso, devem-se incrementar as vazões das estações elevatórias, durante o período fora de ponta, para suprir o volume dos reservatórios de regularização.

Para que a reabilitação do sistema ocorra com o aumento de eficiência energética, não basta que só haja a redução dos custos com energia elétrica; é necessário que as intervenções sejam economicamente viáveis. Para tanto deve ser realizada uma análise econômica para a comprovação da viabilidade do investimento proposto.

Neste estudo, a análise econômica envolve os custos de investimentos (fixos) e os custos de operação (variáveis), que compreende os de energia elétrica. Os custos de investimentos são aqueles realizados na fase de reabilitação do sistema, são eles: aquisição de um conjunto motor-bomba de 750 cv e de válvulas de controle automáticas, construção de reservatórios de regularização e a implantação dos sistemas de automação e controle.

Sabendo que a alteração não possui restrições com relação aos aspectos técnicos, ambientais e sociais, a viabilidade da reabilitação será comprovada apenas pela análise de viabilidade econômica através dos seguintes métodos: Valor Presente Líquido (*VPL*), Relação Benefício/Custo (*B/C*), Taxa Interna de Retorno (*TIR*) e Tempo de Retorno de Capital (*TRC*).

O *VPL* representa o somatório dos benefícios e custos, envolvidos ao longo do alcance de projeto, atualizados para o instante zero, sendo calculado através da Equação (1).

$$VPL = B \times FVP - I \quad (1)$$

Onde:

B = valor do benefício que incide no final do primeiro ano de projeto;

FVP = fator de valor presente, representado pela Equação (2);

I = custo de investimento do empreendimento que incide no instante inicial do projeto.

$$FVP = \frac{(1+e)^n - (1+i)^n}{(1+e) - (1+i)} \times \frac{1}{(1+i)^n} \quad (2)$$

Onde:

e = taxa de aumento anual de energia elétrica;

i = taxa efetiva de juros anuais;

n = alcance de projeto.

Na análise do *VPL* o investimento será atrativo caso este indicador seja maior que zero, não atrativo quando menor que zero e indiferente quando igualado a zero.

O *B/C* é a relação entre os benefícios e custos envolvidos no projeto, contabilizados numa mesma referência de tempo (valores presentes ou anuidades). Sendo o *B/C* maior que 1, significa que o investimento é atrativo, caso contrário não é atrativo, e se for igual a um o investimento é indiferente.

A *TIR* é a taxa de juros que zera o *VPL* do empreendimento. Para um investimento ser considerado atrativo, a *TIR* deve ser maior que a taxa de juros empregada, caso contrário o investimento é dito inviável, sendo o mesmo indiferente quando a *TIR* se iguala com a taxa de juros.

O valor de *TRC* indica quanto tempo é necessário para que os benefícios se igualem ao custo de

investimento. São dois os indicadores do Tempo de Retorno do Capital (TRC): o TRC não descontado e o TRC descontado, o primeiro é definido como sendo o período de tempo (meses ou anos) necessário para o retorno do investimento inicial, sem considerar as taxas de juros e de aumento das grandezas monetárias durante a análise do projeto; o segundo representa o número de períodos que zera o valor presente do projeto, levando-se em conta a taxa de juros e de aumento das parcelas incidentes no fluxo de caixa (GOMES, 2009).

A análise do Tempo de Retorno do Capital está diretamente relacionada com a duração da vida útil do projeto. Se o tempo de retorno do capital é superior ao período de vida útil do projeto, o investimento correspondente não será atrativo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Atualmente, o Sistema Prata, durante o horário ponta, abastece a ETA de Petrópolis com apenas um conjunto motor-bomba funcionando em cada uma das três elevatórias, em série, com uma vazão média de 230 L/s. Para atender à ETA Petrópolis com a vazão de 230 L/s, durante as três horas do horário ponta, a capacidade mínima do reservatório de regularização é de 2.484 m<sup>3</sup>. O custo de um reservatório em concreto armado para atender este volume, com as conexões metálicas necessárias, foi orçado em R\$ 990.826,00.

Com a parada das bombas do Sistema Prata se deixará de consumir a energia gasta pelos três conjuntos (um de cada elevatória), que atualmente operam simultaneamente durante as 3 horas do horário ponta. Com as paradas dos conjuntos motor-bomba o sistema deixa de consumir, em média, 122.870 kWh mensais no horário ponta. Com base na energia e demanda economizadas e nos valores das tarifas de consumo e de demanda, a economia média mensal proporcionada com a parada dos conjuntos do Sistema Prata é de R\$ 164.813,31. O volume de água reservado no reservatório de regularização deve advir do aumento da vazão das elevatórias no período fora do horário ponta. O aumento da vazão é obtido da divisão do volume a ser armazenado no horário ponta pelo período de tempo do horário fora de ponta. Este valor corresponde a menos de 10% da vazão média aduzida pelo sistema fora do horário ponta, que é de 400 L/s. Admitindo-se, a favor da segurança, que a potência dos conjuntos motor-bomba das três elevatórias aumentará 10%, haverá um aumento do consumo de energia de 10% fora do horário ponta. Com base nos cálculos executados, haverá um acréscimo médio mensal de energia fora do horário ponta de 199.579 kWh e de 335 kW na demanda a ser contratada. A partir dos valores das tarifas, haverá um acréscimo médio mensal de R\$ 42.221,12 na fatura de energia do Sistema Prata. No entanto, a economia do custo médio mensal líquido de energia elétrica, no Sistema Prata será de R\$ 122.592,19.

Para o sistema de Jucazinho atender 100% da demanda será necessário construir 8 reservatórios para distribuir água às diversas localidades abastecidas pelo sistema, além de aumentar as vazões das estações elevatórias, durante o período fora de ponta, para suprir os volumes dos reservatórios de regularização.

Com as paradas dos conjuntos motor-bomba de Jucazinho o sistema deixa de consumir, em média, 279.151 kWh mensais e deixa de demandar 5,23 MW de potência no horário ponta. Com base na energia e demanda economizada e nos valores das tarifas de consumo e de demanda, a economia média mensal proporcionada com a parada dos conjuntos é de R\$ 279.076,51. Devido ao aumento da vazão no horário fora de ponta haverá um acréscimo médio mensal de energia fora do horário ponta de 176.130 kWh e de 305 kW na demanda contratada, resultando em um acréscimo médio mensal de R\$ 44.382,79. No entanto, haverá uma economia do custo médio mensal líquido de energia elétrica, no Sistema Jucazinho, de R\$ 234.693,72.

## Intervenções Complementares

Reabilitação da elevatória EE-02 do Sistema Prata: Atualmente a estação elevatória EE-01 opera continuamente com um dos registros parcialmente fechado, isto ocorre porque a EE-02 não dispõe de capacidade para recalcar a vazão máxima oriunda da EE-01. Concomitantemente, como a capacidade de recalque da EE-03 é maior do que a da EE-02 um dos conjuntos da EE-03 opera com o registro parcialmente estrangulado. Desta forma, os conjuntos motor-bomba da EE-02 devem ser redimensionados com capacidades de recalque compatíveis com os conjuntos da EE-01 e EE-03. De

acordo com o fabricante das bombas instaladas atualmente, o custo de implantação unitário de um conjunto motor-bomba (com acessórios) de 750 CV, para operar com as vazões e alturas manométricas compatíveis com o recalque de EE-02 para EE-03 é da ordem de 750 mil reais. Portanto, o custo de investimento para reabilitar a estação elevatória EE-02 (dois conjuntos elevatórios) é de 1,5 milhões de reais.

Implantação de válvulas de controle automáticas: Para a melhoria da eficiência da operação dos sistemas, os acionamentos “liga-desliga” dos conjuntos motor-bomba deverão ser efetuadas com o auxílio de válvulas de controle automática, que são manejadas eletronicamente. O custo unitário de implantação de uma válvula controladora de bomba DN 400 foi cotado em 70 mil reais. Para as três elevatórias do Sistema Prata haverá a necessidade de implantação de 6 válvulas controladoras de bomba, perfazendo um custo de investimento de 420 mil reais. Para as oito elevatórias do Sistema Jucazinho haverá a necessidade de implantação de 19 válvulas controladoras de bomba, perfazendo um custo de investimento em torno de 1,33 milhões de reais.

Implantação do sistema de automação e controle (sistema tipo SCADA): A operação correta de um macro sistema adutor do porte do Prata e de Jucazinho não deve prescindir de um sistema de automação para controlar adequadamente os acionamentos dos conjuntos motor-bomba e permitir o seu monitoramento e operação de forma otimizada. O monitoramento da operação das elevatórias, reservatórios e ETA, através do seu Centro de Controle Operacional, além de garantir um melhor funcionamento do sistema adutor como um todo, permitirá visualizar “em tempo real” as condições operacionais de todo o sistema e tomar decisões para evitar o pagamento de multas pela ocorrência de possíveis transitórios hidráulicos e elétricos (picos de corrente). Mediante cotação comercial, o orçamento aproximado para a automação do sistema adutor do Prata, compreendendo os controles automáticos de liga e desliga dos conjuntos motor-bomba, juntamente com os níveis de reservatórios de regularização e da chegada de água à ETA de Petrópolis, foi de 400 mil reais. Para Jucazinho, o custo de implantação para a automação do sistema adutor, foi de 1,1 milhões de reais.

A análise de pré-viabilidade econômica das intervenções propostas para a diminuição do consumo e custo de energia elétrica para os Sistema Prata e Jucazinho está embasada nos seguintes dados: custo energético economizado; custo de investimento das intervenções propostas; alcance do projeto; taxa de juros anual esperada e taxa de aumento do custo energético. Considerando os custos economizados mensais de energia elétrica, haverá uma economia anual, nos dois sistemas, de R\$ 4.287.430,96. Esta economia se traduz em benefício no fluxo de caixa para a obtenção dos indicadores econômicos do estudo de pré-viabilidade (ver Figura 3). O custo de investimento das intervenções propostas em Prata e Jucazinho será igual à soma dos custos de: reservatórios de regularização, válvulas de controle, bomba e automação do sistema. O custo total de investimento dos dois sistemas é de R\$ 10.313.331,28.

Para a análise econômica proposta o alcance do projeto de eficiência energética é de 10 anos, a taxa de juros anual adotada é de 6,5% ao ano e a de aumento da energia é de 6% ao ano.

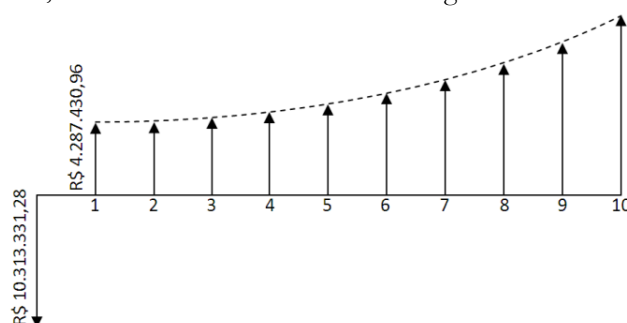


Figura 3 - Fluxo de caixa da análise econômica dos sistemas Prata e Jucazinho

Em resumo, os resultados alcançados dos indicadores econômicos foram:

- Relação Benefício Custo:  $B/C = 3,82$ ;
- Valor Presente Líquido:  $VPL = R\$ 29,1$  milhões;
- Tempo de Retorno do Capital:  $TRC = 2,6$  anos;
- Taxa Interna de Retorno:  $TIR = 45,9\%$  ao ano.



## CONCLUSÕES

Os resultados obtidos deste trabalho, referentes ao diagnóstico e aos estudos de pré-viabilidade técnica e econômica dos sistemas Prata e Jucazinho são extremamente positivos e animadores. Com a implantação das ações, recomendadas nos estudos de pré-viabilidade, a COMPESA poderá economizar, aproximadamente, R\$ 122.592,19 na fatura mensal de energia elétrica do Sistema Prata, o que corresponde a 19,3% da conta de energia paga atualmente à CELPE. Para o Sistema Jucazinho a economia mensal poderá ser de, aproximadamente, R\$ 234.693,72, o que corresponde a 17,7% da conta de energia paga atualmente à CELPE. Para a obtenção das economias antes apontadas, será necessário parar todas as estações elevatórias de Prata e Jucazinho no horário de ponta do consumo de energia elétrica. Neste caso, para que não haja prejuízo ao abastecimento de todas as localidades atendidas, serão necessários investimentos de 3,3 milhões de reais para o Sistema Prata e de 7 milhões para Jucazinho.

Vale ressaltar, ainda, que a análise econômica realizada neste trabalho considerou que a vida útil dos equipamentos e obras civis a serem implantados nos sistemas Prata e Jucazinho seria de 10 anos. No entanto, a vida útil dos equipamentos geralmente é superior a 10 anos e das obras civis a 30 anos, o que melhoraria, ainda mais, os indicadores de viabilidade econômica de ambos os projetos. Todos os equipamentos e obras civis foram dimensionados com folgas, em favor da segurança.

Além do aspecto da viabilidade econômica plenamente favorável, conforme demonstrado neste trabalho, deve-se considerar que as intervenções propostas, visando à redução e custo de energia elétrica dos sistemas Prata e Jucazinho, proporcionam benefícios operacionais consideráveis, já que os dois sistemas passarão a operar de forma automatizada, favorecendo um maior e melhor controle de todo o sistema, se refletindo na melhor qualidade do serviço prestado. Com o maior controle do sistema, haverá redução de multas provocadas por falta de monitoramento dos possíveis transientes elétricos (picos de corrente). Os acionamentos de liga e desliga dos conjuntos motor-bomba passarão a ser executados com válvulas automáticas, dispensando o trabalho pesado de manejo manual dos registros.

Recomenda-se a realização de campanhas de combate a perda de água e do uso racional da água por parte da demanda, que proporcionarão uma melhor confiança e a garantia de continuidade do abastecimento nos sistemas atendidos por Prata e Jucazinho.

Por último, deve ser ressaltado que o trabalho de eficiência energética proposto trará um benefício significativo para o setor elétrico brasileiro. Com as paradas das estações elevatórias no horário ponta se evitará disponibilizar 8,58 MW de potência neste horário.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBOSA, P. S. F.; VENTURINI, M. A. G. (2002) “*Subsídios à escolha de técnicas de reabilitação de redes de distribuição de água*”, Seminário: Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água: O Estado da Arte e Questões Avançadas. João Pessoa, Brasil.
- BASTOS, C. C. O.; GOMES, H. P.; SILVA, J. S. O. P. (2008) “Reabilitação do sistema de abastecimento de água da cidade de Fundão - Brasil”, In: RAMOS, H. M., COVAS, D. I. C., GONÇALVES, F. V., SOARES, A. K. (eds). *Alterações Climáticas e Gestão da Água e Energia em Sistemas de Abastecimento e Drenagem*. 1ª ed., Lisboa, Portugal, IST - CEHIDRO.
- GOMES, H. P. (2009) “*Eficiência Hidráulica e Energética em Saneamento: Análise Econômica de Projetos*. 2ª ed, João Pessoa, Brasil, Editora UFPB.
- GOMES, H. P.; BEZERRA, S. T. M. (2007) “Reabilitação de sistemas de distribuição de água”. In: GOMES H., GARCIA R., REY (eds). *Abastecimento de Água - O Estado da Arte e Técnicas Avançadas*. 1ª ed., João Pessoa, Brasil, Editora Universitária da UFPB.
- JAMES, K.; CAMPBELL, S. L.; GODLOVE, C. E. (2002) “*Água e energia - Aproveitando as oportunidades de eficiência de água e energia não exploradas nos sistemas municipais*”. Alliance - Aliança para Conservação de Energia. Washington, USA.

---

### **3 Diagnóstico preliminar energético de sistemas de distribuição de água da Paraíba**

---

**Heber Pimentel Gomes<sup>1</sup>, Saulo de Tarso Marques Bezerra<sup>2</sup>, Wil Lavor Lucena Camboim<sup>1</sup> e Paulo Sergio O. Carvalho<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal da Paraíba - UFPB - João Pessoa - Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal de Pernambuco - UFPE - Caruaru - Brasil

#### **INTRODUÇÃO**

O combate ao desperdício de energia elétrica e água vem impulsionando uma mudança de paradigma comportamental demandada pela sociedade, principalmente por meio de organismos governamentais, em função do esgotamento dos recursos naturais. Evidentemente, os fatores financeiros colaboram com iniciativas nesse sentido, já que nenhuma instituição, seja ela pública ou privada, física ou jurídica, sobrevive sem um bom aproveitamento de suas reservas econômicas. A mudança de hábitos e a eficiência energética são instrumentos que promovem a redução efetiva dos diversos tipos de desperdícios.

A busca pela eficiência energética ocorre a partir de dois momentos: a informação e o conhecimento efetivo. Ou seja, é extremamente necessário o conhecimento do comportamento das grandezas envolvidas nos processos, que associados a interpretação fundamentada em conhecimentos técnicos, possibilita o arcabouço necessário para almejem-se resultados significativos. Desta forma, não é possível reestruturar um sistema sem o conhecimento do estado em que este se encontra. Os projetos voltados para o aumento da eficiência de sistemas de abastecimentos de água, basicamente, podem ser divididos em três fases: a do diagnóstico, do projeto propriamente dito, e a de implantação e acompanhamento das medidas indicadas no projeto. O diagnóstico do sistema compreende a busca de informação através da análise e coleta de dados em campo. Eventualmente, é recomendada a simulação do funcionamento hidráulico do abastecimento através de programas computacionais, destacando-se o uso do EPANET. O diagnóstico também é essencial no processo de planejamento do sistema a médio e longo prazo, seus resultados são imprescindíveis para a estruturação das diversas etapas subsequentes. Em curto prazo, após a obtenção do diagnóstico do problema, já é possível o estabelecimento de estratégias que considerem, principalmente, os aspectos técnicos e econômicos (minimização de custos e/ou aumento de receita).

Partindo do preceito da importância do diagnóstico, apresenta-se neste capítulo um breve resumo do diagnóstico preliminar da operação de 39 sistemas de bombeamento da Companhia de Água e Esgotos da Paraíba – CAGEPA, realizado no ano de 2009. Os diagnósticos apontam os problemas verificados *in loco* e forneceram subsídios a companhia para a elaboração de 18 projetos de eficiência hidráulica e energética em sistemas de água e de esgotos voltados para a obtenção de recursos financeiros da Reserva Global de Reversão - RGR do Programa Nacional de Eficiência Energética no Saneamento Ambiental - PROCEL SANEAR - das Centrais Elétricas Brasileiras S. A. - Eletrobrás.

No documento completo, diagnóstico preliminar descreve detalhadamente a situação real dos sistemas (estações elevatórias, sistemas de proteção, automação, macromedição, adução e reservação), elucidando suas principais deficiências, configurações e modo de operação. Aquele apresenta as quantidades e características técnicas dos equipamentos existentes, incluindo as dos conjuntos motor-bomba, das válvulas de controle, das tubulações etc.

O trabalho foi executado pela SCIENTEC - Associação para o Desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia. Todos os sistemas foram visitados por consultores do LENHS UFPB - Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba e por técnicos da CAGEPA, que tinham a função de descrever minuciosamente a operação de cada sistema e disponibilizar os dados técnicos referentes ao último trimestre do ano de 2008.

## SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

A bomba constitui-se no dispositivo de transferência de energia de fluido mais antigo que se conhece. O objetivo de sua utilização é converter trabalho mecânico em uma combinação de energias (cinética, pressão e potencial), de forma a possibilitar o transporte do fluido com as características necessárias a sua utilização (Gomes, 2009).

Os sistemas de bombeamento visitados possuem basicamente as seguintes finalidades:

- Bombeamento de água bruta de rios, reservatórios de nível ou represas para estações de tratamento de água (ETA).
- Bombeamento de água tratada de ETA para reservatórios elevados ou apoiados.
- Bombeamento de água tratada de reservatórios apoiados para reservatórios elevados.
- Bombeamento em estações elevatórias de esgoto.

Ainda existem sistemas que possuem alternativas para complementar o abastecimento. São poços artesianos disponíveis em alguns setores que completar o fornecimento. Os poços artesianos fornecem água de boa qualidade (necessitam apenas de adição de cloro) e abastecem diretamente os reservatórios (Figura 1). Os poços amazonas e fontes naturais fornecem água para as ETA.

Quando se trata de água bruta o bombeamento se dá através de derivação da barragem de nível ou por meio de bombeamento direto, através de captação flutuante (Figura 2). Nem sempre tem-se a utilização de caixa de areia e poço de sucção, com a preocupação da instalação de dispositivos preliminares para a remoção de sólidos em suspensão.

O bombeamento de água tratada se dá para reservatórios elevados, que então abastecem as cidades por gravidade. Existe ainda a possibilidade do bombeamento ser dividido em dois trechos sendo o primeiro da ETA para o reservatório apoiado e o segundo do reservatório apoiado para o elevado.



Figura 1 – Poço artesiano abastecendo diretamente um reservatório apoiado(Sistema R6 – João Pessoa)

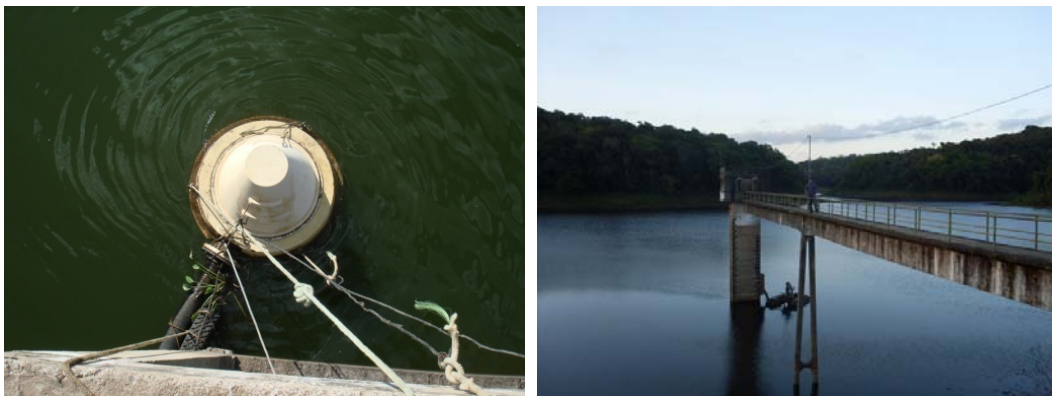


Figura 2 - Captação flutuante a) Açude Coremas-Piáncos b) Captação do Sítio Vaca Brava II - Esperança

No bombeamento de esgotos sanitários a chegada dos efluentes se dá por gravidade em poços de sucção equipados, na maioria das vezes, com grades para retirada de materiais sólidos.

Dentre os sistemas de bombeamento analisados, destaca-se o sistema Gramame. Este sistema é responsável por abastecer parte da cidade de João Pessoa (PB). O complexo possui uma subestação própria que alimenta os conjuntos motor-bomba e uma rede trifásica que fornece energia elétrica a ETA Gramame. O sistema de bombeamento possui 2 motores de 1500 cv e 2 motores de 2750 cv disponíveis (Figura 3). Os motores elétricos possuem quadros individualizados dotados de medidores analógicos de tensão e corrente elétrica. As bombas não são afogadas.



Figura 3 – Sistema de bombeamento de Gramame

Um sistema de bombeamento é composto basicamente de uma tubulação de aspiração, um conjunto motor-bomba e uma tubulação de recalque. Há, basicamente, dois tipos característicos de instalações de bombeamento utilizadas em abastecimento de água. No primeiro caso, a bomba é instalada num plano acima do nível da água do reservatório inferior, enquanto no segundo, esta se encontra abaixo dele, caracterizando o que se chama de instalação com bomba afogada (Andrade Filho, 2009). Este último modo de instalação deve ser utilizado sempre que possível, pois apresenta as seguintes vantagens:

- A bomba se encontra sempre escorvada, ou seja, completamente preenchida com o fluido, dificultando a presença de bolhas de ar.
- As pressões na aspiração são positivas. A ausência de vácuo impede a entrada de ar na tubulação de aspiração, ou seja, a bomba não “pega ar”, como é conhecido o fenômeno.
- A válvula de pé, que só permite o escoamento num sentido e assim impede o retorno da água ao reservatório inferior, é dispensada.

Alguns tipos de captação impossibilitam a instalação das bombas de forma afogada. Por exemplo, quando a captação acontece de forma direta do manancial têm-se sucção não afogada, como é o caso da captação flutuante no Rio Piranhas em Pombal (Figura 4). Para a instalação das bombas afogadas, normalmente, se faz necessária a construção de um poço de sucção próximo a casa de bombas. Esse poço de sucção pode se encontra em um nível mais baixo que o manancial ou reservatório e ser abastecido por gravidade (Figura 5), ou mesmo receber água recalçada de um reservatório mais baixo.



Figura 4 - Captação flutuante, bomba não afogada



Figura 5 - Poço de sucção para água bruta abastecido por gravidade.

A concessionária de energia elétrica fornece energia aos complexos em média e alta tensão. Os sistemas, dependendo do porte dos sistemas de bombeamentos, possuem transformadores ou subestações (Figura 6) para converterem a energia em baixa tensão.

Os sistemas elétricos alimentados em alta tensão recebem em 13,8 kV, sendo os diversos grupos de transformadores responsáveis em converter na tensão requerida dos motores (380V ou 440V). Obviamente, todos os motores possuem alimentação trifásica.

Os sistemas de maior porte possuem uma alimentação diferenciada. A unidade Marés em João Pessoa, por exemplo, recebe energia em média tensão e distribui para 9 subestações responsáveis pela alimentação dos sistemas de bombeamento e uma pelos prédios da administração.



Figura 6 - Subestação que alimenta o sistema de bombeamento e a ETA Gramame

## **ADUTORAS**

Existe uma grande quantidade de tipo de tubos que podem ser empregados nos sistemas de distribuição de água. Para a seleção adequada devem ser considerados vários fatores, tais como: diâmetro, custo do tubo, pressão de trabalho, cargas externas que poderão atuar, custo de instalação e manutenção, qualidade da água etc. Os tipos de tubo geralmente empregados nas redes hidráulicas são de PVC, polietileno, PRFV (poliéster revestido com fibra de vidro) e metálicos (ferro fundido e aço).

Os sistemas de distribuição de água relacionados utilizam tubulação de ferro fundido, PVC e PRFV, com diâmetros que variam de 100 a 400 mm. Os trechos possuem comprimentos que variam de 2 metros a 14 km, dependendo da distância entre os reservatórios, ETA's e mananciais

No caso dos sistemas de esgotamento sanitário, estes são mais robustos, como é o caso da Usina I, João Pessoa, que possui adutora com diâmetro nominal de 800 mm. A seguir, a Quadro 1 apresenta uma relação com alguns sistemas visitados com os respectivos diâmetros e material de suas adutoras.



Quadro 1 - Tipos de adutora

Sistema	Tipo	Diâmetro	Material
Usina I – João Pessoa	Esgoto	800 mm	FoFo
ETA - Sapé	Água Tratada	300 mm	FoFo
		200 mm	PRFV
		150 mm	FoFo
		150 mm	FoFo
Serra Vermelha – Conceição	Água Bruta	200 mm	FoFo
ETA – Solânea	Água Tratada	200 mm	FoFo

## MEDIÇÃO DAS GRANDEZAS HIDRÁULICAS

A medição em campo das grandezas envolvidas no sistema é indispensável para um eficiente acompanhamento, diagnóstico e possíveis correções de erros de operação. Tais medições são necessárias, também, para a determinação de indicadores de desempenho, que devem ser padronizados e terem seu acompanhamento encarado como atividade permanente nas empresas.

Para se ter dados consistentes é necessário que, antes de tudo, as medições das grandezas elétricas e hidráulicas sejam realizadas simultaneamente, caracterizando assim um estado do sistema de forma completa.

As grandezas elétricas a determinar são obrigatoriamente: tensão, corrente, potência, e fator de potência. As principais medições das grandezas hidráulicas a registrar são vazão e pressão. Dos sistemas analisados, poucos possuíam medições automáticas de vazão e pressão.

Para análise das grandezas elétricas os quadros apresentavam medidores analógicos de tensão e corrente.

A maioria dos sistemas não apresentava medidores fixos de vazão ou pressão, porém, praticamente, todos possuem vários TAP's instalados para a medição de vazão e pressão através de estações pitométricas (Figura 7).

Sistemas como Barragem Jacaraú, em Jacaraú, e ETA Solânea, em Solânea, possuem um calha *parshall*. A calha *parshall* é um dispositivo de medição de vazão na forma de um canal aberto com dimensões padronizadas. A água é forçada por uma garganta relativamente estreita, sendo que o nível da água a montante é o indicativo da vazão a ser medida. É um dispositivo simples, mas que pode ser uma excelente alternativa para sistemas menores, pois necessitam de pouca manutenção e mão de obra menos especializada.

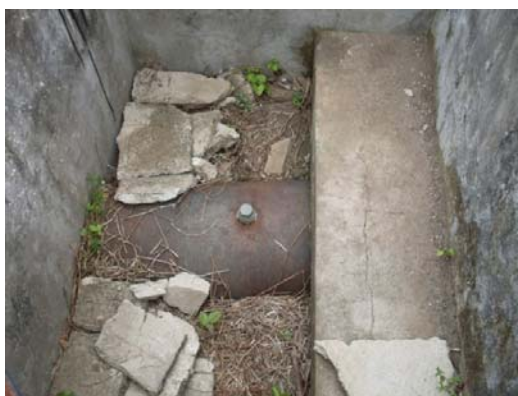


Figura 7 – TAP

Outra forma comum de obter valores de vazão nos sistemas é a utilização de medidores de vazão proporcional (Figura 8). Medidores proporcionais são aqueles em que um medidor tipo turbina de pequeno porte é instalado em paralelo a uma tubulação de maior diâmetro, de modo que apenas uma parcela da água é medida. O medidor proporcional pode medir grandes volumes de água tratada (Bezerra et al., 2009).



Figura 8 – Medidores de vazão proporcional

A Figura 9 apresenta uma configuração típica desenvolvida pela CAGEPA - Companhia de Água e Esgotos da Paraíba. A tubulação de água na qual se deseja efetuar a medição é perfurada lateralmente na altura de seu eixo axial longitudinal onde é introduzido um tubo de pequeno diâmetro que conta com orifícios. Este tubo dispõe de certo número de orifícios que ficam em posição frontal ao sentido do escoamento da tubulação maior (orifícios de montante), de forma que por eles entram uma pequena parte da água que flui pela tubulação cuja vazão é objeto de medição. A água que entra por estes orifícios sai pelos orifícios da face oposta (orifícios de jusante) do tubo de pequeno diâmetro, após ter passado por um hidrômetro instalado externamente no anel que se conforma por fora da tubulação principal. (WIENDL, 1997).

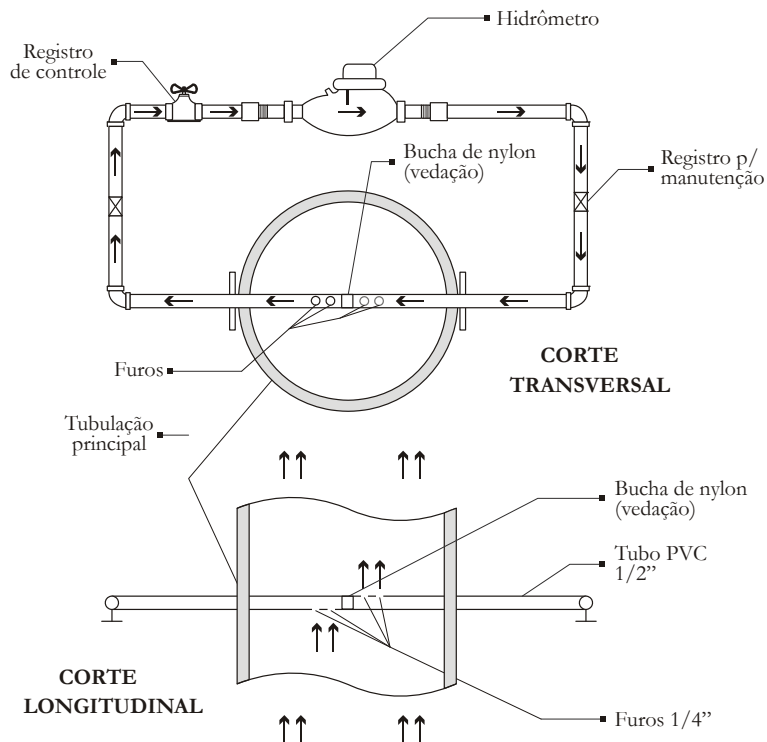


Figura 9 - Esquema de medidor tipo proporcional<sup>1</sup>

Calibrações prévias permitem obter coeficientes que, multiplicados pelos valores registrados no medidor, fornecem o volume total escoado. A calibração pode ser realizada em laboratório, mas a prática operacional recomenda que uma estação pitométrica seja instalada junto ao medidor proporcional, permitindo calibrações periódicas no próprio local.

<sup>1</sup> Fonte: CAGEPA - Companhia de Água e Esgotos da Paraíba.

Uma versão mais moderna é possível quando o hidrômetro instalado é dotado de registrador contínuo de sinais. A leitura e processamento desses sinais permitem a medição da vazão contínua.

A principal motivação (vantagem) para o uso do medidor proporcional é o custo, que é muito baixo quando comparado com outros tipos.

Os medidores proporcionais devem ser criteriosamente construídos e calibrados. Cada configuração deve ser individualmente testada e calibrada, pois não existem normas estabelecidas para este tipo de medidor. Se tais cuidados não forem tomados, o grau de confiabilidade decai bastante. Um problema importante reside no fato de que as calibrações originais podem se perder rapidamente como acúmulo de detritos no filtro do medidor, pois isto altera a perda de carga no sistema, fator básico para o funcionamento do mesmo. Com base neste fato, recomenda-se utilizar como medidor paralelo um medidor sem filtro, de preferência do tipo monojato, que tem passagem mais livre para partículas porventura existentes na água.

Por sua característica, estes medidores possuem uma dinâmica de medição muito pequena, não sendo adequado para locais onde ocorram grandes variações de vazão. Deve-se também tomar cuidado com o coeficiente a ser multiplicado pelo valor medido no hidrômetro, pois pode variar com a vazão.

Os sistemas que apresentavam medidores de vazão mais eficientes e modernos, do tipo eletromagnético, foram o sistema Pedro Bandeira - Guarabira e o sistema da ETA de Sapé (Figura 10). Para exemplificar, a Quadro 2 apresenta os tipos de medidores de três sistemas estudados.



Figura 10 – Medidor de vazão eletromagnético da ETA de Sapé

Quadro 2 - Tipos de medidores de vazão

Sistema	Medidor Vazão
Pedro Bandeira – Guarabira	Proporcional Eletromagnético
ETA - Sapé	Proporcional Eletromagnético
ETA – Solânea	TAP Proporcional

## COMUNICAÇÃO E CONTROLE DOS SISTEMAS

Para um bom gerenciamento dos sistemas de abastecimento de água é necessário que se tenha um eficiente processo de aquisição, armazenamento e transmissão das grandezas elétricas e hidráulicas. Atualmente, tem-se investido na automação para alcançar esses objetivos, já que esta possibilita uma operação assistida e um controle automático do processo.

Nos sistemas em análise pouco se tinha em automação. Na maioria destes o controle era realizado de forma visual, com procedimentos manuais e toda a comunicação realizada via rádio. O sistema Usina II, João Pessoa, pode-se citar como exemplo de um sistema que apresenta o controle das bombas feito através de um CLP (Figura 11).



No sistema de recalque de esgoto da EEE – Guarabira utiliza-se o sistema de auto-bóia. Esse é um tipo de sistema bastante eficiente e muito usado em elevatórias de esgoto e mantém os níveis dos reservatórios dentro dos limites de trabalho.



Figura 11: CLP do sistema Usina II – João Pessoa

## MONOBRAS DOS SISTEMAS

Normalmente, para o melhor funcionamento dos sistemas de abastecimento são necessários manobras, tais como o liga/desliga de motores e abertura/fechamento de registros. Essas manobras são exigidas devido à variação de vazão ou pressão requerida pelos sistemas; disponibilidade de água por parte dos mananciais, ETA ou reservatórios; ou ainda por falhas elétricas ou hidráulicas do sistema (vazamentos, falta de energia etc.).

O ideal seria que todas essas manobras e decisões fossem tomadas de forma remota e automatizadas, porém esse tipo de solução ainda é considerada muito dispendiosa, além de necessitar de mão de obra mais especializada e uma estrutura de operação mais complexa. Como não há instrumentação e monitoramento remoto nos sistemas visitados, é necessária a presença de operadores em todas as estações de bombeamento. Os operadores fazem o controle visual do processo e realizam as manobras necessárias.

Alguns dos sistemas relacionados não existem manobras a serem feitas, principalmente, porque já trabalham em situação final de projeto necessitando que seus conjuntos motor-bomba trabalhem vinte e quatro horas por dia, como é o caso da estação de Arara. Normalmente existe um motor de reserva para possível manutenção ou mesmo quebra do motor principal. Aqueles que necessitam de mudanças de operação possuem, via de regra, o desligamento de parte dos conjuntos nos períodos de menor consumo (madrugada), normalmente é criada uma programação horária com base na experiência dos operadores e essas ações são tomadas como regra por todo período de operação.

Nos sistema de reservatório R6 – João Pessoa e na ETA de Solânea, além das manobras de liga/desliga das bombas, há uma manobra de estrangulamento em certos períodos no registro a jusante de cada bomba. Essa prática é comum nos sistemas de abastecimento, sendo uma forma simples, porém ineficiente de se reduzir vazão e pressão a jusante da instalação da válvula.

## MANANCIASIAIS

Mananciais são fontes de água, superficiais ou subterrâneas, utilizadas para o abastecimento humano e manutenção das atividades econômicas. Nos sistemas visitados os mananciais são rios, barragens e poços (artesianos ou amazonas). Dos mananciais o abastecimento segue por gravidade ou recalque para as ETA. Quando se utiliza poços artesianos como manancial para o abastecimento de um sistema existe a possibilidade do tratamento ser realizado apenas com adição do cloro. Podemos verificar essa prática no sistema reservatório R6 – João Pessoa.

Tem-se percebido que a maioria dos problemas dos sistemas de abastecimentos visitados está nos sistemas de bombeamento e adutoras, já que normalmente os mananciais possuem uma boa capacidade de reservação, além de conseguir manter um bom nível na qualidade do fornecimento no período de estiagem. Segue uma relação de alguns mananciais com suas respectivas capacidades de reservação (Quadro 3).

Quadro 3- Capacidade dos Mananciais

MANANCIAL	LOCALIZAÇÃO	CAPACIDADE
Açude Cachoeira	Itaporanga	1.600.000 m <sup>3</sup>
Barragem São Salvador	Sapé	12.000.000 m <sup>3</sup>
Açude Coremas	Coremas – Piáncó	1.300.000.000 m <sup>3</sup>

## MOTORES E ACIONAMENTOS

Os cuidados na escolha da potência dos motores elétricos têm grande importância, pois influencia diretamente nos gastos da instalação, já que o custo do motor está diretamente ligado a sua potência. O emprego de motores com potência inadequada podem perturbar o funcionamento da máquina acionada, diminuir seu rendimento, aumentar as despesas de instalação, etc. Em geral a correta seleção do motor elétrico é sempre uma excelente forma de reduzir custos operacionais.

A potência dos motores variam bastante em função da vazão requerida do sistema e da altura manométrica das adutoras. Normalmente trabalham em conjunto (dois motores), sendo um reserva do outro.

Os motores envolvidos nos sistemas em análises possuem varias formas de acionamento, dependendo de suas características e da disponibilidade das instalações, uma vez que alguns sistemas se encontram em locais de extrema dificuldade de acesso, dificultando a utilização de acionamentos mais adequados.

O tipo de acionamento dos motores mais utilizados nos sistemas é chave compensadora (Figura 12), porém, têm-se também sistemas operando com acionamento por partida direta (sistemas de menor porte é que trabalham vinte e quatro horas). Alguns sistemas possuem banco de capacitores para a correção do fator de potência e eliminação da cobrança de excedente reativo, como é o caso do sistema de captação Açude Coremas - Piáncó.



Figura 12 – Quadro de comando do sistema de bombeamento de Mamanguape

A seguir segue uma planilha com os principais dados de alguns sistemas visitados. Maiores detalhes de cada sistema podem ser encontrados nos produtos entregues a CAGEPA - “Diagnóstico de 40 Sistemas da CAGEPA” e “Termos de Referência para contratação de serviços referentes à medição de grandezas hidráulicas e elétricas de 38 sistemas de bombeamento e 1 um de reservação da CAGEPA”.

Quadro 3 - Dados de 6 sistemas avaliados da CAGEPA

SISTEMA	Tipo	Motores	Acionamento	Alimentação elétrica	Medição de Grandezas Elétrica	Medição de Vazão
Marés – João Pessoa	Água Tratada	2 x 750 cv	Chave Compensadora	Medía tensão 2160V	Analógica no quadro.	Possui TAP
Mumbaba – João Pessoa	Água Bruta	2 x 400 cv 2 x 125 cv	Conversor de frequência e chave compensadora.	Primária 13,8 kVA Secundária 380V	Analógica no quadro.	Possui TAP
Usina I – João Pessoa	Esgoto	2 x 175 cv	Chave compensadora	Primária 13,8 kVA Secundária 380V	Analógica no quadro.	Possui TAP
Pedro Bandeira – Guarabira	Água Tratada	4 x 50 cv	Chave Compensadora		Analógica no quadro.	Medidores eletromagnéticos
ETA – Sape	Água Tratada	2 x 200 cv 2 x 250 cv 2 x 30 cv 2 x 40 cv	Chave Compensadora	Primária 13,8 kVA Secundária 380V	Analógica no quadro.	Medidores eletromagnéticos e proporcionais.
Barragem Jacaraú – Jacarau	Água Bruta	2 x 75 cv	Chave compensadora	Primária 112,5kVA Secundária 380V	Analógica no quadro.	Possui TAP
ETA Solânea – Solânea	Água Tratada	1 x 30 cv	Chave compensadora	Primária 13,8 kVA Secundária 380V	Analógica no quadro.	Possui TAP e medidores proporcionais

## RESULTADOS

Com base nos resultados obtidos no diagnóstico foi sugerida a elaboração de projetos de eficiência energética para 18 sistemas de distribuição de água, que podem englobar um único ou vários sub-sistemas citados no diagnóstico. Os tipos de Projetos de Eficiência Energética indicados são três: projetos para otimização de sistemas de bombeamento, projetos de modulação de carga que deslocam ou reduzem a demanda do horário da ponta e outros (inovação tecnológica). São eles:

- Sistema de Abastecimento de Água de Santa Rita
- Sistema de Abastecimento de Água de Itabaiana
- Estação Elevatória do Sítio Mumbaba - João Pessoa
- Reservatório R7 - João Pessoa
- Reservatório R9 - João Pessoa
- Reservatório R21 - João Pessoa
- Sistema de Abastecimento de Água de Mamanguape
- Estação Elevatória de Bodocongó (EE3) - Campina Grande
- Estação Elevatória de Cuitegi
- Estação Elevatória de Guarabira
- Estação Elevatória de Jacaraú
- Estação Elevatória da ETA de Sapé
- Estação Elevatória do Açude Coremas - Piancó
- Estação Elevatória do Rio Piranhas - Pombal
- Sistema Gramame - João Pessoa
- Estação Elevatória do Açude Boqueirão do Cais - Cuité
- Estação Elevatória do Sítio Horodongo - Catolé do Rocha
- Sistema Marés - João Pessoa

Como resultado da avaliação do diagnóstico preliminar, determinou-se que o diagnóstico completo obrigatoriamente deveria conter o layout das instalações do sistema, além de informações referentes à capacidade do manancial, tipo de captação empregada no sistema, estação elevatória de água, características da adutora (diâmetro, material, comprimento, altura manométrica), quantidade e capacidade de reservatórios elevados e apoiados, rede de distribuição (material, diâmetros, etc.), quantidade de

motores em funcionamento e suas características reais (potência nominal, vazão, altura manométrica, rotação, manobras realizados durante a operação), etc. Estes dados devem ser reais, logo verificou-se que é imprescindível que os dados sejam levantados em campo.

As medições das grandezas hidráulicas e elétricas de cada sistema devem englobar:

1. Medições simultâneas de vazão e pressão na entrada e saída das bombas, parâmetros elétricos dos motores elétricos, e rotação dos conjuntos, de no mínimo quatro pontos de operação (incluindo shut-off e o registro totalmente aberto), para cada conjunto moto-bomba (CMB) individualmente, a fim de ser possível a obtenção das curvas características das bombas. Estas medições devem ser repetidas três vezes, objetivando sempre os mesmos pontos de operação, para a obtenção da média em cada ponto.

2. Medições simultâneas de vazão e pressão na entrada e saída das bombas, parâmetros elétricos dos motores elétricos, e rotação dos conjuntos, de no mínimo quatro pontos de operação (incluindo shut-off e o registro totalmente aberto), para as diversas combinações de CMB (por exemplo: CMB 1, CMB 2, CMB 3, CMB 1 + CMB 2, CMB 2 + CMB 3, CMB 1 + CMB 3, CMB 1 + CMB 2 + CMB 3), considerando o número máximo de bombas operando paralelamente. Estas medições devem ser repetidas 3 (três) vezes, objetivando sempre os mesmos pontos de operação, para a obtenção da média em cada ponto.

3. Levantamento do coeficiente de perda de carga (energia) localizada de peças especiais em função da velocidade, que também servirão para futuras correções nos cálculos da(s) curva(s) característica(s) da(s) bomba(s) e do(s) coeficiente(s) de perda de carga das adutoras.

4. Medições simultâneas de vazão, pressão e dos parâmetros elétricos, com os dados sendo coletados com intervalos entre as medidas inferiores a 15 (quinze) minutos. Os equipamentos utilizados devem possuir meios eletrônicos para armazenamento dos dados. A duração das medições é de no mínimo 30 (trinta) dias contínuos. Estas medições devem ser realizadas com o sistema operando normalmente. As medições são:

- a) Medições de pressão na entrada e saída das bombas.
- b) Medições de pressão no início e final das adutoras, a fim de que seja possível o levantamento do coeficiente de perda de carga (energia) - coeficiente C de Hazen-Williams - destas.
- c) Medições de vazão em cada trecho do sistema, de preferência na saída das bombas.
- d) Medição de nível dos reservatórios (apoiado e elevado) e dos poços de sucção.
- e) Medições de parâmetros elétricos na alimentação de entrada dos motores elétricos - tensão, corrente, potência ativa, potência reativa, potência aparente, fator de potência. O número de pontos de medições simultâneas dos parâmetros elétricos é igual ao número máximo de motores em operação simultaneamente.
- f) Medições de parâmetros elétricos na saída das subestações - tensão, corrente, potência ativa, potência reativa, potência aparente, fator de potência. Quando houver um transformador exclusivo para um conjunto moto-bomba, será exigida apenas uma medição dos parâmetros elétricos.

Para cada sistema foi determinado seus principais elementos e os pontos de medição de vazão e pressão que devem ser contemplados na elaboração de projetos de eficiência energética. Para exemplificar, a Figura 13, Figura 14 e Figura 15 apresentam o desenho esquemático do sistema de abastecimento de água de Santa Rita, do Reservatório R9 (João Pessoa) e Marés (João Pessoa), respectivamente, com os pontos de medição de vazão e pressão que devem ser implantados.

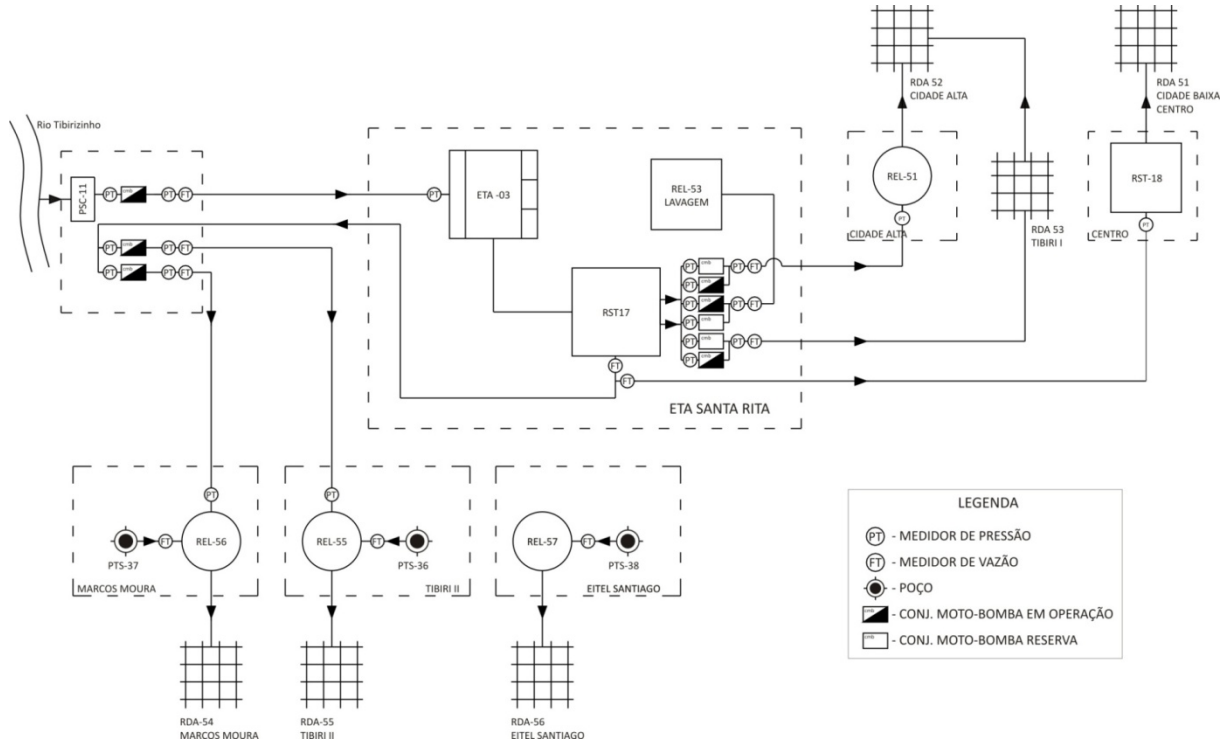


Figura 13 - Sistema de abastecimento de água de Santa Rita

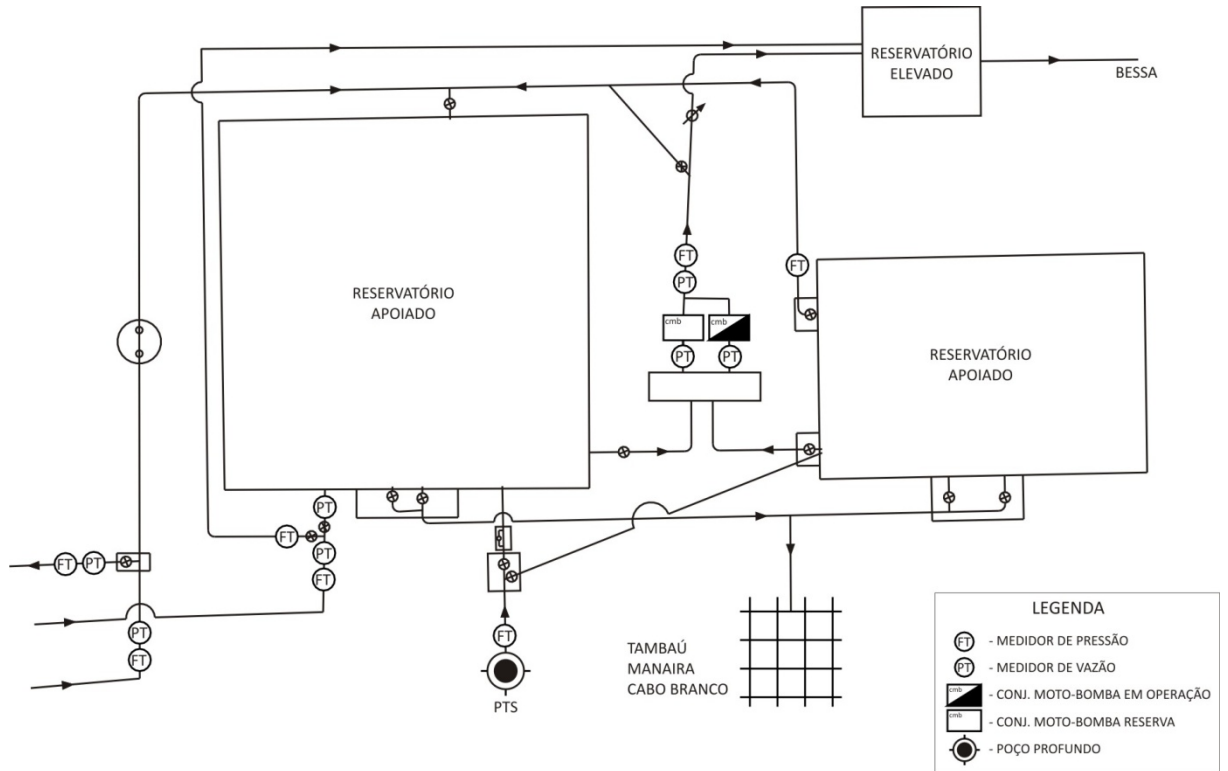


Figura 14 - Reservatório R9 - João Pessoa

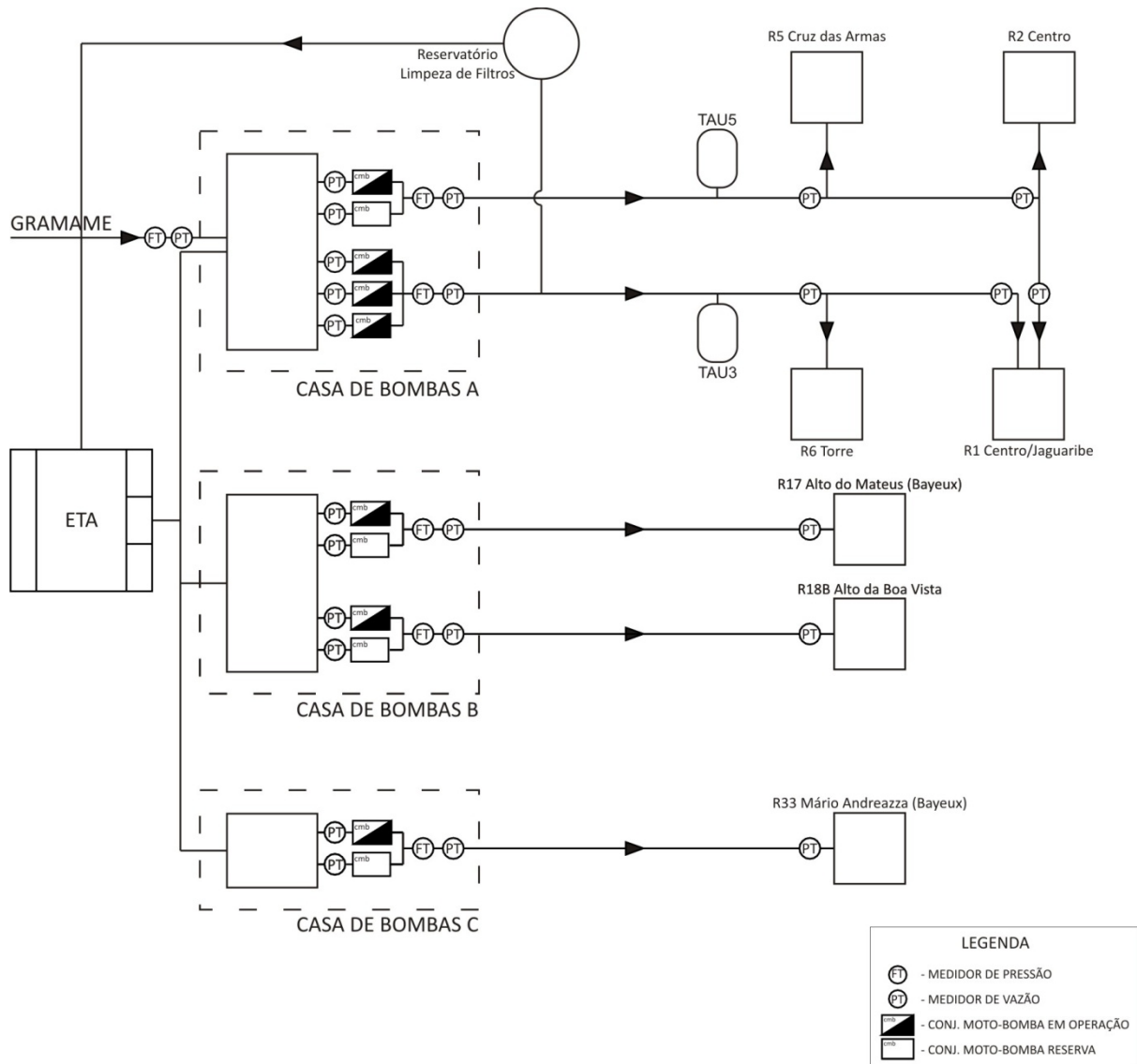


Figura 15 - Sistema Marés - João Pessoa

O Quadro 4 apresenta o resumo da quantidade de medições, descritas de maneira geral anteriormente, que devem ser realizadas em cada um dos 18 sistemas definidos, a fim de fornecer subsídios para a avaliação individual e conjunta dos conjuntos motor-bomba. O Quadro 5 apresenta o número de pontos de medições contínuas para cada sistema.

Quadro 4 - Quantidade de medições, descritas de maneira geral nos Itens 3.4.1 e 3.4.2, para cada sistema

	SISTEMA	Combinações		
		Medição individual	Dois conjuntos simultaneamente	Três conjuntos simultaneamente
01	Sistema de Abastecimento de Água de Santa Rita	09	-	-
02	Sistema de Abastecimento de Água de Itabaiana	03	-	-
03	Estação Elevatória do Sítio Mumbaba - João Pessoa	02	-	-
04	Reservatório R7 - João Pessoa	05	04	01
05	Reservatório R9 - João Pessoa	02	-	-

06	Reservatório R21 - João Pessoa	01	-	-
07	Sistema de Abastecimento de Água de Mamanguape	07	03	-
08	Estação Elevatória de Bodocongó (EE3) - Campina Grande	08	03	01
09	Estação Elevatória de Cuitegi	07	-	-
10	Estação Elevatória de Guarabira	04	-	-
11	Estação Elevatória de Jacaraú	02	-	-
12	Estação Elevatória da ETA de Sapé	08	-	-
13	Estação Elevatória do Açude Coremas - Piancó	02	-	-
14	Estação Elevatória do Rio Piranhas - Pombal	02	-	-
15	Estação Elevatória de Gramame - João Pessoa	04	-	-
16	Estação Elevatória do Açude Boqueirão do Cais - Cuité	01	-	-
17	Estação Elevatória do Sítio Horodongo - Catolé do Rocha	02	-	-
18	Sistema Marés - João Pessoa	11	03	01

Quadro 5 - Número de pontos de medições contínuas, descritas de maneira geral no Item 3.4.4, para cada sistema

	<b>SISTEMA</b>	<b>Vazão</b>	<b>Pressão</b>	<b>Nível do reservatório/ poço</b>	<b>Parâmetros elétricos nos motores</b>	<b>Parâmetros elétricos na saída da subestação</b>
01	Sistema de Abastecimento de Água de Santa Rita	10	20	07	08	02
02	Sistema de Abastecimento de Água de Itabaiana	02	07	01	02	01
03	Estação Elevatória do Sítio Mumbaba - João Pessoa	01	04	01	01	01
04	Reservatório R7 - João Pessoa	02	07	03	05	02
05	Reservatório R9 - João Pessoa	07	07	03	02	02
06	Reservatório R21 - João Pessoa	02	02	02	01	01
07	Sistema de Abastecimento de Água de Mamanguape	04	13	03	07	02
08	Estação Elevatória de Bodocongó (EE3) - Campina Grande	03	14	03	05	01
09	Estação Elevatória de Cuitegi	04	15	01	04	02
10	Estação Elevatória de Guarabira	02	08	01	02	01
11	Estação Elevatória de Jacaraú	01	04	01	01	-
12	Estação Elevatória da ETA de Sapé	04	14	01	04	01
13	Estação Elevatória do Açude Coremas - Piancó	01	04	01	01	01
14	Estação Elevatória do Rio Piranhas - Pombal	01	02	01	01	-
15	Estação Elevatória de Gramame - João Pessoa	01	02	01	01	-
16	Estação Elevatória do Açude Boqueirão do Cais - Cuité	01	03	01	01	01
17	Estação Elevatória do Sítio Horodongo - Catolé do Rocha	01	04	01	01	01
18	Sistema Marés - João Pessoa	06	25	03	06	10

## CONCLUSÃO

Após a visita nos sistemas relacionados fica clara a necessidade de reformulação em alguns sistemas de abastecimento da CAGEPA. Todos os melhoramentos devem ser acompanhados de estruturas que possibilitem a implantação de futuros sistemas automatizados. É evidente que todas essas mudanças têm um custo elevado e não há a possibilidade de serem implantadas de forma rápida, mas é um caminho que todas as indústrias buscam, o caminho da eficientização e automação dos processos, e não é diferente nas empresas de saneamento de água (“indústria da água”).

Apesar das limitações financeiras que muitas companhias possuem, deve-se ter em mente que os projetos de eficiência energética e hidráulica dos sistemas de distribuição de água podem resultar em economias da ordem de milhões de reais por ano. Fato já comprovado, por exemplo, em estudos realizados pelo LENHS UFPB em dois sistemas de distribuição de água de uma companhia de saneamento nordestina.

Além disso, deve-se priorizar o aperfeiçoamento do setor de manutenção, uma vez que essa é a área de que mais conhece a empresa no que concerne as condições de integridade, dimensionamento e confiabilidade dos equipamentos, falhas de projeto, qualidade de materiais e, principalmente, inconveniências técnicas de procedimentos operacionais. Portanto não há como se perenizar uma cultura evolutiva na busca da eficiência se a manutenção não for mobilizada e envolvida com todas as questões que interferem na eficiência do sistema. Logo sua atuação deve ser consolidada e incorporada as práticas de gestão da empresa.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos técnicos da Companhia de Água e Esgotos da Paraíba - CAGEPA que foram imprescindíveis para a realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE FILHO, L.S. 2009. Bombas e estações elevatórias. In: Heber Pimentel Gomes. (Org). Sistemas de Bombeamento – Eficiência Energética. João Pessoa. Editora Universitária, 2009. P 45 a 112.

BEZERRA, S.T.M. 2009. Sistema Fuzzy para o controle do plano piezométrico de sistemas de distribuição de água visando a economia da água e energia. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Paraíba

GOMES, H.P. 2009. Sistemas de Bombeamento – Eficiência Energética. João Pessoa, Editora Universitária/ UFPB.

WIENDL, W. G. 1997. Análise do funcionamento prolongado de medidores proporcionais. João Pessoa: CAGEPA - Companhia de Água e Esgotos da Paraíba.





---

## 4 Sistema de apoio à decisão aplicado ao setor de abastecimento de água de João Pessoa – Paraíba

---

Roberta Macêdo M. Gouveia, Heber Pimentel Gomes e Moisés Menezes Salvino  
Universidade Federal da Paraíba – UFPB – João Pessoa – Brasil

### INTRODUÇÃO

A necessidade de desenvolver sistemas para dar suporte às decisões gerenciais é uma realidade cada vez mais comum nas empresas. As soluções que visam o eficiente planejamento, controle e gestão dos processos de apoio à decisão e descobertas de conhecimento nos Bancos de Dados (BD) estão em foco, e com isto, vem sendo desenvolvidas e aperfeiçoadas as tecnologias de *Data Mining* (DM). Os algoritmos, técnicas e aplicações de mineração de dados consistem em descobrir e analisar novos conhecimentos e padrões de comportamento dos dados armazenados em um BD. Portanto, a gestão aleatória baseada na intuição agora dá lugar à inteligência de negócio (*Business Intelligence – BI*).

Este trabalho apresenta uma experiência do processo de descoberta do conhecimento em banco de dados, também conhecido com *Knowledge Discovery in Databases* (KDD), a fim de observar a viabilidade e aplicabilidade de um estudo de caso real de apoio à decisão. O trabalho está organizado sob a forma de uma pesquisa bibliográfica; da criação e implementação de um *Data Warehouse* (DW) Departamental, i.e., um ambiente cuja finalidade é extrair, integrar, limpar e dar consistência aos dados provenientes dos sistemas transacionais de uma determinada empresa; e da aplicação de técnicas e algoritmos de DM para descoberta de novos conhecimentos e padrões nos dados. A idéia fundamental consiste em coletar os dados transacionais, reduzi-los ao escopo de um problema, organizá-los no repositório de dados do tipo DW, e finalmente aplicar os algoritmos de DM.

Os serviços de abastecimento de água para uso da população constituem um dos principais indicadores da qualidade de vida da humanidade, o trabalho direciona-se em obter resultados que proporcionem aos gestores um melhor entendimento do comportamento e perfil da companhia. Portanto, os objetivos são: implementação de um DW Departamental referente ao setor comercial da companhia de abastecimento de água e execução de algoritmos de DM sobre este DW visando à geração de um sistema de apoio à decisão para detecção e conseqüente minimização das perdas de água e de faturamento, que também são conhecidas como Perdas Aparentes no sistema de abastecimento urbano de água.

### DESENVOLVIMENTO

Após anos de pesquisas concentradas no armazenamento, atualização e extração eficiente dos dados, o problema agora passa a ser o aproveitamento deste precioso recurso. De acordo com (LAROSE, 2005), o processo de tomada de decisão com auxílio de computadores iniciou na década de 70 por meio dos *Executive Information Systems* (EIS). Na fase atual, os processos de tomada de decisão são totalmente informatizados e o gestor define os atributos mais importantes ao processo decisório, recebendo subsídios e informações processadas pelos Sistemas de Apoio à Decisão (SAD), ou *Decision Support Systems* (DSS). Os SAD proporcionam uma avaliação crítica das informações dos negócios, auxiliando a gerência a definir tendências, apontar problemas e absorver decisões inteligentes.

O KDD foi proposto para determinar as etapas que produzem conhecimentos a partir dos dados e, principalmente, definir a etapa de DM, que é a fase que transforma dados em conhecimento (FAYYAD, et al., 1996). O processo de KDD envolve três etapas iniciais: seleção, (pré) processamento e transformação, as quais compõem a preparação dos dados. Em seguida vem a fase de DM, considerada essencial ao processo e foco principal deste trabalho. Por fim, o conhecimento gerado é analisado e assimilado, por meio da etapa de análise e interpretação dos resultados, que se encontra no topo do processo. Cada fase da execução do processo KDD possui uma interseção com as demais. Deste modo, os resultados produzidos em uma fase podem ser utilizados para melhorar os resultados das próximas fases. Este cenário revela um processo iterativo, que busca sempre aprimorar os resultados a cada iteração.

De acordo com (INMON, 2005), o DW surgiu por duas razões principais: primeiro, pela necessidade de fornecer uma origem de dados única, limpa e consistente para fins de apoio à decisão; segundo, pela necessidade de fazê-lo sem causar impacto sobre os sistemas transacionais.

O DM possui três etapas, conforme apresenta (BATISTA, 2003). A primeira etapa corresponde à escolha das tarefas de DM a serem utilizadas, dentre elas tem-se a tarefa de: classificação, regressão, associação e *clustering*. A segunda etapa corresponde à escolha dos algoritmos de DM a serem executados, dentre eles tem-se: *Apriori*, *J4.8*, *ID-3*, *NaiveBayes*, *OneR* etc. A terceira e última etapa é a aplicação do DM aos dados obtidos do DW e dos quais se pretende encontrar novos conhecimentos e padrões.

Existem duas metas que podem ser alcançadas com a aplicação do DM (FAYYAD, et al., 1996), são elas: Previsão e Descrição. A previsão consiste em antecipar os valores de variáveis desconhecidas ou analisar um possível valor para uma variável com o passar do tempo, utilizando algumas variáveis, como atributos da base de dados. Logo, indica as chances de uma ação ocorrer. Já a descrição consiste em procurar por padrões que descrevem os dados e que sejam de entendimento dos analistas. Deste modo, a mineração preditiva consiste na generalização de exemplos ou experiências passadas com respostas conhecidas ou regras de negócio estabelecidas por especialistas. Enquanto que a mineração descritiva consiste na identificação de comportamentos intrínsecos do conjunto de dados, sendo que estes dados não possuem uma classe especificada.

O DM compreende dois tipos de aprendizados indutivos: supervisionado e não-supervisionado. O aprendizado supervisionado é direcionado a tomada de decisão e é através dele onde se realiza inferências nos dados com o intuito de realizar previsões, envolvendo o uso dos atributos para prever o valor futuro. Enquanto que no aprendizado não-supervisionado as atividades são descritivas, o que permite a descoberta de padrões e novos conhecimentos.

O aprendizado supervisionado serve para identificar a classe a que pertence uma nova amostra de dados. Neste tipo de aprendizado é sempre conhecida a classe dos dados que são usados para treino e há um histórico de dados que permite prever sobre dados futuros.

No aprendizado não-supervisionado o rótulo da classe de cada amostra de treino não é conhecido e o número de classes a ser treinada pode não ser conhecido a priori. O objetivo é construir um modelo que procura por regularidades, formando agrupamentos ou *clusters* com características similares. O aprendizado não-supervisionado utiliza-se de algoritmos descritivos. As atividades descritivas trabalham com conjuntos de dados que não possuem uma classe determinada e têm o objetivo de identificar padrões de comportamento semelhantes nestes dados. As tarefas descritivas podem ser divididas em: Associação, Segmentação e Generalização.

A tarefa de DM aplicada ao estudo de caso deste trabalho foi a Classificação. Esta tarefa realiza atividade preditiva e corresponde ao aprendizado indutivo supervisionado.

## **ESTUDO DE CASO**

O primeiro passo no processo de DM é a identificação da fonte de dado. O próximo passo é a limpeza (ou *cleaning*), ou seja, a preparação dos dados. O principal desafio da limpeza é formatar os dados de forma compatível com a representação do software utilizado para mineração.

O terceiro passo é construção dos modelos de mineração, onde neste trabalho foram definidos dois modelos, que serão discutidos adiante. O quarto passo no processo iterativo de DM é a avaliação dos modelos criados, que consiste em estimar a precisão do modelo e refinar sua compreensão e sua utilidade. Por último surge o desdobramento dos modelos, que serve para aplicá-los a novos dados, a fim de dar lugar ao surgimento de novas perguntas, trazendo um refinamento adicional às descobertas.

Ao final do processo de DM seguem as ações para a etapa de pós-processamento, que são: Interpretação dos Padrões e Consolidação do Conhecimento. A primeira etapa de pós-processamento é avaliação e interpretação dos padrões encontrados, a fim de determinar aqueles que terão alguma utilidade e gerarão algum conhecimento. Nesta etapa, pode ocorrer a necessidade de retorno a umas das etapas anteriores. A segunda etapa de pós-processamento é a verificação e utilização do novo conhecimento sobre os dados através das ferramentas de visualização, assim como a produção da documentação para auxiliar a compreensão do usuário, que normalmente é o gestor ou administrador da empresa.

A Companhia de Água e Esgoto da Paraíba (CAGEPA/PB) foi escolhida para aplicação das tecnologias de DW e DM visando à detecção de perdas aparentes (que são as perdas de água, de

faturamento, as irregularidades e anormalidades da rede de distribuição de água) proposta por este trabalho. Ela é responsável pelo abastecimento de água e coleta de esgotos em 185 dos 223 municípios paraibanos.

O bairro de Miramar (setor 64 da localidade 001) da cidade de João Pessoa-PB foi selecionado como estudo de caso apresentado neste trabalho. Um dos motivos que levou ao estudo desta área foi que ela contempla as distintas realidades sociais: habitações populares; classe alta, classe média, além de possuir diversos tipos de estabelecimentos (comercial, industrial, público, praças, terrenos etc.). A maioria dos consumidores desta região é de classe média alta e a minoria é de classe baixa. Outra razão para a escolha foi à condescendência por parte da gerência da companhia em disponibilizar tais dados.

Este trabalho nasceu da necessidade de investigar se as perdas aparentes estavam distribuídas proporcionalmente pelo setor selecionado para o estudo de caso ou se elas estavam concentradas em áreas específicas, como exemplo, em áreas com níveis sociais similares. Além disso, tem como objetivo realizar uma avaliação através da análise do perfil do consumidor e do imóvel de acordo com a categoria de consumo, situação da água e esgoto, avaliando os consumos e valores medidos e faturados por mês, durante um período de um ano, entre 2007 e 2008.

## METODOLOGIA

Inicialmente foi criado um BD com os dados extraídos da companhia de abastecimento de água, onde todos os atributos e instâncias foram inseridos em uma única tabela. Em seguida, foi projetado e desenvolvido o ambiente de DW utilizando a modelagem dimensional do esquema Constelação de Fatos, que por sua vez foi útil e essencial para a seleção otimizada dos dados a serem minerados.

Antes de iniciar o processo de DM, a extração dos dados no DW foi realizada. Nesta etapa de carga dos dados (*loading*), antes de iniciar a execução dos algoritmos de mineração propriamente dita, o software de mineração WEKA foi selecionado por ser *open source* e se adequar às necessidades do trabalho. O WEKA é um conjunto de produtos para DM com funcionalidades para realizar classificação, associação, descoberta de sucessões, série temporais, agrupamento e regressão. Ele permite configurar os dados através de várias funções de filtragens, dentre elas, normalizações, adições, compartilhamentos, junções, eliminações, conversões de tipos e formatos, funções estatísticas etc. Contudo, os filtros não precisaram ser utilizados, afinal os dados já se encontravam íntegros e preparados pelo DW, de modo que estavam prontos para serem minerados pelo software WEKA.

Das várias tarefas de DM definidas na literatura, duas delas se mostraram adequadas aos resultados a que se pretendia chegar neste trabalho de detecção de perdas aparentes. As tarefas aplicadas foram: Classificação por Árvore de Decisão e Classificação Bayesiana, ambas do aprendizado indutivo supervisionado. Os algoritmos utilizados na Classificação dos dados fornecidos pela companhia de abastecimento de água foram: *J4.8* e *NaiveBayes*.

A matriz de confusão faz parte dos algoritmos classificadores (Tarefa de Classificação) do DM. A matriz oferece meios efetivos para a avaliação do modelo com base em cada classe. Cada elemento da matriz mostra o número de exemplos para os quais a classe verdadeira é a linha e a classe predita é a coluna. A diagonal principal da matriz (elementos  $(i,i)$ , onde  $i = j$ ) representa os acertos do modelo, enquanto os demais elementos representam os erros, discriminados para cada classe.

A Tabela 1 apresenta um exemplo da Matriz de Confusão para um problema com duas classes, denominadas Adimplente (classe positiva) e Inadimplente (classe negativa). Existem quatro possibilidades de acertos e de erros do classificador, são eles: VP, FN, VN e FP.

Tabela 1. Matriz de Confusão para a classificação com duas classes

		Preditiva		Erros
		Adimplente	Inadimplente	
Verdadeira	Adimplente	278 (VP)	3 (FN)	Acertos
	Inadimplente	15 (FP)	4 (VN)	

Verdadeiros positivos (VP) ocorrem quando os exemplos pertencem à classe Adimplente e foram preditos como pertencentes a essa mesma classe. Falsos negativos (FN) ocorrem quando os exemplos

pertencem à classe Adimplente e foram preditos como pertencentes à classe Inadimplente. Verdadeiros negativos (VN) ocorrem quando os exemplos pertencem à classe Inadimplente e foram preditos como pertencentes a essa mesma classe. Falsos positivos (FP) ocorrem quando os exemplos pertencem à classe Inadimplente e foram preditos como pertencentes à classe Adimplente.

A Taxa de Erro  $((FP + FN)/(VP + FN + FP + VN)) \times 100$  e a Taxa de Acurácia  $(1 - \text{Taxa de Erro})$  são medidas de avaliação mais utilizadas para os modelos de classificação. A taxa de erro é a proporção de erros de predição sobre um conjunto de exemplos em que se conhece o valor do atributo meta. A acurácia e a taxa de erro são estimativas do percentual de acertos e de erros do classificador, respectivamente, na predição da classe de novos exemplos (WITTEN, et al., 2005; HAN, et al., 2006).

No exemplo da Tabela 1 existem 300 instâncias a serem mineradas. As instâncias classificadas corretamente foram VP (278 instâncias) e VN (4 instâncias), totalizando 282 instâncias (278 + 4). As instâncias classificadas incorretamente foram FP (15 instâncias) e FN (3 instâncias), totalizando 18 instâncias (15 + 3). Portanto, a Taxa de Erro corresponde a  $(18/300) \times 100 = 6\%$  e a Taxa de Acurácia corresponde a  $(282/300) \times 100 = 94\%$ .

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Visando identificar com mais precisão o perfil do consumidor, o perfil dos imóveis e as abordagens referentes às perdas aparentes pertencentes ao setor 64 no que diz respeito às características envolvidas no serviço prestado pela companhia de abastecimento de água e esgoto da Paraíba foram desenvolvidos dois modelos de DM. São eles: Modelo do Perfil do Setor e o Modelo das Perdas Aparentes.

### Modelo de Data Mining Perfil do Setor

Os atributos dimensionais do DW requeridos como entrada nos algoritmos de DM para geração e diagnóstico deste primeiro modelo foram: matrícula do consumidor, quadra, situação da ligação de água, situação da ligação do esgoto, categoria de consumo, subcategoria de consumo, inadimplência do consumidor e referência de consumo por semestre.

Antes de apresentar os resultados da execução dos algoritmos de DM, o software WEKA nos possibilita realizar uma análise prévia dos dados e obter informações relevantes para o apoio à decisão. A pré-mineração dos dados contribuiu para a geração e descoberta de informações do setor 64, dando-nos uma visão do perfil e peculiaridades do setor 64. A representação gráfica de cada atributo associado ao atributo inadimplência encontra-se destacado em vermelho na Figura 1.

O gráfico (E) relaciona a quantidade de inadimplência com as subcategorias do setor, sendo a subcategoria “favela” a que possui maior quantidade de consumidores inadimplentes (240), seguido pela subcategoria casa, com 36 inadimplências. A informação obtida do Gráfico (F) é a quantidade total de inadimplência do setor, isto é, 324 inadimplências detectadas no período de um ano.

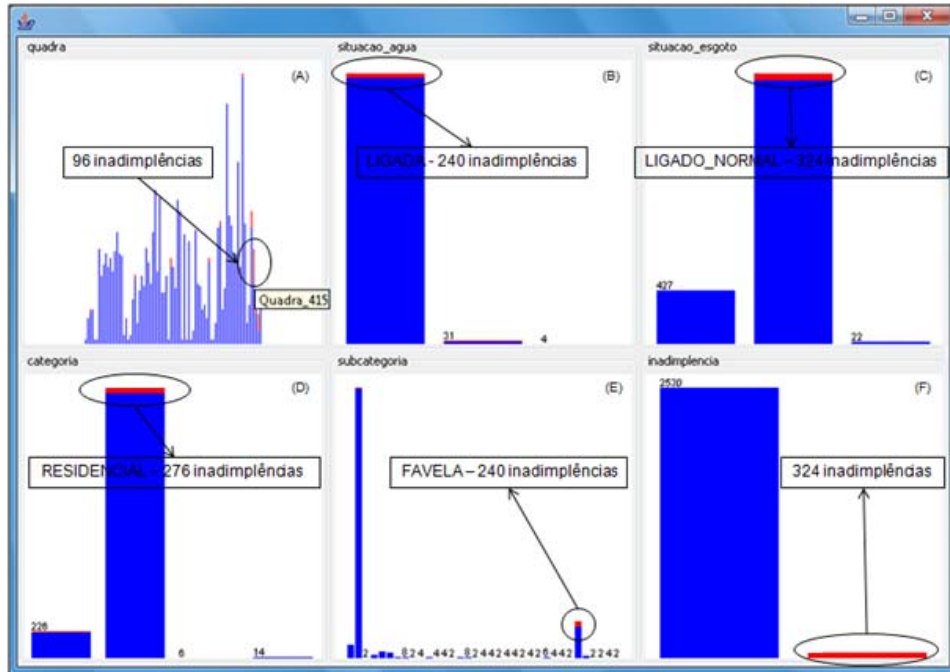


Figura 1. Pré-mineração dos dados: visão geral do perfil do setor 64 da cidade de João Pessoa quanto à inadimplência

Ao executar o algoritmo J4.8 com os dados do modelo Perfil do Setor, o software WEKA gerou as informações da mineração. Ao todo foram utilizadas 2.583 instâncias de treinamento para a classificação, sendo 2.533 instâncias classificadas corretamente (taxa de acurácia 98,06 %) e 50 classificadas incorretamente (taxa de erro 1,94%). O tempo de processamento foi de 0.07 segundos. Cada caminho do nó raiz até o nó folha corresponde a uma regra e conseqüentemente a uma descoberta de conhecimento no DW. A Matriz de Confusão produzida pelo algoritmo classificador J4.8 mostra que das 2.527 instâncias classificadas como Adimplência, 48 foram classificadas incorretamente. E das 6 instâncias classificadas como Inadimplência duas delas foram classificadas incorretamente.

Na execução do algoritmo *NaiveBayes* com os dados do modelo Perfil do Setor foram utilizadas 2.583 instâncias de treinamento para a classificação, sendo 2.533 instâncias classificadas corretamente (taxa de acurácia de 98,06%) e 50 classificadas incorretamente (taxa de erro de 1,94%). O tempo de processamento foi de 0.02 segundos. A Matriz de Confusão produzida pelo algoritmo classificador *NaiveBayes* mostra que das 2.523 instâncias classificadas como Adimplência, 44 delas foram classificadas incorretamente. E das 10 instâncias classificadas como Inadimplência, 6 foram classificadas incorretamente.

### Modelo de Data Mining Perdas Aparentes

Os atributos e instâncias para identificação das perdas aparentes foram extraídos do ambiente de DW. Na Figura 2 estão representados alguns dos atributos do modelo Perdas Aparentes.

Os atributos foram: matrícula do consumidor, quadra, anormalidade, capacidade do hidrômetro em m<sup>3</sup>, tipo do hidrômetro, ano de fabricação do hidrômetro, inadimplência do consumidor, referência de consumo por semestre, médias de consumo de água, médias dos valores da conta de água, consumo baseado na estrutura tarifária, indicador de medidor, instalação do hidrômetro e decisão de substituição do hidrômetro.



Figura 2. Pré-mineração dos dados: modelo perdas aparentes associados ao atributo decisão

O atributo “decisão” possui três valores possíveis: “desfavorável\_a\_troca” (cor azul), “favorável\_a\_troca” (cor vermelha) e “análise\_mais\_detalhada” (cor verde). Das 3.523 instâncias, 3.141 são classificadas como “desfavorável\_a\_troca” do hidrômetro, 306 classificadas como “análise\_mais\_detalhada” do hidrômetro e 76 “favorável\_a\_troca” do hidrômetro. O gráfico (B) da Figura 2 ilustra as 24 anomalias presentes no setor 64 e mostra que a maioria das instâncias do modelo (2.448) não possui anomalias. O tipo de anomalia mais encontrada no setor é “imóvel\_ou\_portão\_fechado”, com 420 instâncias. Este tipo de anomalia impossibilita o leitorista a obter a carreta medição de consumo de água. Os gráficos (C), (D), (E) e (F) correspondem, respectivamente, aos atributos capacidade do hidrômetro, tipo do hidrômetro, ano de fabricação do hidrômetro e data de instalação do hidrômetro.

Para execução do algoritmo J4.8 com os dados do modelo Perdas Aparentes foram utilizadas 3.523 instâncias de treinamento para a classificação, sendo 3.136 instâncias classificadas corretamente (taxa de acurácia 89,02%), 387 classificadas incorretamente (taxa de erro 10,99%). O tempo de processamento foi de 0,06 segundos. A Matriz de Confusão produzida pelo algoritmo classificador J4.8 mostra que 3.121 instâncias foram classificadas corretamente como Desfavoravel\_a\_Troca e 366 foram classificadas incorretamente como Desfavoravel\_a\_Troca. Quanto ao tipo Favoravel\_a\_Troca, nenhuma instância foi classificada corretamente e 3 foram classificadas incorretamente. E para o tipo Analise\_mais\_detalhada, 15 instâncias foram classificadas corretamente e 18 classificadas incorretamente.

A navegação pela árvore de decisão gerada pela execução do algoritmo J4.8 determina as regras de classificação descobertas. A interpretação da toda a árvore de decisão determina todos os padrões descobertos da base de dados. Dentre eles, tem-se que os hidrômetros (medidores de água) com ano de fabricação entre 1999\_a\_2003 e 2004\_a\_2008 estão medindo o consumo de água corretamente e não há anomalias, nem indícios de irregularidades e fraudes por parte desses consumidores. Já os

hidrômetros com ano de fabricação entre 1994\_a\_1998 precisam de uma análise mais detalhada, visto que as perdas aparentes podem ser encontradas nos consumidores com este perfil.

A execução do algoritmo *NaiveBayes* sobre os dados do modelo Perdas Aparentes informa que das 3.523 instâncias de treinamento para a classificação, 3.131 instâncias foram classificadas corretamente (taxa de acurácia de 88,87%) e 392 classificadas incorretamente (taxa de erro de 11,13%). O tempo de processamento do algoritmo foi de 0.01 s. A Matriz de Confusão produzida pelo algoritmo classificador *NaiveBayes* mostra que 3.129 instâncias foram classificadas corretamente como *Desfavoravel\_a\_Troca* e 380 foram classificadas incorretamente. Quanto ao tipo *Favoravel\_a\_Troca*, nenhuma instância foi classificadas corretamente e 8 foram classificadas incorretamente. E para o tipo *Analise\_mais\_detalhada*, 2 instâncias foram classificadas corretamente e 4 classificadas incorretamente.

## CONCLUSÕES

Os algoritmos de DM foram utilizados para fornecer informações e padrões desconhecidos de um determinado setor do sistema de abastecimento de água da cidade de João Pessoa. Eles responderam satisfatoriamente ao objetivo desejado, que é transformar dados em informações, visando à gestão automática dos processos relacionados à detecção e consequente minimização das perdas aparentes no sistema de abastecimento de água. Estas informações foram geradas pelos algoritmos em forma de árvores de decisões e análises estatísticas.

Foram utilizados dois algoritmos tanto para o modelo Perfil do Setor quanto para o modelo Perdas Aparentes. A Tabela 2 apresenta o comparativo entre os algoritmos J4.8 e *NaiveBayes* quanto à taxa de acurácia, taxa de erro, desempenho e tempo de processamento.

Tabela 2. Comparativo entre os algoritmos de Mineração de Dados aplicados aos modelos

MODELO PERFIL DO SETOR					MODELO PERDAS APARENTES				
Aprendizado Supervisionado	(A)	(B)	(C)	(D)	Aprendizado Supervisionado	(A)	(B)	(C)	(D)
	J4.8	98,06%	1,94%	0,07s		J4.8	89,02%	10,99%	0,06s
	<i>Naive Bayes</i>	98,06%	1,94%	0,02s		<i>Naive Bayes</i>	88,87%	11,13%	0,01s

Legenda: (A) Algoritmo/(B) Taxa de Acurácia/(C) Taxa de Erro/(D) Tempo de Processamento

A taxa de acurácia e erro dos algoritmos J4.8 e *NaiveBayes* foram iguais para o modelo Perfil do Setor, ou seja, 98,06% e 1,94%, respectivamente. O que diferenciou foi o tempo de processamento, haja vista que o algoritmo *NaiveBayes* foi mais rápido com a mineração das 2.583 instâncias, visto o tempo de processamento foi de 0,02s contra 0,07s do algoritmo J4.8. Portanto, o algoritmo *NaiveBayes* foi superior no processo de DM para o Modelo Perfil do Setor.

Já para o modelo Perdas Aparentes a taxa de acurácia e erro do algoritmo J4.8 foi de 89,02% e 10,99%, respectivamente. E para o Algoritmo *NaiveBayes* a taxa de acurácia foi menor, ou seja, 88,87% e a taxa de erro maior, ou seja, 11,13%. O Algoritmo *NaiveBayes* só foi melhor que o algoritmo J4.8 com relação ao tempo de processamento da mineração (0,01s contra 0,06 do algoritmo J4.8). Portanto, para o modelo Perdas Aparentes o que melhor respondeu ao processo de DM foi o algoritmo J4.8.

Uma das principais motivações para realização deste trabalho foi propor modelos de DM para facilitar a extração e geração de informações gerenciais a partir da exploração automatizada dos dados do sistema de abastecimento de água. A fim de se detectar perdas aparentes e verificar o perfil do setor selecionado para o estudo de caso, este trabalho direcionou-se para a criação de um ambiente computacional de armazenamento de dados, o DW, para em seguida serem aplicadas os algoritmos de DM do aprendizado supervisionado sobre estes dados que foram obtidos do ambiente transacional, conhecidos como *On-Line Transaction Processing (OLTP)*, da companhia de abastecimento da Paraíba.



O DW implementado neste trabalho se mostrou uma solução eficiente quanto ao objetivo que lhe é destinado, isto é, fornecer um repositório contendo dados limpos e agregados para serem geradas e analisadas as informações e conhecimento úteis ao processo de gestão da companhia de abastecimento. O DM pode ser aplicado isoladamente e independentemente da implantação do DW, porém, sem o DW, a obtenção das instâncias a serem mineradas seria feita diretamente sobre o ambiente OLTP da companhia, ambiente este que se encontra em constantes atualizações dos dados. É justamente para evitar problema de integridade dos dados, e suas desagradáveis consequências, que se indica a implementação primeiro do DW para em seguida aplicar o DM, este que por sua vez, é considerado o procedimento mais importantes do KDD.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BATISTA, Gustavo Enrique de Almeida Prado Alves. 2003. Pré-Processamento de Dados em Aprendizado de Máquina Supervisionado. Ciências de Computação e Matemática Computacional, Instituto de Ciência Matemática e de Computação - ICMC-USP. São Carlos - SP: s.n., 2003. p. 232, Tese de Doutorado.
- FAYYAD, U., PIATETSKY-SHAPIRO, G. e SMYTH, P. 1996. Advances in Knowledge Discovery and Data Mining. s.l.: Califórnia América Association for Artificial Intelligence, 1996. p. 611.
- HAN, Jiawei e KAMBER, Micheline. 2006. Data Mining: Concepts and Techniques. Second Edition. s.l.: Elsevier Science & Technology Books, 2006. The Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems.
- INMON, William H. 2005. Building the Data Warehouse. 4a Edição. s.l.: Editora: Wiley Publishing, Inc, 2005.
- KIMBALL Ralph e ROSS Margy 2002. The data warehouse toolkit: the complete guide to dimensional modeling [Livro]. - [s.l.]: John Wiley and Sons, 2nd ed., 2002.
- KANASHIRO, Augusto. 2007. Um data warehouse de publicações científicas: indexação automática da dimensão tópicos de pesquisa dos data marts. USP - São Carlos. São Paulo : s.n., 2007. Dissertação de Mestrado.
- LAROSE, Daniel T. Discovering knowledge in data: an introduction to data mining. New Jersey, Central Connecticut State University: A John Wiley & Sons, Inc, 2005.
- PASSINI, Sílvia Regina Reginato e NAIME, Ana Kelly. 2004. Data Mart para apresentação dos resultados econômico-financeiros da setorização. Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento - SANASA. Campinas – São Paulo : s.n., Artigo, 2004.
- PASSINI, Sílvia Regina Reginato. Março 2002. Mineração de Dados para Detecção de Fraudes em Ligações de Água. PUC - Campinas. São Paulo : s.n., Março 2002. Dissertação de Mestrado.
- QUEYROI, Roberto. 2007. Aplicação de Modelo de Mineração de Dados em um Sistema de Apoio a Decisão para Empresas de Saneamento. Sistemas Computacionais em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Rio de Janeiro : s.n., 2007. p. 112, Dissertação de Mestrado.
- WITTEN, Ian H. e FRANK, Eibe. 2005. Data mining: practical machine learning tools and techniques. 2nd ed. s.l.: Elsevier Inc, 2005.

---

## 5 Eficiência energética no dimensionamento econômico de redes de distribuição de água

---

**Moisés Menezes Salvino, Paulo Sérgio Oliveira de Carvalho, Gênisson Batista Carneiro e Heber Pimentel Gomes**

Universidade Federal da Paraíba - UFPB - João Pessoa - Brasil

### INTRODUÇÃO

O projeto otimizado de sistemas pressurizados de distribuição de água tem recebido uma atenção especial de engenheiros projetistas e pesquisadores da área de saneamento e afins, devido aos altos custos de implantação e operação destes sistemas. As variáveis determinantes no projeto otimizado de ampliações e concepções de sistemas de distribuição de água são os diâmetros das tubulações dos trechos da rede pressurizada de distribuição e a altura manométrica do sistema de propulsão. Este último parâmetro repercute diretamente no sistema de bombeamento, ou seja, na energia necessária para que este sistema funcione.

O dimensionamento dos sistemas de distribuição de água é matematicamente indeterminado, admitindo inúmeras soluções. A busca da solução ótima, que minimiza o custo total de implantação e operação do sistema, parte desta operação diz respeito ao consumo de energia necessária para manter o sistema ao longo do tempo de projeto proposto, portanto, esse é o objetivo dos modelos matemáticos e hidráulicos desenvolvidos para este fim.

Historicamente, foram propostos vários métodos para o dimensionamento de redes hidráulicas. Os primeiros, denominados clássicos, se restringiam à escolha dos diâmetros da rede que proporcionassem o equilíbrio hidráulico do escoamento permanente nas malhas do sistema de distribuição. No entanto, a busca do custo mínimo do sistema de abastecimento é um problema de otimização, que vem sendo pesquisado por inúmeros profissionais há vários anos.

Na década de 70, com a consolidação do uso dos microcomputadores, tornou-se possível o desenvolvimento de técnicas matemáticas voltadas para o dimensionamento de redes hidráulicas, surgindo os primeiros métodos de otimização baseados nos modelos matemáticos de programação linear (KARMELI et al., 1968), programação não linear (JACOBY, 1968) e programação dinâmica (KALLY, 1969).

No final da década de 90 surgiu, também, o emprego do Algoritmo Genético ou Evolucionário (AG) para o dimensionamento de redes pressurizadas. Podem-se destacar os trabalhos desenvolvidos por LANSEY e MAYS (1989); EIGER et al. (1994); SAVIC e WALTERS (1997); LIONG e ATIQUZZAMAN (2004); PRASAD e NAM-SIK (2004); ARAÚJO et al. (2006); JIMENEZ et al. (2007).

Mais recentemente, alguns pesquisadores têm empregado métodos baseados na organização e/ou evolução de determinadas espécies de seres vivos. EUSUFF e LANSEY (2003) propuseram o Shuffled Frog-Leaping Algorithm (SFLA), um algoritmo meta-heurístico baseado na evolução de rãs. MAIER et al. (2003) e ZECCHIN et al. (2006) utilizaram uma nova técnica chamada Ant Colony Optimisation (ACO), que é baseada na analogia do comportamento de uma colônia de formigas, bem como a sua capacidade para determinar o trajeto mais curto entre o seu ninho e uma fonte de alimentação. Estes métodos apresentaram bons resultados, porém, assim como o AG, requerem um tempo computacional muito elevado. CUI e KUCZERA (2003) destacaram o problema do tempo computacional e propuseram que estas análises sejam manuseadas por super computadores ou por computação paralela.

Apesar da existência de vários métodos de otimização na literatura, as técnicas mais utilizadas no dimensionamento da grande maioria das redes implantadas no Brasil e no mundo são, ainda, baseadas em análises de tentativa e erro; isso ocorre porque a maioria dos modelos de dimensionamento otimizado é de difícil acesso e aplicabilidade pelo usuário. JIMENEZ et al. (2007) afirmam que a otimização de redes hidráulicas ainda não é usual na engenharia e o surgimento de programas com interfaces amigáveis está apenas começando.

O objetivo do presente trabalho é o desenvolvimento de um modelo de otimização que busca alcançar a solução ótima de uma rede pressurizada de distribuição de água sob o controle das variáveis de estado (pressão e velocidade da água), juntamente com seu sistema de bombeamento. O algoritmo do modelo se baseia numa programação dinâmica iterativa, onde se obtém, em cada iteração, uma solução ótima parcial, em função dos custos das tubulações e da energia necessária para o bombeamento do sistema. O método proporciona, como resposta ao dimensionamento, os diâmetros dos trechos da rede e a altura manométrica de bombeamento, de forma a encontrar um custo mínimo total do sistema (custo de implantação mais custo energético).

## METODOLOGIA

O processo iterativo do método parte de uma solução inicial, de contorno, onde a rede de distribuição é composta, pelos diâmetros mínimos admitidos para o projeto. Esta solução inicial possui o custo mínimo de implantação da rede e custos energéticos elevados, já que é composta pelos diâmetros mínimos. No entanto, esta solução não é uma alternativa factível, na prática, pois ela proporciona perdas de carga excessivas nos trechos da rede, acarretando uma elevada altura manométrica na cabeceira de origem do sistema.

A partir da solução inicial da metodologia proposta, o processo de cálculo se desenvolve, iterativamente, de maneira que cada solução subsequente, a ser obtida, dependerá da solução anterior. As soluções subsequentes serão obtidas, aumentando-se os diâmetros de cada trecho da rede, de forma que o acréscimo de custo da rede e energético seja o mínimo possível. O processo iterativo termina quando a configuração dos diâmetros da rede atende às restrições impostas no projeto (velocidade máxima, velocidade mínima, pressão máxima, pressão mínima e/ou cota de cabeceira admitida).

O algoritmo do método é associado a um simulador hidráulico, que fornecerá a cada iteração, o equilíbrio hidráulico do sistema e os valores das variáveis de estado do escoamento do fluxo d'água na rede (vazões, velocidades, perdas de carga e pressões). O simulador escolhido foi o Epanet2 (ROSSMAN, 2008).

Com a solução inicial estabelecida efetua-se a simulação de escoamento na rede para a obtenção das pressões em todos os nós. Uma vez detectado o nó mais desfavorável, inicia-se o processo de cálculo otimizado. Em cada iteração, testar-se-ão as várias configurações de diâmetros sob o controle das variáveis de estado. A mudança efetiva do diâmetro, em uma iteração, será definida em função do menor acréscimo de custo da rede em relação ao alívio de pressão proporcionado à rede e dentro dos limites pré-estabelecidos. O trecho que terá confirmada a sua modificação será o que proporcionar o menor gradiente de custo. O gradiente de custo ( $G_c$ ) relativo a um determinado trecho da rede é dado pela equação (1). Ele representa o custo marginal do acréscimo de pressão no nó mais desfavorável, proporcionado pela troca do diâmetro do trecho da rede pelo seu adjacente superior.

$$G_c = \frac{P_2 - P_1}{\Delta p} \quad \text{equação (1)}$$

onde  $G_c$  é o gradiente de custo, em unidades monetárias por metro de alívio de perda de carga (em \$/m);  $P_1$  é o custo da tubulação do trecho com o seu diâmetro atual (em \$);  $P_2$  é o custo da tubulação do trecho com o diâmetro imediatamente superior ao atual (em \$);  $\Delta p$  é o ganho de pressão, no nó mais desfavorável, em mca.

Em cada iteração haverá “n” gradientes de custo, correspondentes às “n” configurações de mudanças de diâmetros dos “n” trechos da rede; o gradiente de custo ótimo ( $G_c^*$ ) será o menor entre todos os calculados e dentro dos limites pré-estabelecidos. O trecho correspondente ao  $G_c^*$  será chamado de trecho ótimo ( $t^*$ ). O trecho ótimo assumirá uma nova configuração, onde o diâmetro será o seu imediatamente superior (testado). Esta última configuração será a configuração de partida para a iteração seguinte. O processo iterativo de otimização segue a metodologia antes mencionada até atingir a solução ótima buscada.

O método trabalha com duas alternativas de dimensionamento. Na primeira, a rede é abastecida por uma cota piezométrica na cabeceira fixa e conhecida. Neste caso, o custo do sistema corresponderá ao

custo fixo de implantação da rede hidráulica. Na segunda alternativa, a água é bombeada diretamente para o sistema ou para um reservatório elevado, através de bombeamento e o custo total do sistema será composto pelo custo da rede de tubulações mais o custo energético, atualizado, da estação elevatória. Neste último caso a cota na cabeceira será uma variável de decisão a mais no processo de otimização.

### Cota de cabeceira fixa na origem

Na primeira alternativa, a condição de parada das iterações ocorrerá quando a pressão em algum nó da rede atingir o valor mínimo admitido. O custo total do sistema de distribuição (função objetivo), que compreende o custo de implantação da rede, pode ser expresso pela equação (2).

$$C(D_i, Q_i) = \sum_{i=1}^m L_i \times P(D_i) \quad \text{equação (2)}$$

onde “ $C(D_i, Q_i)$ ” é o custo da rede hidráulica; “ $L_i$ ” é o comprimento do trecho “ $i$ ”; “ $P(D_i)$ ” é o preço unitário do tubo do trecho “ $i$ ” com o diâmetro “ $D_i$ ”; e “ $m$ ” é o número de trechos.

### Cota de cabeceira variável na origem

No dimensionamento do sistema, em que a rede é pressurizada através de uma estação elevatória, o método leva em conta o custo da energia de bombeamento ao longo da vida útil do projeto. A função objetivo que representa o custo total do sistema de distribuição compreende o custo de implantação da rede mais o custo atualizado de energia da estação de bombeamento (equação 3).

$$C(D_i, Q_i, H) = \sum_{i=1}^m L_i \times P(D_i) + C_e \times H \times FVP \quad \text{equação (3)}$$

onde “ $C_e$ ” é o custo de operação da estação de bombeamento por unidade de altura manométrica (equação 4); “ $H$ ” é a altura manométrica de bombeamento; e “ $FVP$ ” é o fator de valor presente (equação 5).

$$C_e = \frac{9,81 \times Q}{\eta} \times T \times nb \quad \text{equação (4)}$$

onde  $Q$  é a vazão em  $m^3/s$ ,  $T$  é a tarifa relativa ao consumo de energia elétrica, em  $R\$/kWh$ ; e  $nb$  é o número de horas de bombeamento por ano. O fator de valor presente para o alcance do projeto (“ $t$ ” anos), que efetua a conversão de uma série de custos anuais para um valor presente, sujeito a uma taxa de juros “ $i$ ” e de um aumento de energia “ $e$ ”, é dado pela equação 5.

$$FVP = \left[ \frac{(1+e)^t - (1+i)^t}{(1+e) - (1+i)} \right] \times \left[ \frac{1}{(1+i)^t} \right] \quad \text{equação (5)}$$

O processo de otimização do dimensionamento leva em consideração o custo energético através da grandeza denominada gradiente energético ( $Ge$ ). O  $Ge$  representa o custo, atualizado, de pressurização da água, por metro de elevação, e é dado pela equação 6.

$$Ge = C_e \times FVP \quad \text{equação (6)}$$

Analogamente ao procedimento anterior, executa-se o processo iterativo, obedecendo a metodologia antes descrita, com a diferença de que ao final de cada iteração do processo, compara-se o

$G_c^*$  com o  $G_e$  calculado. Caso o  $G_c^*$  seja inferior ao  $G_e$ , o custo de investimento para diminuir as perdas de energia na rede de tubulações - e conseqüentemente aumentar a pressão no nó mais desfavorável - será inferior ao custo energético para aumentar a carga na rede. O processo iterativo seguirá aumentando os diâmetros dos trechos até que o valor do  $G_c^*$  supere o valor do  $G_e$  e enquanto todos os limites sejam alcançados. Com a obtenção desta última solução, determina-se a altura manométrica, de modo que a pressão mínima do sistema seja igual à pressão mínima requerida. A metodologia é sintetizada no fluxograma apresentado na figura 1.

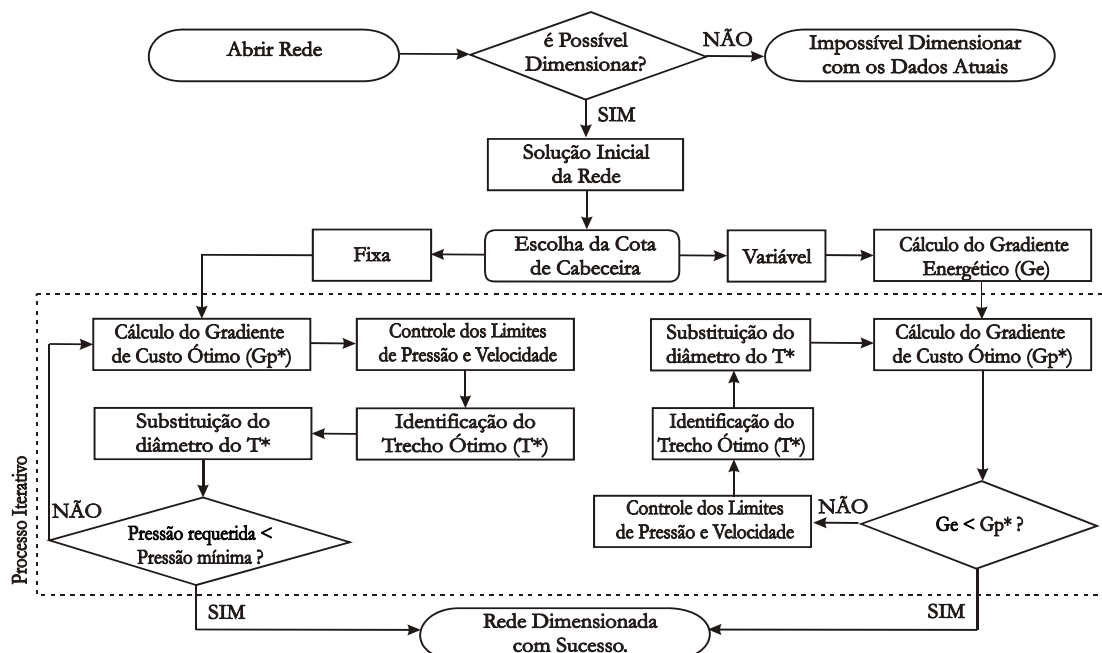


Figura 1: Fluxograma do método Lenhsnet

## APLICAÇÕES E RESULTADOS

O método desenvolvido foi aplicado no dimensionamento otimizado do sistema de distribuição de água da Cidade de Hanoi (FUJIWARA e KHANG, 1990); do Grande Anel apresentado por Gomes (2004) e da Rede R-9 proposta por (FORMIGA, 2005).

### Exemplo 1 - Grande Setor (Gomes, 2004)

Este exemplo consiste em projetar o sistema de distribuição de água do Grande Setor do bairro do Bessa (João Pessoa, Brasil), que foi modelado originalmente por Gomes (2004). Pretende-se dimensionar, com o menor custo possível, os trechos da rede e a altura do reservatório elevado, considerando-se os preços de implantação das tubulações e o custo energético do conjunto motor-bomba, que impulsionará a água para o reservatório.

O nível da água de captação (poço de sucção) está na cota 30 metros. A tabela 1 apresenta os dados da rede. A pressão mínima requerida nos nós é de 25 mca, e as velocidades máximas e mínimas admitidas são de 3,0 m/s e 0,2 m/s, respectivamente. Na figura 2 encontram-se a numeração dos nós e dos trechos da rede. A tabela 2 fornece os diâmetros disponíveis, o material, os coeficientes de rugosidade “C” (Hazen-Williams) e os preços unitários de implantação dos tubos.

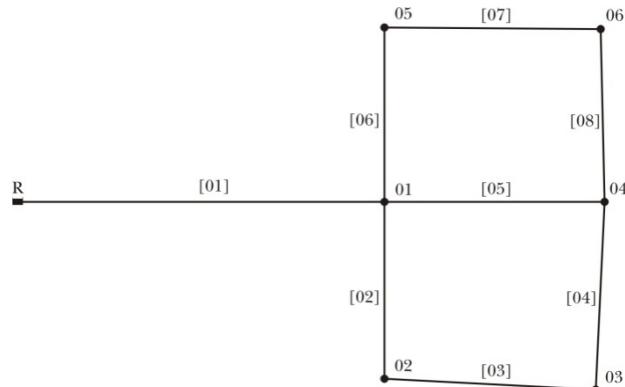


Figura 2: Configuração da rede Grande Setor.

Os custos e regime do bombeamento são: número de horas de bombeamento diário = 20, rendimento do conjunto motor-bomba = 75%, alcance do projeto = 20 anos, taxa de juro anual = 12%, taxa de aumento anual da energia = 6%, custo do kWh (incluindo a tarifa de demanda) = R\$ 0,20.

Tabela 1: Dados do Grande Setor (GOMES, 2004).

Dados dos nós			Dados dos trechos	
Nó	Vazão (l/s)	Cota (m)	Trecho	Comp. (m)
1	0,00	6,0	[01]	2.540
2	47,78	5,5	[02]	1.230
3	80,32	5,5	[03]	1.430
4	208,60	6,0	[04]	1.300
5	43,44	4,5	[05]	1.490
6	40,29	4,0	[06]	1.210
Total	420,43		[07]	1.460
			[08]	1.190

Tabela 2: Dados das tubulações disponíveis.

DN	Diam. (mm)	Material do tubo	Coef. "C"	Custo (R\$/m)
100	108,4	PVC	145	47,09
150	156,4	"	145	63,80
200	204,2	"	145	87,62
250	252,0	"	145	118,59
300	299,8	"	145	152,24
350	366,2	FoFo	130	317,86
400	416,4	"	130	375,00
450	466,6	"	130	436,23
500	518,0	"	130	515,60
600	619,6	"	130	640,30

Com base nos dados fornecidos, calcula-se, através da equação 6, o valor do gradiente energético ( $G_e$ ), que é igual a \$ 89.324,72. O processo iterativo de cálculo se dá aumentando os diâmetros dos trechos e baixando a cota piezométrica de alimentação, até se alcançar a solução que proporcione o custo mínimo do sistema (intervenção física e energia elétrica) e ainda obedecer os limites de velocidades máxima e mínima, e pressão mínima.

Estabelecida a condição de parada, o método calcula a cota piezométrica final para a cabeceira, que foi de 13,35 m. Multiplicando-se a cota manométrica pelo  $G_e$ , determina-se o custo atualizado da energia

elétrica do Grande Setor: \$ 1.192.399,31. O custo de investimento das tubulações é de \$ 3.375.240,40. Por conseguinte e o custo total do sistema de distribuição de água é \$ 4.566.921,71.

Os resultados do dimensionamento são apresentados nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3: Dimensionamento do Grande Setor

Trecho	LENHSNET	PNL2000
[01]	619,6	619,6
[02]	299,8	416,4
[03]	299,8	416,4
[04]	299,8	299,8
[05]	518,0	299,8
[06]	252,0	416,4
[07]	156,4	299,8
[08]	252,0	299,8

\* Diâmetros (mm)

Tabela 4: Pressões dos nós (mca).

Nó	LENHSNET	PNL2000*
1	30,53	34,72
2	26,22	30,53
3	25,00	27,46
4	25,93	25,00
5	27,61	33,70
6	26,19	28,45

\* Foi utilizado um valor de  $\alpha$  (equação. 7) igual a 10,66, diferente do Epanet2.

Comparando os resultados obtidos, para o dimensionamento da rede, pelo Lenhsnet com o método PNL2000 (GOMES e FORMIGA, 2001), conclui-se que o modelo proposto obteve um resultado mais vantajoso em termos econômicos, reduzindo o valor do custo total da rede em 16,54% (ver tabela 5).

Tabela 5: Custos dos Métodos PNL2000 e LENHSNET.

Componente	PNL2000	LENHSNET
Tubulações	3.905.797,60	3.375.240,40
Energia	1.566.782,30	1.192.399,31
Custo total (\$)	5.472.579,90	4.567.639,71

### Exemplo 2 - Rede Hanoi (Fujiwara e Khang, 1990)

O sistema de distribuição de água da cidade de Hanoi (Vietnã) é composta por três anéis, trinta e quatro trechos, trinta e um nós e um reservatório de nível fixo (ver figura 3). Essa rede foi utilizada originalmente por Fujiwara e Khang (1990), sendo utilizada, posteriormente, por diversos autores (CUNHA e SOUSA, 1999; WU e BOULOS, 2001; EUSUFF e LANSEY, 2003; LIONG e ATIQUZZAMAN, 2004; SURIBABU e NEELAKANTAN, 2006; ZECCHIN et al., 2006). Os dados do sistema e os custos das tubulações estão apresentados nas tabelas 6 e 7. A cota piezométrica de cabeceira é de 100 mca e a pressão mínima admitida para os nós da rede é de 30 mca.

A equação utilizada para a perda de carga, foi a fórmula de Hazen-Williams (equação 7), assumindo o valor de  $\alpha$  igual à 10,6792 (valor default do Epanet2) e o coeficiente de rugosidade C igual a 130.

$$H_L = \frac{\alpha L Q^{1,852}}{C^{1,852} D^{4,871}} \quad \text{equação (7)}$$

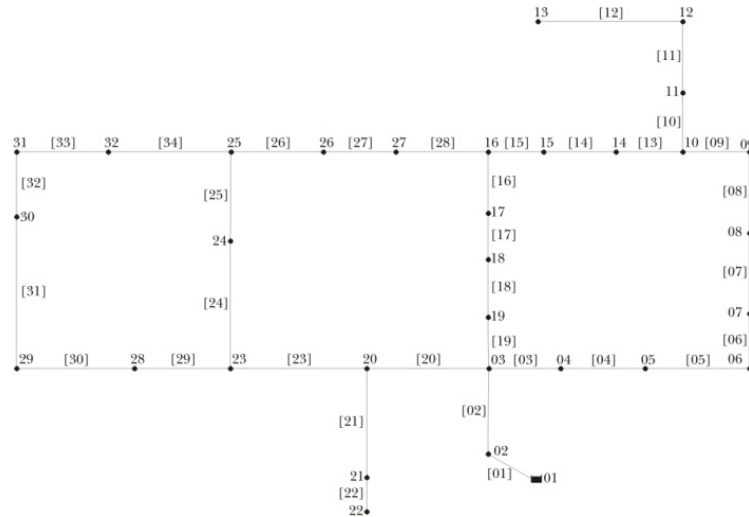


Figura 3: Traçado da Rede Hanoi

Tabela 6 - Dados da rede Hanoi e custo das tubulações.

Nó	Demanda (m <sup>3</sup> /h)	Trecho	Comp. (m)	Nó	Demanda (m <sup>3</sup> /h)	Trecho	Comp. (m)
01	-	[01]	100	18	1.345	[18]	800
02	890	[02]	1.350	19	60	[19]	400
03	850	[03]	900	20	1.275	[20]	2.200
04	130	[04]	1.150	21	930	[21]	1.500
05	725	[05]	1.450	22	485	[22]	500
06	1.005	[06]	450	23	1.045	[23]	2.650
07	1.350	[07]	850	24	820	[24]	1.230
08	550	[08]	850	25	170	[25]	1.300
09	525	[09]	800	26	900	[26]	850
10	525	[10]	950	27	370	[27]	300
11	500	[11]	1.200	28	290	[28]	750
12	560	[12]	3.500	29	360	[29]	1.500
13	940	[13]	800	30	360	[30]	2.000
14	615	[14]	500	31	105	[31]	1.600
15	280	[15]	550	32	805	[32]	150
16	310	[16]	2.730			[33]	860
17	865	[17]	1.750			[34]	950

Tabela 7 - Custo das tubulações.

Diâmetro (mm)	Custo de implantação (\$)
304,8	45,73
406,4	70,40
508,0	98,38
609,6	129,30
762,0	180,80
1016,0	278,30
1.231,2	375,27
1.435,4	477,76
1.537,0	532,76
1.638,6	590,42



Para o dimensionamento do sistema foram consideradas duas situações. Na primeira foram acrescentados diâmetros maiores para atender à restrição de velocidade máxima imposta, enquanto na segunda o dimensionamento foi executado apenas com os diâmetros disponibilizados originalmente por Fujiwara e Khang (1990). Com a execução deste exemplo, através do modelo proposto, foram obtidos os dados do dimensionamento ótimo da rede, que estão mostrados na tabela 8. Nesta tabela são apresentados, também, nas colunas A, B e C, os resultados do mesmo dimensionamento, efetuado através de outros modelos citados na literatura. A tabela 9 fornece as pressões e os custos para o Lenhsnet e outras soluções citadas na literatura.

Tabela 8 - Soluções da Rede Hanoi – Diâmetros (mm).

Trecho	Autor <sup>1</sup>				
	LENHSNET	A	B	C	
[01]	1638,6	1016	1016	1016	1016
[02]	1638,6	1016	1016	1016	1016
[03]	1016	1016	1016	1016	1016
[04]	1016	1016	1016	1016	1016
[05]	1016	1016	1016	1016	1016
[06]	1537	1016	1016	1016	1016
[07]	762	1016	1016	1016	1016
[08]	762	1016	1016	762	1016
[09]	762	1016	1016	762	1016
[10]	609,6	762	762	762	762
[11]	609,6	762	762	762	609.6
[12]	508	609,6	609,6	609,6	609.6
[13]	508	609,6	406,4	406,4	508
[14]	406,4	609,6	406,4	304,8	406.4
[15]	406,4	609,6	304,8	304,8	304.8
[16]	304,8	304,8	406,4	609,6	304.8
[17]	406,4	406,4	508	762	406.4
[18]	508	609,6	609,6	762	609.6
[19]	1016	609,6	609,6	762	609.6
[20]	1016	1016	1016	1016	1016
[21]	406,4	508	508	508	508
[22]	304,8	406,4	304,8	304,8	304.8
[23]	762	1016	1016	762	1016
[24]	609,6	762	762	762	762
[25]	508	609,6	762	609,6	762
[26]	406,4	508	508	304,8	508
[27]	406,4	508	304,8	508	304.8
[28]	406,4	609,6	304,8	609,6	304.8
[29]	406,4	406,4	406,4	406,4	406.4
[30]	304,8	406,4	406,4	406,4	304.8
[31]	304,8	304,8	304,8	304,8	304.8
[32]	304,8	406,4	304,8	406,4	406.4
[33]	406,4	406,4	406,4	508	406.4
[34]	508	609,6	508	609,6	609.6
Custo <sup>2</sup>	5,81	6,33	6,18	6,22	6,09

<sup>1</sup> A - Wu e Boulos (2001); B - Liong e Atiquzzaman (2004);

C - Suribabu e Neelakantan (2006).

<sup>2</sup> Custo total em milhões.

Utilizando apenas os diâmetros disponibilizados originalmente por Fujiwara e Khang (1990), a solução apresentada Cunha e Sousa (1999) foi a de mínimo custo (\$ 6,06 milhões), porém, as pressões foram inferiores a 30 mca em 6 nós da rede, quando simulado através do Epanet2. Suribabu e

Neelakantan (2006) encontraram a solução de mínimo custo para  $\alpha$  igual à 10,6792 (valor default Epanet2). No entanto, o Lenhsnet se apresenta como uma alternativa prática de cálculo de redes hidráulicas, já que sua interface de entrada de dados é acoplada ao Epanet2 e possui um baixo tempo de processamento dos cálculos. O tempo de processamento foi aproximadamente 32 segundos, utilizando um computador Core 2 Duo de 1.7 GHz e 2 GB de memória RAM.

Tabela 9: Resultados do dimensionamento – Pressões (mca)

Nó	Autor <sup>1</sup>					
	D2	E2	B	F	Lenhsnet	
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	97,14	97,14	97,14	97,14	97,14	99,72
3	61,63	61,67	61,67	61,67	61,67	96,26
4	56,82	56,88	57,54	57,08	56,53	91,08
5	50,86	50,94	52,43	51,38	50,14	84,63
6	44,57	44,68	47,13	45,40	43,36	77,78
7	43,10	43,21	45,92	44,01	41,74	77,56
8	41,33	41,45	44,55	42,36	39,76	69,41
9	39,91	40,04	40,27	41,06	38,16	62,78
10	38,86	39,00	37,24	40,11	36,95	57,79
11	37,30	37,44	35,68	38,55	35,39	53,16
12	33,87	34,01	34,52	35,12	34,23	49,73
13	29,66	29,80	30,32	30,91	30,03	39,51
14	34,94	35,13	34,08	37,21	34,52	51,61
15	32,88	33,14	34,08	32,89	33,93	46,98
16	29,79	30,23	36,13	32,16	33,59	44,26
17	29,95	30,32	48,64	41,36	36,46	57,79
18	43,81	43,97	54,00	48,55	53,66	81,31
19	55,49	55,57	59,07	54,33	58,92	96,00
20	50,43	50,44	53,62	50,61	51,56	86,72
21	41,07	41,09	44,27	41,26	42,21	58,99
22	35,90	35,93	39,11	36,10	40,94	53,83
23	44,24	44,21	38,79	44,53	46,27	67,07
24	38,50	38,90	36,37	39,39	42,14	56,60
25	34,79	35,55	33,16	36,18	35,09	42,82
26	30,87	31,53	33,44	32,55	33,31	40,00
27	29,59	30,11	34,38	31,61	33,33	40,40
28	38,60	35,50	32,64	35,90	37,63	58,18
29	29,64	30,75	30,05	31,23	32,95	38,28
30	29,90	29,73	30,10	30,29	32,00	37,13
31	30,18	30,19	30,35	30,77	32,12	37,56
32	32,64	31,44	31,09	32,04	33,39	38,76
Vel. máx. (m/s)	6,83	6,83	6,83	6,83	6,83	3,48
Custo (Milhões)	6,062	6,072	6,22	6,13	6,33	5,81

<sup>1</sup> B - Liong e Atiquzzaman(2004); D - Cunha e Sousa(1999); E - Eusuff e Lansey(2003); F - Zecchin et al.(2006).

<sup>2</sup> Cunha e Sousa (1999) utilizou um valor de  $\alpha$  (equação 7) igual a 10,51 e Eusuff e Lansey (2003) igual a 10,67.

Como os diâmetros disponibilizados originalmente se mostraram insuficientes para atender à restrição de velocidade máxima, foram acrescentados à serie original novos diâmetros (1231,2 a 1638,6 mm), aumentando o campo de busca de possibilidades de 634 (2,87x1026) para 1034 alternativas. O custo

total obtido foi de \$ 5,806 milhões, inferior aos demais custos dos demais trabalhos citados na literatura (ver tabelas 2 e 3). A tabela 10 apresenta os custos totais para as soluções obtidas.

Tabela 10: Soluções para a rede Hanoi modificada.

Solução	Velocidade Máxima (m/s)	Custo (milhões de \$)
1	4,65	5,439
2	4,44	5,444
3	3,65	5,618
4	4,84	5,679
5-final	3,48	5,807

### Exemplo 3: A Rede R-9 (FORMIGA, 2005)

Este terceiro exemplo (Figura 6), rede R-9, faz parte de uma rede localizada na cidade de João Pessoa – Brasil, consiste de 53 nós e um reservatório conectados por 72 trechos. Os dados deste problema foram propostos por FORMIGA (2005) como mostrada nas Tabelas 11 e 13. Os diâmetros disponíveis com seu custo de implantação por metro e o coeficiente de rugosidade (Darcy-Weisbach) é mostrado na Tabela 12. Esta rede já foi dimensionada por alguns pesquisadores (LEAL, 1995; LOPES, 2003 e FORMIGA, 2005). Os dados da rede, no formato de arquivo INP, poderá ser encontrado no endereço <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/download/benchmarks>.

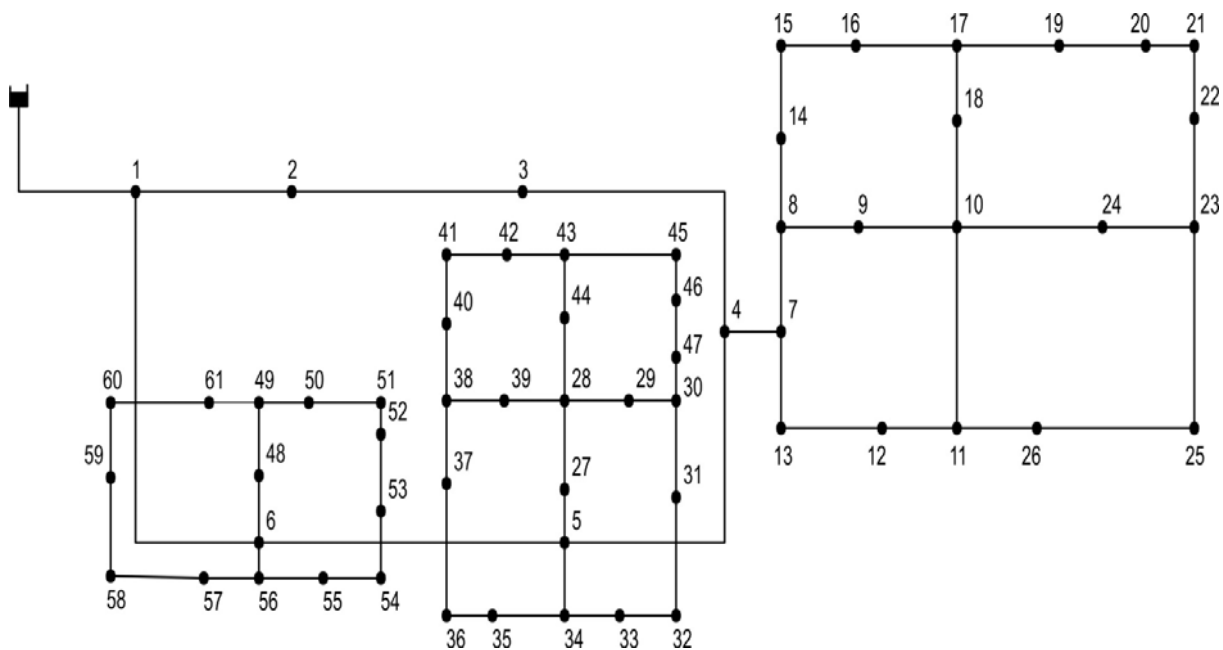


Figure 6 – Configuração da Rede R-9

A rede em estudo apresenta valores de pressões mínimas distintos para cada nó da rede. Para os nós pertencentes ao anel principal da rede a pressão mínima é de 25 mca e para as redes secundárias derivadas do anel principal a pressão mínima é de 15 mca. Para questões de modelagem no Lenhsnet, a diferença de Pressão foi adicionada a topografia do terreno do anel principal e foi estabelecida a pressão mínima de 15 mca para toda a rede.

Tabela 11 – Dados da rede R-9

Nós	Demanda (L/s)	Cota (m)	Pressão Mínima	Node	Demand (L/s)	Elevation (m)	Minimum Pressure
1	2.51	5.0	25.00	32	4.09	4.5	15.00
2	44.07	5.0	25.00	33	3.68	5.0	15.00
3	41.24	4.0	25.00	34	4.04	5.0	15.00
4	1.04	4.5	25.00	35	3.22	6.0	15.00
5	0.86	4.5	25.00	36	2.53	4.5	15.00
6	1.32	4.5	25.00	37	2.31	4.5	15.00
7	1.35	4.5	15.00	38	2.50	4.0	15.00
8	8.59	5.0	15.00	39	2.89	4.0	15.00
9	6.40	4.5	15.00	40	2.48	4.0	15.00
10	6.07	5.0	15.00	41	4.61	4.0	15.00
11	4.95	3.5	15.00	42	3.47	4.0	15.00
12	8.38	3.5	15.00	43	3.61	4.0	15.00
13	11.70	3.5	15.00	44	5.17	4.0	15.00
14	5.63	5.0	15.00	45	6.48	4.0	15.00
15	5.57	6.0	15.00	46	4.91	4.5	15.00
16	6.30	6.0	15.00	47	6.50	4.0	15.00
17	3.26	6.0	15.00	48	4.97	4.5	15.00
18	3.60	6.0	15.00	49	2.97	3.0	15.00
19	4.83	6.0	15.00	50	1.80	5.0	15.00
20	4.50	6.0	15.00	51	2.96	4.0	15.00
21	2.80	5.0	15.00	52	4.66	3.0	15.00
22	5.46	3.0	15.00	53	4.54	4.5	15.00
23	62.45	3.5	15.00	54	8.80	4.5	15.00
24	8.19	6.0	15.00	55	4.26	4.5	15.00
25	58.87	3.5	15.00	56	2.98	5.0	15.00
26	3.26	3.5	15.00	57	3.91	5.0	15.00
27	4.36	4.3	15.00	58	3.70	4.7	15.00
28	4.25	4.0	15.00	59	1.86	5.0	15.00
29	4.56	2.5	15.00	60	3.12	5.0	15.00
30	8.32	2.5	15.00	61	3.52	4.5	15.00
31	4.94	3.5	15.00				

Tabela 12 – Custo das tubulações

Diameter (mm)	Darcy-Weisbach Coefficient	Unit Cost (Cr\$/m)*
100	0.01	1 629
150	0.01	4 054
200	0.01	5 769
250	0.01	7 718
300	0.10	9 237
350	0.10	11 012
400	0.10	12 397
450	0.10	15 501
500	0.10	17 686
600	0.10	23 132

\* Current Brazilian currency in 1982 (Cr\$ 90.60 = USD 1.00)

Tabela 13 – Dados dos Trechos para a Rede R-9

Trecho	Nó inicial	Nó final	Comp. (m)	Trecho	Nó inicial	Nó final	Comp. (m)
[1]	Reservoir	1	2 540	[37]	32	31	285
[2]	1	2	350	[38]	33	32	210
[3]	2	3	1 140	[39]	34	33	240
[4]	3	4	1 430	[40]	5	34	250
[5]	4	5	1 020	[41]	34	35	340
[6]	6	5	1 430	[42]	35	36	270
[7]	1	6	1 710	[43]	36	37	240
[8]	4	7	220	[44]	37	38	160
[9]	7	8	190	[45]	39	38	260
[10]	8	9	295	[46]	28	39	250
[11]	9	10	390	[47]	38	40	330
[12]	11	10	370	[48]	40	41	230
[13]	12	11	190	[49]	42	41	385
[14]	13	12	310	[50]	43	42	160
[15]	7	13	205	[51]	44	43	330
[16]	8	14	305	[52]	28	44	210
[17]	14	15	295	[53]	43	45	150
[18]	15	16	300	[54]	45	46	255
[19]	16	17	290	[55]	47	46	260
[20]	18	17	180	[56]	30	47	230
[21]	10	18	315	[57]	6	48	115
[22]	17	19	300	[58]	48	49	180
[23]	20	19	295	[59]	49	50	140
[24]	21	20	215	[60]	50	51	215
[25]	22	21	140	[61]	51	52	175
[26]	23	22	220	[62]	52	53	180
[27]	23	24	220	[63]	53	54	260
[28]	10	24	285	[64]	54	55	205
[29]	25	23	300	[65]	55	56	255
[30]	26	25	315	[66]	56	6	260
[31]	11	26	170	[67]	57	56	275
[32]	5	27	110	[68]	58	57	315
[33]	27	28	280	[69]	59	58	200
[34]	28	29	225	[70]	59	60	175
[35]	29	30	200	[71]	60	61	300
[36]	30	31	190	[72]	61	49	250

A solução obtida para a rede R-9 foi de 199,39 Milhões, os resultados obtidos são mostrados na Tabela 14 , a pressão mínima resultante foi de 17,10 m e está localizada no nó 6 da rede. Quando comparado ao resultado proposto por Formiga (2005) de 202,80, que utilizou Algoritmo Génético – NSGA-II, foi obtida uma redução do custo total de 1,7%.

A metodologia proposta neste estudo, baseada em uma programação dinâmica, disponibiliza para os engenheiros de forma prática e rápida alternativas para o dimensionamento através do programa desenvolvido. Esta otimização foi aplicada em diversas redes e os resultados obtidos foram similares aos encontrados na literatura.

Tabela 14 – Solução do dimensionamento da rede R-9 – diâmetros e vazões

Pipeline	Diameter (mm)	Flow (L/s)	Pipeline	Diameter (mm)	Flow (L/s)
[1]	456.20	600	[37]	100	1.77
[2]	394.87	600	[38]	100	5.86
[3]	350.80	600	[39]	100	9.54
[4]	309.56	500	[40]	150	21.68
[5]	86.35	350	[41]	100	8.10
[6]	3.44	100	[42]	100	4.88
[7]	58.82	250	[43]	100	2.35
[8]	222.17	400	[44]	100	0.04
[9]	39.67	200	[45]	100	6.35
[10]	10.73	100	[46]	100	9.24
[11]	4.33	100	[47]	100	3.89
[12]	9.28	100	[48]	100	1.40
[13]	161.08	400	[49]	100	3.20
[14]	169.45	400	[50]	100	6.67
[15]	181.15	400	[51]	150	18.02
[16]	20.34	150	[52]	150	23.20
[17]	14.71	150	[53]	100	7.74
[18]	9.14	100	[54]	100	1.26
[19]	2.84	100	[55]	100	3.64
[20]	1.57	100	[56]	150	10.15
[21]	5.17	100	[57]	150	27.01
[22]	1.15	100	[58]	150	22.04
[23]	3.68	100	[59]	100	10.85
[24]	8.18	150	[60]	100	9.05
[25]	10.98	150	[61]	100	6.09
[26]	16.44	150	[62]	100	1.43
[27]	5.82	100	[63]	100	3.11
[28]	2.37	100	[64]	100	11.91
[29]	84.71	300	[65]	150	16.17
[30]	143.58	350	[66]	150	27.05
[31]	146.85	350	[67]	100	7.90
[32]	67.24	250	[68]	100	3.99
[33]	62.88	250	[69]	100	0.29
[34]	26.19	150	[70]	100	1.58
[35]	21.63	150	[71]	100	4.70
[36]	3.17	100	[72]	100	8.22

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, L.S.; RAMOS, H.; COELHO, S.T. Pressure Control for Leakage Minimisation in Water Distribution Systems Management. *Journal Water Resources Management*, v.20, n.1, p. 133-149, 2006.

CUI, L.; KUCZERA, G. Optimizing urban water supply headworks using probabilistic search methods. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v.129, n.5, p. 380-387, 2003.

CUNHA, M.D.C.; SOUSA, J. Water distribution network design optimization: simulated annealing approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v.125, n.4, p. 215-221, 1999.

EIGER, G.; SHAMIR, U.; BEN-TAL A. Optimal design of water distribution networks. *Water Resources Research*, v.30, n.9, p. 2637-2646. 1994.

EUSUFF, M.M., LANSEY, K.E., Optimization of Water Distribution Network Design Using the Shuffled Frog Leaping Algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v.129, n.3, p. 210-225, 2003.

GOMES, H. Sistemas de abastecimento de água - Dimensionamento econômico. 2 ed. João Pessoa: Editora Universitária / UFPB, 2004, 242.

GOMES, H., FORMIGA, K.T.M. PNL2000: Método prático de dimensionamento econômico de água. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre: ABRH, v. 6, n. 4, p. 91-108, 2001.

JACOBY, S. Design of optimal hydraulic networks. Journal of Hydraulic Division, ASCE, 94, KY3, p. 641-661, 1968.

JIMÉNEZ M., M.R.; RODRÍGUEZ, K.; FUENTES M., O.A.; DE LUNA C., F. Diseño óptimo de redes utilizando um algoritmo genético. In: GOMES, H.; GARCIA, R.; REY, L.I. (Org.). Abastecimento de Água - O Estado da Arte e Técnicas Avançadas. 1 ed. João Pessoa: Editora Universitária da UFPB, 2007, único.

KALLY, E. Automatic planning of the least-cost water distribution network. War. and War. Engng. 148-152, 1968.

KARMELI, D.; GADISH, Y.; MEYERS, S. Design of optimal water distribution networks. Journal of Pipeline Division, ASCE, 94, 10, 1-10. New York, NY, USA, 1968.

LANSEY, K.E.; MAYS, L.W. Optimization model for water distribution system design. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 115, 10, 1401-1419, 1989.

LIONG, S.Y.; ATIQUZZAMAN, M. Optimal design of water distribution network using shuffled complex evolution. J. Institution Engineers, Singapore, v.44, p. 93-107, 2004

MAIER, H.R.; SIMPSON, A.R.; ZECCHIN, A.C.; FOONG, W.K.; PHANG, K.Y.; SEAH, H.Y.; TAN, C.L. Ant Colony Optimization for the design of water distribution systems, Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v.129, n.3, p. 200-209, 2003.

PRASAD, T.D.; NAM-SIK. Multiobjective Genetic Algorithms for Design of Water Distribution Networks. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 130, n. 1, p. 73-82, 2004.

ROSSMAN, L.A. EPANET2: User's manual. U. S. Environment Protection Agency, Cincinnati, Ohio, USA, 2000.

SAVIC, D.A.; WALTERS, G.A. Genetic algorithms for least-cost of water distribution networks. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 123, n. 2, p. 67-77, 1997.

SURIBABU, C.R.; NEELAKANTAN, T.R. Design of water distribution networks using particle swarm optimization. Urban Water J. v. 3, n. 2, p. 111-120, 2006.

WU, Z.Y.; BOULOS, F.; ORR, C.H.; RO, J.J. Using genetic algorithms to rehabilitate distribution system, Journal for American Water Works Association, p. 74-85, 2001.

ZECCHIN A.C.; SIMPSON A.R.; MAIER H.R.; LEONARD M.; ROBERTS A.J.; BERRISFORD M.J. Application of two ant colony optimisation algorithms to water distribution system optimisation. Mathematical and Computer Modelling, v. 44, p. 451-468, 2006.

---

## 6 Utilização de modelo matemática para simulação da operação de sistema de bombeamento de água

---

Petrônio Vieira Júnior, André Luiz A. Mesquita, Vitor Hugo Pereira de Souza e Gleiciane Costa Moraes

Universidade Federal do Pará – UFPA – Belém - Brasil

### INTRODUÇÃO

O crescimento desordenado dos grandes centros urbanos é apontando como um grande obstáculo a ser vencido pelos sistemas de abastecimentos de água (SAA). Deste modo, objetivando atender as diversas demandas de água com pressões adequadas, as concessionárias de saneamento utilizam em larga escala as estações de bombeamento de água, para manter o sistema de distribuição de água dentro de níveis de pressão e vazão compatíveis as necessidades dos usuários. Isso faz com que a maioria das vezes a operação de bombeamento dos sistemas de abastecimento de água ocorre sem interrupções, elevando-se assim o consumo de energia elétrica.

O consumo de energia elétrica é a segunda maior despesa das empresas de saneamento, perdendo apenas para a despesa com pessoal. Segundo Tsutiya (2004), o consumo de energia elétrica em sistema de abastecimento de água é da ordem de 0,6 kWh por m<sup>3</sup> de água produzida, ocorrendo 90% dessa despesa nos motores elétricos utilizados nas estações elevatórias de água. Logo a necessidade de redução de custos de energia elétrica tem sido uma preocupação constante entre as empresas de saneamento.

Em sistema de bombeamento de água há variações na demanda de vazão diária e o reservatório deve ser abastecido de água para atender a demanda solicitada. Se em determinada hora do dia há um elevado consumo de água, baixando o nível do reservatório com maior rapidez, faz-se necessário que o sistema de bombeamento reponha essa água para atender o consumo. Por outro lado, se o consumo de água é baixo, o sistema de bombeamento deverá repor essa vazão na mesma proporção que está sendo usada. Para que este processo ocorra de forma eficiente, utiliza-se métodos para controlar a vazão fornecida ao reservatório.

Alguns controles de vazão, utilizados atualmente nos sistemas de bombeamento de abastecimento de água, onde o controle é realizado mantendo-se a velocidade constante do conjunto motor/bomba, existe um grande desperdício energia elétrica. Segundo Américo (1996), os métodos mais utilizados para controlar a vazão mediante a operação do conjunto motor/bomba com velocidades fixas são chamados de controle *on-off*, *by pass* e válvula de controle e controle com velocidade variável.

No método *on-off*, a vazão é controlada desligando o motor quando a vazão ultrapassa um limite determinado (superior) e ligando quando há vazões abaixo de um outro limite (inferior). Neste ocorre partidas sucessivas do motor, causando maiores solicitações aos circuitos elétricos, devido às elevadas correntes de partida e desgastes mecânicos em função do maior número de operações. O número de partidas é determinado de acordo com a escolha dos níveis onde os sensores estiverem instalados. Para bombas de capacidade de vazão superior ao consumo pode-se instalar o sensor de nível inferior para atendam o nível manométrico mínimo exigido pelo sistema. Neste caso as operações não serão freqüentes, porém o custo da instalação é maior. Para bombeamento com vazão inferior ao exigido pelo consumo o nível inferior não pode estar muito abaixo do nível máximo do reservatório. Neste caso as operações costumam ser mais freqüentes.

O método *by-pass* retorna parte do fluido da descarga da bomba de volta para a sucção. Este desvio é feito através de uma válvula de controle, aumentando a abertura da válvula diminui-se a vazão da tubulação de recalque. É sem dúvida, o método menos eficiente, por isso, o menos usado para controle de vazão em plantas industriais.

No método válvula de controle, a vazão é controlada por uma válvula de estrangulamento de fluxo, chamada válvula de controle. A abertura da válvula muda conforme um sinal elétrico ou pneumático



emitido por uma malha de controle, que pode usar como referencial, a vazão, a pressão, a temperatura ou outro parâmetro do sistema, sendo vazão o referencial mais comum.

O uso da válvula de estrangulamento tem a vantagem de permitir um controle preciso da vazão do sistema, porém com um grande desperdício de energia. Seria como controlar a corrente de um circuito elétrico adicionando resistências em série.

Rodrigues (2007), explica que o uso estrangulado da válvula aumenta a perda de carga no sistema, alterando o ponto de operação (intersecção da curva da bomba com a curva do sistema), sendo progressivamente modificada as condições de funcionamento do conjunto motor/bomba até ser obtido o ponto desejado para uma determinada vazão, com a bomba operando com rotação constante.

No método de controle por velocidade variável é utilizado o acionamento eletrônico para movimentar o conjunto motor/bomba em velocidade variável, eliminando a válvula de controle. O controle da vazão com velocidade variável é feito com acionamento eletrônico que movimenta o conjunto motor/bomba, conforme a variação de demanda, permitindo economizar energia elétrica.

O controle de vazão mediante a variação da velocidade da bomba atende a solicitação de variação de vazão tão bem quanto o método válvula de controle, inclusive utilizando o mesmo sinal elétrico da malha de controle, porém com uma importante diferença, permite uma considerável economia de energia elétrica. Este método de controle de vazão com velocidade variável permite manter a curva do sistema inalterada, alterando somente a curva da bomba, atuando de maneira precisa no controle da velocidade do conjunto motor/bomba sem desperdício de energia elétrica, utilizando inversores de frequência.

Assim, a partir da utilização de inversores de frequência no sistema de bombeamento, é possível variar a potência requerida pela instalação, possibilitando a regulação das pressões permitindo, ainda, a variação de vazão sem perda de carga elevada. Com isso, o uso do inversor de frequência ocasiona a diminuição do consumo de energia elétrica e eliminação do excesso de pressão no sistema, o que reflete na redução dos valores da perda real de água e dos consumos elétricos, tanto pela redução do volume bombeado como pela operação do conjunto motor/bomba em um ponto de maior rendimento. Como vantagem adicional, os inversores de frequência atuam como dispositivos de partida suave dos motores, minimizando os inconvenientes de surto de pressão no sistema e picos na corrente elétrica. (BARROS et al, 2007).

Com a utilização de inversores de frequência na operação de conjunto motor/bomba, é possível constatar um maior controle operacional do circuito hidráulico das estações elevatória, aumentando com isso a flexibilização operacional, impactando numa maior confiabilidade do sistema de bombeamento, e distribuição mais equitativa de pressões em toda a rede de recalque, reduzindo drasticamente as tensões nas tubulações (JOSEPH; FRANCO; FERRARI FILHO, 2004).

De acordo com Barros et al. (2007), o inversor de frequência, ou variador de velocidade, é um equipamento elétrico capaz de produzir uma variação nos valores da frequência elétrica que alimenta o motor, causando uma variação de sua rotação, isso faz com que o consumo de energia elétrica seja proporcional a rotação do motor, utilizando, assim, apenas a energia necessária.

Para Tsutiya (2004) o inversor de frequência é um equipamento elétrico capaz de produzir uma variação dos valores de frequência elétrica que alimenta o motor, produzindo uma variação da sua rotação ou velocidade.

Portanto, a utilização de inversor de frequência é uma das alternativas mais eficientes para otimizar o uso de energia elétrica sem afetar a operação do sistema de bombeamento, pois permite o controle do funcionamento do conjunto motor/bomba em função da variação da demanda de água ao longo das horas do dia, sendo que ao adequar a rotação do motor promove a alteração da curva da bomba sem maiores prejuízos para a curva do sistema ou instalação.

Para se ter avaliação mais precisa e seguras dos ganhos energéticos e hidráulicos com o uso de inversor de frequência são utilizados modelos matemáticos. Assim, se esses modelos forem perfeitamente calibrados, podem reproduzir com muita precisão o desempenho do sistema real, permitindo a simulação de cenários múltiplos de operação antes da implementação de qualquer alteração na rotina operacional.

Os modelos de simulação são modelos matemáticos cujas técnicas permitem representar alternativas propostas e simular condições reais que poderiam ocorrer dentro de uma faixa de incertezas, inerentes ao conhecimento (TUCCI, 1998).

Silva; Valadão; Barros (2007) resalta que a simulação computacional tem atingido elevado grau de importância para a aquisição de conhecimento e de controle operacional de sistemas complexos. No caso

da simulação hidráulica são avaliadas as respostas do sistema face às decisões operacionais em termos das suas variáveis (pressão, vazão entre outras), sendo assim uma ferramenta essencial à rotina computacional que quantifica os objetivos estabelecidos.

Segundo Araújo (2002), a principal vantagem da simulação matemática é a flexibilidade em representar sistemas simples e complexos na forma de modelos computacionais, permitindo a tomada de decisão por um conjunto de soluções viáveis que podem ser otimizadas por técnicas específicas.

Nesse contexto, será utilizado modelo matemático para avaliar a eficiência energética de uma estação elevatória de água bruta (EEAB), tendo como foco do estudo conjunto motor/bomba controlado por inversor de frequência que atua de acordo com o nível de água no reservatório.

Para exemplificar a descrição da elaboração do modelo matemático para obtenção da economia alcançada pela utilização de inversores de frequência foram empregados dados de vazão, potência, corrente e tensão coletados durante um período de 7 dias no Sistema Bolonha, localizado na cidade de Belém do Pará.

## DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Utilizou-se o Sistema Bolonha como objeto de estudo, que tem como função o tratamento e fornecimento de água para os vários bairros da cidade de Belém do Pará, tendo como manancial o Lago Bolonha.

A água bruta captada no lago Bolonha é recalca por meio da EEAB, que tem a função de suprir o fornecimento de água não tratada de forma adequada à estação de tratamento (ETA), sendo a água tratada conduzida para os setores da zona central e de expansão, através de estação elevatória de água tratada, conforme mostrado na Figura 1.

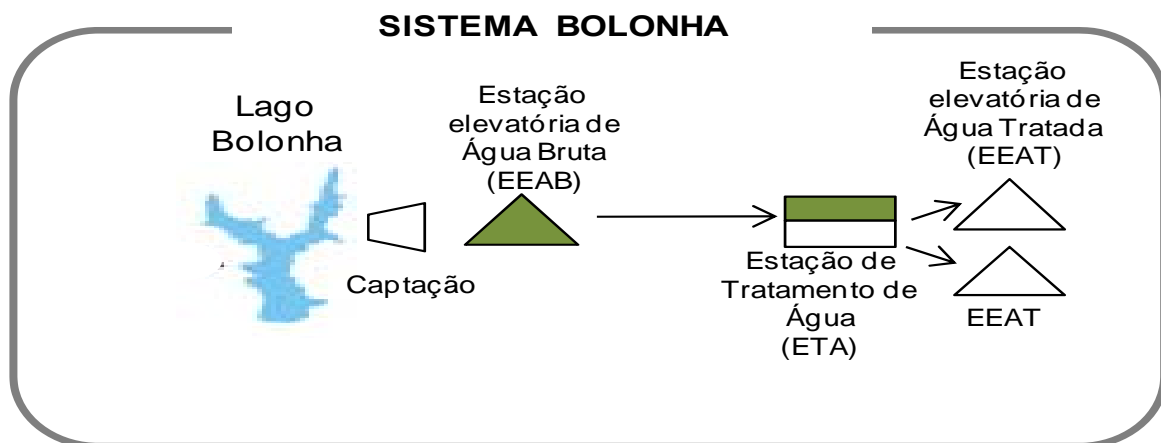


Figura 1 – Sistema Bolonha

De acordo com o consumo exigido na cidade, o controle da vazão para atendimento da ETA está relacionado com o nível de água do reservatório apoiado, operado por manuseio de válvulas controladoras de vazão, uma para cada bomba.

Para o escoamento da água na EEAB são necessárias quatro bombas centrífugas associadas em paralelo do tipo eixo vertical, marca WORTHINGTON, Modelo: 24 QL-19B-1175 rpm, rotor B possuindo vazão nominal unitária de 1,067 m<sup>3</sup>/s.

## DESCRIÇÃO DO EMPREGO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA

A Figura 2 (a) ilustra o torque aceleração disponível para o motor acelerar a partir do repouso ( $T_{motriz}-T_{carga}$ ). Nesta figura curvas características de torque velocidade arbitraria do motor ( $T_{motriz}$ ) e da carga ( $T_{carga}$ ) foram assumidas, e a interseção das curvas características da carga e do motor determinam o ponto de operação em regime.

Em motor de indução, a seguinte relação é válida:

$$\emptyset = \frac{V}{k \times f \times N} \quad (1)$$

Onde:

$\emptyset$  - fluxo por pólo;

V - tensão de alimentação;

N - número de espirais, submetidas a tensão U;

F - frequência de alimentação;

k - constante da máquina.

Caso  $\emptyset$  seja mantido constante, o torque motriz também o será. Isto pode ser conseguido variando-se proporcionalmente V e f. A Figura 2 (b) mostra a curva conjugado versus rotação para um motor assíncrono com controle de frequência a fluxo constante.

Podemos ver que toda curva torque versus velocidade move-se ao longo do eixo das velocidades sem alterar sua forma. A condição para que isto ocorra é que a relação entre a tensão e a frequência seja mantida constante (fluxo constante). O torque máximo permanece aproximadamente constante, caso isto não seja feito, haverá uma redução do torque do motor comprometendo o desempenho dinâmico.

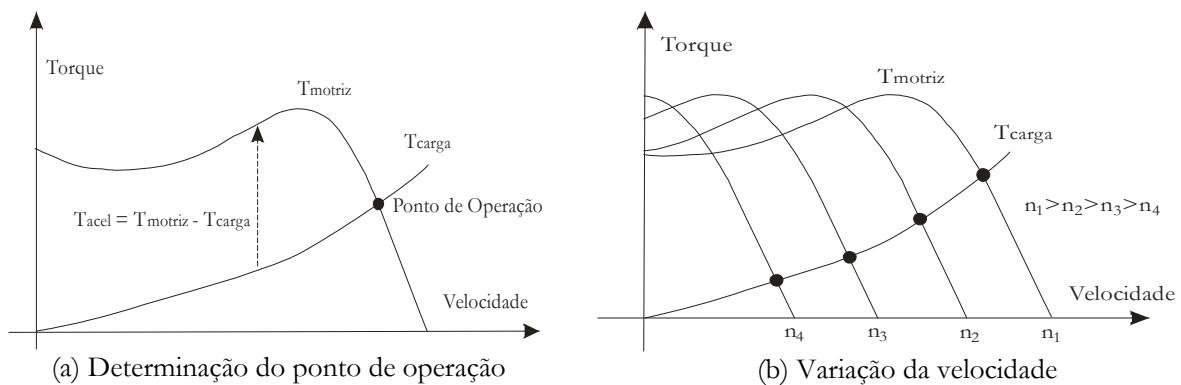
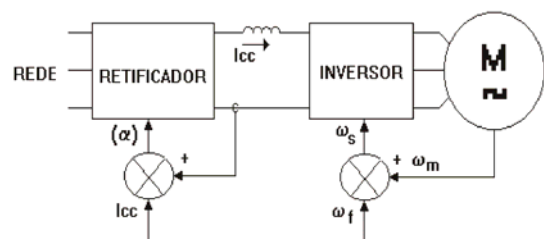


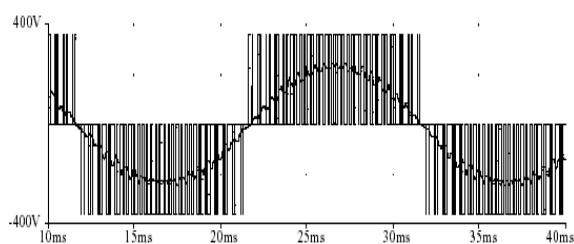
Figura 2– Verificação do comportamento do torque com a variação da velocidade usando inversor.

Inversores ou conversores CC – CA (conversor de Corrente Contínua para Corrente Alternada) são usados em acionamentos de motores CA onde o objetivo é produzir uma saída senoidal CA cuja magnitude e frequência, para alimentação do motor (saída do inversor), possam ser controladas.

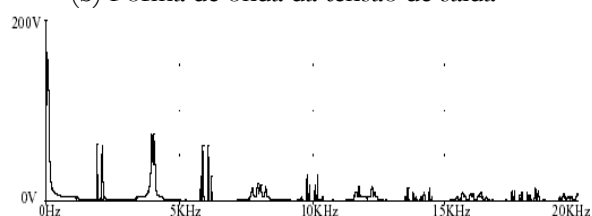
Para fornecer CA a partir de uma rede pública de alimentação, cuja frequência é fixa em 60 Hz, é necessário um estágio retificador para alimentar o inversor com corrente contínua CC, como mostra o esquema da Figura 3(a). A denominação inversor de frequência é popularmente empregada para o conjunto retificado mais inversor, onde a entrada de energia é CA e a saída é também CA. A saída do inversor possui uma forma de onda de tensão semelhante ao mostrado na Figura 3(b). Esta forma de onda não é perfeitamente senoidal e, portanto, produz harmônicas, mostradas na Figura 3(c) que podem causar problemas no sistema de energia elétrica, sobre-aquecendo condutores e transformadores elétricos, provocando interrupções indevidas devido a sinais espúrios nos circuitos de proteção, etc. Para evitar estes problemas são instalados filtros de energia. Ao inversor de frequência pode ser agregada tecnologia que permite o controle automático do processo através de Controladores Lógicos Programáveis (CLPs). Para funcionamento deste recurso é desejável a instalação, além do CLP, de transformadores de corrente (TCs) e múltiplos medidores para obtenção das medições que permitirão o controle automático, como é mostrado da Figura 3(d).



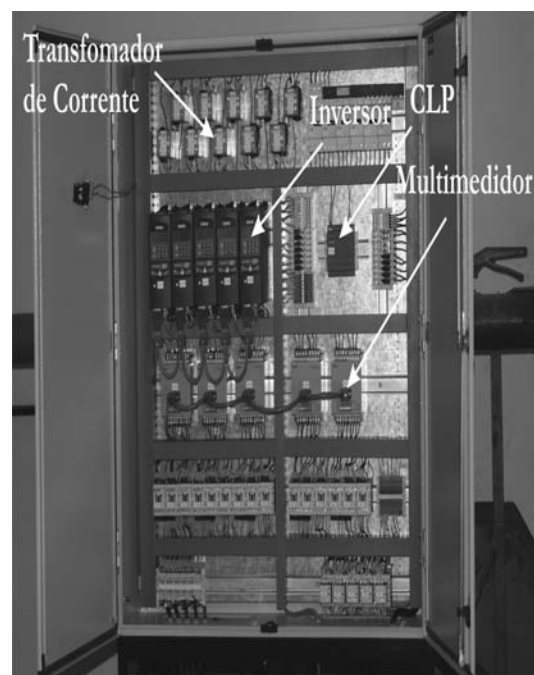
(a) Esquema



(b) Forma de onda da tensão de saída



(c) Harmônicas da tensão



(d) Instalação de inversores de frequência

Figura 3 – Funcionamento de inversores de frequência.

As principais características do conversor empregado na EEAB do Sistema Bolonha são listadas a seguir:

- Grau de proteção IP22;
- 150 % de sobrecarga por 1 minuto;
- 125 % de sobrecarga contínua;
- Fator de potência da fundamental próximo de 1;
- Baixa pulsação do torque e das características de operação em baixa velocidade;
- Alto rendimento do conversor e do motor;
- Quatro diferentes características  $V/f$  que podem ser parametrizada;
- Operação nos quatro quadrantes;
- Retomada automática de operação após falta de energia dentro de um tempo predeterminado.

## MODELO MATEMÁTICO

Para determinar todas as condições necessárias para a análise da simulação do sistema foi feito o diagrama do modelo matemático, representado na Figura 4, na qual estão mostradas todas as variáveis envolvidas no processo.

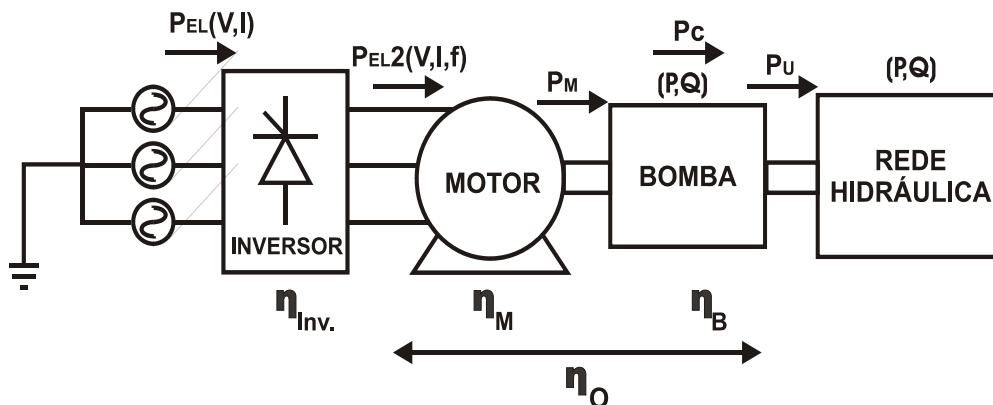


Figura 4 - Diagrama esquemático do sistema

Onde:

$P_{EL}$  - Potência fornecida pela rede de alimentação (W);

$P_{EL2}$  - Potência elétrica fornecida pelo inversor, (W);

$P_M$  - Potência fornecida pelo motor ao eixo da bomba, (W);

$P_C$  - Potência hidráulica, (W);

$P_U$  - Potência aproveitada pelo líquido para seu escoamento fora da própria bomba, (W);

$P$  - Pressão, (m);

$Q$  - vazão, (m<sup>3</sup>/s);

$\eta_{inv}$  - rendimento do inversor;

$\eta_m$  - rendimento do motor;

$\eta_B$  - rendimento da bomba;

$\eta_O$  - rendimento global.

## VARIÁVEIS DO PROCESSO

A velocidade do conjunto motor/bomba é um dos fatores que influencia nas curvas características das bombas, permitindo assim prever seu desempenho quando operando em condições diferentes das previamente estabelecidas.

Como valem para pontos homólogos, ou seja, pontos de mesmo rendimento, a variação de velocidade atua na vazão ( $Q$ ), na altura total da elevação ( $H$ ) e na potência de eixo ( $P$ ), da seguinte maneira:

A vazão varia proporcionalmente com a velocidade;

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1} \tag{2}$$

A pressão varia proporcionalmente com o quadrado da velocidade;

$$\frac{H_2}{H_1} = \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 \tag{3}$$

A potência varia proporcionalmente com o cubo da velocidade.

$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^3 \tag{4}$$

Com essas relações, é possível construir uma família de curvas de rendimento da bomba para várias velocidades a partir da curva de velocidade nominal. A tabela 1 obtida com o auxílio das relações acima mostra como se comportam as variáveis para diferentes valores de velocidade. Sendo esse o ponto chave para a economia de energia com velocidade variável.

Tabela 1 - Comportamento das variáveis do sistema com a velocidade

Velocidade (%)	Vazão (%)	Pressão (%)	Potência (%)	Redução da potência (%)
100	100	100	100	0,0
90	90	81	72,9	27,1
80	80	64	51,2	48,8
70	70	49	34,3	65,7
60	60	36	21,6	78,4
50	50	25	12,5	87,5
40	40	16	6,4	93,6
30	30	9	2,7	97,3
20	20	4	0,8	99,2
10	10	1	0,1	99,9

## CURVA DO SISTEMA

No processo é preciso obter o ponto de operação do sistema adquirido a partir da curva do sistema, que é obtida a partir da equação (5):

$$H = H_0 + K \times Q^2 \quad (5)$$

Onde:

H - altura manométrica do sistema (m);

H<sub>0</sub> - altura geométrica, (m);

k - constante referente às perdas de cargas localizadas;

Q - vazão do sistema, (m<sup>3</sup>/s).

Nesta curva é apresentada a variação da altura manométrica em função da variação de vazão, ou ainda, que esta exibe o perfil da variação de energia por unidade de peso requerida pelo sistema em função da variação da vazão.

## POTÊNCIA DA BOMBA

Na Figura 4 foi apresentado o balanço de energia de um sistema hidráulico. Para este estudo a variável analisada é a potência fornecida ao líquido (P<sub>c</sub>), que é adquirido a partir da equação (6):

$$P = \frac{\gamma \times Q \times H}{\eta_m \times \eta_b} \quad (6)$$

Onde:

γ - peso específico do fluido (Kgf/m<sup>3</sup>);

Q - vazão do sistema (m<sup>3</sup>/s);

H - Altura manométrica do sistema (m);

η<sub>m</sub> - rendimento do motor;

η<sub>b</sub> - rendimento da bomba.

### SIMULAÇÃO

O método para estimar a economia de energia consiste na busca do melhor ponto de operação (ótimo) do conjunto motor/bomba.

O primeiro passo foi obter os dados de vazão do sistema Bolonha para traçar a sua respectiva curva. Esta curva é então combinada com a curva da bomba instalada no local, a qual é obtida nos catálogos do fabricante. A combinação destas curvas nos fornece o ponto de operação da bomba à rotação constante, conforme está ilustrado na Figura 5.

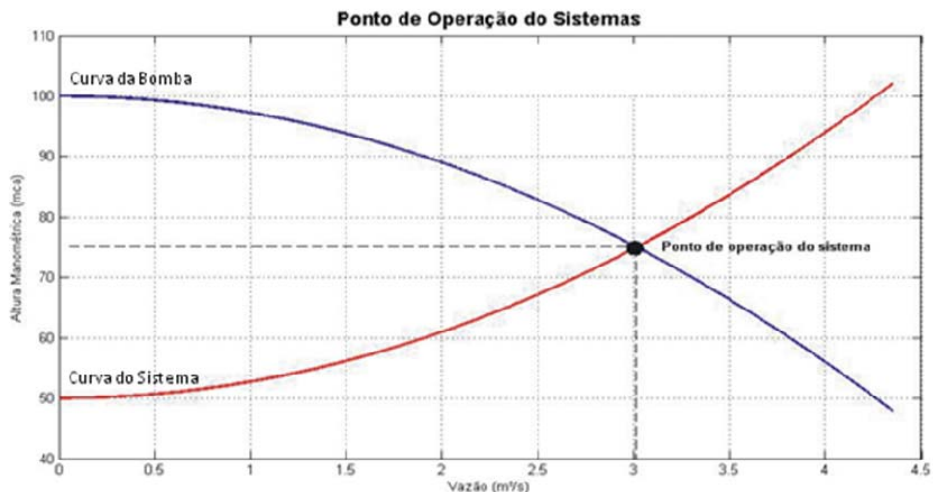


Figura 5 - Ponto de operação do sistema

Como o controle é feito por meio de válvulas ocorre a diminuição na vazão. Logo, fazendo com que ela passe a operar em outro ponto de operação. Em outras palavras, o que acontece é que a energia que se deseja retirar do líquido para que a vazão diminua agora é dissipada na válvula de controle, como está ilustrado na Figura 6.

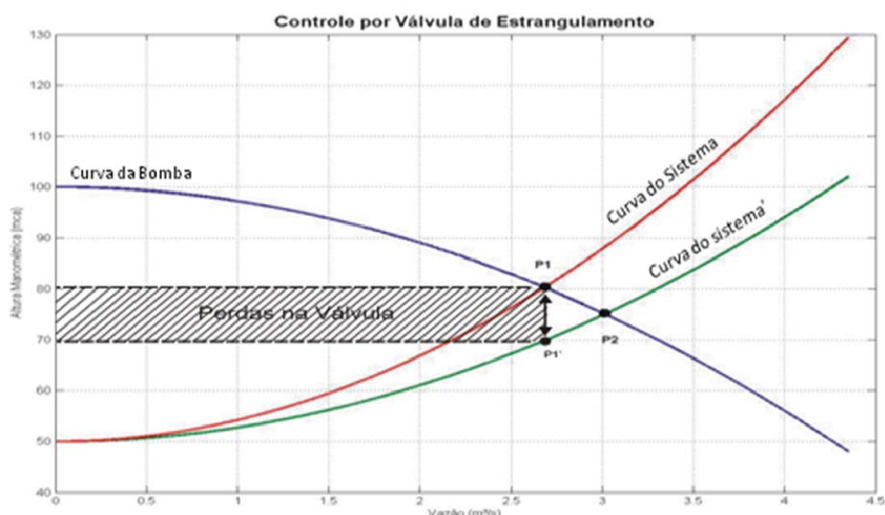


Figura 6 – Controle da vazão por meio de válvulas de estrangulamento

Para verificar como o inversor de frequência irá operar, partiu-se do gráfico do consumo médio do sistema, apresentado na Figura 7, no qual é constatado o máximo e mínimo ponto de consumo. O inversor irá atuar a partir destes pontos, diminuindo ou aumentando a rotação do motor.

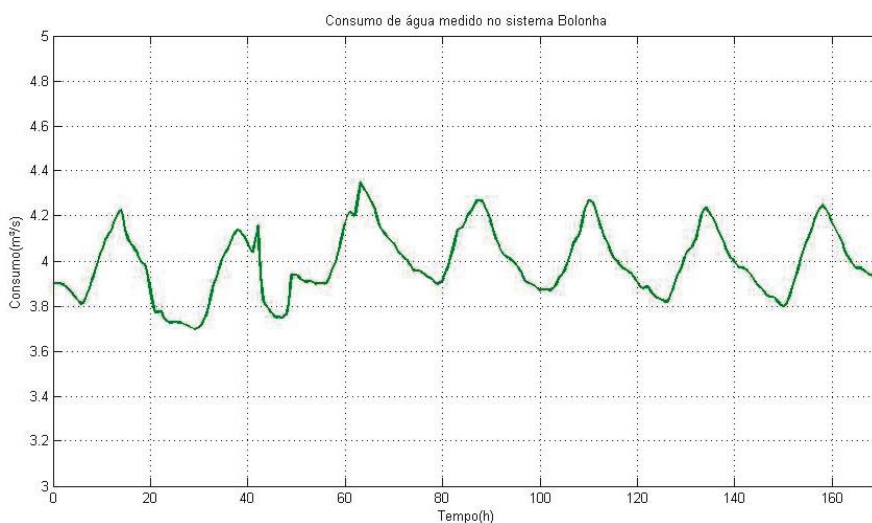


Figura 7 - Consumo Semanal.

A partir destes dados foi feito um estudo para traçar o novo ponto de funcionamento do sistema, com base na teoria da similaridade passando da rotação nominal de 1.175 rpm para 1.050 rpm, apresentado na Figura 8. Ainda nesta figura pode-se determinar a redução no consumo de energia, obtido pela diferença de área nos retângulos, indicada na área hachurada.

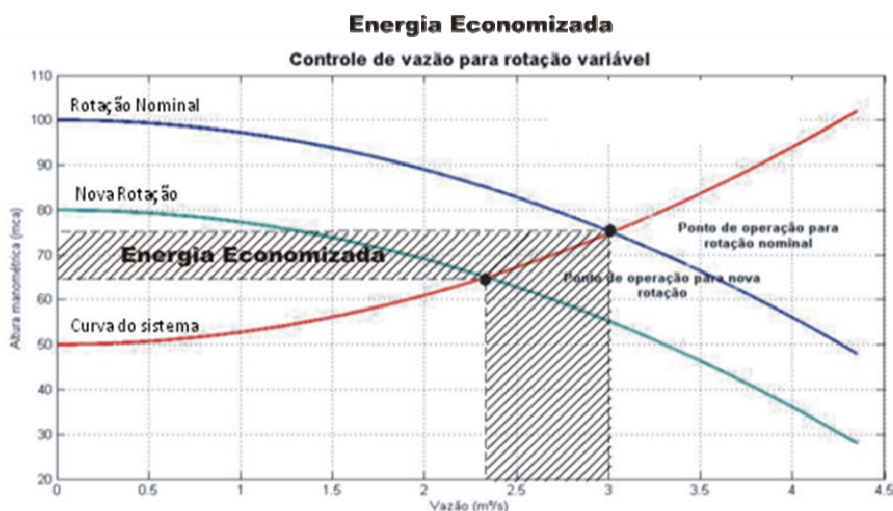


Figura 8 – Curva do Sistema com rotação variável

A partir da equação (3) traçou-se o gráfico da potência consumida semanalmente no sistema, antes e depois da instalação dos inversores. Foi notada a redução de potência consumida pelo sistema, como é visto na Figura 9.



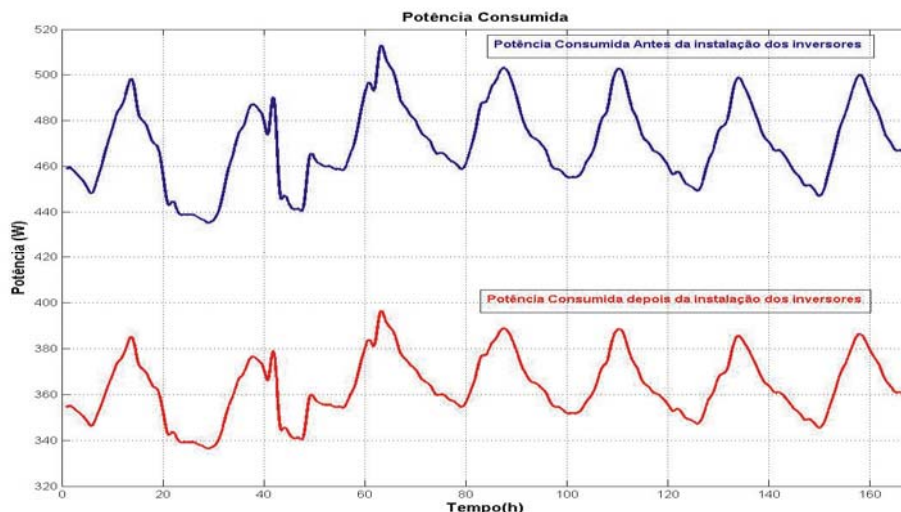


Figura 9 – Potência economizada (linha inferior) depois das instalações dos inversores de frequência

## RESULTADOS

A redução no consumo de energia com as instalações dos inversores foi de 22,7 %. A metodologia usada para o cálculo da economia de energia baseia-se na comparação do consumo médio diário (CMD) nas duas situações de teste, ou seja, sem e com acionamento eletrônico.

O percentual de economia de energia (PEE) foi calculado a partir da equação (7).

$$PEE = \left( \frac{CMD \text{ sem } Acion. - CMD \text{ com } Acion.}{CMD \text{ sem } Acion.} \right) \times 100 \tag{7}$$

Onde:

PEE - Percentual de Economia de Energia  
 CMD - consumo médio diário

O rendimento da bomba é determinado pela relação apresentada na equação (8). Conforme observado na Figura 6, a potência hidráulica da bomba foi reduzida, logo seu rendimento também foi reduzido, conforme mostrado na Tabela 2. Isso não implica que o rendimento global seja ainda menor sendo que não houve perda adicional no sistema porque as perdas em valores absolutos são menores, pois a bomba irá manejar menos potência em velocidade reduzida.

$$\eta_b = \frac{P_c}{P_{eb}} \tag{8}$$

Onde:

$\eta_b$  - Rendimento da bomba;  
 $P_c$  - Potência fornecida ao líquido, em [W];  
 $P_{eb}$  - Potência no eixo da bomba; [W].

Tabela 2 - Rendimento da Bomba

Bomba Worthington 24-QL-19B 1175 rpm		
	Potência (kW)	Rendimento ( $\eta$ )
Com inversor	36,85	0,77
Sem inversor	45,53	0,82

É importante ressaltar que em um sistema flexível a curva da bomba precisará adequar-se a determinados valores de demanda, entretanto nem sempre poderá operar no ponto de rendimento máximo, mas no que melhor se adaptar ao sistema projetado.

Além da melhoria no consumo de energia, o controle por variação de velocidade apresenta inúmeras vantagens em relação ao sistema de controle por válvulas, tais como:

- melhoria na eficiência do sistema pela intersecção da curva característica da bomba com a característica do sistema otimizando o consumo de energia com o ponto de trabalho;
- limitação da corrente de partida; partidas e paradas suaves do sistema de bombeamento, evitando picos na rede de energia elétrica e esforços na tubulação;
- aumento da vida útil da bomba devido a eliminação do desequilíbrio interno de pressões, fonte causadora do desgaste mecânico;
- eficiência otimizada de sistema de bombeamento através da obediência às variações de pressão ou fluxo.

## CONCLUSÃO

A partir da pesquisa realizada foi possível demonstrar que o método de controlar a vazão a partir da utilização de inversor de frequência permite uma grande economia de energia elétrica. Observou-se que variando a velocidade do conjunto motor/bomba é possível manter um sistema eficiente a um custo menor.

Para entendê-lo é preciso saber que o acionamento eletrônico é inserido no sistema como um elemento regulador de energia, atuando de modo a fornecer ao sistema somente a energia necessária, desde um nível mínimo até um nível máximo e assim garantindo sua flexibilidade, que resulta muito mais eficiência.

A economia de energia não é o único atrativo, há outras vantagens como a eliminação de válvulas e seu custo inicial, além do alto custo de manutenção também simplificam a rede de dutos do sistema. O método de controle da vazão por velocidade variável ainda possibilita a eliminação dos golpes de aríete e cavitação, prolongando a vida das tubulações, válvulas, cotovelos e outros elementos do sistema.

Aumento da vida útil da bomba, mancais e vedações pela diminuição do desgaste mecânico - como o sistema dotado de inversor atua na medida exata das necessidades operacionais, haverá uma preservação maior dos equipamentos e acessórios aumentando a vida útil.

Do ponto de vista ambiental, a bomba operando em velocidade reduzida normalmente produz menos ruído e vibração. Desse modo, o ajuste da velocidade permite operação mais flexível com um melhor controle sobre os parâmetros do processo, ocasionando um aumento da produtividade.

Acrescenta-se que com o motor ligado diretamente à rede, no caso de uma rápida falta de tensão ou uma sub-tensão, o processo pode ser interrompido. Já os acionamentos eletrônicos permitem acelerar novamente a máquina com o torque de plena carga até a velocidade preestabelecida.

Portanto, a utilização de inversores de frequência em sistemas de bombeamento mostra-se uma solução importantíssima e decisiva para economia de energia, pois além desse benefício contribui para o aumento da vida útil de todos os componentes envolvidos na planta de bombeamento de água.

## REFERÊNCIAS

AMÉRICO, M. **Conservação de Energia Elétrica em Processos de Bombeamento Usando Acionamentos Eletrônicos**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1996.

ARAÚJO, J. K. **Calibração de Redes de Distribuição de água pelo método inverso aplicado a escoamento transiente**, 2002. Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2002.

BARROS, Denise Pereira et al. Aplicações de inversores de frequência em sistemas de abastecimento de água. In: **Congresso Cier De La Energía**, 3., 2007, Medellín. Disponível em: <<http://sg.cier.org.uy/cdi/cier->

zeus.nsf/9a95ace4eb1b3e7b032570ad00553202/5C560ECA53EC5018832574CF00552C48/\$FILE/III%20CONCIER-BR-110-C.pdf> acesso em: 30 mai. 2010.

JOSEPH, Milton. FRANCO, Nilton. FERRARI FILHO, Dovelio. OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA EM ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE ÁGUA POTÁVEL INSTALADOS E M OPERAÇÃO NO SEMASA. In: **Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água (SAREA)**, 6, 2006, João Pessoa. Disponível em: <<http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/6serea/TRABALHOS/trabalhoO%20%285%29.pdf>> acesso em: 30 mai. 2010.

MACINTYRE, J. A. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1987.

RODRIGUES, W. **Critérios para o Uso Eficiente de Inversores de Frequência em Sistemas de Bombeamento de Água**, 2007. Tese de Doutorado (Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

SIEMENS, **Catálogo Eletrônico de Produtos**. São Paulo, 2005. Disponível em: <<http://www.siemens.com.br>> acesso em 30 mai. 2010.

SILVA, Fernando das Graças Braga da. VALADÃO, Marcus Nante. BARROS, Regina Mambelli. Simulação hidráulica de redes de abastecimento de água com o uso do epanet 2.0 – APLICAÇÃO EM SETORES DE ITAJUBÁ – M.G. In: **Simpósio de Recursos Hídricos do Centro Oeste Cuiabá**, 1., 2007, Cuiabá. Disponível em: <[http://www.abrh.org.br/novo/i\\_simp\\_rec\\_hidric\\_norte\\_centro\\_oeste88.pdf](http://www.abrh.org.br/novo/i_simp_rec_hidric_norte_centro_oeste88.pdf)> acesso em: 30 mai. 2010.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. 1ª edição. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2004.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao PROCEL SANEAR / Eletrobrás, a Companhia de Saneamento do Pará, ao Grupo de Pesquisa Hidráulica e Saneamento - GPHS/UFPA e ao Laboratório de Eficiência Energética em Saneamento - LENHS/NORTE/UFPA.

---

## **7 Estimativa da energia elétrica consumida no bombeamento do volume de água não faturado no 3º setor de distribuição de água de Belém - Pará**

---

**Gilberto Caldeira Barreto, Rodrigo Santos de Sá, João Henrique Macedo Sá e José Almir Rodrigues Pereira**

Universidade Federal do Pará - Belém, Brasil

### **INTRODUÇÃO**

Com a instituição do Plano Nacional de Saneamento - PLANASA, em 1971, a oferta de serviços públicos de abastecimento de água no Brasil teve avanços consideráveis no país que, segundo Miranda (2002), foi caracterizado por grandes obras. Essa expansão absoluta da oferta de água ocorreu com maior ênfase nas unidades de produção (captação, adutora e tratamento), tendo o setor de distribuição e as ações de desenvolvimento operacional menor atenção, recursos mais modestos e menor evolução tecnológica.

Nessa época, o bem-estar da população estava diretamente relacionado ao aumento do consumo de água, que era usada em abundância e entendida como bem inesgotável, portanto, com a sociedade tendo pouca preocupação em conter desperdícios e em promover o uso racional da água.

Por causa da crise econômica da década de 80, os investimentos em obras de saneamento diminuíram, apesar da necessidade de aumentar a oferta do serviço de abastecimento de água, e assim aconteceu por meio de soluções pragmáticas a expansão indiscriminada de redes de distribuição (MIRANDA, 2002).

Contudo, o pequeno investimento em desenvolvimento institucional, a falta de controle operacional, as expansões desordenadas das redes de distribuição de água e a cultura generalizada do desperdício, associadas às pressões urbanas resultantes do crescimento populacional descontrolado, resultaram, com o passar dos anos, na depredação dos sistemas de abastecimento de água, configurando cenário ideal para o aumento das perdas nesses sistemas.

Cheung e Reis (2006) ressaltam que infraestruturas deterioradas em sistemas de distribuição de água podem provocar perdas por vazamentos, diminuição da capacidade de transporte de água, falhas nos componentes do sistema, elevação nos custos de manutenção e operação, constantes interrupções do funcionamento dos sistemas e diminuição da sua confiabilidade, com isso perda de água e de energia elétrica.

Segundo BRASIL (2004), as perdas em sistemas públicos de abastecimento de água são consideradas como a totalidade dos volumes de água não contabilizados pela concessionária, englobando tanto as perdas reais (físicas), que representam a parcela não consumida, como as perdas aparentes (não físicas), que correspondem à água consumida e não registrada.

Para Gomes (2004), o controle operacional de um sistema de abastecimento de água ocorre quando se tem efetivamente o monitoramento e o controle dos parâmetros hidráulicos e elétricos de todas as unidades que compõe o sistema a cada instante do dia. Tsutiya (2004) resalta ser fundamental quantificar as perdas reais, o que é relativamente fácil, porque, para isso, basta obter a diferença entre o Volume Disponível ao Sistema e os Volumes Autorizados. Entretanto o rateio entre as perdas físicas e as perdas não físicas é mais complexo, e exige a adoção de diversas hipóteses ou a realização de vários ensaios de campo

Vale observar que o volume perdido de água implica em perda da energia elétrica utilizada nas estações elevatórias e de tratamento, o que, naturalmente, é diretamente relacionado com o aumento da despesa de exploração desse tipo de serviço, ou seja, perder água é perder dinheiro ou, então, transferir essa conta para terceiros, no caso específico o Estado ou os usuários do sistema de abastecimento de água.

Tsutiya (2004) resalta que o combate às perdas e ao desperdício de água implica na redução do volume de água não contabilizado, exigindo a adoção de medidas que reduzam as perdas reais e aparentes,

para diminuir os custos de produção (consumo de energia, de produtos químicos e outros), melhorar a eficiência dos serviços prestados e viabilizar o equilíbrio financeiro das prestadoras de serviços.

Assim, avaliar a operação de cada unidade do sistema de abastecimento de água, estimando as perdas de água e de energia elétrica, é estratégia importante para o estabelecimento de metas e definição das intervenções que melhorem o desempenho operacional e financeiro da concessionária responsável pelo sistema.

No caso do setor de distribuição de água, é preciso avaliar se a rede está devidamente isolada para receber o volume de água bombeado e distribuído, pois, caso contrário, esse volume projetado para o abastecimento de determinado setor pode ser transportado para outro setor, prejudicando, portanto, o consumo de energia elétrica, o faturamento e os indicadores de desempenho no setor de origem.

Nesse sentido, no presente texto são determinados os valores de perdas de água e de energia elétrica relacionados com o volume de água não consumida no 3º setor da zona central da Região Metropolitana de Belém.

## DESENVOLVIMENTO

Como área de estudo foi utilizada o 3º setor de abastecimento de água, que atende 94.289 habitantes da área central do município de Belém, capital do Estado do Pará. Esse setor integra o sistema Utinga – São Braz – 1º, 2º e 3º setor, é gerenciado pela Companhia de Saneamento do Pará – COSANPA e constituído pelas unidades de reservação, elevação e rede de distribuição de água, conforme representado na Figura 1.

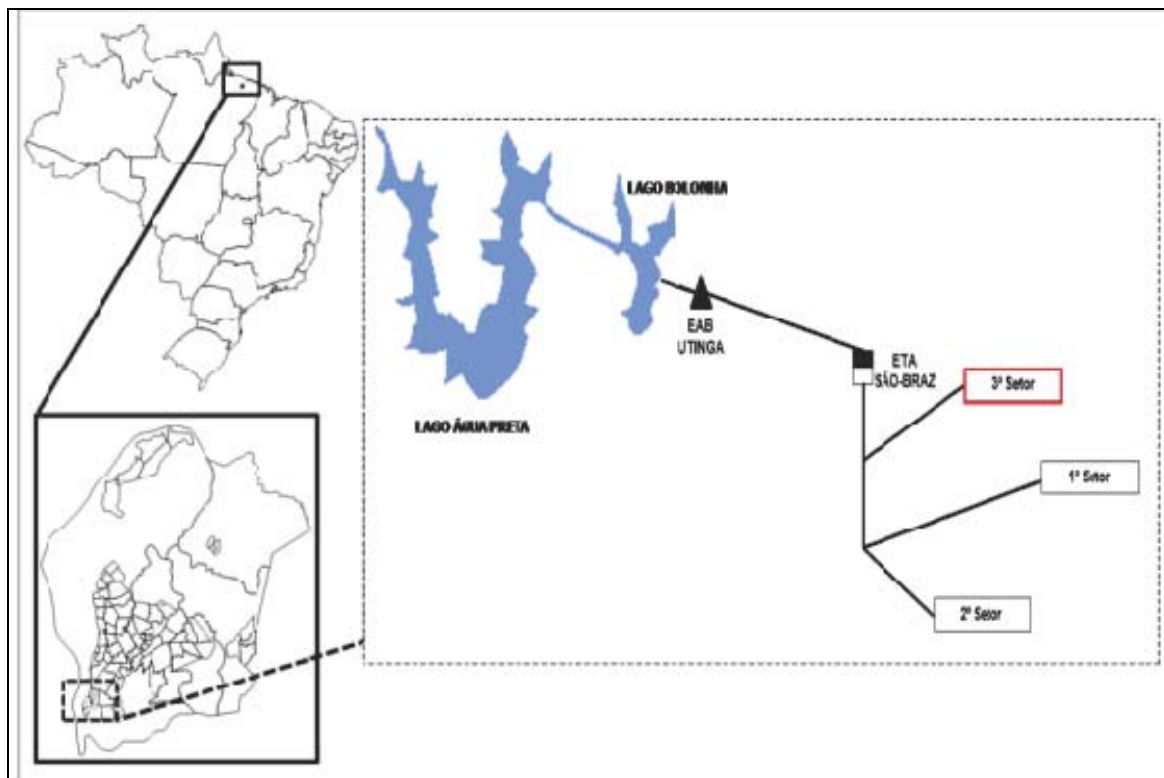


Figura 1 – Sistema Utinga – São Brás – 1º, 2º e 3º setor abastecimento de água da RMB.

A água bruta captada em manancial superficial é tratada na ETA São Brás antes de ser encaminhada para os 3 setores de distribuição de água. O volume encaminhado ao 3º setor é armazenado em reservatório apoiado de concreto armado (8.600 m<sup>3</sup>, altura útil de 5,60m). Em seguida, o volume de água é recalcado por 3 conjuntos motor e bomba - CMB, do tipo centrífuga com acoplamento (motor trifásico), potência de 150 CV, vazão nominal de 868 m<sup>3</sup>/h, altura manométrica de 35 metros e rotor de 11 ½", para reservatório elevado cilíndrico em concreto armado (320 m<sup>3</sup>, altura do fundo de 20,40 metros e altura do

copo de 7,50 metros), quando, então, é distribuído por gravidade para a rede de distribuição de água do 3º setor, conforme ilustrado na Figura 2. Contudo, a falta de setorização faz com que parte do volume de água seja exportado para outros setores, muitas vezes sem que essa passagem seja controlada pela concessionária.

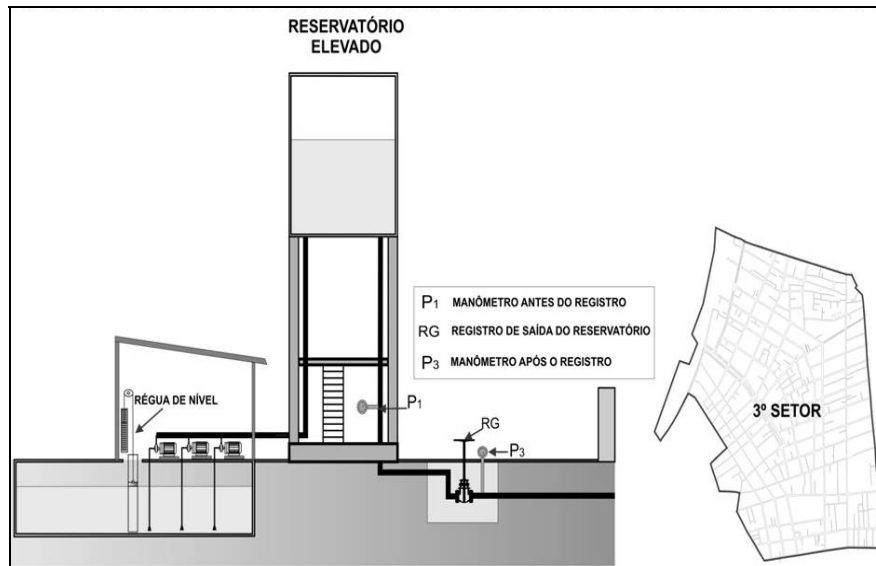


Figura 2 – Layout das unidades reservação e elevação do 3º Setor de abastecimento de água da RMB.

O trabalho foi desenvolvido no período de janeiro a dezembro de 2006, tendo 3 etapas. O objetivo da primeira etapa foi a determinação teórica de parâmetros operacionais, para possibilitar a comparação com os parâmetros obtidos na etapa 2, na qual foram desenvolvidas atividades de monitoramento das unidades de reservação e de elevação de água. Na terceira etapa foram estimadas as perdas de água e energia elétrica no 3º Setor.

## ETAPA 1 - DETERMINAÇÃO TEÓRICA DE PARÂMETROS OPERACIONAIS

Nessa etapa foi avaliada a operação do sistema de abastecimento de água, de acordo com os requisitos observados no projeto de engenharia. Para isso foram calculados:

- O “consumo efetivo teórico de água” (demanda média),
- O “consumo efetivo teórico de água” para o dia de maior demanda,
- O “consumo efetivo teórico de água” para o dia e hora de maior demanda,
- Os volumes de reservação dos reservatórios apoiado e elevado,
- A potência de operação dos CMBs da estação elevatória de água tratada;
- O consumo de energia teórica da estação elevatória de água tratada.

No “consumo efetivo de água” foi considerando que cada pessoa abastecida utiliza 200 litros de água por dia. Para o “consumo teórico de energia elétrica” foram considerados: vazão de projeto, altura manométrica teórica e rendimento teórico das bombas e dos motores.

## ETAPA 2 - AVALIAÇÃO DA OPERAÇÃO DO 3º SAA

Essa etapa foi dividida em 4 fases, para avaliação da operação do 3º setor de abastecimento de água da Região Metropolitana de Belém:

### Fase 1 - Monitoramento da operação do reservatório apoiado

O objetivo dessa fase foi acompanhar a operação do reservatório apoiado por 48 horas consecutivas, sendo verificada a variação do nível d'água, o volume de reservação de água mantido rotineiramente na unidade e a instrumentação disponibilizada para controle do nível d'água e das vazões de entrada e saída do reservatório. Nessa fase também foram analisadas as planilhas de controle operacional da COSANPA referentes ao mês de agosto de 2006, especialmente os dados relacionados com o nível do reservatório apoiado.

## **Fase 2 - Monitoramento da operação da estação elevatória**

O monitoramento das atividades operacionais da estação elevatória do 3º setor foi realizado durante 48 horas consecutivas, sendo verificado o funcionamento dos CMBs a cada hora, com o registro horário dos acionamentos ou desligamentos dos motores. Também foi instalado analisador de energia tipo MI 2192 METREL no quadro de comando, para possibilitar o monitoramento dos valores de tensão e de corrente durante a operação dos CMBs, sendo esses dados registrados de um em um minuto. Nessa Fase ainda foi verificado o consumo de energia elétrica a cada hora.

Os dados de tensão e corrente foram convertidos em potência e energia kWh, e obtidos os valores médios para cada hora, sendo, então, analisadas as planilhas de controle operacional da COSANPA referentes ao mês de agosto de 2006, especialmente as informações de horário de funcionamento dos CMBs.

Finalizado essa fase foram analisadas as planilhas de controle mensal da COSANPA referentes à distribuição de água e ao consumo de energia elétrica no 3º setor do período de outubro de 2005 a setembro de 2006.

## **Fase 3 - Monitoramento da operação do reservatório elevado**

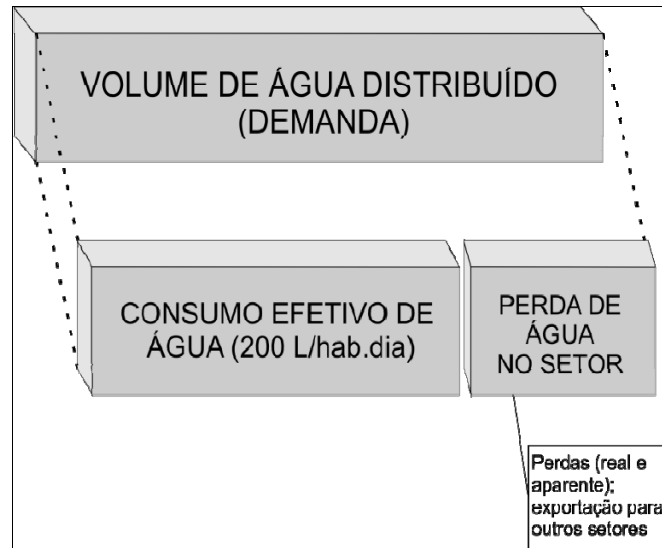
Foi realizado o acompanhamento da operação do reservatório elevado por 48 horas consecutivas, sendo verificada a variação do nível da lâmina líquida, o volume de água reservado na unidade e a instrumentação disponibilizada para controle do nível d'água e das vazões de entrada e saída do reservatório. Também foi obtido o hidrograma de vazão e analisadas as planilhas de controle operacional da COSANPA referentes ao mês de agosto de 2006, especialmente os dados relacionados com o nível do reservatório elevado.

## **Fase 4 – Identificação das Interligações da rede de distribuição do 3º setor**

Foram levantadas as informações do projeto e do cadastro técnico da rede de distribuição de água do 3º setor, sendo identificadas as tubulações que transportavam água distribuída do 3º setor para outros setores. Nesse levantamento foram identificadas as localizações, os diâmetros e tipo de material das tubulações.

## **ETAPA 3 – ESTIMATIVA DA PERDA DE ÁGUA E ENERGIA NO 3º SAA**

Nessa Etapa 3 foi definida a perda de água como a diferença entre o “volume de água distribuído” e o “consumo efetivo teórico de água”. O volume correspondente ao “consumo efetivo teórico de água” foi calculado com base na população abastecida no 3º setor no ano de 2006, considerando o valor per capita líquido (consumo efetivo) de 200 L/hab.dia, conforme apresentado no Esquema 1.



Esquema 1 – Definição de perda de água em sistema de abastecimento de água.

Os dados das vazões distribuídas foram obtidos no setor de pitometria da COSANPA, e foram referentes ao período de outubro de 2005 a setembro de 2006.

O consumo de energia na estação elevatória foi determinado por meio da instalação de analisador de qualidade de energia tipo MI 2192 METREL em um dos 3 CMBs, no caso o CMB-01. Os dados de tensão e corrente, obtidos para um período de 48 horas consecutivas de operação do CMB-01, possibilitaram o cálculo da energia consumida, com esse resultado extrapolado para os dois outros conjuntos motor e bomba.

A perda de energia foi estimada em função do “volume de água perdido” no sistema de abastecimento de água do 3º Setor, e da relação “kWh/m<sup>3</sup>” obtida na segunda fase da Etapa 2 no monitoramento da operação da estação elevatória.

Nesta etapa também foram estimados os custos com a produção de água, especialmente os custos com o consumo de energia elétrica. Esses valores foram calculados com base nos dados obtidos das planilhas de controle mensal da COSANPA.

## RESULTADOS

Nessa etapa foram calculados o consumo efetivo teórico de água e o consumo teórico de energia elétrica e adotados os seguintes parâmetros. Vale observar que esses consumos foram determinados considerando a operação do 3º setor de distribuição de água, de acordo com as condições ideais de projeto:

- Abastecimento de toda população no ano de 2006: 94.289 habitantes;
- Consumo per capita efetivo: 200 L/hab.dia;
- Coeficiente do dia de maior demanda:  $K1 = 1,20$ ;
- Coeficiente do dia e hora de maior demanda:  $K1 = 1,50$ ;
- Funcionamento dos CMBs: 16 horas diárias;
- Aceleração da gravidade:  $9,80 \text{ m/s}^2$ ;
- Operação dos CMBs: 2+1 (dois CMBs operando, e um CMB reserva);
- Coeficiente de Hazen Willans:  $C=100$  (tubo velho) e  $C=140$  (tubo novo).

A soma dos valores do consumo efetivo e das perdas resulta na demanda de água, que no Plano diretor do Sistema de Abastecimento de Água da RMB foi estabelecida em 250 L/hab.dia.

No Quadro 1 são apresentados os parâmetros operacionais teóricos calculados para o 3º Setor.



Quadro 1– Parâmetros operacionais teóricos do 3º setor de abastecimento de água da Região Metropolitana de Belém.

PARÂMETROS	VALOR
a) Consumo efetivo teórico de água médio, em m <sup>3</sup> /mês	565.733
b) Volume total de reservação, em m <sup>3</sup>	4.322,02
- Volume do reservatório apoiado, em m <sup>3</sup> (2/3 do volume total)	2.881,34
- Volume do reservatório elevado, em m <sup>3</sup> (1/3 do volume total)	1.440,67
c) Potência Teórica do CMB (kW)	58
d) Funcionamento dos CMBs (horas/dia)	16
e) Consumo mensal de energia em kWh (considerando dois CMBs em operação)	55.680
f) Custo mensal com energia, em R\$ (considerando dois CMBs em operação)	11.136,00
g) Consumo de energia em kWh/m <sup>3</sup>	0,08

### **AVALIAÇÃO DA OPERAÇÃO DO 3º SETOR DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

Em relação à estrutura e a operação do reservatório apoiado, da estação elevatória e do reservatório elevado foram identificados os seguintes problemas:

#### **Reservatório apoiado**

- A instrumentação disponível é insuficiente e inadequada para o monitoramento dos parâmetros operacionais, no caso o nível de água e as vazões de entrada e saída do reservatório;
- Apesar do volume do reservatório apoiado (8.600 m<sup>3</sup>) ser quase 3 vezes superior ao volume de reservação necessária (2.881 m<sup>3</sup>), 45% desse volume não era utilizado na operação do 3º Setor.

#### **Estação elevatória**

- Não há instrumentação para controle operacional, ou seja, não existe série histórica de dados de vazão, pressão e consumo de energia elétrica etc.
- A operação dos CMBs não ocorre de acordo com o previsto no projeto do 3º Setor, ou seja, não é do tipo “2+1”. Atualmente os 3 CMBs operam diariamente em operação do tipo “1+2” (funcionamento de apenas 1 CMB), do tipo “2+1” (funcionamento de dois CMBs) e do tipo “3+0” (funcionamento de 3 CMBs, simultaneamente);
  - Esses CMBs são operados com a seção de saída estrangulada por registro do tipo gaveta, o que altera a perda de carga e reduz a eficiência;
  - O acionamento dos conjuntos motor e bomba é do tipo Partida Direta, mais conhecida como “partida On/Off”. Nesse tipo de partida o motor inicia a operação com corrente superior a corrente nominal, o que resulta em potência muito superior à potência nominal, aumentando principalmente o custo com energia. As “partidas On/Off” também aumentam o desgaste dos equipamentos eletromecânicos, diminuindo a vida útil dos mesmos, com possibilidade de paralisação na operação para troca ou manutenção dos CMBs.
  - Nos horários de ponta, em que o custo da energia elétrica no Estado do Pará é três vezes mais caro, não há paralisações dos CMBs, tendo 20% das horas totais trabalhadas nesse horário com operação do tipo 3+0 (3 CMBs funcionando simultaneamente);
  - Não há rotina operacional de funcionamento dos CMBs, não sendo bem definidos os períodos de operações dos tipos 1+2, 2+1 e 3+0.

### Reservatório elevado

- A instrumentação para controle do reservatório elevado é insuficiente e inadequada. O monitoramento do nível de água é realizado indiretamente por meio de réguas e manômetros, e a vazão de saída do reservatório elevado é medida por meio de tubo de Pitot, porém essa medição não é contínua;
- O volume do reservatório elevado é cerca de 22,22% da reserva teórica calculada para o reservatório elevado do 3º Setor, o que requer maior capacidade de operação dos CMBs na tentativa de manutenção de pressão na rede de distribuição de água.

### PERDA DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA NO 3º SETOR DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Com base no relatório operacional da COSANPA, em média foram distribuídos 989.580 m<sup>3</sup>/mês de água no período de outubro de 2005 a setembro de 2006, com os valores máximo e mínimo de 1.076.400 m<sup>3</sup>/mês e 69.040 m<sup>3</sup>/mês, respectivamente, conforme apresentado na Figura 3.

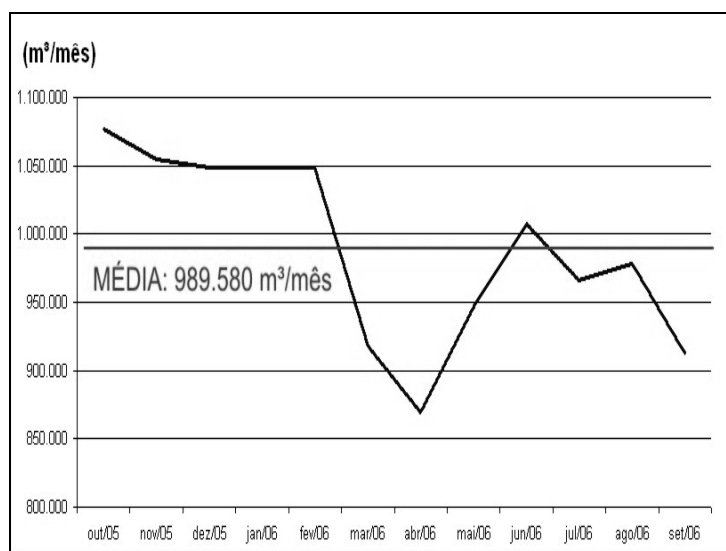


Figura 3 – Volume de água distribuído no 3º Setor de abastecimento de água da RMB no período de outubro de 2005 a setembro de 2006.

Considerando o volume médio de água distribuído no 3º setor de 989.580 m<sup>3</sup>/mês e a população abastecida de 94.289 habitantes, foi obtido o valor médio da demanda de água per capita de 349,84 L/hab.dia. Esse valor excede em 39,94% o valor da demanda média (250 L/hab.dia) recomendada no Plano Diretor do sistema de abastecimento de água da Região Metropolitana de Belém-PA (200L/hab.dia de consumo efetivo e 50L/hab.dia de perda aceitável).

Com isso, a estimativa do volume perdido de água no 3º Setor foi realizada considerando-se:

- Volume médio de água distribuído por mês, do período de outubro de 2005 a setembro de 2006;
- Demanda média de água do Plano diretor do sistema de abastecimento de água da RMB (250 L/hab.dia, sendo 200L/hab.dia de consumo efetivo e 50L/hab.dia de perda aceitável);
- Perda calculada como a diferença entre o volume distribuído e o volume correspondente ao consumo efetivo de água de 200L/hab.dia).

Assim, considerando o valor do consumo efetivo de 200L/hab.dia previsto no Plano diretor do sistema de abastecimento de água da RMB e o volume de água distribuído no período de outubro de 2005 a setembro de 2006, foi obtido o valor médio da perda do volume de água de 423.847 m<sup>3</sup>/mês (42,58 %), que corresponde ao volume efetivamente perdido na rede do 3º setor somado ao volume exportado para outros setores.

Na Figura 4 é mostrado o valor da perda média mensal do volume de água no 3º setor de abastecimento de água da RMB.

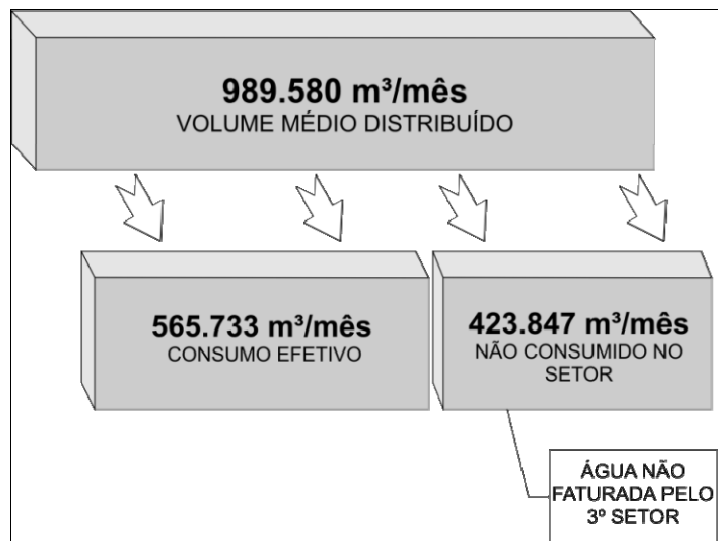


Figura 4 - Perda média mensal do volume de água no 3º setor de abastecimento de água da RMB.

Na Figura 5 é mostrado o valor percentual da perda de água no período de outubro a setembro de 2006.

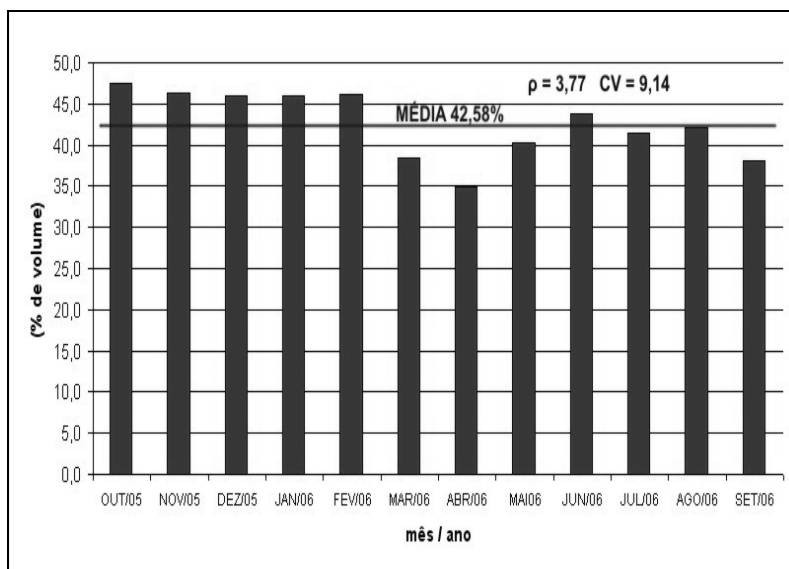


Figura 5 – Perda média de água em percentual no 3º Setor de abastecimento de água da Região Metropolitana de Belém no período de outubro de 2005 a setembro de 2006  
Fonte: Companhia de Saneamento do Pará, 2006.

### CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

Na Tabela 1 são apresentados os consumos de energia elétrica medidos na elevatória do 3º setor e o volume de água bombeado no período de 15h00min do dia 08/08/2006 às 13h00min do dia 09/08/2006.

Tabela 1: Informações do consumo de energia elétrica medido no período de 15h00min do dia 08/08/2006 às 13h00min do dia 09/08/2006 na elevatória do 3º Setor.

HORA	VOLUME BOMBEADO (m <sup>3</sup> )	TOTAL (kWh)
15h00min	1.704,83	483,57
16h00min	1.674,19	479,91
17h00min	1.633,31	476,61
18h00min	1.576,34	326,98
19h00min	1.498,59	325,92
20h00min	1.340,70	327,36
21h00min	1.338,02	324,00
22h00min	1.012,76	158,62
23h00min	660,76	158,62
24h00min	596,91	158,62
01h00min	627,04	158,62
02h00min	632,82	158,62
03h00min	637,64	158,62
04h00min	679,67	158,62
05h00min	907,02	317,25
06h00min	1.267,72	317,25
07h00min	1.529,75	317,25
08h00min	1.589,31	317,25
09h00min	1.661,16	317,25
10h00min	1.704,51	377,55
11h00min	1.705,89	495,33
12h00min	1.759,28	485,94
13h00min	1.768,03	479,31
<b>TOTAL</b>	<b>29.506,25</b>	<b>7.279,10</b>

O consumo total de energia elétrica no período avaliado foi de 7.279,07 kWh, sendo verificado que os horários de maior e de menor consumo de água foram as 13h00min e as 24h00min, respectivamente.

No período do estudo foi observado volume de água bombeado na estação elevatória de 29.506,25 m<sup>3</sup>, com consumo médio de energia elétrica no bombeamento da ordem de 0,25 kWh/m<sup>3</sup> (Figura 6).

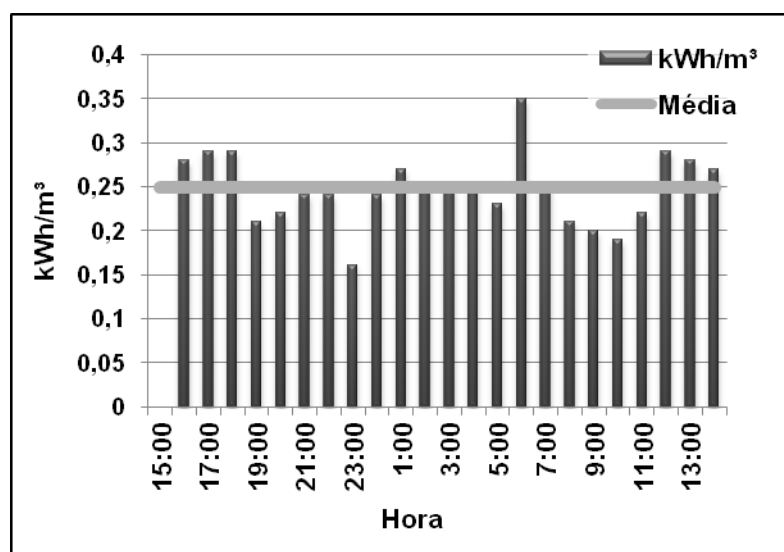


Figura 6 – Consumo médio de energia elétrica na elevatória do 3º Setor de abastecimento de água da RMB no período de 15:00 do dia 08/08/2006 às 13:00 do dia 09/08/2006.

**PERDA DE ENERGIA ELÉTRICA EM kWh E EM R\$**

A perda de energia elétrica relativa ao volume de água perdido (não faturado) no 3º setor foi calculada pela multiplicação do volume médio de água perdido (perda na rede e exportação) no 3º Setor (**423.847 m<sup>3</sup>/mês**) com o consumo médio de energia (**0,25 kWh/m<sup>3</sup>**), conforme a Equação 1:

**$P=423.847 \text{ m}^3/\text{mês}$**  (volume médio mensal de água perdida no 3º Setor);

**$E=0,25 \text{ kWh}/\text{m}^3$**  (consumo médio de energia na EE do 3º setor);

$$P_E = P \times E \quad (1)$$

$$P_E = P \times E = 423.847 \times 0,25$$

$$P_E = 105.962 \text{ kWh}/\text{mês} \text{ (perda mensal de energia)}$$

O custo mensal com a energia elétrica consumida no bombeamento do volume de água não faturado no 3º Setor foi estimado pela multiplicação da perda de energia elétrica (105.962 kWh/mês) pelo custo unitário da energia (que no caso do 3º setor foi de **0,20 R\$/m<sup>3</sup>**), conforme Equação 2:

$$C = (\text{custo unitário da energia}) \times (\text{Perda EE}) \quad (2)$$

$$C = (0,20) \times (105.962)$$

$$C = \text{R\$ } 21.194,40 \text{ (custo mensal com energia perdida)}$$

Portanto, a perda mensal com o custo da energia elétrica consumida no bombeamento da água perdida no 3º Setor foi de R\$ 21.194,40, conforme mostrado na Figura 7.

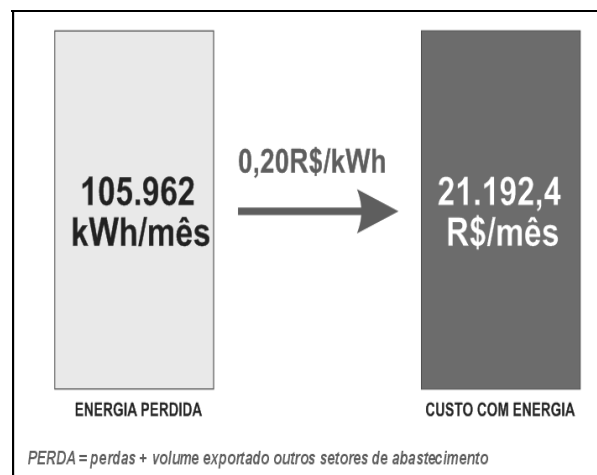


Figura 7 - Perda de energia elétrica no 3º Setor de abastecimento de água da RMB.

Considerando o consumo e o custo médio mensal de energia elétrica utilizada no bombeamento do volume de água não faturado (perdido e exportado) no 3º setor de abastecimento de água da RMB, a perda anual de energia elétrica foi estimada em 1.271.544 kWh, o que representa prejuízo de R\$ 254.308,80 ao ano.

É importante observar que o volume perdido de água é decorrente de vazamentos, consumos clandestinos e problemas de arrecadação no 3º Setor de abastecimento de água, bem como do volume

exportado do 3º setor para outros setores. Vale observar que esse volume exportado não é monitorado e nem controlado.

Assim, parte da água distribuída no 3º setor é exportada para os setores adjacentes (1º, 2º e 8º setor), por 9 (nove) tubulações que estão interligando esses setores sem que a COSANPA tenha instalado macromedidor para registro das vazões que podem estar entrando (vindo do 1º, 2º e 8º setores) ou saindo do 3º Setor para os setores adjacentes. Na Figura 8 e no Quadro 2 são apresentadas as localizações das tubulações que interligam tais setores.

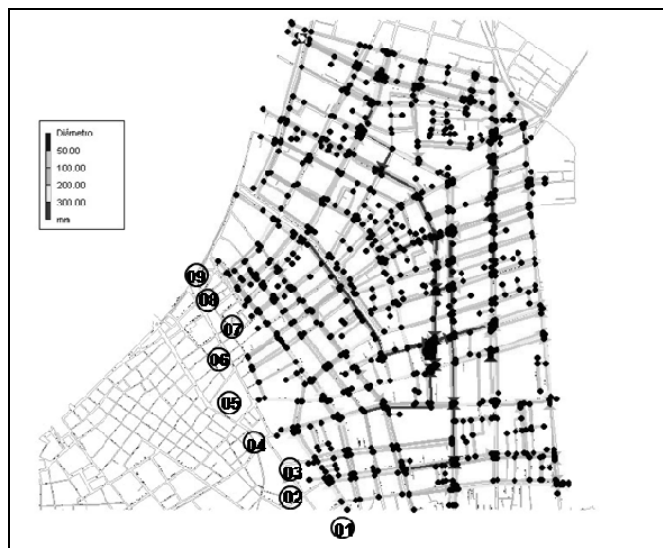


Figura 8– Pontos de Interligações do 3º setor de abastecimento de água com setores adjacentes da RMB.  
Fonte: Cosanpa (2006).

Quadro 2 – Trechos de interligação do 3º setor com o 1º, 2º e 8º setores de abastecimento da Zona Central da RMB.

Fonte: Cosanpa (2006).

Nº	LOCALIZAÇÃO	DIÂMETRO (mm)	SETOR INTERLIGADO
01	Av. Conselheiro Furtado com Trav. Dr. Moraes.	300	8º setor
02	Av. Gentil Bittencourt com Dr. Moraes.	75	1º setor
03	Trav. Dr. Moraes com Av. Braz de Aguiar.	75	1º setor
04	Trav. Dr. Moraes com Av. Nazaré.	200	1º setor
05	Av. Governador José Malcher com Trav. Piedade	200	2º setor
06	Rua Aristide Lobo com Trav. Benjamim Constant.	100	2º setor
07	Trav. Benjamim Constant com Trav. Ó de Almeida.	250	2º setor
08	Trav. Benjamim Constant com Rua Manoel Barata	75	2º setor
09	Trav. Benjamim Constant com Rua 28 de Setembro	200	2º setor

## CONCLUSÕES

No trabalho foi possível observar que a falta de instrumentação para monitoramento e o volume insuficiente do reservatório elevado dificultam o controle e a operação das unidades do 3º Setor. Assim, as decisões operacionais são realizadas empiricamente, de acordo com a experiência do operador. Essa falta de controle e registro de dados operacionais acabou provocando perdas de água e energia elétrica, demonstrando, portanto, a necessidade de planejamento e implementação de rotina de controle operacional.

Durante o período avaliado foram distribuídos 989.580 m<sup>3</sup> de água por mês no 3º Setor. Desse volume, 57,42 % foram efetivamente consumidos para atender a demanda de água dos 94.289 habitantes atendidos (consumo per capita efetivo de 200 L/hab.dia). Com isso, os 42,58 % (423.847 m<sup>3</sup>) restantes foram considerados como perda de água decorrentes de vazamentos, transbordamentos, ligações clandestinas e/ou água exportada para outros setores, devido às interligações na rede de distribuição.

Como o volume perdido de água foi bombeado, a água perdida implica em perda de energia elétrica de 105.962 kWh/mês (custo estimado em R\$ 21.192,4 mensais).

Considerando o valor de R\$ 1,20 para cada metro cúbico de água distribuído e que a tarifa mínima da política tarifária praticada no Estado do Pará, pode-se estimar que a perda de faturamento referente ao volume perdido de água no 3º Setor foi da ordem de R\$ 508.616,00 ao mês. Vale ressaltar que esse valor de perda correspondeu aos vazamentos, consumos clandestinos, problemas de faturamento e exportação de água do 3º setor para setores adjacentes (1º, 2º e 8º setores).

Para a redução desse valor perdido (não faturado) no 3º setor foram recomendadas as seguintes atividades: setorização do sistema, substituição de trechos antigos da rede de distribuição, automação das unidades reservação e elevação. Para isso, foi apresentada a sugestão de elaboração e execução de um Plano de Ação para redução das perdas reais e aparentes no 3º Setor de abastecimento da RMB.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano/ Secretaria de Política Urbana. **Programa nacional de combate ao desperdício de água: DTA-A2 Indicadores de Perdas nos Sistemas de Abastecimento de Água**. Brasília, 2004;

CHEUNG, P. B.; REIS, L. F. R. **Estudo de objetivos múltiplos para reabilitação otimizada de sistemas de distribuição de água**. In: VI SEREA - Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água. João Pessoa (Brasil), 2006;

GOMES, H. P. **Sistemas de abastecimento de água: dimensionamento econômico e operação de redes e elevatórias**. João Pessoa. ed. 2. Editora Universitária, 2004.

MIRANDA, E. C. **Avaliação de perdas em sistemas de abastecimento de água - indicadores de perdas e metodologias para análise de confiabilidade**. Brasília, 2002. Dissertação (Mestrado em tecnologia ambiental recursos hídricos) - Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2002, 215p.

TSUTIYA, T. M. **Abastecimento de água**. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Saneamento da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004;

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao PROCEL SANEAR / Eletrobrás, a Companhia de Saneamento do Pará, ao Grupo de Pesquisa Hidráulica e Saneamento – GPHS/UFPA e ao Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento – LENHS/NORTE.

---

## **8 Utilização de Sistema de Informações Geográficas para controle da ocorrência de vazamentos em redes de distribuição de água potável**

---

**Aline Christian Pimentel Almeida Santos e José Almir Rodrigues Pereira**  
Universidade Federal do Pará. Belém. Brasil

### **INTRODUÇÃO**

No Brasil são produzidos 12,6 bilhões de m<sup>3</sup> de água por ano, porém somente o equivalente a 7,6 bilhões de m<sup>3</sup> são efetivamente faturados. Boa parte dessa água se perde entre as estações de tratamento e a torneira do consumidor final, tendo como principais causas os erros de medição, as fraudes nos hidrômetros, as ligações clandestinas (perdas aparentes), o uso excessivo de água na limpeza de unidades, os vazamentos e as perdas operacionais (ABES, 2007).

Como a eficiência na gestão de Sistema de Abastecimento de Água (SAA) está diretamente ligada à qualidade do atendimento ao usuário e ao equilíbrio financeiro da empresa, quando a gestão não é eficiente pode ocorrer racionamento, falta e perda de água, o que reflete diretamente no faturamento e no aumento das despesas do sistema.

Portanto, na avaliação de desempenho de SAAs é fundamental a organização das informações dos volumes de água, das despesas de exploração e dos dados comerciais. Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), em 2008, as despesas de exploração das prestadoras de serviços de abrangência regional foram de 40,82% com pessoal, 3,40% com produto químico, 14,57% com energia elétrica, com parte desses dados sendo computados no volume perdido de água (BRASIL, 2010).

Tsutiya (2006) recomenda a realização do balanço hídrico na gestão de SAAs. Esse procedimento é uma forma estruturada de avaliar os componentes dos fluxos e usos da água no sistema e seus valores absolutos e relativos, além de fundamentar o estabelecimento de diversos indicadores de desempenho utilizados no acompanhamento das ações técnicas, operacionais e empresariais.

Na elaboração do balanço hídrico é importante observar os volumes perdidos de água em cada unidade. Em muitos casos, os vazamentos na rede de distribuição de água representam parcela significativa do volume de água perdido no SAA.

De acordo com Silva (2005), o volume perdido de água na rede pública de distribuição é tema complexo e ainda não tratado em profundidade. Esse assunto teve maior relevância a partir de 1999, com a implantação do Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água (PNCDA), que a partir do ano de 2003 teve convênio firmado com o ministério das cidades/Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Contudo, os vazamentos nas tubulações de distribuição de água ainda continuam sendo um grande problema na gestão dos SAAs, o que decorre da idade e da qualidade das tubulações, da forma de assentamento da rede, de acidentes eventuais, da profundidade e do tipo de pavimento etc.

Por outro lado, a recuperação do vazamento está ligada a rapidez e precisão com que essa ocorrência é informada, a estrutura interna da equipe de manutenção e as condições do local do vazamento.

Portanto, é essencial a obtenção e o gerenciamento de informações confiáveis, maximizando o potencial de seus benefícios, auxiliando na gestão, reduzindo os custos e facilitando o intercâmbio e a manipulação de dados.

O controle e a recuperação de vazamentos proporcionam melhorias no desempenho econômico da empresa, revertendo tal benefício em tarifas mais baixas para os usuários, na economia na aplicação de recursos no SAA, o que resulta em desempenho gerencial e operacional adequado para o uso racional de água e de energia elétrica.

Nesse contexto, a aplicação de tecnologias que facilitem o gerenciamento e auxiliem na tomada de decisão são recomendadas para o monitoramento e controle do volume perdido de água. Entre essas pode ser citada a utilização de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), como alternativa eficaz para o



gerenciamento de vazamentos em redes de distribuição de água, já que esse instrumento prioriza a informação, tornando os processos mais rápidos, simples e eficientes.

O SIG é uma das tecnologias do geoprocessamento que proporciona, aos gestores, técnicos e usuários, rapidez e confiabilidade na análise dos dados e informações da área em estudo, reduzindo o tempo e melhorando a qualidade da tomada de decisão.

Essa tecnologia pode ser aplicada no planejamento e cadastros técnicos, com a finalidade de armazenar e relacionar as informações operacionais, cartográficas e descritivas do SAA. Além disso, o uso desse sistema facilita o controle operacional e a manutenção preventiva do SAA, evitando ou reduzindo gastos com serviços de recuperação e de compra de equipamentos, portanto, possibilitando a diminuição do volume perdido de água (SANTOS, 2008).

A utilização de SIG facilita a identificação da localização específica de determinado fenômeno, por exemplo, o local de um vazamento, permitindo o acompanhamento e a análise comparativa desse fenômeno com o de outros espaços. Portanto, o SIG é importante no gerenciamento ao disponibilizar resultados mais rápidos e confiáveis, em comparação às formas convencionais de armazenamento e análise de dados.

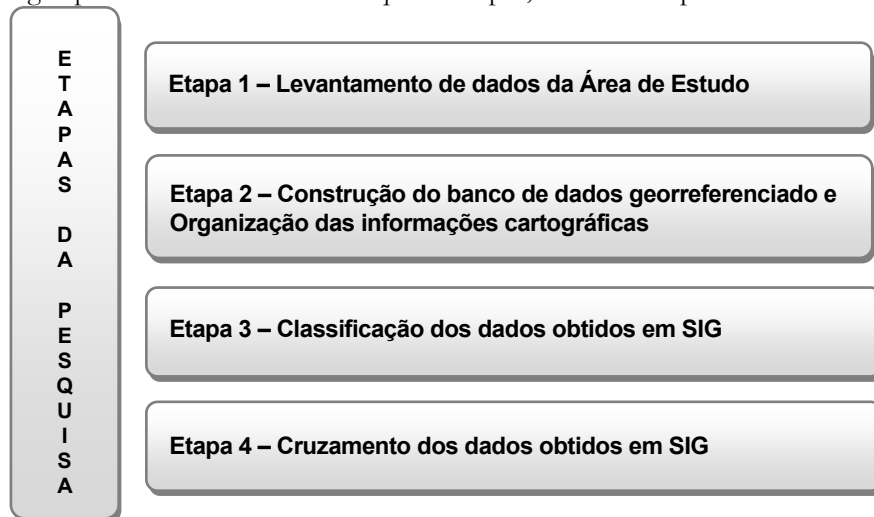
Desse modo, o SIG é uma ferramenta informacional adequada para a representação espacial da incidência de vazamentos na rede de distribuição de água, conforme exemplificado a seguir.

## APLICAÇÃO DO SIG

A utilização de softwares para vinculação de banco de dados em bases cartográficas é recomendada no controle da incidência de vazamentos em tubos, conexões e registros da rede de distribuição de água. O software Arcview 3.2, da *Environmental Systems Research Institute* (ESRI), é uma das alternativas para o geoprocessamento desses dados e informações, em razão do seu caráter abrangente, da facilidade de manipulação, da visualização e da análise de dados.

O Arcview 3.2 tem uma interface gráfica destinada a integrar dados espaciais e tabulares para sua posterior visualização em mapas, tabelas e gráficos. Possui ferramentas de análise espacial, georreferenciamento, visualização, criação e edição de tabelas e dados geográficos, produção e criação de mapas (ARCVIEW..., [2004]).

A aplicação do SIG no controle e espacialização de ocorrências de vazamento na rede de distribuição de água pode ser desenvolvida em quatro etapas, conforme representado no Fluxograma 1.



Fluxograma 1 – Etapas da aplicação do SIG no controle e espacialização de ocorrências de vazamento na rede de distribuição de água

Para exemplificar a aplicação de SIG, é apresentada a espacialização dos dados de vazamento na rede de distribuição de água do 3º setor – Belém/PA, que foi realizada na cooperação técnica Grupo de Pesquisa Hidráulica e Saneamento (GPHS) / Universidade Federal do Pará (UFPA) com a Companhia de Saneamento do Pará (COSANPA).

## LEVANTAMENTO DE DADOS DA ÁREA DE ESTUDO

Inicialmente foram levantados dados e informações para caracterização da área de estudo e conhecimento das ocorrências de vazamento na rede de distribuição de água do 3º setor. Esse setor é gerenciado pela COSANPA e está localizado na zona central do município de Belém, estado do Pará, ao norte do Brasil, entre as coordenadas 01°03' e 01°32' de latitude Sul e 48°11' e 48°39' de longitude Oeste de Greenwich.

Segundo dados do Plano Diretor do Sistema de Abastecimento de Água da RMB, o 3º setor atende a população (89.484 habitantes) residente nos bairros Umarizal, Reduto e Nazaré, tendo área de 453.293 ha (PEREIRA, 2006).

O fornecimento de água para o 3º setor é realizado pelo sistema Utinga - São Braz, no qual a água bruta é captada no lago Bolonha, localizado na Área de Proteção Ambiental (APA) de Belém, e tratada na ETA São Braz. Em seguida, a água potável é bombeada para armazenamento em reservatório e então distribuída para a rede de distribuição do 3º setor, constituída por tubulações de PVC, cimento amianto e ferro fundido, totalizando 233.175 m de rede.

Na Figura 1 é mostrada a localização do 3º Setor de Abastecimento de Água do município de Belém na RMB.

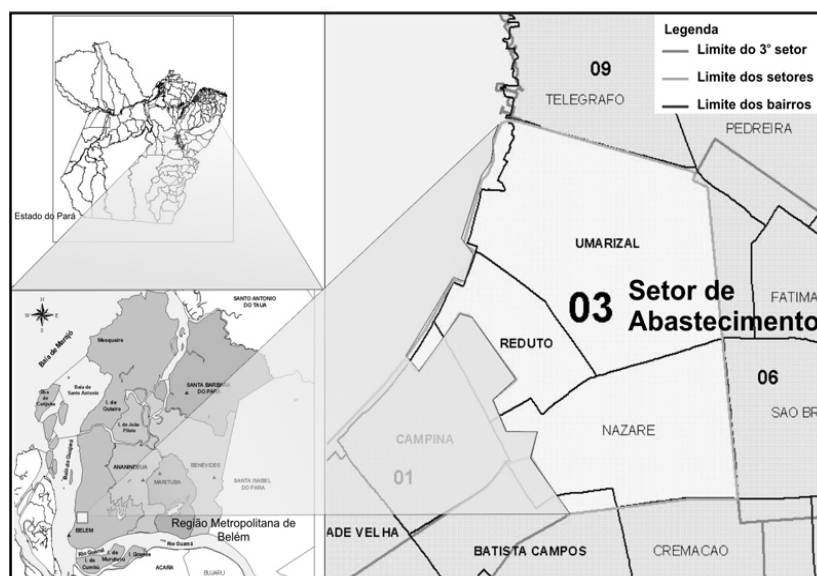


Figura 1 – Localização da Área de estudo.

Para a espacialização das ocorrências de vazamentos no 3º setor, foram levantados dados e obtidas bases cartográficas, em formato CAD (DWG), na Companhia de Desenvolvimento e Administração da Área Metropolitana de Belém (CODEM) e na COSANPA.

Na base fornecida pela CODEM constavam informações do traçado e as denominações dos logradouros e dos bairros, enquanto na base COSANPA foram obtidas informações das tubulações de distribuição de água do 3º setor.

O setor operacional da COSANPA forneceu planilha com informações dos 248 vazamentos ocorridos no 3º setor, no período de maio de 2006 a abril de 2007, as quais são relacionadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Dados de ocorrências de vazamentos na área de estudo.

NÚM	DADOS DA OCORRÊNCIA DE VAZAMENTO
1	Localização geográfica do ponto de vazamento
2	Mês e ano da ocorrência de vazamento
3	Bairro
4	Rua e Perímetro
5	Diâmetro da tubulação onde ocorreu o vazamento
6	Material da tubulação onde ocorreu o vazamento
7	Localização da tubulação (passeio ou rua)
8	Data da reclamação do vazamento
9	Data da recuperação do vazamento
10	Tempo para recuperação (dias)

## CONSTRUÇÃO DO BANCO DE DADOS E ORGANIZAÇÃO DAS INFORMAÇÕES CARTOGRÁFICAS

Os dados e informações obtidos na COSANPA foram organizados em banco de dados construído em formato DBF4 (DataBase 4), utilizando o *software* Excel da *Microsoft*. Esse banco de dados foi desenvolvido para facilitar a consulta e a edição de dados.

Na Figura 2 é mostrada a tela de visualização do banco de dados “Vazamentos”, que foi desenvolvida no *software* Excel 2003, no formato DBF 4, tendo as seguintes informações da ocorrência de vazamento: mês e ano, endereço, bairro, diâmetro da tubulação onde ocorreu o vazamento, localização da tubulação (rua ou passeio), data da solicitação de recuperação e data da recuperação.

ID	MES_ANO	ENDEREÇO	PERIMETRO	BAIRRO	DIÂMETRO TUBULAÇÃO	MATERIAL	LOCALIZACAO	DATA DE SOLICITACAO	DATA DE ATENDIMENTO	DURACAO (DIAS)
1	Mai/2006	Av. Braz de Aguiar	Rua Quintino Bocaluva	Nazare	75 mm	Cimento Amianto	Passeio	2/5/2006	3/5/2006	1
2	Mai/2006	Tv. 14 de Marco	Tv. Jose Pio e Tv. Manoel Evaristo	Umazizal	75 mm	PVC	Passeio	2/5/2006	2/5/2006	0
3	Mai/2006	Tv. Piedade	Av. Gov. Jose Malcher	Nazare	75 mm	PVC	Passeio	3/5/2006	3/5/2006	0
4	Mai/2006	Tv. 14 de Marco	Av. Gentil Bittencourt e Av. Nazare	Nazare	75 mm	Cimento Amianto	Passeio	8/5/2006	10/5/2006	2
5	Mai/2006	Rua Jose Balby	Rua Quintino Bocaluva	Nazare	75 mm	Cimento Amianto	Passeio	8/5/2006	8/5/2006	0
6	Mai/2006	Av. Alcindo Cacela	Rua Ferreira Pena e Pss. Independencia	Nazare	75 mm	Cimento Amianto	Passeio	9/5/2006	9/5/2006	0
7	Mai/2006	Rua Soares Carneiro	Rua Curuca e Tv. 14 de Marco	Umazizal	75 mm	PVC	Passeio	10/5/2006	18/5/2006	8
8	Mai/2006	Rua D. Alberto Galdencio Ramos	Av. Generalissimo Deodoro e Tv. 14 de Marco	Nazare	75 mm	Cimento Amianto	Passeio	11/5/2006	12/5/2006	1
9	Mai/2006	Av. Gov. Jose Malcher	Rua Dr. Moraes e Tv. Piedade	Nazare	200 mm	Fofo	Rua	12/5/2006	12/5/2006	0
10	Mai/2006	Rua Antonio Barreto	Av. Visc. de Souza Franco e Av. Alm. Visconde de Souza Franco	Umazizal	75 mm	PVC	Passeio	13/5/2006	15/5/2006	2
11	Mai/2006	Tv. Quintino Bocaluva	Av. Nazare	Nazare	150 mm	Fofo	Passeio	17/5/2006	22/5/2006	5
12	Mai/2006	Av. Alcindo Cacela	Rua Bernal do Couto e Rua Oliveira Beld	Umazizal	75 mm	PVC	Passeio	22/5/2006	1/6/2006	10
13	Mai/2006	Pss. Independencia	Tv. 14 de Marco	Umazizal	75 mm	Cimento Amianto	Passeio	24/5/2006	27/5/2006	3
14	Mai/2006	Av. Nazare	Pss. Joaquim Nabuco e Rua Quintino Bocaluva	Nazare	300 mm	Cimento Amianto	Passeio	26/5/2006	29/5/2006	3
15	Mai/2006	Pss. Celsa	Tv. D. Romualdo de Seixas e Av. Alm. Visconde de Souza Franco	Umazizal	50 mm	PVC	Rua	26/5/2006	27/5/2006	1
16	Mai/2006	Tv. Manoel Evaristo	Av. Pedro Alvares Cabral e Tv. Jose Pio	Umazizal	75 mm	PVC	Passeio	29/5/2006	30/5/2006	1
17	Mai/2006	Rua Antonio Barreto	Av. Visc. de Souza Franco	Umazizal	75 mm	PVC	Passeio	29/5/2006	30/5/2006	1
18	Mai/2006	Rua Soares Carneiro	Rua Curuca e Tv. 14 de Marco	Umazizal	75 mm	PVC	Passeio	29/5/2006	29/5/2006	0
19	Mai/2006	Pss. Independencia	Tv. 14 de Marco e Av. Alcindo Cacela	Umazizal	75 mm	Cimento Amianto	Passeio	30/5/2006	31/5/2006	1
20	Mai/2006	Av. Nazare	Pss. Joaquim Nabuco e Rua Quintino Bocaluva	Nazare	100 mm	Cimento Amianto	Passeio	30/5/2006	30/5/2006	0
21	Mai/2006	Av. Nazare	Pss. Joaquim Nabuco e Rua Quintino Bocaluva	Nazare	100 mm	Cimento Amianto	Passeio	30/5/2006	31/5/2006	1
22	Mai/2006	Pss. Leopoldina	Av. Gov. Jose Malcher e Av. Nazare	Nazare	75 mm	Cimento Amianto	Rua	31/5/2006	1/6/2006	1
23	Junho/2006	Rua Bernal do Couto	Av. Alcindo Cacela	Umazizal	150 mm	Cimento Amianto	Passeio	2/6/2006	5/6/2006	3
24	Junho/2006	Rua Domingos Marreiros	Av. Visc. de Souza Franco e Av. Alm. Visconde de Souza Franco	Umazizal	75 mm	PVC	Passeio	5/6/2006	7/6/2006	2
25	Junho/2006	Av. Generalissimo Deodoro	Av. Gentil Bittencourt e Av. Braz de Aguiar	Nazare	300 mm	Fofo	Rua	9/6/2006	12/6/2006	3
26	Junho/2006	Rua Dom Romualdo Coelho	Rua Jeronimo Pimentel	Umazizal	125 mm	Cimento Amianto	Rua	12/6/2006	18/6/2006	7
27	Junho/2006	Rua Dougo Mosa	Tv. D. Romualdo Coelho e Tv. D. Romualdo Coelho	Umazizal	75 mm	PVC	Passeio	12/6/2006	28/6/2006	14
28	Junho/2006	Rua Bernal do Couto	Tv. D. Romualdo Coelho e Av. Alm. Visconde de Souza Franco	Umazizal	75 mm	PVC	Passeio	12/6/2006	12/6/2006	0
29	Junho/2006	Av. Visconde de Souza Franco	Rua Municipalidade e Av. Pedro Alvares Cabral	Umazizal	75 mm	Fofo	Passeio	13/6/2006	13/6/2006	0
30	Junho/2006	Rua Antonio Barreto	Av. Alm. Wandenkolk	Umazizal	75 mm	PVC	Passeio	13/6/2006	23/6/2006	10
31	Junho/2006	Rua D. Alberto Galdencio Ramos	Av. Generalissimo Deodoro e Tv. 14 de Marco	Nazare	75 mm	Cimento Amianto	Passeio	16/6/2006	18/6/2006	3
32	Junho/2006	Av. Nazare	Rua Quintino Bocaluva e Av. Generalissimo Deodoro	Nazare	75 mm	Cimento Amianto	Passeio	16/6/2006	3/7/2006	17
33	Junho/2006	Rua Joaquim Nabuco	Av. Gov. Jose Malcher e Av. Nazare	Nazare	75 mm	Cimento Amianto	Passeio	19/6/2006	20/6/2006	1
34	Junho/2006	Av. Gov. Jose Malcher	Av. Alm. Wandenkolk e Rua Quintino Bocaluva	Nazare	200 mm	Fofo	Rua	19/6/2006	21/6/2006	2
35	Junho/2006	Av. Gentil Bittencourt	Rua Quintino Bocaluva e Tv. Rui Barbosa	Nazare	75 mm	Cimento Amianto	Passeio	19/6/2006	20/6/2006	1
36	Junho/2006	Rua Jose Balby	Av. Visc. de Souza Franco	Nazare	75 mm	Cimento Amianto	Rua	20/6/2006	20/6/2006	0

Figura 2 – Visualização do banco de dados “vazamentos” no *software* Excel 2003

Fonte: Companhia de Saneamento do Pará (2007a).

Nesse banco de dados foram relacionadas informações da rede do 3º setor de distribuição de água, sendo observados diâmetros entre 50 e 300 mm, tubulações de diferentes materiais (PVC, cimento amianto e ferro fundido) localizadas na rua ou no passeio.

Os dados de vazamento na rede de distribuição de água e as informações cartográficas da área de estudo foram georreferenciadas utilizando o sistema de coordenadas geográficas, com base no Datum de referência *South American Datum 1969 (SAD-69)*. O conjunto dessas informações foi organizado por “temas” ou “camadas” utilizadas no Arcview 3.2 e salvo em formato shapefile (SHP), de acordo com o tipo de informação.

Para a construção do projeto em SIG, o banco de dados construído no *software* Excel 2003, no formato DBF4, foi exportado para o *software* Arcview 3.2, o que permitiu a sistematização das informações de vazamentos na rede de distribuição de água.

O relacionamento dessas informações com outros dados da rede de distribuição facilita a análise da situação, podendo, com isso, evitar perdas operacionais e gastos na manutenção da rede, contribuindo para a resolução de possíveis problemas com a identificação das relações entre dados geográficos e alfanuméricos. Portanto, gerando resultados adequados para a gestão de SAAs.

As informações cartográficas, como pontos de vazamentos, tubulações, base viária e limite do 3º setor, foram organizadas e especializadas no *software* Arcview 3.2, conforme mostrado na Figura 3.

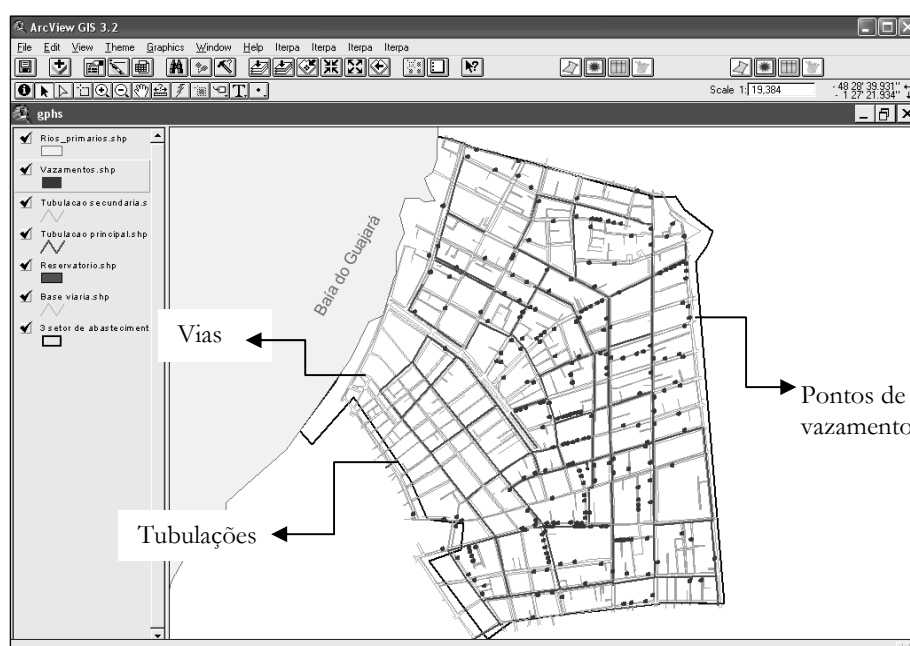


Figura 3 – Visualização das informações cartográficas no *software* Arcview 3.2

Fonte: Companhia de Saneamento do Pará (2007b); Companhia de Desenvolvimento e Administração da Área Metropolitana de Belém (1999).

Em seguida, o banco de dados construído foi vinculado às informações cartográficas dos pontos de vazamentos, já organizadas no formato SHP, gerando o tema “Vazamento”. Na Figura 4 é exemplificada a ocorrência de vazamento em janeiro de 2007, na Rua Bernal do Couto, bairro do Umarizal, em tubulação de PVC com diâmetro de 75 mm.

Com esse mesmo procedimento foram construídos os seguintes temas, para facilitar a recuperação e análise da informação dos vazamentos ocorridos na rede do 3º setor no período de maio de 2006 a abril de 2007:

- Área de abrangência do 3º setor;
- Tubulações principais;
- Tubulações secundárias;
- Base Viária;
- Limites de bairros.

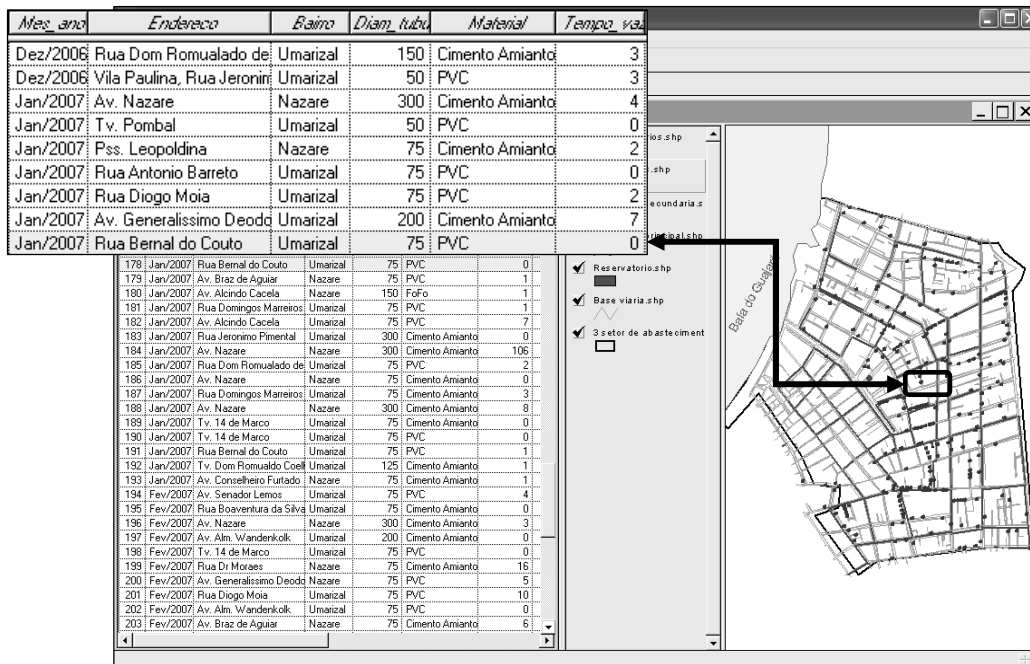


Figura 4 – Visualização das informações cartográficas vinculadas ao banco de dados no software Arcview 3.2.

### CLASSIFICAÇÃO DOS DADOS OBTIDOS EM SIG

A espacialização dos dados primários fornecidos pela COSANPA, das 248 ocorrências de vazamentos do 3º setor de distribuição de água da RMB durante o período estudado, permitiu a classificação dos vazamentos e a geração de mapas específicos, como:

- Data da ocorrência dos vazamentos;
- Diâmetro da tubulação onde ocorreu o vazamento.
- Bairro onde ocorreu o vazamento;
- Tipo de material da tubulação em que ocorreu o vazamento;
- Logradouro onde ocorreu o vazamento;
- Local de ocorrência do vazamento (parque ou rua);
- Tempo para recuperação do vazamento;

Com isso, foi possível verificar que o maior número de vazamentos ocorreu em novembro de 2006 (36 vazamentos), e o menor número, nos meses de outubro e dezembro de 2006 (13 vazamentos), conforme representado no Gráfico 1.

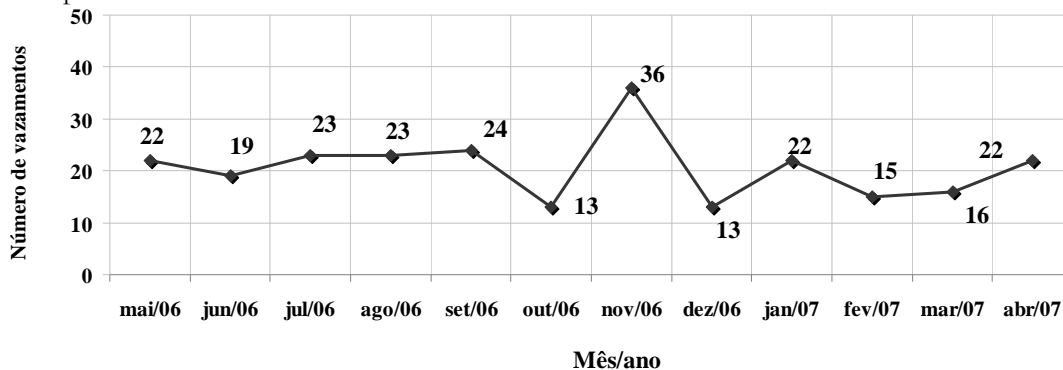


Gráfico 1 – Ocorrência de vazamentos no período de maio de 2006 a abril de 2007  
 Fonte: Companhia de Saneamento do Pará (2007a).

Com essa classificação também foi constatado que a maioria dos vazamentos ocorreu em tubulações de 75 mm de diâmetro, com 177 vazamentos (Gráfico 2), com a maior parte das ocorrências em tubulações localizadas no passeio.

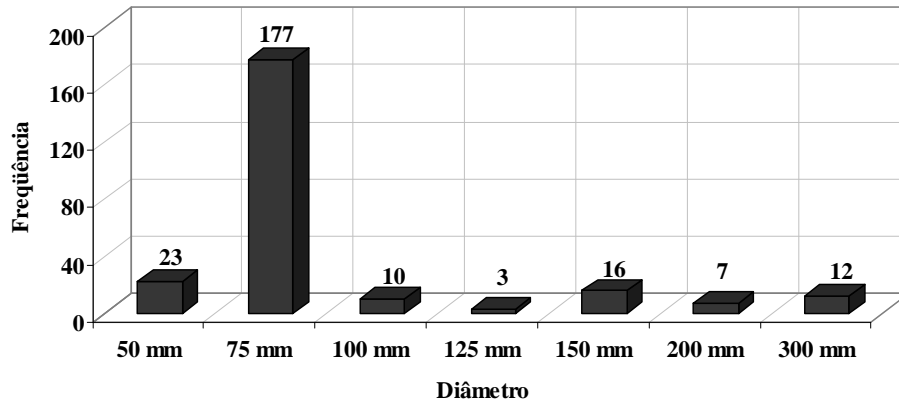
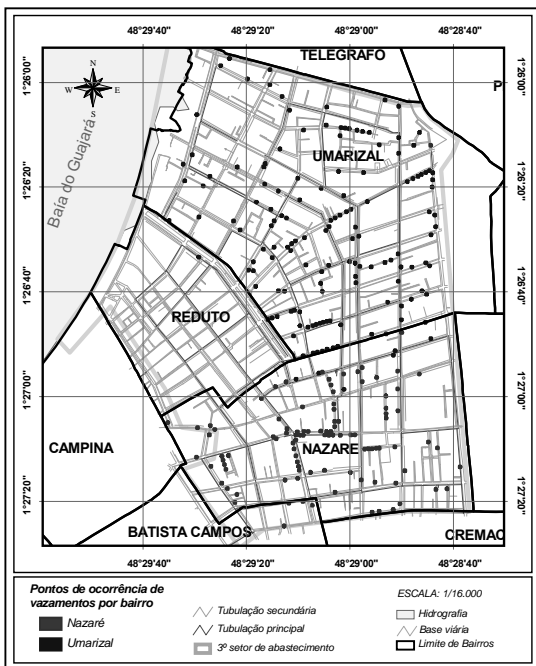


Gráfico 2 – Ocorrência de vazamentos por diâmetro da tubulação no período de maio de 2006 a abril de 2007

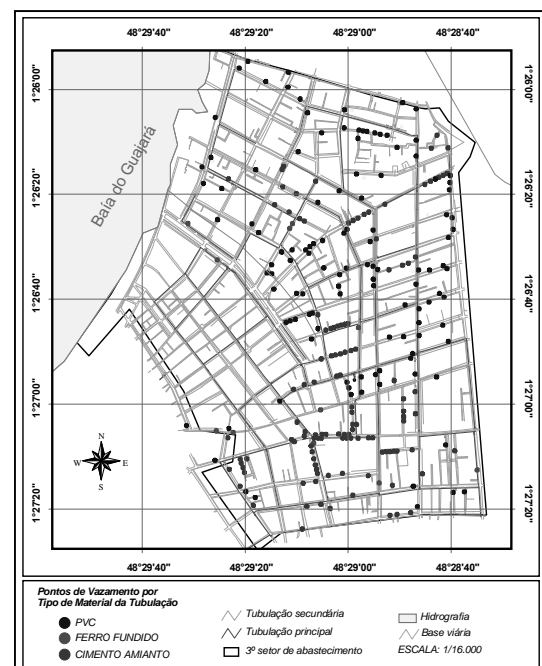
Fonte: Companhia de Saneamento do Pará (2007a).

No período analisado foi verificado que o maior número de vazamentos ocorreu no bairro do Umarizal (147 ocorrências). No bairro de Nazaré foram identificadas 101 ocorrências, enquanto no Bairro do Reduto não foi observada nenhuma ocorrência de vazamento (Mapa 1).

Dos vazamentos ocorridos, 119 foram em tubulações de PVC, 111 em tubulações de cimento amianto e 11 em tubulações de ferro fundido (Mapa 2).



Mapa 1 – Pontos de ocorrência de vazamentos por bairro.



Mapa 2 – Pontos de ocorrência de vazamentos por tipo de material das tubulações

Na verificação do tempo para recuperação dos vazamentos foi constatado que 71 vazamentos foram solucionados na mesma data de solicitação de atendimento; 52 vazamentos somente foram recuperados após 1 dia; 31 vazamentos após 2 dias; 22 vazamentos demoraram 10 dias ou mais para serem solucionados; as outras ocorrências duraram de 3 a 9 dias para a realização dos serviços de recuperação do vazamento, conforme representado no Gráfico 3.

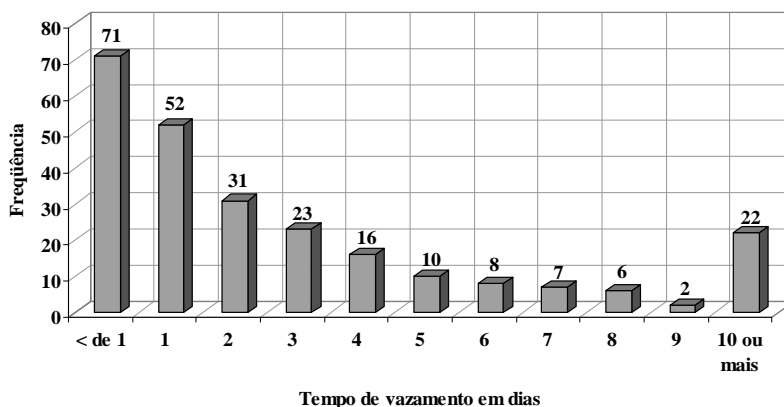
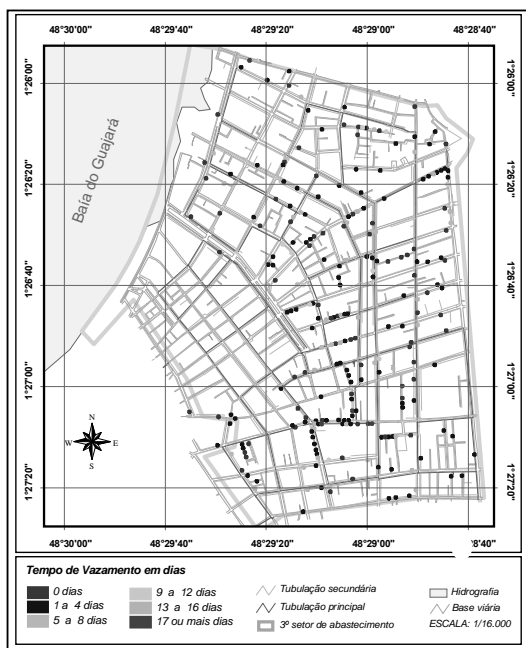


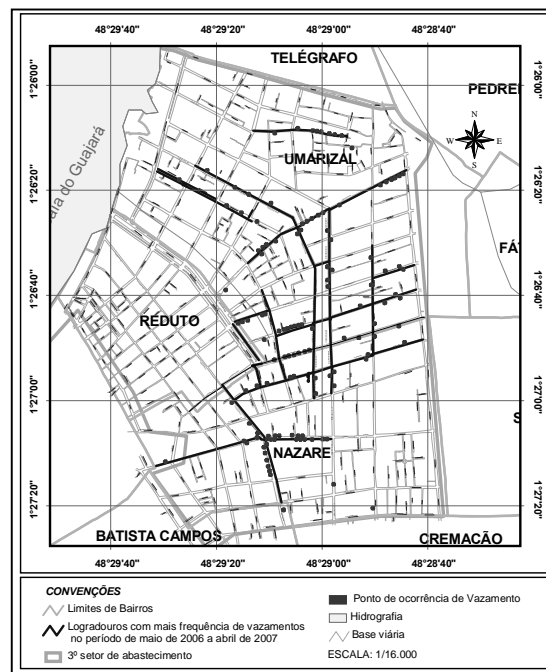
Gráfico 3 – Tempo de duração dos vazamentos ocorridos no período estudado  
 Fonte: Companhia de Saneamento do Pará (2007a).

No Mapa 3 é possível visualizar a distribuição espacial dos pontos de ocorrência de vazamentos no 3º setor, de acordo com o tempo para recuperação do vazamento.

Também foi constatado que o logradouro com mais ocorrências de vazamento foi a av. Nazaré, com 19 vazamentos, sendo 18 em tubulações de cimento amianto e 1 em tubulações de PVC (Mapa 4).



Mapa 3 – Pontos de ocorrência de vazamentos classificados por tempo de vazamento



Mapa 4 – Logradouros com maior frequência de vazamentos

## CRUZAMENTO DOS DADOS EM SIG

O cruzamento dos dados contidos no banco de dados “vazamentos” gerou resultados importantes para a caracterização dos vazamentos ocorridos no 3º setor. O relacionamento dos dados primários possibilitou a construção de mapas, com as seguintes informações:

- Dados de localização (bairro ou logradouro), de material da tubulação (PVC, FoFo, Cimento Amianto) e tempo de vazamento em dias;
- Dados de mês e ano da ocorrência de vazamento por localização da tubulação (paralelo ou rua);
- Dados de diâmetro da tubulação e tipo de material;

- Dados de mês e ano da ocorrência de vazamento e bairro;
- Dados de mês e ano de ocorrência do vazamento por tempo de recuperação do vazamento.

Entre os relacionamentos citados pode ser destacada a relação entre os dados de localização (bairro ou logradouro), de material da tubulação (PVC, FoFo, Cimento Amianto) e tempo de vazamento em dias; e a relação entre os dados de mês e ano da ocorrência de vazamento por localização da tubulação (passeio ou rua).

Com isso, foi constatado que o maior número de vazamentos ocorreu em tubulações de cimento amianto, na Avenida Nazaré, no bairro de Nazaré, com 18 ocorrências, e apenas 1 ocorrência em tubulações de PVC, totalizando 163 dias com vazamento durante o período estudado, 0,12 vazamentos por dia.

A Rua Bernal do Couto apresentou 11 ocorrências de vazamentos em tubulações de cimento amianto e 7 ocorrências em tubulações de PVC, num total de 68 dias com vazamentos, 0,26 vazamentos por dia, conforme apresentado na Tabela 1.

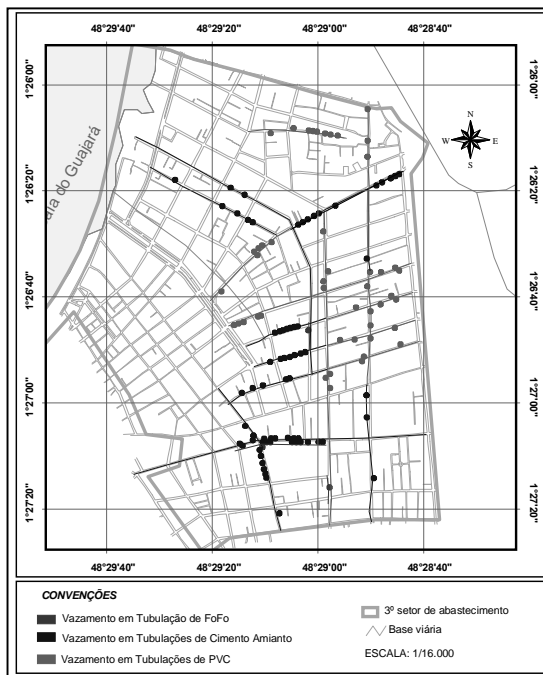
Tabela 1 – Ruas com maior frequência de vazamentos por material da tubulação e tempo de duração do vazamento no período de maio de 2006 a abril de 2007

Endereço	Material			Total de Vaz.	Dias com Vaz.	Vaz/dia
	Cimento Amianto	FoFo	PVC			
Av. Nazaré	18	-	1	19	163	0,12
Rua Bernal do Couto	11	-	7	18	68	0,26
Rua Domingos Marreiros	7	-	5	12	25	0,48
Tv. Quintino Bocaiúva	9	1	1	11	25	0,44
Av. Generalíssimo Deodoro	1	1	8	10	38	0,26
Rua Boaventura da Silva	7	-	3	10	23	0,43
Rua Dom Romualdo de Seixas	2	1	6	9	39	0,23
Rua Soares Carneiro	-	-	9	9	39	0,23
Tv.14 de Março	3	-	6	9	34	0,26
Rua Antonio Barreto	-	-	8	8	22	0,36
Rua João Balby	5	-	3	8	18	0,44
<b>TOTAL GERAL</b>	<b>63</b>	<b>3</b>	<b>57</b>	<b>123</b>	<b>494</b>	<b>0,502</b>

Fonte: Companhia de Saneamento do Pará (2007a).

Esses valores foram registrados no banco de dados possibilitando a geração de mapa, no qual é possível identificar a distribuição espacial das ruas com maior ocorrência de vazamentos por material no período estudado. Como exemplo, é apresentado o Mapa 5, que indica os pontos de vazamentos ocorridos em tubulações de PVC, Ferro fundido e cimento amianto.





Mapa 5 – Ruas com mais frequência de vazamentos por material da tubulação

Na análise da relação da data da ocorrência (mês e ano) com a localização da tubulação (rua ou passeio) é possível observar grande variação no número de ocorrências de vazamentos. Por exemplo, o número de vazamentos reduziu 27,23% entre os meses de junho (31,58%) a agosto de 2006 (4,35%) nas tubulações localizadas na rua; porém aumentou 27,23% nas tubulações localizadas no passeio, passando de 68,42% no mês de junho para 95,65% no mês de agosto de 2006, conforme pode ser observado no Gráfico 4.

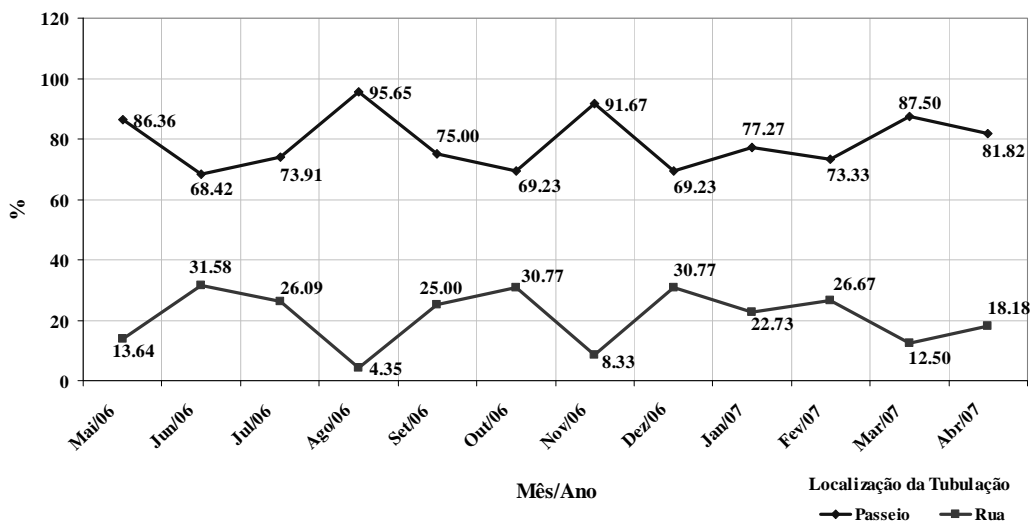


Gráfico 4 – Mês e Ano de ocorrência do vazamento por localização da tubulação

Fonte: Companhia de Saneamento do Pará (2007a).

O cruzamento dos dados de diâmetro da tubulação por tipo de material permitiu verificar que o maior percentual de vazamentos (64,41%) ocorreu em tubulações de cimento amianto com diâmetro de 75 mm. Nas tubulações de ferro fundido, a maior incidência de vazamentos (36,36%) foi observada em tubulações com diâmetro de 150 mm, enquanto que nas tubulações de PVC, o maior percentual de registro de vazamentos (83,19%) ocorreu em tubulações com 75 mm de diâmetro.

A utilização de mapas no gerenciamento de vazamentos em rede de distribuição de água facilita o conhecimento da informação e a atuação da equipe de manutenção responsável pela recuperação dos vazamentos, sendo ferramenta importante para o controle operacional e a redução do volume perdido em redes de distribuição de água.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com Pina et al. (2000), a implantação de SIG é um projeto de médio a longo prazo, sendo acessível aos órgãos públicos, e não deve ser vista como uma despesa, mas como um investimento em produção de informação, tendo alta taxa de retorno para as instituições.

Em geral, a implantação do geoprocessamento na atualização da base cadastral traz aumento da arrecadação, pois possibilita maior controle do processo e das rotinas de operação e manutenção e, com isso, redução das despesas e aumento do retorno com a comercialização do produto disponibilizado ao consumidor.

Além dos benefícios financeiros, o geoprocessamento funciona como uma ferramenta de aumento da eficiência e da eficácia das ações da empresa. Aumenta a eficiência ao permitir decisões mais rápidas e facilita o processamento de informações, e a eficácia, por utilizar uma análise mais abrangente, que normalmente, não é possível com as ferramentas tradicionais. Também permite o desenho mais adequado de políticas públicas, proporcionando melhor qualidade de gestão nos sistemas de infraestrutura.

Os softwares para geoprocessamento funcionam em microcomputadores e, exceto em aplicações com excesso de dados ou muito complexas, podem utilizar equipamentos comuns. O custo desses softwares não é muito diferente do custo de outros programas, e é possível treinar os próprios funcionários para utilizá-los.

No caso específico da utilização de SIG para o controle e a recuperação de vazamentos em redes de distribuição de água, é possível constatar que essa ferramenta possibilita maior agilidade para as equipes de controle e de manutenção, o que é decorrente do melhor registro das ocorrências de vazamentos. Com isso, naturalmente, é mais rápido o repasse das informações em ordens de serviços para as equipes que atuam em campo, facilitando a manutenção e/ou troca de tubos, conexões e registros na rede. Além disso, o registro rápido da informação auxilia na gestão e na definição de ações para melhorias no sistema.

A utilização de SIG exemplificada neste texto, no caso o monitoramento, controle e recuperação de vazamentos na rede de distribuição de água do 3º SAA, pode ser aplicada em qualquer local, pois é de fácil processamento e manuseio, favorecendo a gestão do abastecimento de água.

A grande variedade de informações utilizadas no controle de vazamentos pode ser inserida sem maiores dificuldades no SIG. Um aspecto importante a ser considerado é o temporal, pois as datas da informação da ocorrência e da recuperação do vazamento possibilitam estimar, com base em cálculos hidráulicos, o volume de água perdido e, com isso, ter maior conhecimento da necessidade de agilizar esse tipo de intervenção.

Assim, o conhecimento espacializado de informações relacionadas, como data da ocorrência de vazamento, endereço, bairro, diâmetro da tubulação, localização (rua ou passeio), data da solicitação de recuperação e data da recuperação permitiu caracterizar e detalhar os vazamentos ocorridos na área analisada. Portanto, construir o banco de dados e organizar as informações cartográficas obtidas para a elaboração do relatório de ocorrências de vazamentos é prática que deve ser incentivada nas empresas de saneamento.

Nesse contexto, é importante ressaltar que essa ferramenta de gerenciamento deve ser constantemente atualizada, pois a validade da sua utilização é condicionada a segurança e confiabilidade dos dados, razão para ser recomendado amplo treinamento e acesso dos funcionários da empresa.

## REFERÊNCIAS

ABES. **Desperdício de água na pauta do Congresso da ABES no MS:** perdas de faturamento de algumas empresas de saneamento chegam a 70%. Disponível em: <[http://www.abes-dn.org.br/noticias/23congr\\_materia3.htm](http://www.abes-dn.org.br/noticias/23congr_materia3.htm)>. Acesso em: 18 dez. 2007.

ARCVIEW for Windows. Version 3.2. [S. l.]: ESRI, [2004]. 1 CD-ROM.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Programa de Modernização do Setor Saneamento. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: diagnóstico dos serviços de água e esgotos. 2008. Brasília: MCIDADES.SNSA, 2010.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO E ADMINISTRAÇÃO DA ÁREA METROPOLITANA DE BELÉM. Base Viária. Belém, 1999. 1 CD-ROM.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARÁ. Relatório de vazamentos: sistema comercial. Belém, 2007a. 1 CD-ROM.

\_\_\_\_\_. **Base cartográfica da rede de distribuição de água do 3º Setor de Abastecimento.** Belém, 2007b. 1 CD-ROM.

PEREIRA, José Almir Rodrigues (Coord.). **Plano Diretor do Sistema de Abastecimento de Água da Região Metropolitana de Belém.** Belém: UFPA.GPHS, COSANPA, 2006.

PINA, M. F. et al. Os sistemas de informações geográficas. In: CARVALHO, M.S.; PINA, M.F.; SANTOS, S.M. (Org.). **Conceitos básicos de sistemas de informação geográfica e cartografia aplicados à saúde.** Brasília: Ministério da Saúde, 2000.

SANTOS, Aline C.P.A. **Sistemas de Informações Geográficas no Monitoramento e Recuperação de Vazamentos em Redes de Distribuição de Água.** 2008. 94 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.

SILVA, Fernando José Araújo da. Perda de água em sistemas públicos de Abastecimento no ceará. **Revista Tecnológica**, Fortaleza, v. 26, n. 1, p. 1-11, jun. 2005.

TSUTIYA, M.T. **Abastecimento de água.** São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Saneamento, 2006.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Pará (FAPESPA), à Companhia de Saneamento do Pará, ao Grupo de Pesquisa Hidráulica e Saneamento – GPHS/UFPA e ao Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento – LENHS/NORTE.

---

## **9 Informação estratégica para a gestão hidroenergética de sistemas de abastecimento de água**

---

**Marise Teles Condurú e José Almir Rodrigues Pereira**  
Universidade Federal do Pará – UFPA – Belém - Brasil

### **INTRODUÇÃO**

As informações no setor de saneamento brasileiro ainda são desarticuladas, incompletas e restritas aos seus próprios geradores. Muitas delas são de baixa confiabilidade e tem sido pouco sistematizadas e analisadas, o que dificulta a gestão dos sistemas de saneamento e impede que a sociedade tenha conhecimento do setor.

Apesar de existirem instrumentos governamentais de informação do setor de saneamento, como o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), ainda são observados desencontros e divergências na coleta, processamento e interpretação, formal ou não, de dados primários e de indicadores de desempenho, os quais, normalmente, não tem resultado em informação estratégica para a gestão dos sistemas de abastecimento de água, esgotamento sanitário, resíduos sólidos e drenagem urbana e, muito menos, em conhecimento consolidado no setor.

Com o advento da Lei 11.445/2007, que estabelece as diretrizes nacionais para a prestação dos serviços de saneamento no Brasil, foi definida a criação do Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA), ainda não implantado e que dará continuidade ao objetivo do SNIS, de fortalecer a sistematização e disseminação das informações do setor.

O atual cenário informacional precisa ser melhorado para enfrentar o desafio de universalização do atendimento dos serviços prestados no setor de saneamento, logicamente, a partir do conhecimento da realidade, do planejamento para a tomada de decisão e do acompanhamento sistemático de programas, de obras e da operação desses sistemas. E como fazer isso usando informação estratégica?

A informação adequada e relevante, com seu caráter estratégico para o desenvolvimento de setores e de empresas, em ambiente cada vez mais competitivo, é utilizada na formulação de estratégias de acordo com as necessidades de organizações e setores. Buscar essas informações compreende conhecer o ambiente em que estejam inseridas, desde as instituições envolvidas, as fontes de informação, os produtos gerados etc., para permitir que a decisão a ser tomada seja mais eficiente e eficaz para o setor analisado.

McGee e Prusak (1994) observam que a informação é um elemento imprescindível na criação de estratégias e que, na definição destas e para fazer frente às ameaças e às oportunidades do ambiente externo, é importante conhecer e avaliar os pontos fortes e fracos da organização.

Como conseguir maior desempenho no setor de saneamento, a partir do uso de informações estratégicas? Que informações são necessárias para a consolidação do abastecimento de água no Brasil, especialmente quanto à gestão hidroenergética?

A gestão de sistemas de abastecimento de água (SAAs), de forma eficiente e eficaz, requer conhecimento e utilização da informação que circula nos órgãos governamentais, nas empresas responsáveis pelo sistema e na sociedade, a fim de que essa seja usada voltada à qualidade do sistema e ao melhor aproveitamento da água e energia elétrica.

O anseio mundial de uso racional de água e de energia elétrica leva a reflexão de como é enfocada e utilizada a informação hidroenergética nos SAAs. Contudo, independentemente dos avanços gerenciais e técnicos, os dados de consumo de energia elétrica nesses sistemas tem tido pequeno registro e organização, prejudicando a geração de informações e, naturalmente, de conhecimento indispensável para o planejamento e gestão dos sistemas de abastecimento de água.

Assim, é necessário identificar os problemas, buscar explicações e propor informações que sejam estratégicas ao planejamento governamental, ao crescimento da empresa responsável pelo abastecimento de água e ao atendimento do usuário. Isso contribuirá para a definição da política do setor, à gestão dos responsáveis pelos SAAs e, ao mesmo tempo, possibilitará o conhecimento da situação pela sociedade.

As informações hidroenergéticas consideradas estratégicas na gestão de sistemas de abastecimento de água no Brasil são objeto de análise deste capítulo, sendo estabelecidas àquelas relacionadas às perdas de água e de energia elétrica nos SAAs.

Para isso, é comentada a importância dessas informações hidroenergéticas nos sistemas de informação governamental, o SNIS e o SINISA, com enfoque nas informações estratégicas para a gestão de SAAs, sem, no entanto, ter a pretensão de trazer respostas ou soluções prontas, mas sim sugerir caminhos para a discussão das informações estratégicas para o uso racional de água e de energia elétrica nos sistemas de abastecimento de água.

## GESTÃO DO SAA

Os sistemas de abastecimento de água podem ter diferentes configurações, de acordo com o tipo de manancial, com as características da população atendida, com os recursos disponíveis etc.

Normalmente, esses sistemas são constituídos por unidades sequenciais que, para o entendimento e controle do SAA, podem ser agrupadas em produção (captação, tratamento, elevação e adução de água tratada) e em distribuição de água (reservação, elevação e distribuição de água potável) (Figura 1). O primeiro é referente à adequação da água para consumo humano, enquanto o outro é destinado à entrega dessa água, já potável, aos potenciais consumidores.

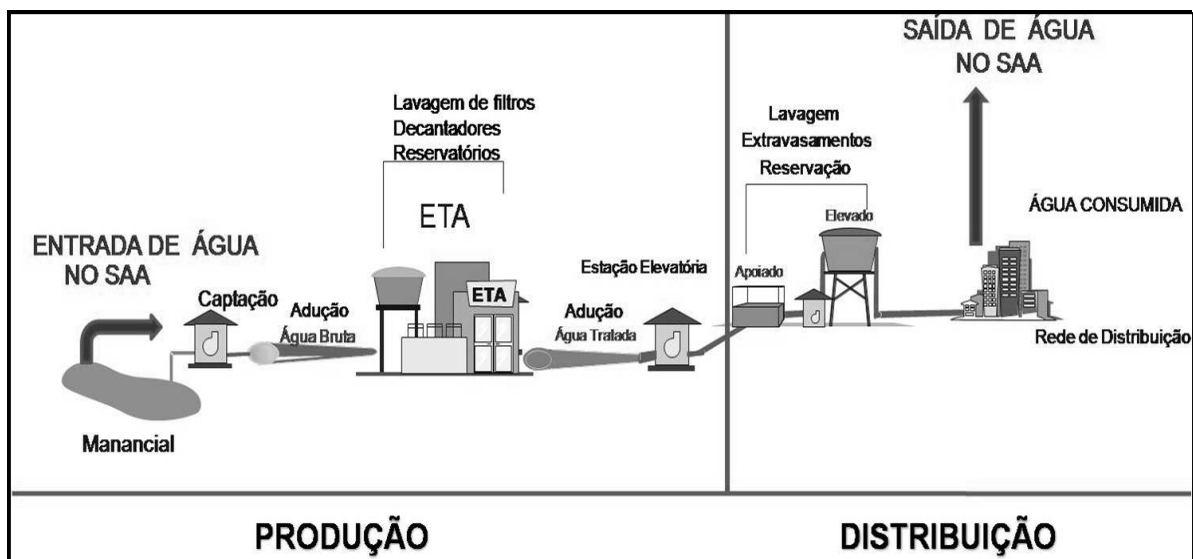


Figura 1: Unidades de SAAs quanto à produção e distribuição de água

Na gestão dos SAAs é preciso a coleta, sistematização e utilização de informações que representem o desempenho dessas duas partes isoladamente e do sistema como um todo. Para isso, a informação do desempenho nesses sistemas é dividida em três grandes grupos, no caso os volumes de água, as despesas de exploração e o faturamento da água fornecida.

Na determinação dos volumes são utilizados equipamentos de medição de vazão de água na entrada e na saída de cada unidade. Com isso, é possível elaborar o balanço hídrico e relacionar informações importantes, como o volume de água produzido, o volume tratado, o volume de serviço, o volume disponibilizado ou distribuído, o volume de água consumido e o volume perdido de água.

Como ao longo do SAA existe aplicação de recursos no pessoal que atua nas unidades, na energia elétrica utilizada, nos equipamentos eletromecânicos, nos produtos químicos empregados para tornar a água potável, em serviços, em obras etc., cabe ao gestor o conhecimento dessas despesas, para que decisões adequadas possam ser tomadas para melhorar o desempenho do sistema.

Além disso, é importante o controle e o faturamento do volume de água utilizado pelos usuários, com os prestadores do serviço de abastecimento de água, tendo de registrar e cadastrar todas as ligações e economias de água do SAA. Vale observar que nem todo volume faturado é devidamente pago pelos

usuários, ou seja, transformado em recurso financeiro para a empresa. Com isso, a diferença entre o valor faturado e arrecadado é considerado como perda de faturamento.

A associação dessas informações de volume, despesas e faturamento permite que o gestor analise o desempenho do sistema, percebendo as fragilidades e tendo embasamento para as suas decisões. Nesse contexto, é importante a precisão nas determinações dos valores de perdas reais (balanço hídrico) e de faturamento (diferença da entrega e pagamento das tarifas de água), bem como a identificação dos grupos predominantes dessas perdas, como ligações clandestinas, vazamentos, uso excessivo de água de serviço etc.

Vale ressaltar, que todo o volume de água perdido passa por uma série de processos e equipamentos, tendo, portanto, um valor agregado de trabalho dos colaboradores, de consumo de produtos químicos e de energia elétrica utilizada nos equipamentos que movimentam e tratam essa massa líquida ao longo do SAA.

Por ser o custo com energia elétrica um dos maiores entre as despesas de exploração do SAA, o volume perdido de água resulta em desperdício de recursos para o pagamento da energia elétrica relacionada com esse volume, sendo, normalmente, essa deficiência da empresa transferida para a tarifa dos consumidores.

Assim, ao definir a expansão da área de atendimento, a rotina de operação e as atividades de manutenção, o gestor precisa avaliar e determinar os gastos desnecessários (ou perdidos com energia elétrica), para que a massa líquida tenha a qualidade, quantidade e regularidade esperadas pelos consumidores cadastrados na empresa.

Dessa forma, é importante identificar as unidades com equipamentos e dispositivos que consomem energia elétrica no SAA, para o adequado planejamento e a tomada de decisão das intervenções voltadas ao uso racional de água e energia elétrica, conforme representado na Figura 2.

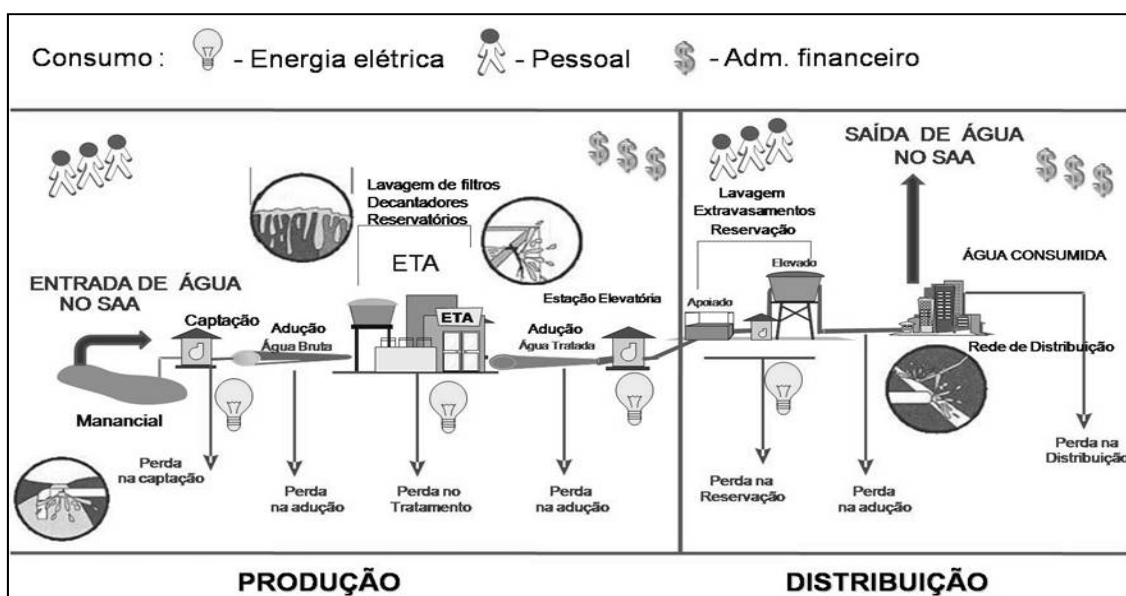


Figura 2: Localização das unidades com uso de energia elétrica em SAAs

A avaliação do desempenho hidroenergético do SAA depende da metodologia e procedimentos adotados, da capacidade e rotina operacional do sistema, das características das unidades na etapa de produção e da configuração do (s) setor (es) de distribuição de água, ou seja, os consumos e despesas com energia elétrica são provenientes de muitos fatores interdependentes.

Os volumes (captado, tratado e elevado) e as despesas da produção se relacionam com o desempenho das unidades de distribuição, que, caso apresentem perda de grande volume de água, acabam exigindo maior consumo de energia elétrica na etapa de produção, incorporando, dessa forma, despesas no SAA decorrentes da ineficiência de determinada unidade, instalação ou equipamento, destacando-se

entre essas o custo de bombeamento do volume de água em diversas estações elevatórias, o funcionamento dos equipamentos de tratamento e o volume de água de serviço.

Portanto, direta ou indiretamente, a variação do consumo de energia elétrica depende das características e da rotina de funcionamento de todo o SAA, razão para ser muito importante a macromedição das vazões em todas as etapas, a setorização da rede de distribuição, a instalação de hidrômetros em todas as ligações, a determinação das perdas etc.

## PERDAS DE ÁGUA E DE ENERGIA EM SAAS

Na Figura 2 são apresentados os pontos de uso da energia elétrica em SAAs, desde a captação da água no manancial até a sua distribuição aos consumidores, já tratada, cabendo ressaltar que as falhas na operação e manutenção do sistema e/ou a inadequada gestão da empresa de saneamento resulta em perdas de água, diretas e indiretas, e em gastos desnecessários com energia elétrica.

De acordo com o diagnóstico de 2008 do SNIS, o volume perdido de água nos SAAs é de cerca de 4.679.785 m<sup>3</sup>/ano no Brasil, sendo nesse relatório citada a despesa com energia elétrica de R\$ 1.928.928.878 nas empresas de saneamento de âmbito regional (BRASIL, 2010). É preciso enfatizar que este valor do SNIS 2008 considera as despesas dos sistemas de abastecimento de água e de esgotamento sanitário.

Alguns fatores devem ser considerados para minimizar o estado atual desses valores perdidos de água e de energia elétrica, como o conhecimento de técnicas, a participação e envolvimento dos profissionais das empresas de saneamento e a conscientização e sensibilização dos consumidores para o problema, o que reduzirá as perdas nos sistemas de abastecimento, além de melhorar a imagem da empresa diante de seus clientes (TARDELLI FILHO, 2004).

Silva (1998) comenta que a grande dificuldade para o controle e redução das perdas físicas e não-físicas é o **gerenciamento integrado**. Para isso, deve ser dada atenção especial às perdas de faturamento, ao cadastro de consumidores e sua permanente atualização, à política de micromedição e à manutenção preventiva de hidrômetros. Assim, “o grande desafio é a **integração dos setores técnico, comercial** (atendimento ao usuário) e de **faturamento** do serviço de saneamento” (SILVA, 1998, não paginado, grifo nosso).

Desse modo, perder água não é apenas o aumento da despesa, mas também a impossibilidade de obter receitas, ou seja, é trabalhar no início e ter pequeno retorno no final do processo. Para evitar isso, o prestador dos serviços precisa estar atento para melhorar a produtividade do abastecimento de água.

Nesse contexto, é imprescindível ter informação e comunicação para minimizar as perdas de água e de energia elétrica, a fim de tornar a gestão desses sistemas mais eficiente, conforme preconizado nas legislações referentes ao saneamento básico, isto é, a lei 11.445/2007 e o decreto 5.440/2005.

Na lei 11.445/2007, marco regulatório do saneamento básico brasileiro, embora no art. 2, inciso I, a universalização dos serviços de saneamento básico é um dos princípios fundamentais (BRASIL, 2007), porém isso não tem ocorrido efetivamente, contrariando também o art. 5º *caput* da Constituição Federal que ressalta o direito de todos os cidadãos à vida, no qual se inclui o direito a esses serviços, permitindo a melhoria da qualidade de vida da população (BRASIL, 1988).

Ora, mas para se alcançar esse objetivo de universalização do serviço de abastecimento de água, um dos fatores imprescindíveis é a atenção a ser dada à redução das perdas e desperdícios desse bem, pois quanto mais se perde e desperdiça água, menor número de ligações pode ser atendido, além de, indiretamente, também haver perda de energia elétrica.

No decreto 5.440/2005 é previsto o controle da qualidade da água, assim como são instituídos mecanismos e instrumentos para divulgação de informação ao consumidor sobre a qualidade da água para consumo humano (BRASIL, 2005), o que facilitará na sensibilização do consumidor para não perder e nem desperdiçar água tratada, que é paga por ele mesmo.

Os atores envolvidos no processo de perdas e desperdícios de água e de energia elétrica dos sistemas de abastecimento de água, isto é, o governo, a prestadora do serviço e a sociedade, precisam ter acesso e utilizar informações internas e externas, a fim de participarem ativamente.

Vale ressaltar que cada ator tem ação diferenciada no processo. Ao Governo cabe o planejamento das políticas públicas do setor saneamento; aos prestadores do serviço o gerenciamento do sistema e, portanto, das perdas da água e energia elétrica desde a captação até a distribuição, disponibilizando

informações ao Governo e à sociedade. Já a sociedade tem o importante papel de acompanhar as ações desses atores e, com isso, ter participação efetiva para o uso adequado da água e de energia elétrica.

Para disseminar a informação necessária aos diversos atores envolvidos no processo de abastecimento de água, nesses instrumentos legais são reforçados mecanismos como sistemas de informação, *internet* e comunicação nas contas individuais dos cidadãos. Em relação aos sistemas de informação, o governo tem apoiado, ainda que de maneira tímida, às empresas responsáveis pelos SAAs ou titulares dos serviços no repasse de suas informações ao sistema nacional, o SNIS. Entretanto, é preciso incentivar a criação de sistemas locais de informações sobre saneamento básico, a fim de minimizar esses problemas com registro e análise adequados de informações confiáveis para a gestão desses sistemas.

Portanto, levantar a informação estratégica nos sistemas de abastecimento de água é fundamental para o adequado controle hidroenergético, o que levará a otimização do sistema, com economia de água e de energia elétrica.

Com isso, a partir do conhecimento do funcionamento do SAA e das despesas que podem ocorrer neles, ocasionadas ou não por perdas e desperdícios, são destacadas informações de água e de energia elétrica abordadas no SNIS 2008 e propostas para a adequação hidroenergética nesses sistemas.

## O SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS) E A INFORMAÇÃO HIDROENERGÉTICA

O SNIS foi criado em 1996, ligado ao Programa de Modernização do Setor Saneamento (PMSS), para disponibilizar informações com qualidade ao setor saneamento, com a versão inicial constituída por dados de abastecimento de água e de esgotamento sanitário do ano de referência 1995.

Somente no ano de 2002 foram inseridos dados e informações do sistema de resíduos sólidos, enquanto que, até o momento, ainda não há registros do serviço de drenagem pluvial, tão importante quanto os demais para o conhecimento do setor de saneamento básico brasileiro.

Para a implantação do SNIS foram realizados estudos e avaliadas bases de dados já existentes, como a da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), Associação Nacional dos Serviços Municipais de Saneamento (ASSEMAE), Caixa Econômica Federal, Associação das Empresas de Saneamento Básico Estaduais (AESBE), censos e a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) (GABRIEL, 2008).

A metodologia de trabalho do SNIS abrange as fases de **coleta** (busca de informações primárias que são analisadas e transformadas em indicadores no SNIS), **tratamento** (processo de análise e correção de erros; cálculo dos indicadores; composição de tabelas de trabalho), **organização e armazenamento** (apresentados em tabelas, no glossário e em listas dos indicadores calculados e expressões de cálculo) e **recuperação e divulgação** dos dados registrados na base desse Sistema (impressos, CD-ROM e *Internet*).

Em relação à disseminação das informações do SNIS, essas são publicadas anualmente nos seguintes documentos: o **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos** e o **Diagnóstico de Manejo de Resíduos Sólidos**, no formato impresso, o **Aplicativo da Série Histórica de Dados**, em CD-ROM, e o *site* [www.snis.gov.br](http://www.snis.gov.br), na *Internet*.

A atualização do banco de dados do SNIS é realizada anualmente, com informações de amostra de prestadores de serviços do país, para os serviços de água e esgotos, e com informações de amostra de municípios, para os serviços de manejo de resíduos sólidos urbanos. A fase de coleta de dados ocorre, geralmente, entre os meses de maio a julho de cada ano (COLETA ..., 2009). Esses dados são fornecidos voluntariamente pelos prestadores de serviços e municípios convidados a participar do sistema.

Isso tudo tem contribuído para se ter conhecimento e, assim, atuar na transformação da realidade do saneamento básico brasileiro, no âmbito federal, estadual e municipal, visando à (ao): a) planejamento e execução de políticas públicas; b) orientação da aplicação de recursos; c) avaliação de desempenho dos serviços; d) aperfeiçoamento da gestão, em busca de eficiência e eficácia; e) orientação de atividades regulatórias e de fiscalização; f) contribuição para o controle social; g) utilização de seus indicadores como referência para comparação e para medição de desempenho no setor saneamento brasileiro (INSTITUCIONAL, 2009).



Atualmente o SNIS está vinculado à Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, do Ministério das Cidades, tendo, na versão publicada no ano 2010, dados de abastecimento de água e de esgotamento sanitário referentes ao ano 2008 e de resíduos sólidos obtidos no ano 2007.

No caso do abastecimento de água, o banco de dados do SNIS 2008 é formado por informações institucionais, administrativas, econômico-financeira, técnico-operacional e da qualidade, fornecidas, voluntariamente, pelos prestadores de abrangência regional e microrregional, apresentados de forma agregada (soma dos municípios atendidos) e desagregados por município, além de prestadores locais de direito público (serviços municipais) e de direito privado (empresas e administração públicas e privadas), com dados referentes ao próprio município (BRASIL, 2010), conforme representado na Figura 3.

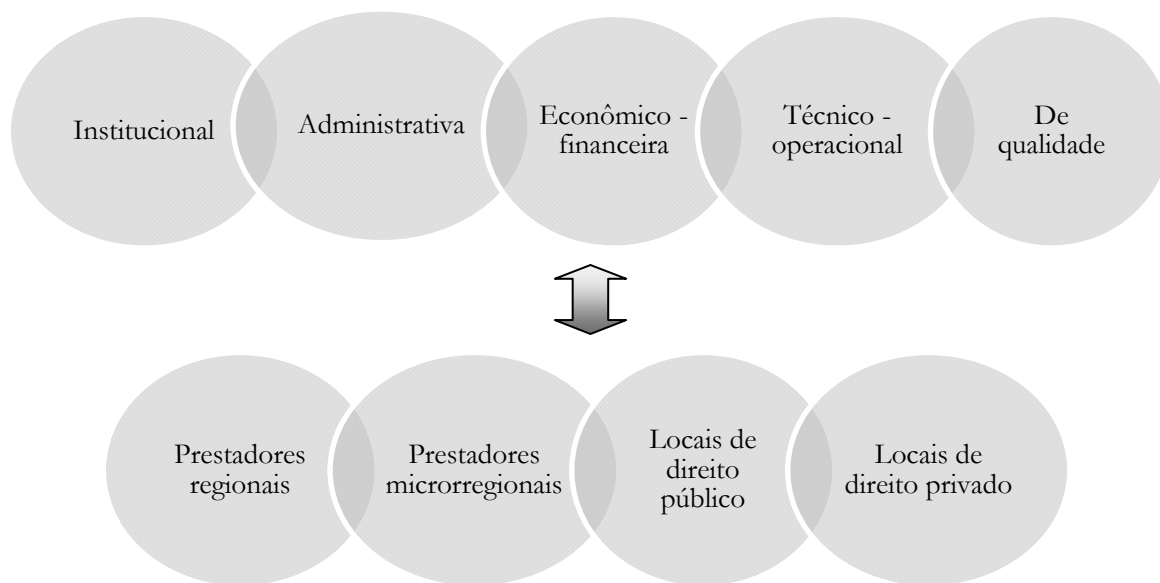


Figura 3: Tipos de informações e de prestadores que formam o SNIS 2008

As informações primárias de abastecimento de água estão agrupadas no SNIS 2008 em: informações gerais, de balanço, operacionais de água e financeiras.

Parte dessas informações primárias é relacionada em indicadores disponibilizados no SNIS, os quais têm sido utilizados para a avaliação do atendimento com água potável nos municípios brasileiros. Entretanto, pouco se observa sobre a energia elétrica utilizada, que é importante fator a ser relacionado com o desempenho e as despesas de abastecimento de água.

As informações primárias hidroenergéticas do SNIS 2008 podem ser diretas e indiretas. Como diretas são considerados: a) o consumo total de energia elétrica nos sistemas de água; b) as despesas com energia elétrica; c) as despesas de exploração. As informações indiretas são as despesas totais com os serviços, as despesas fiscais ou tributárias computadas na DEX, outras despesas de exploração e outras despesas com os serviços trazem embutidas informações de energia elétrica.

No Quadro 1 são relacionadas as informações primárias diretas constantes do SNIS 2008, disponibilizadas para revelar a maior eficiência dos SAAs quanto à utilização de energia elétrica.

Quadro 1: Informações primárias do SNIS 2008 em relação às informações hidroenergéticas em SAAs

Informações Primárias	Definição
CONSUMO TOTAL DE ENERGIA ELÉTRICA NOS SISTEMAS DE ÁGUA (A28)	Quantidade anual de energia elétrica consumida nos sistemas de abastecimento de água, incluindo todas as unidades que compõem os sistemas, desde as operacionais até as administrativas. A despesa com energia elétrica deve estar computada na informação F13. Unidade - 1.000 kWh/ano
DESPESAS COM ENERGIA ELÉTRICA (F13)	Valor anual das despesas realizadas com energia elétrica (força e luz) nos sistemas de abastecimento de água e de esgotamento sanitário, incluindo todas as unidades do prestador de serviços, desde as operacionais até as administrativas. Unidade - R\$/ano
DESPESAS DE EXPLORAÇÃO (DEX) (F15)	Valor anual das despesas realizadas para a exploração dos serviços, compreendendo Despesas com Pessoal, Produtos Químicos, Energia Elétrica, Serviços de Terceiros, Água Importada, Despesas Fiscais ou Tributárias computadas na DEX, além de Outras Despesas de Exploração. Unidade - R\$/ano

Fonte: Brasil (2010).

Para a tomada da decisão adequada, os gestores dos SAAs precisam relacionar essas informações primárias hidroenergéticas a outras, como população, extensão da rede de água, número de ligações etc., com os resultados possibilitando o desenvolvimento de indicadores para o entendimento da situação atual.

Os indicadores de abastecimento de água estão agrupados no SNIS 2008 em: econômico-financeiros e administrativos, operacionais de água, de balanço e de qualidade, para contribuir na minimização das incertezas dos gestores diante das decisões que precisam tomar.

Nessa sistemática de representação são identificados três indicadores hidroenergéticos, nos quais os valores de energia elétrica utilizada no abastecimento de água são apresentados em kWh, R\$ ou % no numerador ou no denominador do indicador. Na forma indireta, os dados de energia elétrica são parte integrante de outras informações primárias relacionadas em indicadores, por exemplo, a despesa de exploração em que a energia elétrica é uma das despesas. A despesa de exploração compreende despesas com pessoal, produtos químicos, energia elétrica, serviços de terceiros, água importada, despesas fiscais ou tributárias computadas na DEX etc. (BRASIL, 2010).

Assim, neste trabalho são analisados os indicadores do SNIS 2008 que estão diretamente relacionados às informações primárias hidroenergéticas em sistemas de abastecimento de água, sendo eles:

$I_{037}$  - Expresso em %

#### Participação da Despesa com Energia Elétrica nas Despesas de Exploração

$$I_{037} = \frac{\text{Despesa com Energia elétrica (F13)}}{\text{Despesa de Exploração (F15)}}$$

$I_{060}$  – Expresso em R\$/kWh

#### Índice de Despesa por Consumo de Energia Elétrica nos Sistemas de Água e Esgotos

$$I_{060} = \frac{\text{Despesa com Energia elétrica (F13)}}{\text{Consumo Total de Energia Elétrica (Água + Esgoto) (A28 + E28)}}$$

$I_{058}$  - Expresso em kWh/m<sup>3</sup>

### Índice de Consumo de Energia Elétrica em Sistemas de Abastecimento de Água

$$I_{037} = \frac{\text{Consumo Total de Energia elétrica em Sistemas de Abastecimento de Água} (A28)}{\text{Volume de Água(Produzido + Tratado Im portado) } (A06 + A18)}$$

Vale observar que o Índice  $I_{060}$  totaliza o consumo de energia elétrica nos sistemas de abastecimento de água e de esgotamento sanitário, ou seja, sua utilização no abastecimento de água requer o desmembramento do valor referente ao esgotamento sanitário. Com isso, sobram apenas dois indicadores hidroenergéticos diretos no SNIS 2008, o que é pouco para embasar a avaliação de desempenho e a tomada de decisão dos gestores de sistemas de abastecimento de água. Isso demonstra que outras informações ainda são necessárias para destacar e detalhar a utilização de energia elétrica no abastecimento de água.

## PROPOSTA DE INFORMAÇÕES ESTRATÉGICAS PARA A GESTÃO HIDROENERGÉTICA DE SAAS

Na análise do setor de saneamento é notado que as informações hidroenergéticas são em pequeno número e de baixa confiabilidade e, muitas vezes, isso tem ocorrido pela falta de equipamentos adequados ou pelo uso de procedimentos inapropriados para medição e registro de dados hidráulicos e energéticos, o que resulta em imprecisões e lacunas nas informações primárias fornecidas ao SNIS, de maneira voluntária, pelos prestadores responsáveis pela rotina operacional do SAA. Na Figura 4 são apresentadas algumas dificuldades para a pequena disseminação do conhecimento hidroenergéticos no setor.



Figura 4: Dificuldades para a sistematização de informações hidroenergéticas.

Para alterar essa situação, é necessário que os prestadores dos serviços tenham equipamentos adequados e utilizem procedimentos tecnológicos modernos, bem como que observem as diretrizes da recente Lei 11.445/2007, mais especificamente as referentes ao novo sistema governamental proposto, no caso o SINISA, ou seja, as lições e potencialidades do SNIS devem ser aproveitadas e os atuais problemas precisam ser estudados para as mudanças no setor.

Portanto, destaca-se como relevante a inclusão de dados que contribuam efetivamente para o combate das perdas hidroenergéticas nos sistemas de abastecimento de água, ampliando a cobertura e a disponibilidade de informações estratégicas quando da implantação desse novo instrumento do governo federal (SINISA), a fim de melhorar a tomada de decisão dos gestores desses sistemas.

Dentre essas podem ser destacados o registro, a sistematização e a divulgação de informações de consumo de energia elétrica nos horários de ponta e fora de ponta, o que permitirá avaliar o funcionamento dos equipamentos do SAA no período em que o valor da tarifa de energia é bem maior.

O conhecimento da variação horária do consumo de energia elétrica no setor de saneamento subsidiará o planejamento do setor elétrico, mais especificamente na definição dos valores de energia

elétrica que devem ser previstos para atender ao incremento do setor de abastecimento de água nos próximos anos, o que será muito influenciado pela dinâmica e crescimento da população nas áreas urbanas brasileiras.

As informações estratégicas precisam relacionar a energia elétrica consumida com as alturas manométricas atendidas na operação dos SAAs. Vale ressaltar que o glossário do SNIS 2008 faz referência a esse tipo de informação, no caso relacionando os dados de consumo de energia elétrica com a altura manométrica de 100mca. Contudo, apesar de definido no glossário, esse tipo de informação não é inserida nas tabelas de informações primárias e, portanto, não é relacionada com nenhum dos indicadores do SNIS 2008.

A falta de informações que relacionem o consumo de energia elétrica com os horários (ponta e fora de ponta) e com a altura manométrica dificulta a adequada avaliação de desempenho do SAA, ainda podendo induzir a erros de interpretação de resultados, pois o mesmo valor da relação kWh/m<sup>3</sup> pode representar duas situações bastante distintas de eficiência do SAA, ou seja, o gestor precisa estar atento ao utilizar os indicadores disponíveis, sendo comum a necessidade de complementação desses dados quando planeja ou toma decisões relacionadas com a melhoria ou expansão do SAA.

O conhecimento do consumo de energia elétrica em cada etapa e unidade do sistema é outro aspecto que precisa ser considerado para que as informações hidroenergéticas atendam às necessidades do gestor. É recomendado que os valores de energia elétrica em kWh, R\$ e % sejam detalhados em todas as unidades do SAA, no caso captação, adução, tratamento, elevação, reservação e distribuição de água, para possibilitar o agrupamento desse tipo de informação nos dois grandes grupos do SAA, no caso as etapas de produção e de distribuição de água.

Além dessas informações recomendadas para constar no novo sistema informacional SINISA, ressalta-se a importância de serem realizadas atitudes como: a) determinação da obrigatoriedade de fornecimento das informações por parte dos prestadores de serviços; b) organização e sistematização detalhada, por unidade do SAA, para registro em base de dados municipal das informações do SAA, que agrupadas formam as informações primárias repassadas para o SNIS; c) aplicação de auditoria dos dados e informações coletadas e repassadas pelos prestadores e municípios.

É premente a urgência de reunir dados seguros, confiáveis e precisos, a fim de que sejam utilizados adequadamente, tornando-se informações estratégicas para a gestão dos sistemas de abastecimento de água em todo território nacional. Para isso, as informações hidroenergéticas devem ser apresentadas com:

- registro em tempo real - inclusão de dados e informações deve ser imediata, o que favorece o conhecimento sempre atualizado dos dados do setor de saneamento;
- periodicidade – sistematização regular e mensal de dados e informações, para evitar a defasagem entre a coleta e a disseminação da informação;
- precisão – detalhamento de procedimentos e utilização de equipamentos adequados para medição das grandezas hidráulicas e elétricas observadas no SAA;
- confiabilidade – obrigatoriedade de auditoria dos dados e informações fornecidas, para aumentar o comprometimento dos prestadores dos serviços e dos municípios, com instrumentos para monitorar e avaliar a confiabilidade dessas informações;
- descentralização – criação de bancos de dados municipais e estaduais, a fim de conhecimento da realidade de cada município e estado;
- sistematização – procedimentos integrados de registro e a organização das informações padronizados em todo o país;
- participação – maior engajamento dos colaboradores e gerentes dos SAAs, com treinamentos contínuos e comprometimento;
- disseminação – maior divulgação dos dados para aumentar o conhecimento e participação dos atores envolvidos.

Portanto, é preciso maior segurança e confiabilidade na qualidade e na quantidade das informações hidroenergéticas dos SAAs, com detalhamento específico da energia elétrica nas diferentes etapas, para facilitar o entendimento dos técnicos e o conhecimento dos usuários.

Vale ressaltar que o gestor necessita de informações que demonstrem, de forma rápida e simples, os pontos vulneráveis e que, portanto, exigem ações hidroenergéticas pontuais, imediatas e eficazes, as quais acabam tendo grandes reflexos em todo o SAA.

Por outro lado, a participação e o controle social dependem da forma de apresentação e disseminação das informações, as quais devem ser elaboradas de forma direta e rápida, para facilitar o entendimento da sociedade. Nesse ponto, é oportuno o uso das tecnologias da informática para cadastro e sistematização dos dados, bem como para representação espacial dos resultados.

Em um segundo momento, a compreensão dos componentes hidroenergéticos do SAA deve ser ampliada ou melhorada nos prestadores de serviço, bem como as suas relações com outras informações primárias explicitadas de cada SAA do município, e não apenas em dados gerais do município como um todo.

Entre as informações primárias que podem ser relacionadas com as hidroenergéticas estão: a população atendida, os volumes de água, a altura manométrica das unidades dos SAAs, as despesas de exploração, o faturamento e a arrecadação.

Para isso, os titulares e prestadores dos serviços precisam estabelecer valores de referência hidroenergética, os quais devem ser avaliados regularmente com base no balanço hídrico e na determinação dos volumes perdidos de água, sendo, então, relacionados com a energia elétrica consumida no SAA.

A redução do custo de energia elétrica depende de ações administrativas e operacionais nas unidades e instalações do SAA, o que requer regras e procedimentos bem claros e detalhados; equipamentos adequadamente especificados e com manutenção permanente; funcionários comprometidos e conscientes da importância do seu trabalho e sistema informacional para o efetivo monitoramento e controle das informações.

Portanto, a determinação de indicadores de desempenho hidroenergético é essencial para a gestão de SAA, pois permite o conhecimento da situação, o planejamento de estratégias e a realização de ações para a redução das despesas de exploração e o aumento do faturamento, a partir do uso racional de água e de energia elétrica em todas as etapas do SAA.

## **CONCLUSÃO**

A base econômica da sociedade vem sendo transformada no decorrer dos tempos, sendo a informação e o conhecimento recursos estratégicos imprescindíveis para a formação da riqueza e prosperidade de países, organizações e demais instituições sociais.

A vantagem competitiva na sociedade da informação deixa para segundo plano os recursos terra, capital e trabalho, anteriormente priorizados na economia industrial. Entretanto, muitos gestores ainda não dispensam atenção necessária para buscar o domínio da informação, a fim de sobrevivência no atual mercado do mundo globalizado.

No caso do setor saneamento brasileiro, a organização, o processamento e a disseminação de informações e indicadores disponíveis nos bancos de dados do atual SNIS, e mais tarde no SINISA, representam iniciativa do governo federal em buscar soluções para problemas do setor, como é o caso das perdas e desperdícios de água e de energia elétrica nos sistemas de abastecimento de água.

Mesmo com as informações disponíveis no SNIS, é necessário observar, quando da implantação do SINISA, que os dados hidroenergéticos dos SAAs sejam mais consistentes e detalhados pelos prestadores dos serviços, a fim de minimizar as incertezas presentes na tomada de decisão.

O conhecimento da realidade de cada sistema do município é indispensável, face às reais demandas da população, o que exige cuidados e critério nas medições e na apresentação dos resultados hidroenergéticos, para que muitas decisões não sejam incompletas ou equivocadas.

Apesar do mérito de ser uma das poucas bases de dados de saneamento disponível, o SNIS recebe críticas quanto a sua metodologia e operacionalização, no caso podem ser citados a não obrigatoriedade da informação, a falta de auditoria e a não cobertura de todos os serviços de saneamento básico, como a drenagem pluvial, além da tardia inclusão de dados de resíduos sólidos (somente a partir de 2002).

Outras grandes lacunas do SNIS são a falta de dados primários hidroenergéticos e o detalhamento dos municípios que apresentam mais de um sistema de abastecimento de água. Vale observar que um mesmo município pode ter grande variação de eficiência, eficácia e efetividade social nos diferentes

sistemas de abastecimento de água que atendem a área do município, sendo oportuno ressaltar que o SAA corresponde às unidades que integram um conjunto desde a retirada de água do manancial até a distribuição de água.

Decorrente dessas inclusões de dados, ainda se chama a atenção para a necessidade da participação obrigatória dos responsáveis pelos serviços no novo sistema nacional de informações sobre saneamento, ressaltando a importância da confiabilidade das informações repassadas, com a devida auditoria dos dados fornecidos.

Nesse contexto, o estabelecimento de diretrizes para criação e implantação de sistema de informações de saneamento local é imprescindível, pois propiciará o registro e a organização das informações hidroenergéticas de cada SAA, o que complementará o previsto na Lei 11445/2007, além de ser fator preponderante para a regulação, fiscalização e controle social dos serviços de saneamento.

Não se pode deixar de reforçar que medidas para evitar as perdas e desperdícios nos sistemas de abastecimento de água, especialmente as de água e de energia elétrica, devem ser iniciadas na reformulação local desses sistemas, com o uso de equipamentos necessários para corrigir essas lacunas e outras ações que venham solucionar esses problemas. Como já comentado, isso é ratificado na Lei 11.445/2007, com a proposta de criação de sistemas de informações nos municípios e estados brasileiros, o que permitirá a consolidação dos dados em sistema nacional, em tempo próximo no SINISA.

Considerando o alto custo hidroenergético assumido pelas empresas de saneamento com a perda e desperdício de água e de energia elétrica em SAAs, recomenda-se que haja mais investimentos no processo de coleta e processamento de informações nesses sistemas, para que no futuro se tenha mais confiabilidade nas informações usadas na tomada de decisão do setor.

O gestor precisa de informações que demonstrem, de forma rápida, simples e fácil, os pontos vulneráveis e que, portanto, precisam de ações pontuais, imediatas e eficazes, as quais acabam tendo grandes reflexos em todo o SAA.

Ressalta-se, assim, que a gestão eficiente, com a redução das perdas e desperdícios de água e o consumo adequado de energia elétrica nos SAAs, precisa ser baseada em informações estratégicas hidroenergéticas disponibilizadas nas bases de dados locais e de abrangência nacional, pois o registro, sistematização e disseminação dessas informações são preceitos estabelecidos na Lei 11.445/2007 que favorecem a conscientização/capacitação dos profissionais das instituições envolvidas e a participação da sociedade, consolidando o setor no cenário brasileiro.

Dessa forma, é necessário estar atento para as diretrizes em relação ao fluxo da informação do setor com base na Lei n. 11.445/2007, como mecanismo de transformação do saneamento básico no Brasil, em busca da qualidade de vida da população, com dignidade de serviços públicos de saúde, moradia etc., sendo as informações hidroenergéticas essenciais e estratégicas nesse processo de mudança institucional da base governamental para o SINISA.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Senado Federal, 1988.

BRASIL. Decreto n. 5.440, de 4 de maio de 2005. 2005. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/Ccivil\\_03/\\_Ato2004-2006/2005/Decreto/D5440.htm](http://www.planalto.gov.br/Ccivil_03/_Ato2004-2006/2005/Decreto/D5440.htm)>. Acesso em: 29 set. 2008.

BRASIL. Lei n. 11.445, de 5 de janeiro de 2007. 2007. Disponível em: <[http://www.ceset.unicamp.br/~marta/ST%20501/Lei\\_Federal\\_n%C2%BA\\_11445.pdf](http://www.ceset.unicamp.br/~marta/ST%20501/Lei_Federal_n%C2%BA_11445.pdf)>. Acesso em: 2 out. 2008.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS: diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2008**. Brasília, 2010. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br>>. Acesso em: 14 maio 2010.

COLETA de dados. Disponível em: < <http://www.snis.gov.br/>>. Acesso em: 4 fev. 2009.

GABRIEL, Jordelan. **O Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS**. Brasília: PMSS, 2008. Apresentação em *Power Point*. Disponível em: <[http://www.snis.gov.br/arquivos\\_pmss/11\\_DESTAQUES/seminario\\_estudos\\_pmss/PMSS-SNIS-Evolu%C3%A7%C3%A3o%20e%20desafios.pdf](http://www.snis.gov.br/arquivos_pmss/11_DESTAQUES/seminario_estudos_pmss/PMSS-SNIS-Evolu%C3%A7%C3%A3o%20e%20desafios.pdf)>. Acesso em: 11 set. 2009.

INSTITUCIONAL. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/>>. Acesso em: 4 fev. 2009.

MCGEE, James; PRUSAK, Laurence. **Gerenciamento estratégico da informação**: aumente a competitividade e a eficiência de sua empresa utilizando a informação como uma ferramenta estratégica. Rio de Janeiro: Campus, 1994.

SILVA, Ricardo Toledo (Coord.). **Indicadores de perdas nos sistemas de abastecimento de água**. Ministério do Planejamento e Orçamento. Secretaria de Política Urbana. Brasília, 1998. Disponível em: <<http://www.geocities.com/hidrometro/pncda.htm>>. Acesso em: 13 set. 2008.

TARDELLI FILHO, Jairo. Controle e redução de perdas. In: TSUTIYA, Milton Tomoyuki. **Abastecimento de água**. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2004. p. 457 – 525.

---

## 10 Variação da pressão dinâmica em redes de distribuição de água com e sem setorização

---

**José Almir Rodrigues Pereira, Daniel Mescoito Gomes, Davi Edson Sales de Souza e Luciano Louzada do Couto**

Universidade Federal do Pará – UFPA – Belém - Brasil

### INTRODUÇÃO

De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) 2008, no Brasil foram produzidos e consumidos volumes de água de 14.303.079.000 m<sup>3</sup>/ano e de 8.364.361.000 m<sup>3</sup>/ano, respectivamente, o que resulta em 41,5% de perda de água nos sistemas de abastecimento de água no território nacional (BRASIL, 2008).

As deficiências na prestação dos serviços de abastecimento de água explicam esse elevado percentual de perda de água no Brasil, o que pode ser constatado na observação dos usuários que, diariamente, sofrem com a intermitência do fornecimento ou com o consumo de água de qualidade duvidosa.

A ampliação da rede de distribuição sem respeito a qualquer critério técnico é um dos fatores para a precariedade da qualidade do abastecimento público de água (BRASIL, 1999), pois o planejamento dos sistemas de infraestrutura urbana não acompanha o crescimento populacional.

Cada vez mais, o aumento indiscriminado da rede de distribuição de água torna complexo e empírico o controle operacional. Ao exceder a área original de abrangência, é prejudicado o comportamento hidráulico da rede de distribuição da água, dificultando a identificação, o controle e a caracterização dos vazamentos e das ligações clandestinas.

A falta de observação dos projetos de engenharia resulta em exportação de água entre diferentes setores do sistema de abastecimento de água, com muitas tubulações não sendo isoladas no setor de origem, ou mesmo controladas, por registros e macromedidores, na passagem de um setor para outro. Essa situação impede a comparação dos valores projetados com os obtidos na operação, prejudicando o controle da vazão e da pressão da água em toda a rede, o que, naturalmente, afeta a qualidade do abastecimento da água fornecida aos usuários do sistema.

Gomes (2004) observa que o controle operacional é a principal ação na gestão das empresas prestadoras de serviços de saneamento, por influenciar diretamente na qualidade do abastecimento em relação aos aspectos sanitário, ambiental, econômico e social.

Além disso, a falta de controle operacional adequado resulta em diversos problemas nas unidades de reservação, elevação e distribuição de água, como perda de água, racionamento ou condições hidráulicas insatisfatórias, no caso baixas vazões e pressões, que tantos prejuízos ocasionam às concessionárias (de ordem econômica) e aos consumidores.

Difícilmente, as perdas físicas nos sistemas de abastecimento de água são eliminadas totalmente. É comum a ocorrência de vazamento em redes e ramais, porém a concessionária responsável pelo abastecimento de água deve ter agilidade na recuperação das tubulações danificadas, o que requer pessoal capacitado, com equipamentos adequados e com disponibilidade de materiais de reposição.

Nos programas e intervenções para redução da perda de água, é essencial a participação das equipes de controle e de campo, bem como a adoção de medidas estruturantes, como a setorização da rede, a macromedição da vazão distribuída, a instalação de micromedidores e a definição de rotinas de controle.

O monitoramento dos valores de pressão dinâmica é uma intervenção eficaz para a identificação de problemas e análise das perdas físicas na rede de abastecimento de água, pois possibilita o estabelecimento de valores de alerta e segurança a partir do conhecimento dos valores piezométricos extremos (pressões elevadas ou muito baixas).

Gonçalves et al. (2009) ressaltam que a setorização da rede de distribuição possibilita a manutenção de patamares de pressão, observando, ainda, ser a setorização a primeira medida para a gestão das



pressões, com a separação em setores de menor dimensão facilitando o monitoramento dessa variável hidráulica.

Em Brasil (1999), a setorização é citada como requisito básico para o controle de sistemas de abastecimento de água, o que é reforçado quando Tsutiya (2004) sugere distritos pitométricos como unidade de controle operacional, enfatizando, entre outros, a necessidade de isolamento da rede. Contudo, apesar do bom desempenho com a setorização da rede de abastecimento de água, alguns gestores ainda resistem à limitação da área de atendimento, pois isso requer estudos técnicos e demanda investimentos.

O isolamento da rede de distribuição de água provoca opiniões divergentes. Alguns técnicos defendem o imediato isolamento da rede na área destinada ao setor, seguindo a concepção original do projeto, o que, em muitos casos, pode ocasionar alterações nos valores de pressão e de vazão de água nas áreas limites. Em contrapartida, outros técnicos, especialmente os que atuam na operação do sistema, entendem ser o aumento da produção a prioridade, já que o crescimento constante da população exige atendimento imediato, o que torna a setorização uma ação secundária.

Vale ressaltar a importância do controle da pressão na rede de distribuição de água, que, segundo recomendação da NBR 12.218/1994 (projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público), deve ter valor mínimo de 10 mca para pressão dinâmica em qualquer ponto nas tubulações distribuidoras. Assim, independentemente da setorização ou não, é indispensável à realização de estudos de desempenho hidráulico da rede de distribuição, pois isso permite prever as alterações de vazão e de pressão da água na área de atendimento.

No controle operacional é recomendado simular o comportamento hidráulico do sistema de abastecimento de água, pois isso possibilita a visão sistêmica e o acompanhamento contínuo dos parâmetros hidráulicos, elétricos e comerciais, complementando o conhecimento e a experiência dos técnicos envolvidos no planejamento, projeto e diagnóstico de tais sistemas.

Entre os modelos de simulação hidráulica desenvolvidos, o EPANET 2.0 pode ser destacado pela confiabilidade e grande quantidade de usuários existentes em muitos países. Esse programa é um *software* de domínio público, desenvolvido pela U.S. *Environmental Protection Agency* (EPA), com acesso livre por qualquer usuário.

O EPANET 2.0 tem um ambiente gráfico integrado para editar os dados descritivos da rede e dos cenários a modelar, executar simulações hidráulicas e de qualidade da água, aferir o modelo e visualizar os resultados em vários formatos. Estes incluem a possibilidade de examinar mapas da rede de acordo com códigos de cores, organizar tabelas de dados, desenhar gráficos em séries temporais, perfis de condutas, isolinhas, frequências e outros, e ainda produzir relatórios específicos (energia, calibração e reação).

Entre as funcionalidades desse *software* estão as obtenções de valores de vazão em cada tubulação, de pressão em cada nó, de altura de água em cada reservatório, de nível variável e de concentração de espécies químicas através da rede, ajudando a analisar estratégias e alternativas de gestão, melhorando a qualidade da água do sistema. Logo, o EPANET 2.0 foi concebido para ser uma ferramenta de apoio a análise de sistemas de distribuição, melhorando, para o consumo humano, o conhecimento do destino dos constituintes da água e de seu transporte (ROSSMAN, 2000).

Assim, este texto tem como objetivo avaliar hidraulicamente os impactos da setorização na distribuição de água na área urbana, com a utilização do *software* EPANET 2.0, tendo como exemplo de aplicação prática em setor de abastecimento de água da Região Metropolitana de Belém.

## **METODOLOGIA**

No trabalho, foram elaborados dois Cenários (1 e 2) para simulação hidráulica da variação dos valores de pressão dinâmica, sendo utilizados dados da rede de distribuição de água do 3º setor da Região Metropolitana de Belém (RMB). Em seguida, foi realizada a simulação, com auxílio do *software* EPANET 2.0, do comportamento hidráulico dessa rede para o Cenário 1 (rede interligada) e para o Cenário 2 (rede setorizada), por período de 24 horas. Finalizando, foram analisados e comparados os resultados das duas simulações hidráulicas, verificando qual dos dois Cenários estabelecidos tinha o melhor desempenho quanto aos valores médios de pressão na rede, durante o período de simulação.

## REDE UTILIZADA NA SIMULAÇÃO

O trabalho teve como área de estudo a rede de distribuição do 3º setor de abastecimento de água da RMB, gerenciado pela Companhia de Saneamento do Pará (COSANPA). Esse setor é constituído por reservatório apoiado, elevatória de água tratada, reservatório elevado e rede de distribuição, recebendo água tratada do sistema Utinga – ETA São Braz, conforme representado na Figura 1.

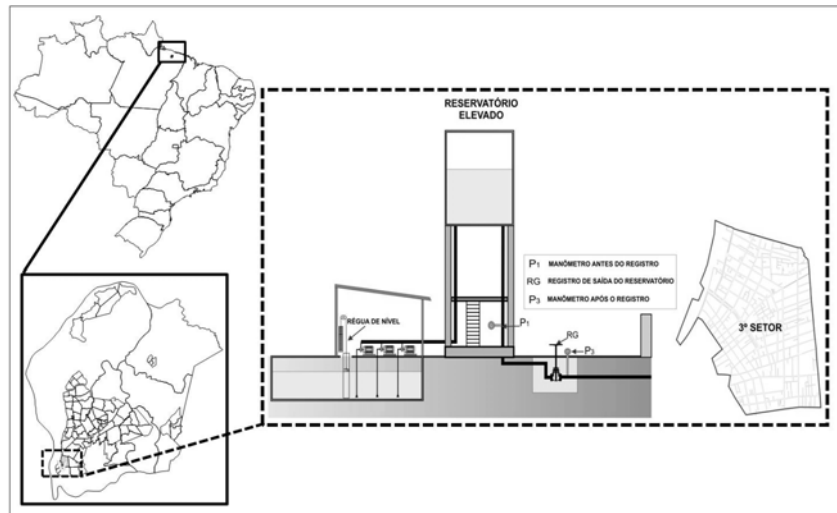


Figura 1: Localização do 3º setor de abastecimento de água  
 Fonte: COSANPA (2004).

De acordo com o Plano Diretor do Sistema de Abastecimento de Água da Região Metropolitana de Belém, o 3º setor tinha valor do consumo per capita de 386 L/hab.dia, área de 4,74 ha, 10.093 ligações e 233.175 m de rede, abastecendo população de 89.484 habitantes.

O estudo foi justificado pela necessidade da COSANPA conhecer e avaliar os impactos no abastecimento de água decorrentes da falta de delimitação física da rede de distribuição de água, já que a rede do 3º setor era interligada com as redes dos setores 1º, 2º e 8º da Zona Central da RMB, conforme pode ser observado na Figura 2 e no Quadro 1..

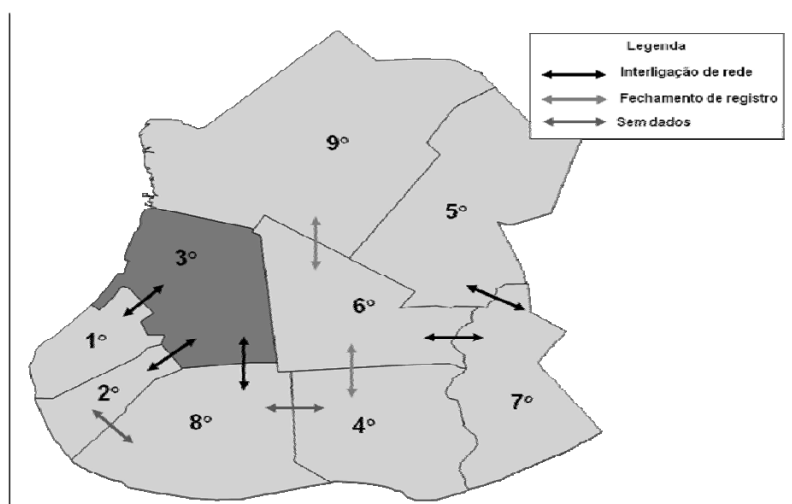


Figura 2: Interligações do 3º setor com o 1º, 2º e 8º setores de abastecimento da Zona Central da RMB.

Quadro 1: Trechos de interligação do 3º setor com o 1º, 2º e 8º setores de abastecimento da Zona Central da RMB.

LOCALIZAÇÃO	DIÂMETRO (mm)	SETOR INTERLIGADO
Avenida Conselheiro Furtado com Trav. Dr. Moraes.	300	1º setor
Av. Gentil Bittencourt com Dr. Moraes.	75	1º setor
Trav. Dr. Moraes com Av. Nazaré.	75 200	2º setor
Av. Governador José Malcher com Trav. Piedade	200	2º setor
Rua Aristide Lobo com Trav. Benjamim Constant.	75 100	2º setor
Trav. Benjamim Constant com Trav. Ó de Almeida.	250	2º setor
Trav. Benjamim Constant com Rua Manoel Barata	75	2º setor
Trav. Benjamim Constant com Rua 28 de Setembro	200	2º setor
Trav. Dr. Moraes com Av. Braz de Aguiar.	75 75	8º setor

## SIMULAÇÃO HIDRÁULICA

Para avaliar o funcionamento hidráulico da rede de distribuição do 3º setor de abastecimento, foi utilizado o *software* EPANET 2.0, sendo simulados dois cenários hidráulicos:

No Cenário 1 foi realizada a simulação do abastecimento de água, considerando a rede de distribuição do 3º setor interligada com a rede do 1º, 2º e 8º setores da zona central. Em seguida, foi simulado o Cenário 2 para a mesma condição de abastecimento do Cenário 1, tendo como diferença o isolamento da rede de distribuição do 3º setor de abastecimento de água da zona central.

Inicialmente, foram definidos os dados necessários para a realização das simulações estáticas e dinâmicas nas unidades componentes do 3º setor, com a finalidade de alimentação e sistematização dos dados de entrada e de processamento dos mesmos durante o uso do EPANET 2.0.

Da estação elevatória de água tratada foram verificadas as dimensões das tubulações de sucção e de recalque, os níveis operacionais e suas variações, bem como as características dos conjuntos motor e bomba. No caso dos reservatórios, apoiado e elevado, foram obtidos dados de volume (m<sup>3</sup>), profundidade útil (m), níveis operacionais, variação dos níveis operacionais, dimensão, extensão e material das tubulações de entrada e saída. Já para a rede de distribuição foram verificados:

- O Hidrograma de vazão (saída do reservatório elevado);
- O traçado e as dimensões de todos os trechos da rede (extensão, diâmetro e tipo de material);
- A topografia da área de abrangência da rede.

Na realização das simulações hidráulicas foram adotadas as seguintes considerações:

- A vazão adotada foi obtida por meio de macromedidor do tipo tubo de Pitot ligado a um Data Logger, instalados na saída da tubulação de distribuição de água, no período de outubro de 2004 a novembro de 2005, sendo adotado a vazão média no período;
- Foi adotado o mesmo hidrograma de vazão para os Cenários 01 e 02;
- Cada um dos cenários estudados continha 1.143 números de nós, os quais foram analisados em 24 horas, gerando, assim, uma amostragem de 28.575 valores de pressões.
- Para a distribuição do consumo de água nos nós, foi utilizada planilha do *software* Excel, considerando as variáveis: vazão específica e comprimento do trecho;
- O nível da lâmina d'água no reservatório elevado de distribuição foi considerado constante.

- Para calcular o volume explotado das tubulações do 3º setor para o 1º, 2º e 8º setores, foram utilizados valores de vazão limite para pré-dimensionamento (ver Quadro 2), sendo inseridos no parâmetro consumo-base na caixa de edição do nó, no software EPANET 2.0.

Quadro 2: Valores de vazão para pré-dimensionamento de rede de distribuição de sistemas de abastecimento de água.

<b>LIMITES DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO</b>		
<b>DN</b>	<b>hf máx. ou V máx.</b>	<b>Q (l/s)</b>
75	8m/Km	3,14
100	8m/Km	6,77
200	8m/Km	41,00
300	8m/Km	119,30

- Em função das características operacionais dos 1º, 2º e 8º setores, como baixa pressão e intermitência do abastecimento, foi adotada a exportação de água do 3º setor para os demais.

## RESULTADOS

Na COSANPA foram obtidos dados referentes ao 3º setor de abastecimento de água, os quais podem ser observados no Quadro 3.

Quadro 3- Caracterização das unidades constituintes do 3º Setor de abastecimento de água

<b>Características Operacionais</b>		
Reservatório apoiado	Volume útil (m³)	8.600
	Área útil (m²)	1.792
Reservatório elevado	Volume útil (m³)	320
	Área útil (m²)	49
Estação elevatória - CMB	Potência (cv)	150, 150 e 150
	Vazão nominal (l/s)	242, 242 e 242
	Altura manométrica (m)	35, 35 e 35
Tubulação de chegada	Diâmetro (mm)	500
	Material	C
Tubulação de recalque	Diâmetro (mm)	350
	Material	fofo
Tubulação de distribuição	Diâmetro (mm)	400
	Material	fofo
	Vazão distribuída	42.189

Na simulação foi considerado nível constante de água no reservatório apoiado, sendo a curva da bomba gerada por meio da utilização do EPANET 2.0. Para isso, o programa foi alimentado com dados da altura manométrica e de vazão nominal da bomba, conforme mostrado na Figura 3.

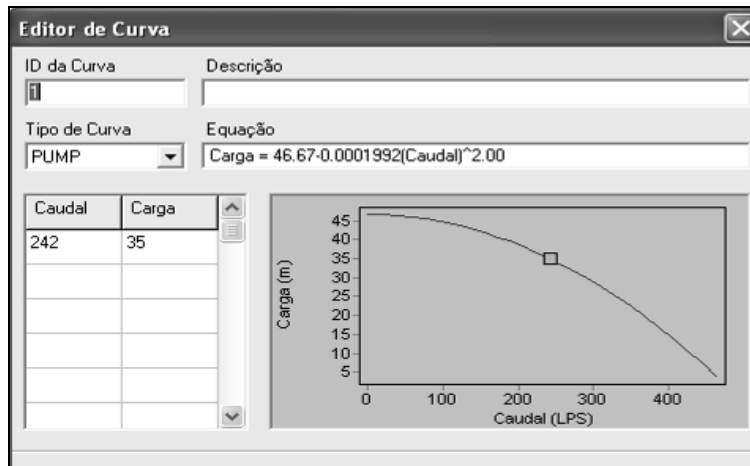


Figura 3: Curva da bomba utilizada na simulação do 3º setor de abastecimento de água da Região Metropolitana de Belém.

Os dados do reservatório elevado foram obtidos na gerência de projetos da Companhia de Saneamento do Pará e podem ser observados no Quadro 4.

Quadro 4 – Dados do reservatório elevado de distribuição do 3º setor de abastecimento da Região Metropolitana de Belém.

DADOS E INFORMAÇÕES	
Cota do terreno	14,50
Cota do fundo	34,95
Cota do nível de água médio	38,70
Cota do nível de água máximo	42,45
Altura do reservatório	20,40
Altura útil do reservatório	7,50
Altura manométrica máxima	27,90
Altura manométrica mínima	20,40
Diâmetro do reservatório	7,37

Na Figura 4 é mostrado o hidrograma de vazão na saída do reservatório elevado de distribuição do 3º setor de abastecimento.

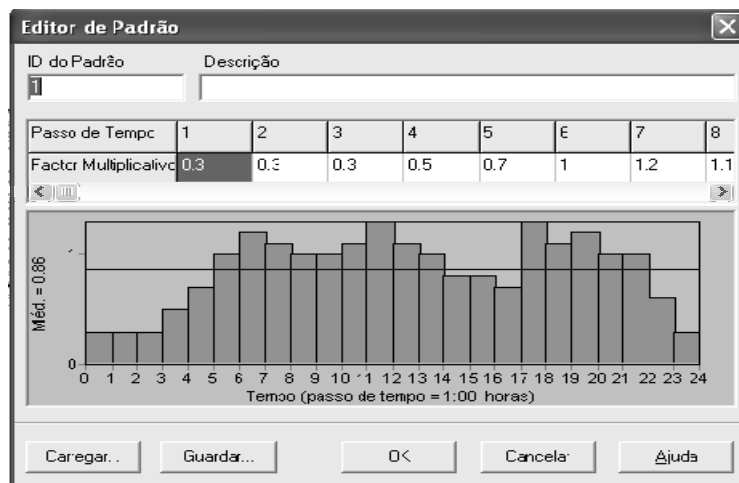


Figura 4: Hidrograma de vazão da saída do reservatório elevado do 3º setor de abastecimento de água da Região Metropolitana de Belém.

Como pode ser observado na Figura 4, o consumo de água na rede é da ordem de 30% do consumo médio no horário de 00h00min a 03h00min. Enquanto que nos horários de 07h00min, 12h00min e 18h00min, os consumos variam entre 120% a 130% de vazão média.

Na Tabela 1 são relacionados dados da rede de distribuição de água, como o comprimento total de 115.151,00 m, os diâmetros variando de 32 mm a 800 mm, com predominância do diâmetro de 75 mm (50,63%).

Tabela 1 – Dados da rede de distribuição do 3º setor de abastecimento da Região Metropolitana de Belém.

DIAMETRO	COMPRIMENTO (m)	COMPRIMENTO (%)
32	40	0,03%
50	11.634	10,10%
75	58.300	50,63%
100	12.641	10,98%
125	1.194	1,04%
150	9.371	8,14%
200	8.591	7,46%
250	4.446	3,86%
300	6.449	5,60%
350	158	0,14%
400	1.258	1,09%
450	308	0,27%
500	409	0,36%
600	304	0,26%
800	48	0,04%
<b>TOTAL</b>	<b>115.151</b>	<b>100%</b>

Na Figura 5 é mostrado o gráfico de isolinhas com a representação, em diferentes escalas de cinzas, dos valores de cotas do terreno, sendo os valores mínimo e máximo de 2,89 m e 14,76 m, respectivamente.



Figura 5: Isometria topográfica do 3º setor de abastecimento de água da Região Metropolitana de Belém.

## SIMULAÇÃO HIDRÁULICA DO 3º SETOR

Para comparar a eficiência hidráulica nos Cenário 01 (rede interligada) e Cenário 02 (rede setorizada), foram gerados relatórios de pressão para os horários de maior e menor consumo, visando identificar as alterações dos valores desse parâmetro com a variação do consumo de água ao longo do dia. Nas Figura 6 e Figura 7 são mostrados os valores médios de pressão nos sistemas interligado e setorizado, nas 24 horas de simulação.

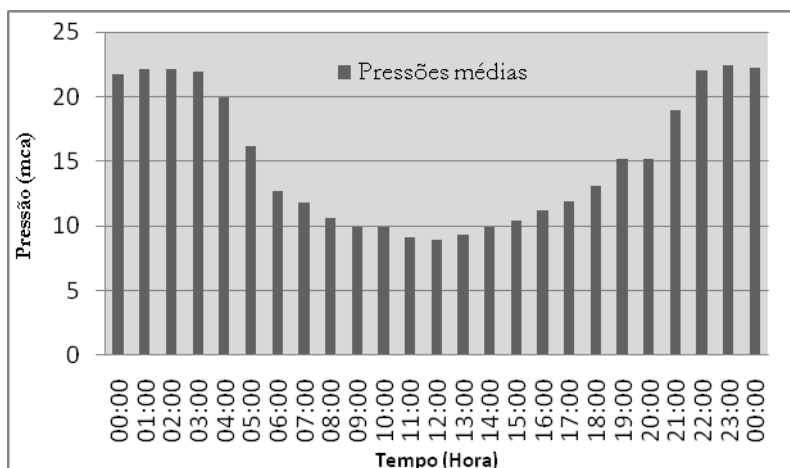


Figura 6: Valores médios de pressão nas 24 horas de simulação para o Cenário 1 (rede interligada).

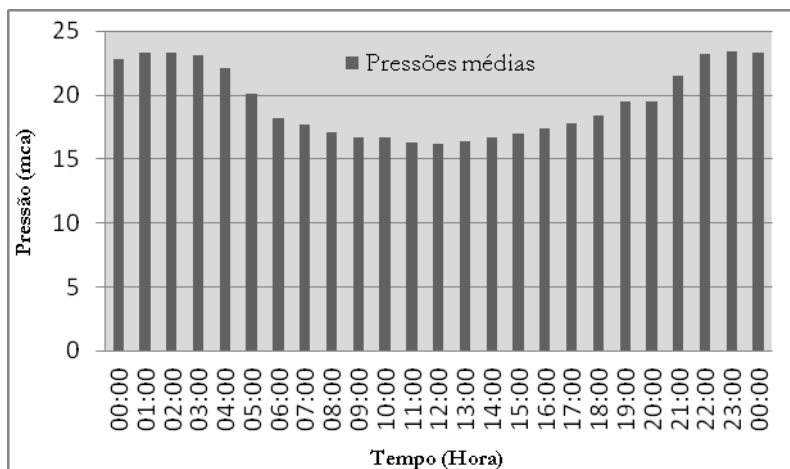


Figura 7: Valores médios de pressão nas 24 horas de simulação para o Cenário 2 (rede setorizada).

A seguir são comentados alguns resultados obtidos em horários específicos, os quais representam a variação nos valores de pressão ao longo das 24 horas nos dois cenários estudados.

### ANÁLISES DAS PRESSÕES ÀS 00h00min

No horário de 00h00min não foi observada diferença significativa nos valores médios de pressão entre o sistema interligado (cenário 01) e o sistema setorizado (cenário 02), os quais apresentaram valores de 21,77mca e 22,83mca, respectivamente. Na Figura 8 são representados os resultados gráficos das simulações realizadas nesse horário, podendo esses comportamentos hidráulicos semelhantes serem explicados pelo reduzido consumo de água nesse horário.

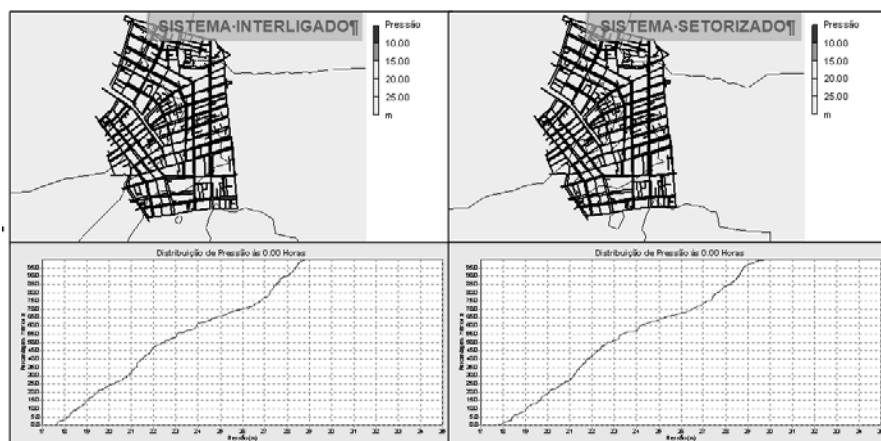


Figura 8: Desempenho das pressões às 00h00min nos Cenário 1 e Cenário 2.

No entanto, mesmo nesse horário, o sistema setorizado apresentou melhor resultado, pois a pressão média foi de 22,83mca, superior à pressão do sistema interligado.

### ANÁLISES DAS PRESSÕES ÀS 07h00min

Com o aumento do consumo de água no início da manhã, em relação aos horários anteriores, a diferença do desempenho hidráulico entre os dois cenários considerados foi relevante. No Cenário 1 (rede interligada) foi registrado valor da pressão média de 11,77mca no horário de 07h00min, enquanto no Cenário 2 (rede setorizada) esse valor foi superior (17,69mca), tendo o comportamento hidráulico do sistema setorizado melhores resultados de valores de pressão dinâmica na área estudada. É oportuno observar que, nos dois Cenários, os valores de pressão média atenderam à recomendação da NBR 12218/1994 para pressão mínima na rede de distribuição de água (10mca), conforme pode ser verificado na Figura 9.

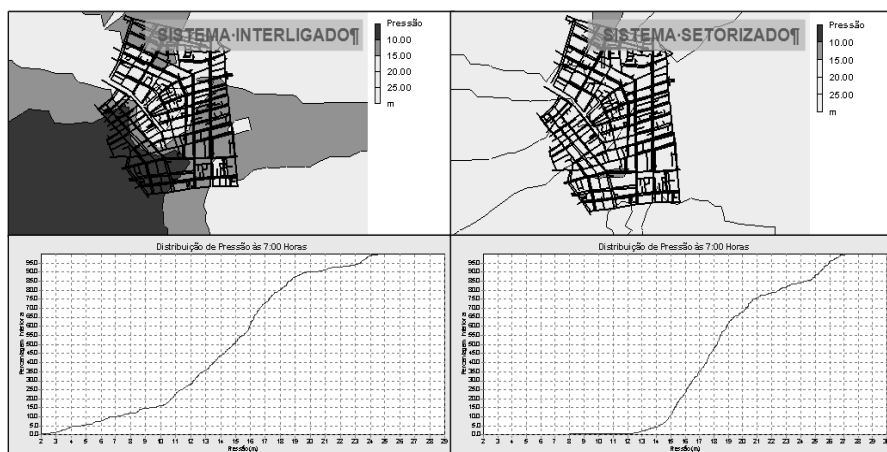


Figura 9: Desempenho das pressões às 07h00min nos sistema interligado e sistema setorizado.

### ANÁLISES DAS PRESSÕES ÀS 12h00min

Nesse horário foram observadas diferenças relevantes no desempenho hidráulico dos dois cenários considerados para a rede de distribuição do 3º setor de abastecimento de água, destacando-se que, em relação aos horários de 00h00min e 07h00min, no horário de 12h00min foi encontrado o menor valor médio de pressão no Cenário 1, conforme pode ser observado na Figura 10.



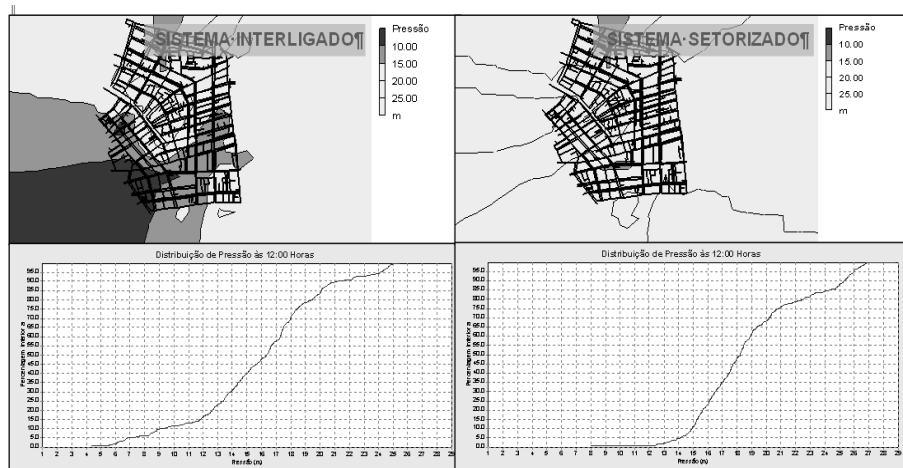


Figura 10: Desempenho das pressões para o horário de 12h00min no sistema interligado e sistema setorizado.

Os valores da pressão média foram de 8,92mca e de 16,16mca no Cenário 1 e no Cenário 2, respectivamente, com o sistema setorizado apresentando valor de pressão média superior ao valor mínimo de 10 mca, recomendado pela NBR 12218/1994, o que não ocorreu para o Cenário com a rede interligada.

O reduzido valor de pressão média no Cenário 1, assim como a diminuição no valor da pressão média do Cenário 2, quando comparado com os outros horários (00h00min e 07h00min), pode ser justificado pelo alto consumo de água no horário de 12h00min, que é um dos horários de pico de consumo a longo do dia.

Considerando todos os valores de pressão média obtidos nas simulações dos dois cenários estabelecidos para o 3º setor de abastecimento de água, foi verificado que 24% dos valores de pressão média do Cenário 1 (rede interligada) foram inferiores ao limite mínimo recomendado pela NBR 12218/1994 (10mca), enquanto que 100% dos valores de pressão média do Cenário 2 (rede setorizada) ficaram acima de 10mca, conforme pode ser verificado na Figura 11 e na Tabela 2.

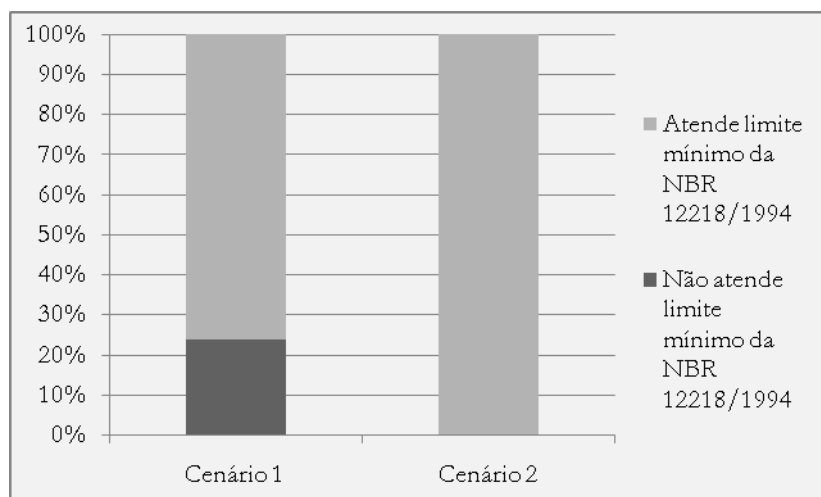


Figura 11: Análise do limite mínimo (10mca) estabelecido pela NBR 12218/1994 dos Cenários 1 e 2.

Tabela 2 – Pressões na rede de distribuição para os Cenários 01 e 02 do 3º setor de abastecimento de água na Região Metropolitana de Belém

PRESSIONES	CENÁRIO 1 (INTERLIGADO)	CENÁRIO 2 (SETORIZADO)
< 10 mca	24%	0%
10 -15 mca	28%	0%
15 - 20mca	20%	60%
>20 mca	28%	40%
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

A simulação hidráulica na rede de distribuição de água demonstrou a necessidade de setorização (isolamento) das tubulações na área projetada para o abastecimento de água, sendo essa medida fundamental para a manutenção dos valores de pressão dinâmica em patamar superior ao limite mínimo recomendado pela NBR 12218/1994.

## CONCLUSÃO

Com a simulação hidráulica foi constatada a necessidade de definir e padronizar as atividades de controle e monitoramento do desempenho operacional de redes de distribuição de água, sendo a avaliação das variações das pressões dinâmicas, importante ferramenta para técnicos e funcionários de empresas de saneamento. Também foi observado ser a setorização indicada para garantir o equilíbrio dinâmico dos valores de pressão recomendados pelas normas brasileiras.

Para o setor analisado, no caso o 3º setor de abastecimento de água da RMB, foi sugerido o estabelecimento de pontos de registro de pressão em locais específicos da rede de distribuição de água, pois isso possibilita a formação de série histórica e a futura comparação desses valores quando da realização de simulações utilizando *softwares* e outras ferramentas informatizadas.

Ainda foi concluído que a setorização apresenta impacto positivo na distribuição de água, pois o isolamento da área atendida resulta em maiores valores de pressão, conforme foi percebido no Cenário em que a simulação do abastecimento de água ocorria em área sem saída (exportação) de água para outros setores.

No caso dos valores médios de pressão observados na simulação dos dois Cenários (interligado e setorizado), foi verificado que 24% dos valores médios de pressão do Cenário 1 (rede interligada) ficaram abaixo de 10 mca, que é o valor mínimo recomendado pela norma da NBR 12218/1994. Por outro lado, o Cenário 2 (rede setorizada) apresentou 100% dos valores médios de pressão acima desse limite mínimo, portanto, atendendo a NBR 12218/1994 durante todo o período estudado.

Além disso, é oportuno ressaltar que a setorização da rede de distribuição teve maiores períodos de estabilidade dos patamares de pressão, confirmando as citações na literatura técnica e, paralelamente, mostrando que o isolamento da rede é medida importante para o adequado desempenho das variáveis hidráulicas em setor de abastecimento de água, bem como medida técnica eficiente no combate as perdas físicas, o que resulta em qualidade no abastecimento de água aos consumidores.

Portanto, com a realização da simulação hidráulica foi possível recomendar a setorização do 3º setor de abastecimento de água da Região Metropolitana de Belém, pois tal procedimento produzirá impactos positivos no desempenho hidráulico do sistema de abastecimento de água, o que, naturalmente, contribuirá para o melhor atendimento aos usuários, bem como reduzir os custos operacionais da COSANPA.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO. R. & NETTO. A. **Manual de hidráulica**. 8. Ed. São Paulo: EDGARD BLÜCHER LTDA. 1998;

\_\_\_\_\_.NBR12218 - **Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público**. Rio de Janeiro, 1994.

BRASIL. Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano/ Secretaria de Política Urbana. **Programa nacional de combate ao desperdício de água: DTA-C3** medidas de redução de perdas elementos para planejamento. Brasília, 1999.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento**. Brasília, 2008.

COSANPA. **Plano Diretor de Abastecimento de Água**. Belém, 2004.

GOMES, H.P. **Sistemas de abastecimento de água: dimensionamento econômico e operação de redes e elevatórias**. ed. 2. João Pessoa: Editora Universitária. 2004.

ROSSMAN, L.A. **Epanet 2 Users Manual**. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 2000.

SILVA, Benedito; CHEUNG, Peter; PERTEL, Monica; GONÇALVES, Ricardo; KIPERSTOK, Asher; PHILIPPI, Luiz; GOMES, Heber; ALVES, Wolney. Consumo de Energia. In: GONÇALVES, Ricardo (Coord.). **Conservação de água e energia em sistemas prediais e públicos de abastecimento de água**. Rio de Janeiro: ABES, 2009. P. 99 – 152.

TSUTIYA, M.T. **Abastecimento de Água**. 1ª Edição. São Paulo – SP. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2004. 643 p.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao PROCEL SANEAR / Eletrobrás, a Companhia de Saneamento do Pará, ao Grupo de Pesquisa Hidráulica e Saneamento - GPHS/UFPA e ao Laboratório de Eficiência Energética em Saneamento - LENHS/NORTE/UFPA.

---

# 11 Eficiencia hidroenergética como objeto de cooperación internacional

---

Mario Alejandro Nudelman, Fernando Diego Bach, Victorio Giorgini  
CEGELAH/FCYT UADER. Paraná, Entre Ríos, Argentina.

## INTRODUCCIÓN

### Participación del CEGELAH en la Red Lenhs/Prosul: como tomar posición desde su situación de Centro de reciente creación

En este apartado queremos plantear el rol que tuvo el CEGELAH dentro de la Red LENHS/PROSUL, diversa a la de la mayoría de los socios, especialmente de Brasil.

La participación en la Red fue coincidente con la fundación del Centro, razón por la cual la prioridad del mismo estuvo más bien centrada en poner en funcionamiento las principales líneas de I&D de acuerdo a los objetivos planificados para su primer trienio de vida.

La dinámica de la Red propuesta por su coordinador facilitó dos aspectos:

- 1) I Año: Conocimiento personal con los representantes de los Centros participantes. Lamentablemente, al no disponer de temáticas en común a partir de la dispar evolución relativa con el resto de centros, dicha relación se fue diluyendo a lo largo del tiempo.
- 2) II Año: Visita del Coordinador de la Red a la sede del CEGELAH en Paraná, Argentina. Planificada con una agenda abierta adaptada a las condiciones y prioridades que el Centro pudo elaborar para dicho acontecimiento.

Un breve cuadro resume cuál era la situación del Centro cumplidas las dos principales actividades de la Red:

Tabla N° 1 – Situación del CEGELAH frente a la Red Internacional Lenhs/Prosul

FORTALEZAS	DEBILIDADES
La pertenencia a la Red, con disposición de sus integrantes más avanzados en entablar vinculación con el Centro	No existía experiencia previa en Estudios ni desarrollos en Eficiencia Hidroenergética (EH)
La visita a la sede del CEGELAH del Coordinador de la Red y del Representante de ELETROBRAS. Generación de expectativas positivas a nivel local y provincial frente a la temática EH.	Los equipos que se conformaron en el Centro son noveles docentes-investigadores, sin experiencia previa específica en EH
Existe capacidad para abordar la temática de la información y de gestión como instrumento que facilite instalar la temática de la EH en forma sostenida en el medio de acción del CEGELAH.	Las dos líneas de trabajo en I+D abordan los principales componentes urbanos de la gestión sostenible del agua, pero no en forma directa los de EH
Incipiente Alianza con el Programa Provincial de Eficiencia Energética de la Secretaría de Energía de la Provincia.	La financiación de proyectos de investigación son de carácter anual y circunscriptos a la UADER, con presupuestos muy limitados. Equipamiento e infraestructura escasos.

Ante esta situación y con la premisa básica de emprender solo aquellas acciones que el Centro pueda controlar y ejecutar con solvencia y en forma sostenida a lo largo del tiempo, el CEGELAH se

propuso fijar su base de trabajo en la temática EH dentro de los términos de la Gestión local de Cooperación. La Estrategia de trabajo adoptada es muy sencilla: Tender Puentes.

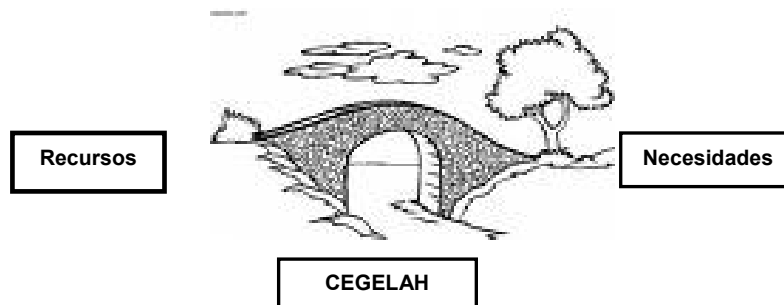


Figura 1. Tender puentes: Estrategia del CEGELAH/FCYT Frente a la temática EH

Puentes entre las Necesidades de los Municipios de la Provincia de Entre Ríos como primera región de proyección, entorno a la problemática EH y los Recursos expresados por un amplio abanico de opciones inherentes fundamentalmente a las capacidades de los centros pertenecientes a la Red Lenhs/Prosul en I+D+T (Investigación + Desarrollo + Transferencia) dentro de la temática EH. En dicho proceso, el CEGELAH asumiría progresivamente compromisos de formación académica, extensión universitaria, consultoría especializada y planteo a futuro de las primeras líneas de investigación, pasando a ser un referente confiable en las iniciativas de aprovechamiento de las capacidades instaladas dentro del entorno amplificado de la Red.

Dicha posición no es una determinación aislada y voluntarista. Responde a los flujos actuales de cooperación entre el mundo académico y el de los prestadores de servicios, en este caso dentro de la órbita EH. Es más, responde más directamente a los objetivos perseguidos por el CNPq de favorecer la cooperación sur-sur.

Por otra parte, gracias al nivel de expectativas positivas despertadas en el medio local por los eventos organizados por la Red Temática, el CEGELAH concretó una alianza estratégica con el Programa de Eficiencia Energética de la Provincia de Entre Ríos, como primera opción de interlocución con los municipios y financiación de los primeros estudios de campo.

Este es el entorno dentro del cual el CEGELAH presenta una herramienta diseñada para realizar en forma inteligente una vinculación exitosa entre necesidades y recursos. Partiendo del hecho comprobado durante la primera reunión de nuestra Red Lenhs/Prosul en Belo Horizonte de que el espectro de recursos disponibles en los Centros participantes era sumamente amplio, complejo y diverso, se puso el acento en diseñar un portal web que permitiese una identificación rápida de las opciones disponibles dentro de la red temática de recursos acordes a las necesidades locales identificadas.

El capítulo pretende presentar entonces a la EH como objeto de cooperación, de acuerdo a las condiciones particulares del CEGELAH y su entorno geográfico próximo y a su pertenencia a la Red Lenhs/Prosul. Se destaca a la Información como insumo de partida y las capacidades de gestión e innovación del Centro como motor de iniciativas de cooperación sur-sur.

## LOS PROBLEMAS, PRINCIPALES COMPONENTES

En este punto veremos quienes son los actores implicados en los problemas y cual es el ámbito de los mismos. En primer lugar explicitaremos brevemente datos sobre la provincia de Entre Ríos los cuales principalmente estarán focalizados en las fuentes de agua. A continuación encontraremos una descripción de la composición demográfica en base a las Municipalidades de la Provincia de Entre Ríos juntamente con indicadores de situación características de los abastecimientos de agua, y prioridades de eficiencia hidroenergética. De dichos datos se desprenderán un conjunto de premisas consecuentes que orientarán las futuras acciones de cooperación en EH.

Datos Generales de la Provincia de Entre Ríos:

- Superficie: 78.320 Km<sup>2</sup>
- Población: 1.158.147 hab.
- Temperatura Media Anual entre 18 y 19° C.
- Precipitaciones Medias Anuales desde 900mm a 1200mm
- Clima: Subtropical Húmedo de llanura (85% de la superficie)  
Templado Húmedo de llanura (15% de la superficie)
- Cuencas: 10
- Departamentos:17, Distritos: 106

## Fuentes de Provisión de Agua

### Agua Superficial

Desde su propio nombre la provincia denota la fuerte presencia de cauces hídricos que han determinado su demarcación geográfica e influido en su economía. Los dos principales cursos, el Paraná y el Uruguay, aglutinan a las grandes localidades en sus márgenes.

El relieve de la provincia tiene una ligera pendiente hacia el Sur, este efecto se aprecia también en el sentido en que corren los grandes ríos perimetrales.

Continuando con la influencia del relieve, se destacan por ser divisorias de aguas las grandes lomadas llamadas “cuchillas”. La cuchilla de Montiel, determina dos planos de escurrimiento hacia el Paraná por el Oeste y por el Este con dirección a la cuenca del Gualeguay o eje primario. Y la cuchilla Grande desagua hacia el Oeste generando los afluentes del Gualeguay y hacia el Este volcando con destino al Uruguay o hacia el Galeguaychú (ver Figura 2).

Además de estas, existen lomadas menores que son desprendimientos de las anteriores en los departamentos Federación, Concordia, Villaguay, La Paz, Paraná y Nogoyá que también hacen las veces de divisorias de aguas.

El eje interior de este sistema hidrográfico es el río Gualeguay que drena la larga depresión ubicada entre las dos principales lomadas, la Cuchilla grande y de Montiel, y desde allí sigue hasta desembocar en el delta del Paraná.

En la zona norte se encuentran los cursos del Guayquiraró y del Mocoretá que constituyen el límite con la provincia de Corrientes desaguando en el Paraná y el Uruguay respectivamente. Otros cursos significativos son: el Arroyo Feliciano que vuelca aguas en el Paraná, al igual que el arroyo Las Conchas y el Nogoyá pero este último lo hace a través del delta de este río (al noroeste de lo que hace el Gualeguay). El río Gualeguaychú, en cambio, tiene su desembocadura en el río Uruguay. Todos estos cursos conforman cuencas del tipo dendrítico donde avanan una gran cantidad de arroyos menores. Por último, hay una considerable cantidad de “causes secos” que solo llevan aguas de precipitaciones durante una mínima parte del año.

Como fue explicado en los párrafos anteriores los cursos interiores de la provincia desaguan en los grandes ríos perimetrales, por eso puede ser clasificados en función de sus vertientes de escurrimiento superficial. Por lo tanto el sistema hidrográfico de Entre Ríos se divide en:

La vertiente del río Paraná

La vertiente del río Uruguay

A la vertiente del Paraná aportan cuencas que se subdividen en dos grupos: las que desaguan directamente al cause principal de este río y aquellas que vuelcan sus aguas sobre el delta del Paraná. En las primeras se encuentran: la cuenca del río Guayquiraró, La cuenca del arroyo Feliciano, la cuenca del arroyo Las Conchas. Y entre las segundas: la cuenca del arroyo Nogoyá, la cuenca del río Gualeguay.

Por su parte, en la vertiente del río Uruguay desaguan: la cuenca del río Mocoretá, y la cuenca del río Gualeguaychú.

En Entre Ríos no se encuentran lagos, aunque en las partes bajas de sus lomadas se forman bañados o esteros. Ejemplo de esto son: el Yacaré, la Laguna del Pescado, del Sauzal, del Rabón, de los

Toldos, de las Cañas; esteros de Morán; la laguna Carabajal; la laguna de los Gauchos; la laguna Larga; la laguna de Las Tejas, de Montiel y otras.



Figura 2 - Red Hidrológica de la Provincia de Entre Ríos.

Esta vasta red hidrológica da lugar a la conformación de distintas cuencas las cuales fueron clasificadas en grandes grupos, en función de la importancia del recurso. Es así que cuenta con 10 (diez) grupos los cuales se encuentran detallados en el Cuadro N°3. A continuación se presenta un mapa con las cuencas hidrológicas del sistema hídrico de Entre Ríos (ver Figura 3).

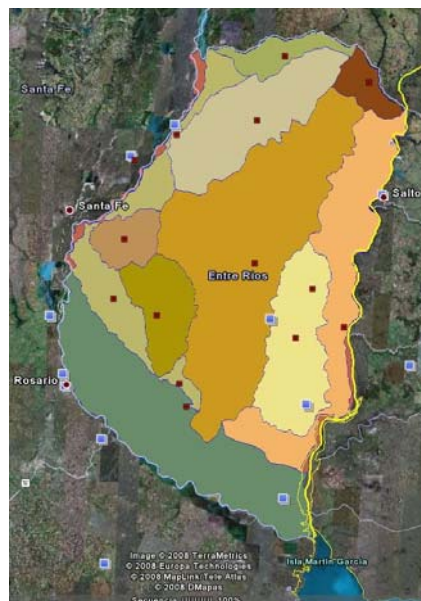


Figura 3 - Cuencas Hidrológicas de la Provincia de Entre Ríos.

Tabla N° 2 - Cuencas Hidrológicas Entre Ríos.

CUENCA	N°	Sup. (km2)
Feliciano	1	8203,62
Las Conchas	2	2156,74
Nogoyá	3	3885,12
Gualeguay	4	21548,49
Gualguaychú	5	6981,94
Guayquiraró	6	1945,47
Mocoretá	7	1609,68
Aportes Menores al Río Paraná	8	6205,1
Aportes Menores al Río Uruguay	9	10079,90
Sistema Delta	10	14464,84
Islas Paraná	0	715,17
Islas Uruguay	0	529,09

### Agua Subterránea

Pese a la importancia que tienen los recursos hídricos subterráneos en la provincia de Entre Ríos como fuente de abastecimiento de agua para ingesta humana, riego y últimamente recreativo o turístico (aguas termales), nunca se ejecutaron desde los organismos oficiales responsables, estudios o relevamientos sistemáticos de los mismos. En los últimos tiempos se ha avanzado en el conocimiento de este recurso a través de trabajos de investigación encarados por Universidades mediante la recopilación de información antecedentes o la prospección de aguas termales encarados por varios municipios.

Acuíferos Superiores de Entre Ríos:

Formación Salto Chico: Riego Arrocera – Uso Poblacional

Formación Paraná: Riego Cereales y oleaginosas - Uso Poblacional

Formación Ituzaingó: Uso Poblacional

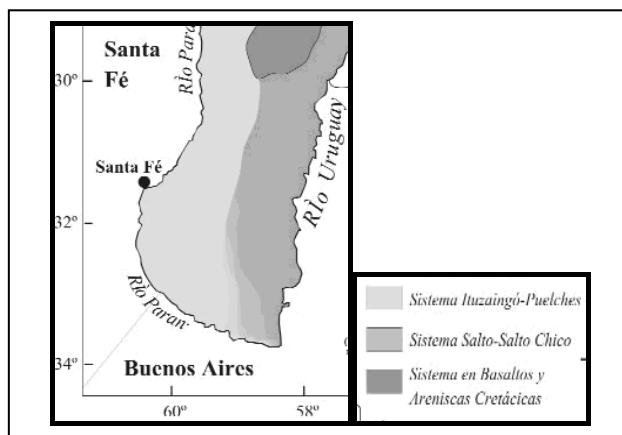


Figura 4 - Acuíferos Superiores de la Prov. Entre Ríos.



Siguiendo en parte el criterio de Fili et al, expuestos en el trabajo “Investigaciones geohidrológicas en la Provincia de Entre Ríos” se pueden considerar distintos ambientes hidrogeológicos: Formación Misiones, Formación Paraná, Formación Ituzaingó y Formación Salto Chico. En caso de requerir mayor información se sugiere la lectura del trabajo antes mencionado.

Haciendo un resumen de los recursos subterráneos de la provincia de Entre Ríos podemos, considerar dos grupos de acuíferos, a saber:

Acuífero Profundo: Acuífero Guaraní (Fuente: J. Santa Cruz- Proy. SAG)

Almacenamiento estimado: 37.000- 43.000 km<sup>3</sup>

Profundidad: 50 a 1200 m. Espesor medio: 250m

Porosidad efectiva: 15%

Recarga media: 166 km<sup>3</sup>/año

Área de descarga: 694.000 km<sup>2</sup>

Área de recarga directa: 783.000 km<sup>2</sup>

Volumen explotable: 1 km<sup>3</sup>

Temperatura: 33 a 65 °C

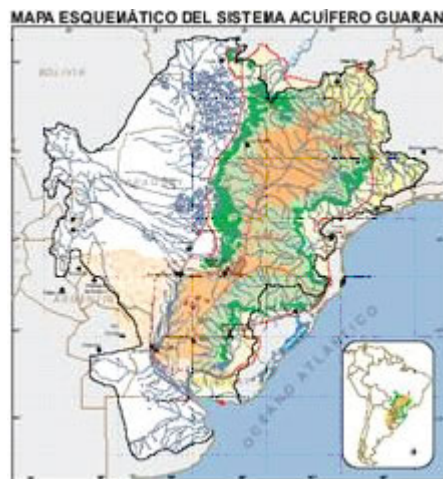


Figura 5 - Mapa Esquemático del Sistema Acuífero Guaraní (Fuente: Proyecto SAG)

## Los Municipios

Como mencionamos anteriormente, aquí nos detendremos un momento pues estamos observando los actores y adquiriendo una visión de cual es el escenario en el que estamos operando y la magnitud del mismo.

Desde el año 1980 los municipios de América Latina en general y de Argentina en particular (en 1980 Obras Sanitarias de la Nación parte paso a manos de los municipios y parte se privatizó), han ido asumiendo diferentes y cada vez más diversas responsabilidades en relación con las demandas directas de los ciudadanos. En el marco de circunstancias de distinta naturaleza (crisis económicas, aspectos coyunturales, crisis políticas), los procesos de descentralización de responsabilidades y las crecientes demandas sociales han promovido una mayor responsabilidad de los gobiernos locales. En muchos de los municipios que han asumido, entre otras, la prestación de servicios de agua potable y saneamiento se observa, en la mayoría de los casos, que esto se ha producido sin el consecuente aumento de su capacidad institucional para asumir la mayor escala y complejidad de la gestión.

Pasemos a ver los siguientes datos, en nuestro país con 3.761.274 km<sup>2</sup> (incluye Islas Malvinas, Islas del Atlántico Sur y Antártica) y una población estimada en 36.260.130 (Fuente INDEC, Censo Nacional de Población y Vivienda, 2001), teniendo en cuenta que la provincia de Buenos Aires con una superficie de 307.571 km<sup>2</sup> posee una población estimada de 13.544.764 (Fuente INDEC, Censo Nacional de Población y Vivienda, 2001), lo que hace una densidad poblacional de 44,04 hab/km<sup>2</sup> y lo comparamos, por ejemplo con la provincia de Entre Ríos donde la situación es la siguiente: superficie de 78.781 Km<sup>2</sup> y

una población estimada de 1.158.147 habitantes, esto hace una densidad poblacional de: 14,70 hab/km<sup>2</sup> (Tabla N°3); vemos que estamos ante una situación de claro desequilibrio territorial en términos demográficos. Esta situación se repite, en mayor o menor medida en todas las provincias argentinas.

Tabla N° 3 - Cantidad de Municipios en Argentina según Número de Habitantes.

N° DE HABITANTES	CANTIDAD MUNICIPIOS	PORCENTAJES %
de 2.000 a 9.999	546	69.55
de 10.000 a 49.999	185	23.57
de 50.000 a 99.999	28	3.57
Mas de 100.000	26	3.31
<b>TOTAL GENERAL</b>	<b>785</b>	<b>100.00</b>

(Información INDEC, Censo Nacional de Población y Vivienda 2001, Elaboración: Autor)

Tabla N° 4 - Cantidad de Municipios en Entre Ríos según Número de Habitantes.

N° DE HABITANTES	CANTIDAD MUNICIPIOS	PORCENTAJES %
de 2.000 a 9.999	33	62.26
de 10.000 a 49.999	16	30.19
de 50.000 a 99.999	2	3.77
Mas de 100.000	2	3.77
<b>TOTAL GENERAL</b>	<b>53</b>	<b>100.00</b>

(Información INDEC, Censo Nacional de Población y Vivienda 2001, Elaboración: Autor)

Tabla N° 5 - Resumen de Indicadores.

N° DE HABITANTES	ARGENTINA	ENTRE RÍOS
Población Total	36.260.130	1.158.147
Población Total en Hogares	35.923.907	1.149.418
Superficie (km <sup>2</sup> )	3.761.274	78.781
Densidad Poblacional (hab/km <sup>2</sup> )	9,64	14,70
% Población Nacional	100	3,19
% Población Urbana	89,43	82,50
% Población Rural	10,57	17,50
% población c/acceso agua de red pública	78,40	90,00
% población c/acceso a red desagües cloacales	42,50	66,50

(Información INDEC, Censo Nacional de Población y Vivienda 2001, Elaboración: Autor)

Según el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC) se considera población urbana a la que habita localidades de 2.000 o más habitantes.

Si nos detenemos en la provincia de Buenos Aires encontraremos que algunos municipios cercanos a la ciudad de Buenos Aires concentran un número de habitantes equivalentes al de varias provincias reunidas, sin embargo, el 93,12% de los municipios tiene menos de 50.000 habitantes y el 69,55% tiene menos de 10.000 habitantes (ver Tabla N° 3).

Haciendo un rápido análisis de los datos aquí expresados vemos que el 82,50% de la población en ER es del tipo “urbana” (ver Tabla N° 5) y que el 92,45% de los municipios (62,26% son municipios de 2.000 a 9.999 habitantes más 30,19% municipios de 10.000 a 49.999 habitantes) posee una población menor a 50.000 habitantes (ver Tabla N° 4). También se observa que el 90% de la población tiene acceso al agua de red pública y el 66,50% población está cubierto por el servicio de red desagües cloacales, siendo estos valores superiores al promedio nacional (ver Tabla N° 5).

En estos tipos de unidades poblacionales las problemáticas a resolver son similares. Esta densidad de poblados nos indica que las líneas de acción que se tomen con vistas al servicio público de agua y cloacas deberá considerar opciones tanto para densidades razonables en los cascos consolidados pero coordinadas con aquellas que responden a condiciones de baja densidad y población dispersa.

### Uso y Aprovechamiento del Recurso Hídrico

Ahora bien, asociemos la información obtenida anteriormente, sobre municipios, población y recursos hídricos, para tener una mejor comprensión sobre el estado de situación actual.

La demanda sobre este recurso es por la actividad de consumo humano y además se utiliza para agricultura, ganadería, avicultura, industria, recreación (turismo) y otros usos. Los cuales hasta la fecha no están siendo monitoreados en forma metodológica y sistemática.

A modo de resumen observemos estos indicadores de aprovechamiento hídrico a escala provincial:

Tabla N°6 - Consumo de Agua en Entre Ríos

USO	VOLUMEN (M3)	%	OBSERVACIONES
Consumo Humano	131.400.000	13,3	90% de las localidades se proveen con agua subterránea (1)
Agricultura	782.700.000	79,4	Riego de arroz, cereales, y oleaginosas. (2)
Ganadería	58.684.612	6,0	4.015.600 cabezas (2)
Avicultura	1.603.526	0,2	2103 granjas aves consumo (parrilleros). 227 granjas de aves ponedoras (3)
Recreación	11.309.760	1,1	11 explotaciones termales (otras en estudio) (4)
Industrial	Sin datos		
<b>Total</b>	<b>985.697.898</b>	<b>100</b>	

Cuadro basado en la conferencia “Gestión de los Recursos Hídricos Provinciales. Importancia Estratégica” de Oscar Duarte, modificado por Ing. Fernando Bach (1) Fuente INDEC, 2001. (2) Fuente ENA, INDEC, SAGPyA, 2001. (3) Fuente SAGPyA, 2010. (4) Fuente ERRTER, 2010 (<http://www.errter.gov.ar/>).

## Premisas consecuentes para la Cooperación en EH

Los Municipios entrerrianos, si bien cuentan con una cobertura de abastecimiento urbano de agua que ronda el 90% (ver Tabla N° 5) de los usuarios en promedio, tiene serias deficiencias en la calidad del servicio que se presta. La misma se ve disminuida progresivamente por los siguientes motivos:

- Aumento del consumo de agua “per cápita”, sin una adecuada mensura de los volúmenes consumidos por usuario (cuasi inexistencia de micro-mediciones o de mediciones por sectores),
- Agua no controlada (fugas) sin ningún tipo de mensura de la misma,
- Relevamiento impreciso o hasta inexistente por sectores, de los tendidos de abastecimiento,
- Conocimiento impreciso de las capacidades reales de bombeo,
- Escaso o “vago” conocimiento del comportamiento de las fuentes de provisión subterránea.

Estos puntos traen aparejados las siguientes consecuencias:

- A) Crecimiento progresivo de la demanda de agua, aumentando la necesidad de nuevas perforaciones.
- B) Disminución y/ hasta corte de suministro en horas pico, problema que se agudiza en verano y /o en temporada alta de turismo.
- C) Aumento de los costos energéticos para la provisión del servicio (luego del los RRHH, la energía el segundo costo en importancia en la tabla de gastos para brindar el servicio urbano de agua)<sup>1</sup>.

La falta o escasa información disponible sobre las principales variables del sistema, significa una importante debilidad a la hora de tomar decisiones locales que contribuyan a la sostenibilidad del sistema. Esta debilidad abarca desde aspectos del entorno natural del cual se abastece (Fuentes subterráneas y las principales condiciones de uso y recarga de la misma, posibles amenazas a su calidad, etc.), las condiciones de consumo por manzana, hasta las características precisas de la topología de la red y de todos sus componentes.

Por último, hay que sumar la escasa capacidad instalada de los RRHH locales para llevar adelante trabajos de relevamiento y registro (y equipamiento para realizar la medición de parámetros hidráulicos, en explotación, distribución y administración), como así también en el manejo de tecnologías informáticas que les permita capturar dicha información, procesarla y generar datos relevantes para la toma de decisiones. Si esto es así para el uso de información descriptiva, la capacidad es nula para un manejo dinámico de la información (simulación por ordenador) que permitiría una construcción más precisa de escenarios futuros, herramientas de alto impacto a la hora de introducir modificaciones estructurales al sistema que aparejen un uso eficiente de los siempre escasos recursos económicos y financieros disponibles (Nudelman, Schenone y Sedano, 2010).

Esta situación de los Municipios de la región de referencia próxima del CEGELAH, muestran que la EH como política local dista de ser la prioritaria. El nivel de subsidios que imperan en los costos del agua e inclusive de la energía eléctrica, ocultan estos déficits reales. Si bien el año 2008 significó para la Argentina un año crítico en materia energética (aumento de la demanda, sequías, elevado costo del petróleo, debilidad en cuanto al autoabastecimiento de combustible – fuel oil - aspecto que generó medidas de racionamiento de energía en casi todo el país). Pero, la dinámica imperante en el medio de políticas cortoplacistas, hicieron descender el interés real sobre el ahorro energético en general y la EH en particular cuando desaparecieron los síntomas de escasez energética.

Lo expresado hasta aquí nos muestra claramente cuál debería ser el perfil de potenciales proyectos de cooperación en el campo de la EH:

### Etapa I

---

<sup>1</sup> Federación Entrerriana de Cooperativas de Servicios, Conferencia de Ahorro energético en Abastecimientos de Agua y Saneamiento organizada por el CEGELAH/FCYT y la Secretaría de Energía de la Provincia. 2008

- Línea “Diagnóstico EH” – Es necesario arribar a los principales déficits en cuanto ineficiencia hidroenergética, ubicarlos tanto geográfica como organizacionalmente y cuantificarlos en términos económicos.
- Línea “Condiciones del Sistema de Información Local del Ciclo Urbano del Agua” – Disponer de un detallado catastro de infraestructura y condiciones de consumo de agua y energía asociada a la misma. El catastro comprenderá también los recursos humanos disponibles.
- Línea “Implantación de un Sistema de Información Local del CUA” – Infraestructura de información y capacitación de recursos humanos en el manejo de tecnologías de la información aplicadas al CUA.

## Etapa II

- Línea “Diseño de un Programa de EH ajustado a los principales déficits detectados a nivel Local” – En dicho Programa se combinarán tanto Recursos (locales, regionales, nacionales y de la Red Lenhs/Prosul) en pos de satisfacer positivamente los principales déficits locales debidamente detectados y tipificados. También se identificarán las principales fuentes de financiación, inclusive aquella local proveniente de las medidas de EH que se implementen progresivamente.

Una conclusión parcial sobre lo expuesto hasta aquí nos muestra que si no se dispone de una base apropiada de información, cualquier medida será aislada y condenada al fracaso en el corto o mediano plazo. A esto se le suma que las condiciones políticas del sector podrán llegar a favorecer medidas decididas de ahorro solo cuando se transparenten costos o en situaciones de déficits energético prolongado. Por lo tanto el recurso para implementar un Programa de EH, inicialmente deberán explotar el sendero de los recursos de Ciencia y Tecnología, Innovación tecnológica, Cooperación al Desarrollo fundamentalmente donde la ventaja comparativa del conocimiento aplicado disponible en la Red, puede generar iniciativas experimentales de interés.

Una vez ejecutado estudios fundamentados en evidencia, se estará seguramente en condiciones de esgrimir argumentos económicos que ameriten inversiones acotadas provenientes de Programas de Obras y Servicios Públicos y Desarrollo Local.

## **RECURSOS Y NECESIDADES DE INTERMEDIACIÓN**

### **Desde el Sistema Internacional de Ciencia y Técnica a Proyectos Ejecutivos de Eficiencia Hidroenergética**

En este punto abordaremos cual es el marco operativo que dispone el CEGELAH dentro de los lineamientos dictados a nivel Nación y Provincia que fijan los ejes nacionales y provinciales de investigación científica innovación y desarrollo vinculados a la temática de nuestro centro y más específicamente a proyectos ejecutivos de Eficiencia Hidroenergética.. Como así también que sistemas de cooperación están disponibles en el ámbito de las relaciones internacionales.

Comenzaremos con la descripción de los lineamientos nacionales en investigación desarrollo e innovación en ciencia y tecnología en el sector de energía, estando estos definidos por el Plan Plurianual del Bicentenario . Los mismos son resultados de una matriz en donde se definen “temas horizontales” a los cuales se le cruzan diversas cadenas y su problemática está directamente vinculada a la sustentabilidad de largo plazo. A continuación, dado que no es objeto de este trabajo y a modo de ser lo más objetivos y didácticos describimos brevemente el punto referido a la temática de la Energía en donde se mencionan solamente los de nuestra incumbencia directa, para mayor información sobre este punto recurrir a Plan Plurianual del Bicentenario 2006 – 2010.

Tabla N° 7 - Plan Plurianual del Bicentenario 2006-2010  
(Descripción resumida)

<b>1.4. ENERGÍA</b>
<p>En base a un trabajo de relevamiento de oferta y demanda de conocimientos, auspiciado conjuntamente por la Secretaría de Energía y la SECyT, se han identificado en el Plan 1999-2001 (sección 3.3.4.) los siguientes temas prioritarios de interés general para la investigación:</p>
<p><i>1.4.1. Investigación Tecnológica</i></p> <p><i>i. Hidrocarburos:</i></p> <p><i>ii. Electricidad:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Tecnologías Nuevas para la Generación de Electricidad (celdas de combustible, eólica, solar, etc.).</li> <li>○ Tecnologías para la Generación de Electricidad en pequeña escala para núcleos aislados y para la atención de pequeñas demandas dispersas. Desarrollos vinculados a la Calidad de Servicio a Usuarios Finales.</li> <li>○ Calidad de Equipamiento Eléctrico (Normalización y Certificación).</li> <li>○ Nuevas Tecnologías en Redes de Alta Tensión.</li> <li>○ Estudios básicos para el desarrollo de proyectos hidroeléctricos y riesgos geológicos conexos.</li> </ul> <p><i>iii. Fuentes nuevas y renovables de energía:</i></p> <p><i>iv. Uso racional de la energía:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Nuevas Tecnologías para el Uso Eficiente de la Energía.</li> </ul> <p><i>v. Medio ambiente:</i></p>
<p><i>1.4.2. Investigación socioeconómica</i></p> <p><i>i. Estudios generales:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Estudios que contribuyan al mejoramiento de los sistemas de información energética disponibles (balances energéticos, información geológica, información de precios y tarifas, legislación y sistemas regulatorios, etc.)</li> </ul> <p><i>ii. Hidrocarburos:</i></p> <p><i>iii. Electricidad:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Estudios sobre las tendencias tecnológicas en la oferta eléctrica.</li> </ul> <p><i>iv. Demandas y uso de la energía:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Caracterización del comportamiento de los usuarios.</li> <li>○ Estudios sobre requerimientos y demandas energéticas, en los planos sectorial y geográfico-regional.</li> <li>○ Modelos de demanda de energía.</li> </ul> <p><i>v. Uso racional de la energía:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Estudios Regionales y Sectoriales sobre Uso Racional de la Energía.</li> <li>○ Estudios sobre sustitución entre fuentes de energía.</li> </ul>
<p><i>1.4.3. Investigaciones Ambientales</i></p>

El organismo encargado de coordinar y llevar adelante estas acciones es el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva (Mincyt). Y tal como esta explicitado en su sitio de Internet es el encargado de “establece políticas y coordinar acciones orientadas a fortalecer la capacidad del país para dar respuesta a problemas sectoriales y sociales prioritarios, así como contribuir a incrementar la competitividad del sector productivo, sobre la base del desarrollo de un nuevo patrón de producción basado en bienes y servicios con mayor densidad tecnológica”.

Este ministerio forma parte de un total de doce (12) ministerios que junto con seis (6) secretarías dependen de la “Jefatura de Gabinete de Ministros”, quien a su vez esta bajo la órbita de la Presidencia de la Nación.

Para una mejor administración y aplicación de los recursos este ministerio esta compuesto de tres (3) secretarías, un Consejo Asesor formado por: el Consejo Federal de Ciencia y Tecnología (COFECYT), el Consejo Interinstitucional de Ciencia y Tecnología (CICYT) y el Comité Nacional de Ética. Completan este ministerio dos (2) organismos descentralizados, la Agencia de Promoción Científica y Tecnológica (AGENCIA) y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Veamos un organigrama al respecto.

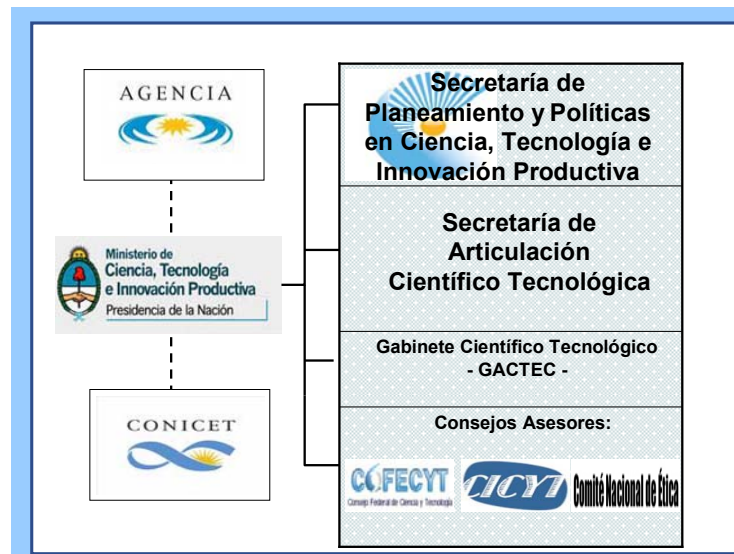


Figura 6 - Organigrama Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación Productiva de la Argentina  
(Fuente: Oscar Galante)

Toda la normativa legal para la organización institucional del sistema de ciencia, tecnología e innovación productiva se encuentra en el site: <http://www.mincyt.gov.ar/index.php?contenido=ley1>, como así también lo referente a: capacitación y desarrollo tecnológico, incentivos fiscales (exenciones y desgravaciones, créditos fiscal) incentivos no fiscales (ayuda económica, otros), propiedad intelectual, bioseguridad y tratados internacionales de cooperación científica. Vale aclarar que las leyes de mayor relevancia son: Ley 23.877 Promoción y Fomento de la Innovación Tecnológica. Sancionada: Buenos Aires, 28 de septiembre de 1990. Promulgada de Hecho: 26 de octubre de 1990. Y la Ley 25.467 Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación. Objetivos de la política científica y tecnológica nacional. Responsabilidades del Estado Nacional. Estructura del Sistema. Planificación. Financiamiento de las actividades de investigación y desarrollo. Evaluación de las mismas. Disposiciones especiales y generales. Sancionada: agosto 29 de 2001. Promulgada: septiembre 20 de 2001.

Hasta el momento fueron presentados aspectos organizativos y administrativos, veamos como se financian estas acciones.

Para ello, si observamos el organigrama anterior (Figura 6), debemos recurrir a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (AGENCIA) que depende administrativamente del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva, y la cual fue creada por el Decreto 1.660/96 del Poder Ejecutivo Nacional.

La AGENCIA, a través de sus dos Fondos (FONCyT y FONTAR), financia el desarrollo de investigaciones científicas, innovaciones y modernizaciones tecnológicas de empresas, científicos e institutos de investigación de todo el país. Administra al FONSOFT, fondo fiduciario creado a partir de la sanción de la Ley de Promoción de la Industria del Software, y también al FONARSEC, cuyo objetivo es desarrollar capacidades críticas en áreas de alto impacto potencial.

Además, “la Agencia impulsa el establecimiento de acuerdos de cooperación con organismos nacionales, gobiernos provinciales y municipales; empresas y fundaciones dirigidos a implementar acciones conjuntas para la promoción de la investigación científica y tecnológica y de la innovación”.

“La Agencia adhiere a los convenios de cooperación nacionales e internacionales con universidades, organismos públicos, empresas, asociaciones, etc. con el fin de asociarse para desarrollar proyectos dirigidos a la generación de conocimientos en áreas C&T”.

“Estos convenios son administrados por el Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica (FONCyT) en el marco de los Proyectos de Investigación Científica y Tecnológica Orientados (PCTO). Las características de cada convocatoria se acuerdan con el socio dispuesto a cofinanciarla” (fuente MINCYT).



Figura 7 - Organigrama FONDOS MINCYT Nación Argentina  
(Fuente: Oscar Galante).

Veamos como se articulan estos recursos nacionales con las provincias o como se práctica el federalismo. Remitiéndonos a lo dicho en el site del MINCYT: “Las políticas encaradas por el Ministerio, a través del [Consejo Federal de Ciencia y Tecnología](#) (COFECyT), buscan coordinar con las provincias acciones que respondan a la **satisfacción de necesidades propias** de cada una de ellas; **disminuir la brecha tecnológica** existente entre las distintas jurisdicciones provinciales; **coordinar y brindar apoyo técnico** a los Consejos Regionales de Ciencia y Tecnología; ser órgano de referencia y consulta en temas de interés provincial y regional; **y promover la transferencia y la vinculación tecnológica** entre el sector de la investigación provincial y el sector productivo”.

“En el marco de una política de promoción regional de la innovación, a través de la **Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica** (AGENCIA) y con la intervención coordinada de grupos de empresas, centros de investigación, gobiernos provinciales y locales, se fomenta el desarrollo de proyectos de aglomerados productivos y se impulsa el establecimiento de acuerdos de cooperación para el desarrollo de proyectos dirigidos a la generación de conocimientos científico y/o tecnológicos en áreas de interés para cada socio local”.

Solo a modo de ejemplo se detallan a continuación dos de los instrumentos de COFECyT (Figura 8) y del FONCYT. (Figura 9).



Instrumentos COFECyT			
LINEAS	TIPO DE BENEFICIO y PRESENTACION	CARACTERISTICAS DE LOS PROYECTOS	MONTO FINANCIAMIENTO
ASETUR - Apoyo tecnológico al sector Turismo	SUBSIDIOS por Convocatoria pública	Es una línea de financiamiento desarrollada especialmente para dar impulso a centros turísticos regionales que requieren innovación tecnológica y que hayan sido seleccionados conjuntamente por las autoridades de aplicación de cada provincia y el área de Turismo.	\$600.000 por jurisdicción. Dichos aportes no podrán exceder el 70% del costo total del proyecto.
DETEM - Proyectos de Desarrollo Tecnológico Municipal	SUBSIDIOS por Convocatoria pública	Aspira a jerarquizar la calidad de vida del municipio a través del desarrollo tecnológico a nivel local y mejores prácticas de gestión, a fin de dar respuesta a las demandas y necesidades sociales, asegurando el desarrollo sustentable, en concordancia con las políticas y estrategias provinciales.	\$600.000 por jurisdicción. Dichos aportes no podrán exceder el 70% del costo total del proyecto.
PFIP - Proyectos Federales de Innovación Productiva	SUBSIDIOS por Convocatoria pública	Esta línea tiene por objetivo general dar solución, a partir de la generación y transferencia del conocimiento, a problemas sociales y productivos concretos, de alcance municipal, provincial o regional, identificados como prioritarios por las Autoridades Provinciales en Ciencia y Tecnología	\$900.000 por jurisdicción. Las jurisdicciones podrán asignar un financiamiento máximo de \$450.000 por año calendario. Dichos aportes no podrán exceder el 70% (setenta por ciento) del costo total del proyecto.
PFIP-ESPRO - Proyectos Federales de Innovación Productiva- Eslabonamientos Productivos	SUBSIDIOS por Convocatoria pública	Destinados a apoyar el desarrollo competitivo de las cadenas de valor de todo el territorio nacional que han sido preestablecidas por las autoridades provinciales de Ciencia y Tecnología en correspondencia con sus estrategias de desarrollo regional.	\$900.000 por jurisdicción. Dichos aportes no podrán exceder el 60% o el 75% del costo total del proyecto, según se trate de proyectos de carácter provincial o interprovincial respectivamente.

Figura 8 - Instrumentos del COFECyT (Fuente: Oscar Galante).

Instrumentos FONCyT		
<b>PICT</b> Proyectos de Investigación Científica y Tecnológica	Generación de nuevos conocimientos en áreas científicas y tecnológicas, cuyos resultados están <i>a priori</i> destinados al dominio público. Categorías: I. TEMAS ABIERTOS / II. AREAS PRIORITARIAS / III. RAICES / IV. START-UP.	A: Equipos   entre \$ 230 y \$ 350 mil B: Jóvenes   máx \$ 30 mil D: Equipos de reciente formación   máx \$ 120 mil
<b>PICT-O</b> Proyectos de Investigación C&T Orientados	Convenios con organismos nacionales o provinciales, universidades e instituciones sin fines de lucro y empresas, destinados a realizar convocatorias conjuntas para el co-financiamiento de proyectos de investigación C&T orientados a temas de interés común.	Montos según convenios
<b>PID *</b> Proyectos de Investigación y Desarrollo	Dirigidos a la generación y aplicación de nuevos conocimientos C&T para la obtención de resultados pre-competitivos o de alto impacto social. Son cofinanciados por 1 ó más Adoptantes (empresas o instituciones) que se reservan la prioridad de adquisición de los resultados.	\$ 750.000- x año y x proyecto Monto máximo total \$ 1.800.000-
<b>PME</b> Proyectos de Modernización de Equipamiento	Orientados al fortalecimiento de las capacidades centrales de uno o más Laboratorios o Centros de I+D, en el marco de sus actividades a nivel regional y en vinculación a los problemas identificados como relevantes en el Plan Nacional de Cti.	A: \$ 600.000-   B: \$ 1.200.000-   C: \$ 1.800.000-
<b>PAE</b> Programa de Areas Estratégicas	Proyectos interinstitucionales cuyo objeto es dar respuesta a problemas productivos y sociales, nacionales y regionales; en áreas de alto impacto económico y social. Incluyen como componentes los distintos instrumentos de la ANPCyT.	Monto máximo total \$ 9 millones x PAE
<b>PRH</b> Programa de Recursos Humanos	Incluye dos componentes, los PIDRI (Relocalización o Radicación de Investigadores que se encuentran en el exterior); y, los PFDT (Formación de Doctores en áreas Tecnológicas).	Monto máximo total x Institución \$ 4,5 millones para PIDRI y \$ 3 millones para PFDT
<b>RC **</b> Reuniones Científicas	Financiamiento parcial de reuniones dirigidas a la promoción de la investigación científica o tecnológica, a realizarse en el país. Se financian reuniones en cuatro categorías según las características y ámbitos de actuación.	Periódica Nacional: \$ 30 mil Periódica Internacional: \$ 70 mil Talleres / Workshops: \$ 20 mil Primeras Reuniones: \$ 20 mil

Figura 9 - Instrumentos del FONCyT (Fuente: Oscar Galante)

Ahora bien, detengámonos un momento en la provincia de Entre Ríos y observemos como se aplican estos recursos. En Mayo del año 2009 se suscribió el [decreto 1517](#) por el cual el gobierno provincial designó a la ACTIER (Agencia de Ciencia, Tecnología e Innovación de Entre Ríos) entidad que depende del Ministerio de Desarrollo Social, Empleo, Ciencia y Tecnología, como autoridad de aplicación en el ámbito provincial de la Ley Nacional 23.877 de Promoción y Fomento de la Innovación Tecnológica. Creándose un Consejo Consultivo.

Este esta formado por los siguientes miembros: Poder Ejecutivo provincial; Universidad Autónoma de Entre Ríos (UADER); Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER); Universidad Tecnológica Nacional (UTN); universidades privadas con asiento en la provincia; Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA); Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI); Consejo Nac. Investigaciones Científicas y Tec. (CONICET); Cámaras Empresariales; las organizaciones del sector agropecuario de la Prov. de Entre Ríos; las Unidades de Vinculación Tecnológica; los parques, polos e incubadoras con personería jurídica propia y asiento en la provincia; por la Confederación General del Trabajo (CGT)

Cabe señalar que por Ley Provincial N° 8630, Entre Ríos ratificó su adhesión a la Ley 23.877, correspondiéndole a los órganos de ciencia y tecnología provinciales ser la autoridad de aplicación con las siguientes funciones:

- a) Administrar la alícuota de fondos nacionales determinada y los fondos que se prevean a nivel provincial;
- b) Aprobar los proyectos que se sometan a su consideración.

Como vimos en párrafos anteriores la AGENCIA promueve los acuerdos de cooperación de desarrollo científico, tecnológico y de innovación ente grupos de investigación argentinos y de otros países.

Los mecanismos de cooperación acordados se establecen teniendo en cuenta, el marco jurídico vigente, los medios de financiación con los que se cuentan, su aplicabilidad y el estado de desarrollo de la investigación científica y tecnológica nacional e internacional.

Entre ellos se encuentran los internacionales de carácter multilateral y bilateral. Dentro de los de carácter multilateral actualmente se practican con la Unión Europea, MERCOSUR, Programas, Organismos, Centros e Institutos Internacionales, Premios y Becas. En los de carácter bilateral existen más de 150 Acuerdos entre Intergubernamentales e Interinstitucionales que enmarcan la relación bilateral con países de Ibero América, Europa Occidental y Oriental, Medio Oriente, Sudeste Asiático, parte de Asia, Oceanía y África (fuente MINCYT).

Sobre estos acuerdos bilaterales nos detendremos en el: Programa de Cooperación Científico - Tecnológico Argentino - Brasileño. Programa de Cooperación entre la Fundación Coordinación de Perfeccionamiento del Personal de Nivel Superior (CAPES) del Ministerio de Educación de la República Federativa del Brasil y el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva (MinCyT) de la República Argentina. Este programa sustenta los proyectos conjuntos de investigación y cooperación científica tecnológica de las Instituciones de Enseñanza Superior de Brasil y de Argentina, que promuevan la formación en el nivel de posgrado así como el perfeccionamiento de docentes e investigadores en todas las áreas del conocimiento científico.

Este es uno de los programas de cooperación científica que esta en funcionamiento entre Argentina y Brasil, al cual debemos verlo como un puente de vinculación entre los intereses comunes de ambos. Debemos procurar construir proyectos de investigaciones y desarrollo conjuntos de mutuo interés. De manera tal de utilizarlo como punto de partida para definir líneas de acción regional. Y como bien dice el MINCYT “trabajar en la identificación de los campos de acción y áreas científicas de interés mutuo, considerando las prioridades y potencialidades nacionales y de socios internacionales”.

## **INFORMACIÓN, UNA FORMA DE ENLACE ENTRE NECESIDADES Y RECURSOS**

### **I Portal, un instrumento para focalizar recursos disponibles de Eficiencia Hidroenergética en la Red Internacional Lenhs/Prosul**

En este punto trataremos de indicar como las distintas problemáticas dentro del ciclo urbano del agua (CUA) pueden ser abordadas con la información, trabajos, proyectos, desarrollos, cursos, capacitación, y otros recursos que encontramos en la “Red LENHS/PROSUL”, todo esto en un ámbito de cooperación e intercambio con los Centros que la conforman. Y, además, como el CEGELAH/FCYT da una respuesta a estas demandas por medio de la construcción de una herramienta de vinculación.

La forma de trabajo utilizada se resume en los siguientes pasos:

- a) se define un marco conceptual donde se expondrán una serie de definiciones y conceptos para otorgarle una plataforma referencial al trabajo. Además, en vista de la temática abordada, ya sea por el objeto del mismo, el ciclo urbano del agua (CUA), por los actores intervinientes (universidades, países) y/o por la basta información (cúmulo de trabajos, investigaciones, ensayos, etc.) que se registra en cada institución que participan de la Red LENHS/PROSUL, es necesario explicitar los límites y alcances del mismo.
- b) se diseñará una “Herramienta de Vinculación” la cual comenzará siendo un buscador de información científica y tecnología referida a la temática del CUA. Esta base de datos contendrá el universo de “RECURSOS” de la Red LENHS/PROSUL, los cuales trataremos de clasificar en forma sistemática dentro de los que son los componentes del ciclo urbano del agua (CUA), esto permitirá una forma de búsqueda organizada. Esta información (RECURSOS) estará disponible para que puedan acceder estudiantes, docentes, investigadores, entidades, instituciones, municipios, comunas, empresas que estén trabajando con temáticas referentes al ciclo urbano del agua (CUA).

De esta forma estaremos contribuyendo a trazar caminos que nos faciliten llegar a los lugares del conocimiento que nos permitan entender, comprender, resolver, abordar, los distintos matices que se presentan en el Ciclo Urbano del Agua de Pequeños Municipios y delinear estrategias de vinculación para producir programas conjuntos con los centros de la Red LENSH/PROSUL y otros Centros dentro de un marco de cooperación , de manera tal de fortalecer las relaciones creando puentes que le impriman dinamismo y continuidad superadora a los vínculos.

## **Objetivos del I PORTAL**

Dentro de las actividades que tienen por finalidad promover y fortalecer las tareas de investigación, desarrollo, vinculación y transferencia del CEGELAH/FCYT se dispuso llevar adelante el siguiente proyecto que tiene como objetivos generales:

- 1) Facilitar el acceso a información científica y tecnológica sobre el Ciclo Urbano del Agua.
- 2) Promover el encuentro de Centros Especializados en la temática y/o de Universidades con las cuales plantear proyectos comunes.
- 3) Identificar áreas de cooperación bilateral y programas de extensión orientados al asesoramiento a municipios en áreas específicas ligadas a las líneas de investigación del CEGELAH/FCYT.
- 4) Brindar un servicio especializado a la Comunidad Universitaria, Científica y a los Gobiernos Locales dedicado a la detección de oportunidades de proyectos cooperación internacional entorno a la Gestión Sostenible del Ciclo Urbano del Agua.

Y como Objetivo Principal la creación de un Portal de Internet para acceder a los Centros Integrantes de la Red Lenhs/Prosul, el cual ofrece una base de datos con información (cursos, postgrados, trabajos de investigación, proyectos, laboratorios, etc.) perteneciente a las Universidades integrantes de la Red LENHS/PROSUL bajo la visión de Ciclo Urbano del Agua del CEGELAH/FCYT.

## **Metodología**

### **Marco Conceptual**

Este punto se consideraron enunciados y conceptos fundamentales los que se adoptaron para dar sustento al trabajo como: sustentabilidad (Brundtland, 1988), (Betancord, 2003), (Naredo, 2002), (Pesci, 2002), municipios (Bach, 2008) y ciclo urbano del agua. También se realizaron definiciones y se dispusieron los límites y alcances del mismo.

Para observar el concepto de sustentabilidad y otros que no serán detallados en el presente dado el tipo de presentación se recomienda recurrir a la bibliografía. Pasemos a ver lo que entendemos por “Ciclo Urbano del Agua” (CUA).

### Ciclo Urbano del Agua

Al hablar del ciclo urbano del agua (CUA) podríamos decir que son la serie de fases por las que transita el agua en una ciudad o poblado. Veamos una representación gráfica (Figura 10) del ciclo urbano del agua (CUA) (Nudelman, 2003), la misma se inicia en la fuente (superficial, subterránea o meteórica) desde su estado crudo pasando por la obra de toma (TO) y el tratamiento (TR) que se dará en cada caso para su potabilización. A continuación, en la mayoría de los casos, se realiza el almacenamiento (AL) en tanques y reservorios públicos o privados, para luego ser distribuida por medio de una red de tuberías. De esta forma llega a una casa, edificio, escuela, club, etc. donde es utilizada y consumida (CO) para luego proceder a su emisión (EM). Estos efluentes son recolectados y trasladados por una red de desagües sanitarios y el agua de lluvia por una red de drenaje pluvial. Llegando a su tratamiento (TR) (según el caso) y posterior disposición final.

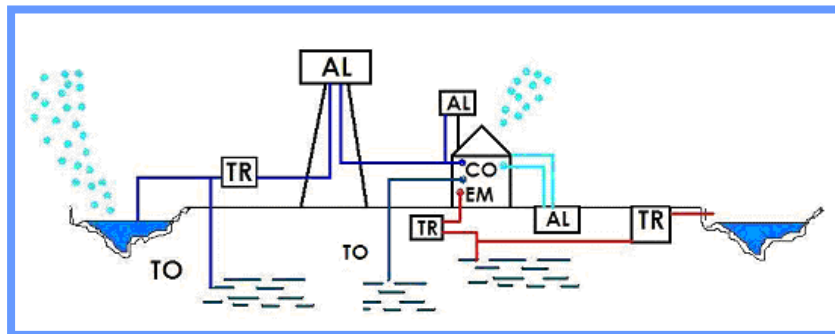


Figura 10 - Esquema del Ciclo Urbano del Agua (CUA) (Nudelman, 2003).

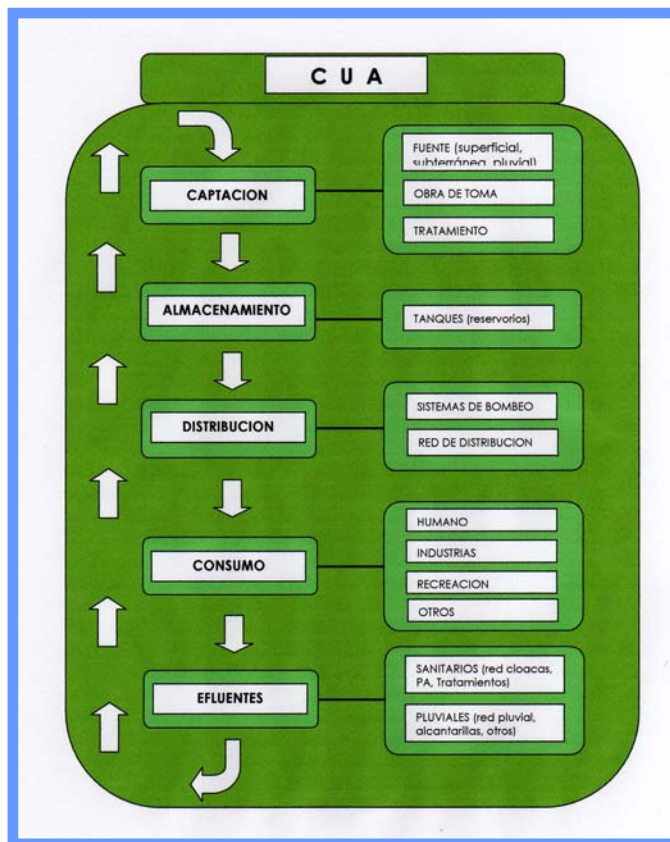


Figura 11 - Matriz del Ciclo Urbano del Agua (CUA) (Bach, 2008)

Este gráfico trata de resumir todos los aspectos que conforman el Ciclo Urbano del Agua (CUA). Es una simplificación de un sistema complejo y con gran cantidad de variables y variantes en su resolución.

A continuación se presenta el Gráfico 2 sobre el ciclo urbano del agua (CUA) el cual fue adoptado como la matriz de sustento para la construcción del “iPORTAL” (Bach, 2008).

La Figura 11 representa el Ciclo Urbano del Agua (CUA) formado por los siguientes componentes: CAPTACION, ALMACENAMIENTO, DISTRIBUCION, CONSUMO, EFLUENTES. Los cuales tienen una secuencia tal como la que sigue el agua en una ciudad desde su fuente hasta su disposición final, pasando por cada uno de ellos, para luego cerrar el ciclo y realimentarse, como indican las flechas.

Estos componentes y subcomponentes del ciclo urbano del agua (CUA) serán los “campos” en los cuales iremos clasificando la información y los recursos que disponemos en la Red LENHS/PROSUL.

## Red LENHS/PROSUL

Como bien sabemos la “Red de Laboratorios en Eficiencia Hidráulica y Saneamiento” (RED LENHS/PROSUL) es una red temática que trabaja sobre el binomio agua-energía, siendo uno de los aspectos más relevantes el uso eficiente de la energía en los abastecimientos de agua. Está formada por centros altamente especializados en ingeniería hidráulica y medioambiente. El objetivo general de ella es promover la interacción y la integración de proyectos comunes en el área del agua y el saneamiento en Sudamérica. Su coordinador es el Sr. Heber Pimentel Gomes (Pimentel Gomes, 2007). La misma es financiada por el gobierno de Brasil a través del CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

Está integrada por las siguientes casas de estudios, de Brasil: Universidad Federal de Paraíba (UFPB), Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG), Universidad Federal de Pará (UFPA), Universidad Federal de Rio Grande do Sul (UFRGS), Universidad Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS); en Colombia por la Universidad Nacional de Colombia (UNAL); en Ecuador por la Universidad Técnica de Loja (UTPL) y en Argentina por la Universidad Autónoma de Entre Ríos (UADER).

Estimado lector, hagamos un resumen sobre los conceptos hasta aquí vistos. Entonces tenemos:

CUA = ciclo urbano del agua

RED = Red LENS/PROSUL

CENTROS = hace referencia a los Centros que representan a las Universidades que componen la Red LENS/PROSUL.

RECURSOS = trabajos científicos, monografías, publicaciones, papers, libros, cursos de capacitación de distintos niveles, especialidades, maestrías, doctorados, jornadas técnicas y científicas, congresos, proyectos de investigación, proyectos de aplicación, laboratorios, asesoramientos, transferencia y extensión generados y/o pertenecientes a las universidades participantes de la Red LENHS/PROSUL.

Los cuales serán utilizados hasta el final del trabajo con esta acepción y sentido.

## Construcción del iPORTAL

### a) Investigación y Recopilación de Información.

En primera lugar se realizó una búsqueda de información y bibliografía en los Centros pertenecientes a la RED. Esto dio como resultado una base de datos en Excel, esta se ordeno y clasifico según el CUA (Bach, 2008). En la instancia siguiente se realizó una nueva revisión bibliográfica para ampliar y profundizar el trabajo que es la base de dicho proyecto. Se incluyeron más datos en la base, se observo la parametrización de las clasificaciones CUA, se reclasificaron datos, se depuraron las relaciones y se incorporación de nuevos conceptos y terminología. El resultado fue la base de datos: “CUALENHS/PROSULv02” (Bach, 2008).

### b) Diseño Informático.

El iPORTAL nace a partir del archivo “CUALENHS/PROSULv02” (Bach, 2008). Este se construye con soporte en una base de datos de libre distribución como es la planilla de cálculo “Excel”

sobre ella se cargaron los recursos y se generaron los campos de clasificación. Este producto a continuación fue transformado con sus contenidos a una base de datos del tipo “Access”, con exactamente el mismo formato. Además a esta base de datos se le incluyeron vistas fijas que sirven para extraer los recursos de los filtros, como por ejemplo: Facultades, Temas, Sub-Temas, Países, etc. que luego son mostrados por la página en los combos para seleccionar (Ver Gráfico 4).

Posteriormente se desarrolló una Web de consulta con lenguaje “ASP” que se encarga de armar los filtros, aplicarlos sobre la base de datos y mostrar los resultados. Producto obtenido: <http://www.cegelah.org>.

c) Validación Interna y Externa.

I PORTAL, en el momento de la redacción de este Capítulo, se encuentra justamente en esta fase, cuestión abordada con más detalle en el punto cuatro del presente.

## Resultados hasta el momento

El resultado obtenido es la concreción del portal temático: “iPORTAL”, el cual se encuentra bajo la óptica del CEGELAH/FCYT y además es comandado por el mismo. Ahora bien para poder ver sus frutos y su potencialidad, nada mejor que practicar un ejemplo de uso.

Acceder al “iPORTAL”

Para acceder se debe ingresar a: <http://www.cegelah.org>. La pantalla que encontrará es como la que representa la Figura 12. Una vez en la página del CEGELAH/FCYT, hay que dirigirse al campo “iPORTAL”, el cual se encuentra (mirando la pantalla de frente) en el ángulo izquierdo inferior bajo la sectorización “Recursos” y también en el menú superior (debajo del encabezado). Sobre este campo se debe “clickear” para ingresar, a continuación se desplegará una pantalla como la indicada en la página web siguiente:



Figura 12 - Ingreso al “I PORTAL”



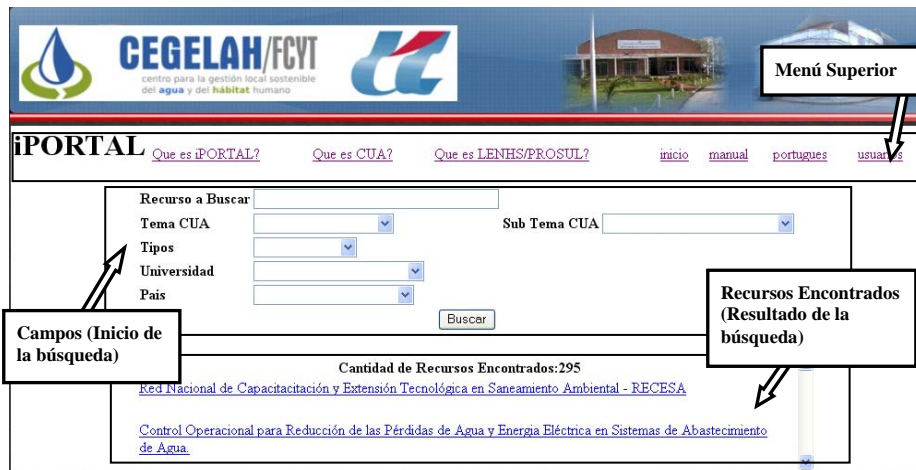


Figura 13 - Primera pantalla del “iPORTAL”

Ejemplo de Búsqueda. Realizar las búsquedas.

Se recomienda previamente a iniciar una búsqueda o exploración haber leído los apartados: “**Qué es el I PORTAL?**”; “**Qué es el CUA?**” y “**Qué es la RED LENHS/PROSUL?**”, los cuales se ubican en el menú superior de esta pantalla (en la página [www.cegelah.org/iPORTAL](http://www.cegelah.org/iPORTAL), Figura 13) esto permitirá al usuario obtener una interpretación del ciclo urbano del agua en cuanto a su composición y funcionamiento. Y además, poder ver cuál es la fuente de recursos que alimentan estos campos, o sea, de donde proviene el contenido que lo forma. Lo cual contribuirá a que las búsquedas sean más dinámicas y eficaces.

Spongamos que un estudiante universitario o un investigador, del área ingeniería sanitaria, esta realizando un trabajo sobre “Sistemas de Captación de Agua”, para lo cual quisiera conocer en que publicaciones consultar. Vemos los pasos a seguir por este usuario.

Paso 1: acceder a: [http:// www.cegelah.org/](http://www.cegelah.org/)

Paso 2: hacer “clic” en “iPORTAL” (aquí se ingresa al explorador, ver Imagen 1)

Paso 3: Configuración de la búsqueda (Inicio de la misma), a seguir se expone una de las opciones en teniendo en cuenta que el usuario tiene conocimiento sobre el CUA, entonces en el campo “**Tema CUA**” escoge la opción “**CAPTACION**” y hace un “clic” en la tecla “**Buscar**”, obtendrá= Resultados: 44 registros

Ahora, si el usuario que además de tener conocimiento sobre el CUA conoce los atributos del iPORTAL y hace una exploración más meticulosa. Entonces en el campo “**Tema CUA**” opta por “**CAPTACION**” y en el campo “**Tipos**” escoge la opción “**Publicaciones**” nuevamente hace “clic” en la tecla “**Buscar**” y obtendrá= Resultados: 42 registros (ver Figura 14).



Figura 14 - Pantalla donde el usuario procura el “Tema CUA: CAPTACION” y “Tipos: Publicaciones.”

Si observamos la pantalla el primer registro que se presenta es:

[“Estudio Comparativo, Aplicación y Definición de Metodologías Apropriadas para la Determinación del Caudal Ecológico en la Cuenca del Rio Pará, en Minas Gerais.”](#)

En caso que el usuario este interesado en saber más sobre este recurso, debe desplazar el cursor sobre el registro y hacer “clic”, en ese momento obtendrá un resumen (abstract) con los datos de la institución (Universidad, facultad, centro de estudios y/o investigación, etc.), la página web de referencia y los datos del contacto (Nombre, correo electrónico y teléfono) (Ver Figura 15 - Pantalla Final de la Búsqueda).

The screenshot shows the iPORTAL website interface. At the top, there are logos for CEGELAH/FCYT and UFMG. Below the logos, there are navigation links: "Que es iPORTAL?", "Que es CUA?", "Que es LENHS/PROSUL?", "inicio", "manual", "portugues", and "usuarios". The search filters are set to "Recurso a Buscar" (empty), "Tema CUA" (CAPTACION), "Sub Tema CUA" (empty), "Tipos" (Publicaciones), and "Universidad" (empty). A detailed information box is displayed, containing the following text:

En los últimos años, a pesar de los innegables progresos institucionales y legales, vienen creciendo los conflictos relacionados con la demanda por los recursos hídricos, cuyas limitaciones, sobre los aspectos cualitativos y cuantitativos, son sobradamente conocidas. Como, el aumento de la demanda agrava los conflictos entre los usos y usuarios del agua. Con eso, se torna cada vez mas necesario el desarrollo y puesta en práctica de métodos y técnicas que permitan el crecimiento sustentable, o sea, el desarrollo de las actividades antrópicas sin que haya mayores prejuicios para el medio ambiente, tanto sobre el escenario actual, cuanto al prospectivo. 2007

**Institución:** UFMG  
**Web:** [http://www.smarh.eng.ufmg.br/diss\\_defesas\\_listagem.php](http://www.smarh.eng.ufmg.br/diss_defesas_listagem.php)

**Contacto:** Nombre: A. Assis dos Reis (autor)  
 Correo: [posgrad@desa.ufmg.br](mailto:posgrad@desa.ufmg.br)  
 Telefono: 55 31 3409 1882

Figura 15 - Ampliación de Información

Si luego de ver estos datos el usuario sigue interesado y desea profundizar sobre el tema basta con hacer “clic” sobre la dirección web y obtendrá un archivo en pdf.

De la misma manera como fue explicado anteriormente deberá procederse en el caso de cualquier otro tipo de búsqueda.

## INCIPIENTES CONCRECIONES

El panorama desplegado anteriormente nos muestran el contexto de las acciones de cooperación en EH y también la principal herramienta de información desarrollada por el CEGELAH dentro de dicha estrategia de “puente”, donde el Centro puede desplegar sus actuales fortalezas e iniciar un proceso de capacitación, formación académica e investigación, dentro de acciones acordadas localmente con municipios en estudio.

Dentro de esta línea se exponen a continuación los modestos pasos dados en pos de concretar un proceso de cooperación sostenido en el medio regional.

## Conferencia Internacional en Paraná, primer contacto con las necesidades en Eficiencia Hidroenergética.

La misma fue realizada el día 12 de agosto del 2008. Los aspectos relevantes de la misma son los siguientes:



## Aspectos Organizativos

1) La organización estuvo a cargo del CEGELAH y SECRETARÍA DE ENERGIA DE LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS

En la conferencia se logró reunir un total de ochenta personas. El perfil preponderante fue la de técnicos y responsables del área pertenecientes a Municipios y Cooperativas de Servicios del interior provincial. Con ello se lograron dos importantes objetivos operativos de cara al futuro:

- disponer de una oportunidad para conocer el grado de interés y las inquietudes de quienes están brindando los servicios esenciales en los municipios de la provincia (agua, saneamiento y energía)
- contar con la participación de personas que potencialmente podrán ser tenidas en cuenta como enlace de futuras acciones en el sector.

Para ello, los temas que se abordaron fueron los siguientes:

1) Presentación de la Iniciativa del programa de ahorro energético de ELETROBRÁS - PROCEL, para el sector de abastecimiento de agua (PROCEL SANEAR), edificaciones (PROCEL EDIFICA), industria (PROCEL INSUTRIA), edificaciones públicas (PROCEL EPP), iluminación pública (RELUZ), gestión energética municipal (PROCEL GEEM), educación (PROCEL EDUCAÇÃO), certificación (PROCEL SELO).

2) Presentación del enfoque que piensa darse en la Provincia a la Iniciativa de Uso Eficiente de la Energía Eléctrica. Sus posibles aplicaciones entorno a los Abastecimientos de Agua y Saneamiento.

3) Presentación de las actividades de los Centros participantes de la RED LENHS/ PROSUL.

4) Líneas de I+D impulsadas por los Centros LENHS de las Universidades Federales asociadas, vinculados a las necesidades de los Municipios brasileños en cuanto a la búsqueda de eficiencia energética de los abastecimientos de agua y saneamiento.

5) Iniciativa del CEGELAH/ FCYT para favorecer iniciativas de Cooperación Sur – Sur entre los Sectores provinciales y Regionales relacionados con la Problemática en cuestión y los Miembros brasileños y latinoamericanos participantes de la Red.



Figura 16 - Expositores de la Conferencia Internacional, de Izquierda a Derecha, por Brasil; Ing. Djamil de Holanda Barbosa (Eletrobras), Dr. Ing. Heber Pimentel Gomes (Lenhs-Prosul) y por Argentina: Ing. Alberto Alcain (Sec. Energía Entre Ríos) y Mg.Arq. Mario Nudelman (Cegelah//Fcyt) (Foto Autor)

## Evaluación de la Conferencia

Lo que se opinó sobre la misma en la Reunión de la Red Temática queda resumido en los siguientes puntos:

- El nivel de la Exposición fue juzgado aceptable.
- Resultó positiva la posibilidad de contar con Conferencistas Extranjeros.
- La intervención de un Centro de Investigación en la Temática del Ahorro es interpretada como una garantía de continuidad más allá de los cambios de funcionarios del área.
- La Idea de “Vinculación” entre las necesidades locales y los recursos técnicos de los Centros LENHS del Brasil, no es una idea visualizada con facilidad.
- Se valoró positivamente las potenciales iniciativas de formación de cuadros intermedios (Técnicos).
- La asistencia en general y de representantes del interior fue muy positiva. Hubo poder de convocatoria.
- No resultó satisfactoria la concurrencia de centros de I + D vinculados a la temática presentada.
- Es valorable la presencia de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Santa Fe (con trayectoria académica en este campo) a través de su Secretario General.
- Intervenciones bien enfocadas, como la que resaltaba que es un contrasentido plantear el uso eficiente de la energía cuando existen condiciones de subsidios que van en su detrimento.
- Se despertó interés en la Sociedad. Es importante no detener ese interés despertado. Se demostró Receptividad.
- La organización resultó impecable. Fue muy positivo que en la recepción-mesa de inscripción aparecieran profesionales del tema.
- La alianza para este evento entre el CEGELAH/ FCYT y la Secretaría de Energía, en la figura del Coordinador del Programa Provincial de Eficiencia Energética, Ing. Alberto Alcain generó una oportunidad de profundizar el vínculo.
- Tomar como inspiración la forma de trabajo del Brasil, donde los financiadores toman contacto con los centros y todos tienen idea de lo que hacen todos.

### **Acta de Acuerdo Cegelah – Red Lenhs/Prosul – Eletrobras**

Otro hecho tangible fue la firma de un Acta de Acuerdo entre el Coordinador de la Red Lenhs/Prosul Heber Pimentel Gomes, el Asistente de Dirección de ELETROBRAS, Djamil de Holanda Barbosa y el Director del CEGELAH, Mario Alejandro Nudelman, dentro del marco de la Reunión de la Red Temática realizada en Paraná en agosto del 2008. Los cuatro puntos acordados fueron los siguientes:

- 1) El CEGELAH avanzará en la creación de un portal de INTERNET para facilitar el acceso a los recursos técnicos, humanos, de experiencias de I+D y Transferencia de todos los CENTROS de la Red LENHS/PROSUL), basado en la propuesta presentada por el Ing. Fernando BACH<sup>2</sup>. Además de la Red en cuestión podrá también ser utilizado como medio de vinculación de los centros de I+D asociados al Seminario Internacional SEREA<sup>3</sup>.
- 2) El CEGELAH contará con el apoyo de ELECTROBRAS (financiador de la Experiencia LENHS en ocho Universidades Federales de Brasil) para avanzar en el desarrollo de un PROGRAMA DE COOPERACIÓN orientado a la Eficiencia Hidro-Energética en Abastecimiento de Agua y Saneamiento de la Provincia de Entre Ríos, en alianza con ENERSA / Secretaría Provincial de Energía y otros Centros de I+D del sector, dentro del marco provisto por el CIER<sup>4</sup>. Se espera que esta sea una primera Experiencia que pueda luego expandirse a otros Distritos de la Región.
- 3) El CEGELAH avanzará según sus Objetivos Institucionales en la identificación y/ o diseño de Programas de Formación Superior con los Centros de la Red LENHS/PROSUL dentro del

<sup>2</sup> Dicha Propuesta fue realizada por el Ing. Fernando Bach dentro del marco del Trabajo Final del Curso de PosGrado “Gestión sostenible del Agua en pequeños municipios” con la Denominación “Estrategias de Vinculación del CEGELAH con los Centros de la Red LENHS/PROSUL”, bajo la Dirección del Mg. Arq. Mario Nudelman

<sup>3</sup> SEREA: Seminario Iberoamericano de Planificación, Proyecto y Operación de Sistemas de Abastecimiento de Agua.

<sup>4</sup> CIER: Comisión de Integración Energética Regional, Organismo Internacional del Sector Energético de América del Sur, en el cual ELECTROBRAS es la coordinadora del Área de Ahorro Energético.

marco de cooperación que ofrece la CAPES<sup>5</sup> del Ministerio de Educación del Brasil en acuerdo con el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Argentina.

- 4) El director del Laboratorio de Eficiencia Hidro-Energética de la Universidad Federal de Paríba, promoverá la firma de un Convenio de Cooperación entre dicha Universidad y la UADER, cuya propuesta será presentada oportunamente por el CEGELAH<sup>6</sup>.

Sobre estos puntos, el CEGELAH avanzó en la concreción de los puntos que siguen a continuación en forma prioritaria

### **Oficina de Vinculación del CEGELAH/FCYT**

El Programa de Investigación y Desarrollo del CEGELAH/FCYT esta centrado especialmente en la Planificación Local del Sector del Agua y Saneamiento orientándola a su gestión sostenible. De dicha Planificación se desprenderán necesariamente Proyectos y Acciones que materialicen la decisión de modificar positivamente las situaciones deficitarias que se detecten. Es obvio que el Centro no necesariamente deberá ser especialista en el vasto arco de opciones tecnológicas viables que puedan ejecutarse.

Allí aparecerá la necesaria y enriquecedora acción de relacionarnos como centro científico con nuestros pares especializados en los campos donde se detecten localmente oportunidades de aplicación y/o innovación de tecnologías exitosas. La “Oficina de Vinculación” buscara tener actualizada información sobre personas, grupos y centros solventes científica y técnicamente en los temas que las necesidades locales con las que se este trabajando así lo requieran.

En consonancia con estos objetivos, la Facultad de Ciencia y Tecnología de la UADER decidió contratar al Ingeniero Bach para iniciar la estructuración de dicha Oficina dentro de la Orbita del CEGELAH /FCYT. La actividad prioritaria ejecutada ha sido el desarrollo y puesta en marcha del I Portal ya presentado, para el cual contó también con la participación del Licenciado en Sistemas Victorio Giorgini.

Por ultimo, un punto saliente ha sido la capacitación de posgrado en esta línea “Gestión de la Vinculación Tecnológica Universidad-Empresa” de la Oficina y el Cegelah organizada por el Ministerio de Ciencia y Tecnología de la Nación.

### **Instrumentación del I Portal: Validación Interna y Externa.**

Una vez creado el iPORTAL se realizaron pruebas dentro del CEGELAH/FCYT lo que nos posibilito realizar ajustes e incorporar mejoras de manera tal que el portal sea más amigable.

Seguidamente se efectuó la difusión y puesta en funcionamiento a modo de prueba en los Centros RED LENHS/PROSUL, o lo que sería una validación externa. Para ello se desarrollo un protocolo que entre otros documentos incluye un “Manual del Usuario”, este puede obtenerse de <http://www.cegelah.org/iportal>.

A partir de que los usuarios de los Centros tomaron contacto con el “iPORTAL” se les solicitó que nos informen sobre el uso del mismo.

Con las consultas, sugerencias y el cuestionario se procede a realizar nuevos ajustes y mejoras, tendientes a una optimización de la herramienta. Esta etapa esta en desarrollo.

### **Diagnóstico de Eficiencia Hidroenergética en el Municipio de Nogoyá.**

Como fruto de la reunión de la Red Lenhs/Prosul en Paraná, Entre Ríos, quedó firme la relación entre el CEGELAH y el Programa de Eficiencia Energética y Energías Alternativas de la Secretaría de Energía de la Provincia. Previa firma de un convenio marco entre dicha Secretaría y la UADER. Esta

---

<sup>5</sup> CAPES: Coordinación de Perfeccionamiento del Personal de Nivel Superior

<sup>6</sup> Este es el único punto donde el CEGELAH no avanzó, en virtud de los criterios de cooperación antes expuestos: trabajar sobre las necesidades detectadas localmente. Dado que no se dispone aun de un trabajo diagnóstico ejecutado, se está a la espera de un panorama certero al respecto.

relación se centró en la Formulación y gestión de un primer trabajo de consultoría a cargo del CEGELAH a financiarse por dicho Programa provincial. Dicho trabajo apunta a realizar una primera Etapa Diagnóstica en cuanto al uso de energía eléctrica en el Abastecimiento de agua y saneamiento en un Municipio de 22.000 habitantes a los efectos de ajustar una metodología de trabajo que se implementaría luego a un conjunto de diez municipios representativos de los distintos rangos de población característicos de la Provincia.



Figura 17 - Municipio de Nogoyá, trama urbana de baja densidad (Foto G. Schneider)

Los Objetivos Generales del Diagnóstico son los siguientes:

- 1) Conocer las condiciones bajo las que operan los Sistemas de Bombeo de un conjunto de diez municipios de la provincia de Entre Ríos.
- 2) Determinar las principales líneas correctivas que orienten a dichos sistemas hacia un uso eficiente de la energía eléctrica.
- 3) Iniciar una etapa de concientización del Uso Racional y Eficiente de la Energía y el Agua. con el personal encargado del servicio en lo relacionado al registro/información de todas las intervenciones sobre el sistema

#### Objetivos Específicos

La forma en que se plantea alcanzar los Objetivos Generales son las siguientes

- 1) Releva los principales factores que determinan dichos Sistemas, tanto referidos al Equipamiento disponible como a las condiciones del servicio de abastecimiento de agua y saneamiento, su administración, operación y mantenimiento.
  - 2) Procesar la información relevada, obteniendo un conjunto de indicadores que permitan describir las situaciones problemas, comparar los resultados con parámetros pre-establecidos y priorizar las principales áreas deficitarias detectadas.
  - 3) Identificar las principales líneas de acción orientadas hacia el uso eficiente de la Energía Eléctrica según las condiciones locales detectadas y las principales oportunidades de financiación vigentes.
- Cuantificar estimativamente los costos de las principales líneas detectadas y el retorno de la inversión.



Figura 18 - Municipio de Nogoyá, fuerte presencia de la actividad agrícola-ganadera en la demanda de agua a nivel de cuenca (Foto G. Schneider)

Hasta el momento, luego de un año y medio de pacientes gestiones, dicho estudio no fue ejecutado. Se espera iniciar las actividades a mediados del mes de junio del presente año. Una lectura posible de dicho retraso nos muestra claramente la ubicación de las actuales prioridades políticas del sector para con la EH. Como suele decirse en lenguaje llano “a buen entendedor, pocas palabras”.

### **Proyectos de Investigación y Desarrollo Anuales del CEGELAH: Hacia instrumentos para el manejo de información y capacidades locales entorno a la información**

Esta prioridad del CEGELAH está en consonancia con aquellos aspectos aportados más arriba en cuanto a las condiciones de los Municipios en cuanto a sus debilidades manifiestas entorno a la información del Ciclo Urbano del Agua, un aspecto indispensable a la hora de estructurar medidas de mejora dentro de los ejes de la EH. Para el CEGELAH, la EH constituyen un conjunto de instrumentos y medida que contribuyen a la sostenibilidad del Ciclo Urbano del Agua dentro de un marco de Planificación Local del sector.



Figura 19 – Municipio de Crespo, Agropecuario e Industrial adoptado como Referencia para los Proyectos de Investigación del CEGELAH/FCYT

Los proyectos de investigación y desarrollo anuales (PIDA) hasta aquí ejecutados o en ejecución priorizan la construcción de instrumentos que apoyen la generación de Información y su acceso, a partir de base de datos de acceso web y mediante el desarrollo de aplicaciones GIS que faciliten la visualización

de la información georreferenciada. Estas líneas contemplan a los técnicos y operarios municipales como usuarios de dichos entornos de información.

El Resumen de los Proyectos son los siguientes:

Tabla N° 8 – Resúmenes de los Proyectos de I+D del CEGELAH/FCYT

<p><b>PIDA: “Sistema de información aplicable a un modelo de simulación como soporte a la toma de decisiones para proyectos y programas sostenibles de agua y saneamiento en pequeños municipios” (Ejecutado 2006/2007)</b></p>
<p>El Proyecto pretende en una primera etapa relevar información local referida a las variables que inciden sobre la sostenibilidad del Ciclo Urbano del Agua en una localidad de referencia: la Ciudad de Crespo (Entre Ríos).</p> <p>A través de un informe preliminar se lograra tener una aproximación a las condiciones actuales y futuras de las variables ambientales, sociales, económicas y de infraestructura, que se analizarán en el caso de estudio. Junto con ello, se evaluará la fiabilidad de las fuentes y se diseñará un Sistema de Información, denominado “Observatorio Local de la Sostenibilidad del Ciclo Urbano del Agua”.</p> <p>Ambos puntos pasarán a ser insumos fundamentales, en una segunda etapa para operar un Modelo de Simulación por ordenador, que permitirá obtener información relevante para el diseño de Proyectos y Programas locales, dentro del sector del Agua y el Saneamiento.</p>
<p><b>PIDA: “Desarrollo de una interfaz amigable para sistemas de información geográfica como soporte a la toma de decisiones para proyectos y programas sostenibles de agua y saneamiento en pequeños municipios” (En ejecución 2009/2010)</b></p>
<p>El proyecto persigue como objetivo realizar el desarrollo de una herramienta orientada al manejo de información geográfica, caracterizada por una interfaz amigable, siendo capaz de acceder a los formatos más usuales de forma ágil.</p> <p>El desarrollo estará orientado a usuarios finales de información de naturaleza geográfica de administraciones públicas (municipios, juntas de gobierno, cooperativas).</p> <p>Se utilizará una plataforma SIG de software libre (open source), debido a que esta iniciativa será de gran interés para los potenciales organismos receptores y para los ambientes universitarios por su componente I+D+I. Esto permitirá la extensibilidad del proyecto de forma que los posibles desarrolladores puedan ampliar las funcionalidades de la aplicación fácilmente, así como desarrollar aplicaciones totalmente nuevas a partir de las librerías utilizadas.</p>
<p><b>PIDA “Bases para la Simulación de las condiciones del Servicio de Abastecimiento de agua potable en el Municipio de Crespo” (En Ejecución 2010/2011)</b></p>
<p>El Proyecto constituye una segunda etapa aplicando la información local referida a las variables que inciden sobre la sostenibilidad del Ciclo Urbano del Agua en la localidad de referencia: la Ciudad de Crespo (Entre Ríos) relevada dentro del marco del PIDA 626/07.</p> <p>En esta ocasión se lograra tener una aproximación a las condiciones actuales de comportamiento teórico del Servicio de Abastecimiento de Agua Potable. Dicho comportamiento se obtendrá a partir del análisis de la Información que aporte un Modelo Teórico de Simulación de dicha red, utilizando las herramientas informáticas EPANET y GISRED.</p> <p>Este paso responde a los lineamientos del Programa de Investigación que impulsa el CEGELAH orientado a identificar, adaptar y transferir herramientas que permitan la construcción de soportes para la toma de decisiones a nivel local entorno al Sector del Agua y el Saneamiento.</p>





Figura 20 – Municipio de Crespo, Captación desde Fuente Subterránea y Almacenaje compensador, un esquema típico de abastecimiento de agua en los municipios de Entre Ríos

Como puede concluirse parcialmente, de todas las acciones concretas emprendidas, ninguna aun constituyen aplicaciones directas de tecnología o planes de mejora para instrumentar acciones de EH. La pertenencia a la Red Temática Lenhs Prosul a posibilitado por una parte ir creando las condiciones para formular e iniciar Programas de Cooperación en este campo (Alianzas con el área de Energía y los municipios, Oficina de Vinculación, I Portal) y por otro, los proyectos de I+D del Centro encuentran en la EH una meta de trabajo como aplicación de medidas de mejora de carácter experimental dentro de un marco de Gestión Sostenible del Agua a nivel Local (Proyectos PIDA). Por último, progresivamente, la ejecución del Diagnostico sobre EH en diez municipios provinciales (en gestión) si constituirían la base de un Programa Ejecutivo de alcance provincial donde los contactos enhebrados dentro de la Red Lenhs/Prosul serán un soporte privilegiado de recursos humanos, conocimientos y desarrollos tecnológicos con posibilidades de aplicación directa y transferencia de know-how.

## CONCLUSIÓN

### **Perspectivas a futuro de Iniciativas de Cooperación en Eficiencia Hidroenergética en la Provincia de Entre Ríos y la Región**

Es preciso reconocer que el punto de partida presentado al inicio de este Capítulo ha sido una condicionante fundamental a la hora de presentar en este campo concreciones de relevancia. Pero también es conveniente destacar como la pertenencia de un Centro como el CEGELAH/ FCYT a la Red Internacional Lenhs/Prosul ha posibilitado fijar bases para abordar el tema con solvencia dentro del marco de cooperación, especialmente con los Centros de Brasil, e inclusive, no se descarta un aporte a futuro de la propia ELETROBRAS vía el CIER a Proyectos Piloto que impulse el CEGELAH/FCYT en la Región.

El contexto político actual no prioriza la financiación de iniciativas en esta temática con fondos públicos de infraestructura. Pero si es fecundo el campo de la Cooperación en Ciencia y Tecnología que permitirían una expansión de iniciativas tanto de Capacitación, de Innovación Tecnológica, de Evaluación de Proyectos experimentales e inclusive la aplicación y producción de equipamiento para la EH.

Para ello, el CEGELAH/FCYT puede constituirse como un Centro de Referencia para la región.

Por último, el desarrollo del I PORTAL constituye un aporte de gran valía en esta etapa, “Ad Intra” la Red temática, multiplicando los puntos de contacto entre los Centros. Esto sin duda puede redundar en el planteo de iniciativas de Cooperación entre los Centros y sus regiones de referencia.

## BIBLIOGRAFÍA

BACH, F.D. “Estrategias de Vinculación del CEGELAH con los Centros de la Red LENHS/PROSUL. Objetivo: Ciclo Urbano del Agua”. Trabajo Final Curso Posgrado – Universidad Autónoma de Entre Ríos - Facultad de Ciencia y Técnica. Concepción de Uruguay. Entre Ríos, 2008.

BRUND'TLAND, G.H. "Our Common Future". Oxford, Oxford University Press., 1987 (Trad. al castellano, “Nuestro futuro común”, Madrid, Alianza Ed.), 1988.

BETANCOR, L. “Urbanismo y Sustentabilidad”. Buenos Aires, Argentina, 2003. Disponible en [www.todoarquitectura.com.ar/v2/Noticias/one\\_news.asp?IDNews=2998](http://www.todoarquitectura.com.ar/v2/Noticias/one_news.asp?IDNews=2998) Acceso el 31 de mayo del 2010.

NAREDO, J. M. “Sobre el origen, el uso y el contenido del término sostenible” Buenos Aires, Argentina, 2002 . Disponible en [www.herramienta.com.ar/Autores/Naredo-Jose\\_Manuel](http://www.herramienta.com.ar/Autores/Naredo-Jose_Manuel) Acceso el 31 de mayo del 2010.

NUDELMAN, M. A. “Directrices para un modelo de simulación del ciclo urbano del agua”. Trabajo de Investigación – Diploma de Estudios Avanzados en Ingeniería Hidráulica y Medioambiente Universitat Politècnica de València. Valencia, España, 2003

NUDELMAN M., SCHENONE C. y Otros. “Memoria Técnica del PIDA “Sistema de información aplicable a un modelo de simulación como soporte a la toma de decisiones para proyectos y programas sostenibles de agua y saneamiento en pequeños municipios”. CEGELAH, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad Autónoma de Entre Ríos, Paraná, Argentina, 2009

NUDELMAN M., SCHENONE C. y SEDANO C. “Aportes a la gestión local del ciclo urbano del agua desde la investigación, el desarrollo y la innovación” – “Scientae Interfluvius”, Revista de Ciencia y Tecnología de la Universidad Autónoma de Entre Ríos, Paraná ER, Argentina, 2010

PESCI, Rubén. “Las ciudades y la riqueza de las naciones. Políticas urbanas para el desarrollo sustentable en Argentina”. La Plata, Buenos Aires, Argentina, 2002

GOMES, Heber Pimentel. “Projeto Criação da Rede LENHS/PROSUL”. Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, Brasil, 2007.

Páginas web consultadas en el Capítulo:

Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS) Argentina, web: [www.aidisar.org/aidis.html](http://www.aidisar.org/aidis.html)

Biblioteca Virtual de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental, web: <http://www.bvsde.ops-oms.org/sde/ops-sde/bvsde.shtml>

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria (CEPIS), web: [www.cepis.org.pe](http://www.cepis.org.pe)

Gobierno de la Provincia de Entre Ríos, web: [www.entrerios.gov.ar](http://www.entrerios.gov.ar)

Gobierno de la República Argentina, dirección web: [www.argentina.gov.ar](http://www.argentina.gov.ar)



Ministerio de Ciencia y Tecnología de la República Argentina, dirección web: [www.mincyt.gov.ar](http://www.mincyt.gov.ar)

Portal de la Red LENSH/PROSUL, web: [www.lenhs.ct.ufpb.br](http://www.lenhs.ct.ufpb.br)

Portal de la Universidad Autónoma de Entre Ríos (UADER), web: [www.uader.edu.ar](http://www.uader.edu.ar)

Portal de la Universidad Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), web: [www.ufms.br](http://www.ufms.br)

Portal de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG), web: [www.ufmg.br](http://www.ufmg.br)

Portal de la Universidad Federal de Pará (UFPA), web: [www.ufpa.br](http://www.ufpa.br)

Portal de la Universidad Federal de Paraíba (UFPB), web: [www.ufpb.br](http://www.ufpb.br)

Portal de la Universidad Federal de Rio Grande do Sul (UFRGS), web: [www.ufrgs.br](http://www.ufrgs.br)

Portal de la Universidad Nacional de Colombia (UNAL), web: [www.unal.edu.co](http://www.unal.edu.co)

Portal de la Universidad Técnica de Loja (UTPL), dirección web: [www.utpl.edu.ec](http://www.utpl.edu.ec)

Portal del CEGELAH, web: [www.cegelah.org.ar](http://www.cegelah.org.ar)

Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable del Gobierno de la República Argentina, dirección web: [www.ambiente.gov.ar](http://www.ambiente.gov.ar)

United States Environmental Protection Agency (EPA), web: [www.epa.gov](http://www.epa.gov)

---

## **12 Redução do consumo de energia elétrica em um sistema de abastecimento de água mediante a utilização de variador de frequência em sistemas de bombeamento**

---

**Liane de Azevedo Saffi<sup>1</sup>, Dieter Wartchow<sup>1</sup> e Natal de Avila Antonini<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

<sup>2</sup>DMAE, Porto Alegre, Brasil

### **INTRODUÇÃO**

Na área de saneamento um dos itens com custos operacionais mais significativos, no que diz respeito ao gasto com energia elétrica, são os bombeamentos. Atenção especial deve ser dada aos conjuntos motor-bomba, pois o rendimento destes equipamentos pode afastar-se dos valores nominais, acarretando maior consumo de energia elétrica para a realização do trabalho hidráulico.

A partir da implantação do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS), resultado de uma parceria entre a Eletrobrás e o Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS), dentro do Programa PROCEL, prestadores de serviços estão sendo motivados a buscar a necessidade de buscar novas tecnologias e realizar experiências que possam comprovar a eficiência energética de equipamentos elétricos e hidráulicos aplicáveis aos sistemas de abastecimento de água.

Para que haja redução no consumo de energia é necessário buscar alternativas para aumentar a eficiência nessas operações, o que enseja uma otimização dos sistemas de bombeamento. Neste contexto, variadores de frequência incorporados aos sistemas de bombeamento com a função de manter a operação em níveis necessários ao pleno atendimento das demandas, podem evitar desperdícios ao proporcionar um melhor controle operacional.

Os variadores de frequência são equipamentos eletrônicos acoplados aos conjuntos motor-bomba, cuja função é o controle da velocidade de rotação dos motores elétricos a corrente alternada. As modificações da curva da bomba são obtidas variando-se a sua rotação. Na medida em que a rotação da bomba varia surge um conjunto de curvas paralelas, que representam a operação da bomba para a velocidade resultante daquela rotação. Isto em nada afeta a curva do sistema.

Dentro deste contexto, Saffi (2009) desenvolveu simulações utilizando variadores de frequência, a partir de um estudo de caso no subsistema EBAT Bordini e Reservatório Bela Vista, operado pelo Departamento Municipal de Água e Esgotos de Porto Alegre (DMAE). Os resultados obtidos na simulação com o uso do variador de frequência, não afetou a operação do sistema de abastecimento e levou à racionalização do uso de energia elétrica.

Para a realização deste trabalho de simulação considerou-se como premissa que as curvas de funcionamento de um conjunto motor-bomba são alteradas seguindo as leis de semelhança física das máquinas hidráulicas mudando assim o ponto de operação do sistema. Desta forma, o variador de frequência visa manter o sistema de distribuição de água dentro de níveis de pressão e vazão necessários ao pleno atendimento das demandas, evitando desperdícios ao proporcionar um melhor controle operacional.

### **OBJETIVOS DO TRABALHO**

O objetivo principal deste trabalho é a verificação da redução de consumo de energia elétrica, implantando variador de frequência em um conjunto motor-bomba específico do Departamento Municipal de Água e Esgotos de Porto Alegre.

O objetivo secundário deste trabalho foi a definição de curvas de desempenho das bombas para outras rotações além das fornecidas pelo fabricante, através do estudo de semelhança de máquinas hidráulicas, a qual se buscou um melhor controle operacional mantendo o bombeamento em níveis

necessários ao pleno atendimento das demandas no que diz respeito à vazão e pressão. Este objetivo secundário está apresentado em Saffi (2009).

## MATERIAIS E MÉTODO

Para verificar a possibilidade e as vantagens e desvantagens do uso de variadores de frequência no subsistema proposto será feita uma simulação computacional do sistema.

O software a ser utilizado na simulação do subsistema escolhido permite o dimensionamento e simulação dinâmica de sistemas de distribuição de água, possui um bom banco de dados de materiais para as tubulações, importa e exporta valores facilmente e gera planilhas variadas e orçamentos detalhados (MOURA, 2006).

Os princípios básicos que consideram os modelos para o cálculo da rede são os que governam a conduta do líquido e são a conservação da massa, a conservação da quantidade de movimento e o princípio da energia. O algoritmo de cálculo se resume na solução da matriz topológica, formatada pelos nós da rede, aos quais se associam as equações de verificação da continuidade das vazões e pelos elementos que constituem as malhas fechadas, nas quais, se deve verificar o balanceamento entre as cargas disponíveis, definidas pelos níveis dos reservatórios (condições de contorno), e as cargas acrescentadas nas bombas e dissipadas nas válvulas e singularidades (MOURA, 2006).

O modelo do programa de computação utilizado permite o seguimento da evolução do fluxo de água nas tubulações, da pressão nos nós de demanda, do nível de água nos depósitos e da concentração de qualquer substância através do sistema de distribuição durante um período prolongado de simulação. Para uma correta simulação se deverá caracterizar completamente a rede (ou seja, incluindo todas as tubulações, sem simplificações, válvulas, unidades de bombeamento, reservatórios) que constituem pré-requisitos essenciais para a correta modelagem.

Ele contém um conjunto de ferramentas de cálculo para apoio à simulação hidráulica, onde se destacam como principais características (MOURA, 2006):

- a) dimensão (número de componentes) da rede a analisar é limitada;
- b) cálculo da perda de carga utilizando as fórmulas de Hazen-Williams ou Darcy-Weisbach;
- c) consideração das perdas de carga singulares em curvas, alargamentos, estreitamentos;
- d) modelagem de bombas de velocidade constante ou variável segundo critério operacional escolhido;
- e) cálculo da energia de bombeamento e do respectivo custo;
- f) modelagem dos principais tipos de válvulas, incluindo válvulas de fechamento, de retenção, reguladoras de pressão e de vazão;
- g) modelagem de reservatórios de armazenamento de nível variável de formas diversas, através de curvas de volume em função da altura de água;
- h) múltiplas categorias de consumo nos nós, com uma possibilidade de variação no tempo;
- i) condições de operação do sistema com controles adequados à simulação, como por exemplo, a altura de água num reservatório, pressões nos nós, tempo de funcionamento, etc., ou ainda um conjunto destes.

Os passos seguidos na utilização do programa de computação para a simulação do caso estudado, constituído pelo subsistema de abastecimento de água EBAT Bordini e reservatório Bela Vista, seguiu a seguinte sequência de etapas:

- a) desenho do traçado ou esquema do sistema de distribuição;
- b) edição das propriedades dos componentes (objetos) que constituem o sistema (nós, trechos, bombas e reservatório);
- c) descrição das condições de operação do sistema;
- d) seleção de um conjunto de opções de simulação e análises;
- e) execução de simulações hidráulicas dinâmicas;
- f) obtenção e análise dos resultados das simulações.

Uma das características fundamentais dos modelos de simulação e análises de sistemas de abastecimento de água é a presença da variável tempo. O objetivo do modelo não é o de determinar valores das grandezas hidráulicas e sim o de obter a variação destas grandezas ao longo do tempo (vazões nos trechos, pressão nos nós, nível de água nos reservatórios, etc.).

Em função da variável tempo os modelos podem representar os sistemas de forma estática ou dinâmica. Os modelos estáticos objetivam determinar os valores das variáveis do sistema para uma determinada condição (cenário) de operação. Já nos modelos dinâmicos as grandezas hidráulicas (vazão nos trechos, pressão nos nós, níveis de água nos reservatórios e energia requerida do bombeamento) variam ao longo do tempo em função de variações temporais dos consumos de água nos nós da rede.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nos bombeamentos, o ponto de funcionamento da bomba varia ao longo da curva<sup>1</sup>, de acordo com a variação da curva do sistema. Consequentemente, o rendimento da bomba estará variando também, ora para melhor, ora para pior, dependendo do ponto de funcionamento do sistema. Nos bombeamentos ditos em marcha, ou seja, os que distribuem o fluido bombeado antes do ponto mais alto do sistema, isso se amplifica, pois a curva do sistema varia mais, conforme o consumo em cada ponto ao longo da tubulação de recalque (MONACHESI; MONTEIRO, 2005).

Como medidas de redução de perdas de energia elétrica ou busca de maior eficiência recomenda-se manter o rendimento o mais próximo possível do ponto de máximo rendimento (PMR), variando a curva de performance da bomba por meio da variação da sua rotação (velocidade) para compensar a variação da curva do sistema. Esta eficiência é alcançada por meio do uso de variadores de frequência.

Monachesi e Monteiro (2005, p. 27) afirmam que os sistemas de bombeamento de água são os principais consumidores de energia elétrica em um sistema de abastecimento, por isso, melhorar sua eficiência operacional significa diretamente diminuição nas perdas deste insumo e, sugerem que:

*"[...] antes de atuar no bombeamento, onde o consumo de energia realmente se dá, devem-se priorizar as ações de melhorias na utilização final da água e nos sistemas de distribuição, nessa ordem, pois os ganhos nessas áreas serão refletidos de modo ampliado no bombeamento. Caso contrário há o risco de o bombeamento ficar sobredimensionado."*

Monachesi e Monteiro (2005) afirmam que a eficiência do bombeamento pode ser melhorada nos seguintes itens:

- a) rendimento da bomba: nos catálogos dos fabricantes são mostrados as curvas de rendimento associadas às curvas de performance das bombas, facilitando a escolha do equipamento conforme necessidade do sistema;
- b) seleção adequada da bomba: cada sistema tem a sua necessidade característica de bomba, e cada bomba tem sua aplicação específica;
- c) rendimento do motor: motores sub ou sobre dimensionados interferem diretamente no cálculo da potência requerida pelo motor;
- d) redução da vazão recalçada: na fase de projeto, deve-se fazer um estudo de setorização para se evitar bombeamentos desnecessários;
- e) cavitação: a cavitação, que deve ser evitada, é um dos principais problemas nos bombeamentos, pois afeta sua eficiência energética, além de deteriorar o rotor da bomba e diminuir sua curva de desempenho.

Os sistemas de distribuição de água raramente possuem inspeções para a prevenção de rompimentos, a não ser inspeções visuais e se tratando de linhas principais, como adutoras. O controle de pressões serve de indicativo para possíveis rompimentos e vazamentos nas redes, por isso seu controle é de grande importância neste tipo de sistema. Deve ser feita manutenção preventiva, tais como inspeções elétricas e mecânicas, para garantir o bom funcionamento das unidades de bombeamento (MONACHESI; MONTEIRO, 2005).

Na maioria dos sistemas de abastecimento, existe uma relação entre bombeamentos e água distribuída. Logo, a redução de suas perdas de água é uma consequência direta da redução do consumo de energia elétrica.

Para que haja redução das perdas na rede, devem ser tomadas algumas medidas, tais como (MONACHESI; MONTEIRO, 2005):

- a) redução da pressão e setorização na rede de distribuição;
- b) automação e controle da rede;

<sup>1</sup> A energia total cedida por uma bomba varia com a vazão que a atravessa. Esta variação é mostrada através de curvas que descrevem o comportamento da bomba (também chamadas de curvas características da bomba).

Rodrigues e Luvizotto Júnior (2007) definem variadores de frequência como sendo “[...] *equipamentos eletrônicos acoplados aos conjuntos motor-bomba, cuja função é o controle da velocidade de rotação dos motores elétricos a corrente alternada (CA)*”. Os variadores de frequência são usados em motores elétricos de indução substituindo os rudimentares sistemas de variação de velocidades mecânicos (como polias), variadores eletromagnéticos e variadores hidráulicos, bem como os motores de corrente contínua.

Conforme Macintyre (1987, p. 677), os motores das bombas são alimentados por corrente alternada (CA) e seu número de rotação depende:

- a) da frequência ( $f$ ) do sistema que fornece energia elétrica (no Brasil este valor é de 60 Hz);
- b) do número de pólos do motor. A rotação de um motor em rpm (rotação por minuto) é o número de rotações com que, para dados valores do número de pólos e da frequência, ele é susceptível de girar.

Assim, segundo Macintyre (1987, p. 677), se tem segundo a equação 1 que:

$$N = \frac{120 \cdot f}{\rho} \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

$N$  = número de rotações em rpm;

$\rho$  = número de pólos do motor;

$f$  = frequência.

Desta forma, os variadores de frequência controlam a rotação e a velocidade do motor elétrico. Na medida em que varia a rotação da bomba, suas curvas de funcionamento são alteradas, mudando o ponto de operação do sistema. Além disso, podem-se transladar os pontos de mesmo grau de rendimento das curvas fornecidas pelo fabricante (MACINTYRE, 1987).

Macintyre (1987, p. 69) define o consumo de energia elétrica por uma bomba pela equação 2.

$$P = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{75 \cdot \eta} \quad (\text{equação 2})$$

onde:

$Q$  = vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$P$  = potência (cv);

$\gamma$  =  $1000 \text{ kgf}/\text{m}^3$ , peso específico da água;

75 = fator de conversão de  $\text{kgm}/\text{s}$  para cv;

$\eta$  = rendimento do conjunto motor-bomba;

$H$  = altura manométrica (m).

Rodrigues e Luvizotto Júnior (2007) afirmam que o traçado das curvas de funcionamento, para rotações diferentes que as dadas pelo fabricante, podem ser obtidas através das leis de semelhança física entre máquinas hidráulicas. Estas leis de semelhança são mostradas nas equações 3 a 6, apresentadas a seguir.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (\text{equação 3})$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (\text{equação 4})$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^3 \quad (\text{equação 5})$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (\text{equação 6})$$

onde:

Q = vazão ( $m^3/s$ );

N = rotação (rpm);

P = Potência (Watts);

T = Torque (N/m);

H = altura manométrica (m).

Conforme as leis de semelhança física apresentadas nas equações 3 à 6, tem-se que variando o número de rotação do rotor de uma bomba hidráulica se pode variar a vazão bombeada, a altura manométrica requerida pelo sistema, a potência do motor e seu torque.

O variador de frequência trabalha alterando a frequência da tensão aplicada ao motor, possibilitando controlar a sua rotação e, conseqüentemente, reduzindo o consumo de energia elétrica (BACCARELLI; MASSELLI, 2007). O uso deste equipamento em sistemas de bombeamento visa controlar a pressão na rede, reduzindo as perdas por vazamento e manter o ponto de funcionamento da bomba próximo do ponto de maior rendimento.

## SUBSISTEMA ESTUDADO

O presente trabalho analisa em um estudo de caso, o subsistema EBAT Bordini e reservatório Bela Vista, o qual faz parte do Sistema Moinhos de Vento, da cidade de Porto Alegre, operado pelo Departamento Municipal de Água e Esgotos (DMAE). Os dados gerais do Sistema Moinhos de Vento são apresentados no quadro 1.

Quadro 1 – Dados gerais do Sistema Moinhos de Vento. (PORTO ALEGRE, 2004)

ITEM	VALOR
Área do sistema MV	1.313 (ha)
Densidade populacional	2,45 (hab/dom)
Produção Total Média Medida 2003	$3.090 \times 10^3$ ou 1.192 ( $m^3/mês$ ou L/s)
Consumo Total Médio Medido 2003	$1.970 \times 10^3$ ou 760 ( $m^3/mês$ ou L/s)
Perdas	36,24 (%)
K1 <sup>2</sup> medido	1,23
Consumo Residencial Medido 2003	$1.400 \times 10^3$ ou 540 ( $m^3/mês$ ou L/s)
População 2003	169.034 (hab)
Demanda 2003 (Q <sub>máx</sub> diária, com perdas e K1 ( $m^3/mês$ ou L/s))	$3.800 \times 10^3$ ou 1.466
Percapita líquido 2003, cons. resid.	276 (L/hab.dia, s/ perdas)
Percapita bruto 2003, cons. resid.	433 (L/hab.dia, c/ perdas)

A água captada provém do lago Guaíba e, através de uma elevatória de água bruta, é levada pela adutora até a ETA Moinhos de Vento. Da ETA, parte da água tratada segue para os reservatórios de onde abastecem uma área mais baixa do sistema e o restante segue para a EBAT 24 de Outubro (nível 1), onde a água é bombeada até o reservatório Bordini e depois, da EBAT Bordini (nível 2), a água é bombeada até o reservatório Bela Vista. O quadro 2 apresenta os dados e características do sub-sistema Bordini a ser estudado.

No caso estudado do sub-sistema Bordini, há duas unidades de bombeamento operativas e uma reserva, que recalcam água do Reservatório Bordini, situado na cota 82,90 m até o reservatório Bela Vista com capacidade de armazenamento de 1.000  $m^3$ , situado na cota 109,60 m.

Este subsistema foi escolhido para simular o uso do variador de frequência, pois ele se classifica no que se chama de distribuição em marcha, onde a água é recalçada até o reservatório e, ao mesmo tempo, já está abastecendo a população localizada no limite do subsistema. Neste tipo de caso, a pressão de recalque requerida pelo sistema é bastante variável durante seu período de funcionamento, fazendo com que haja

<sup>2</sup> K1 é o coeficiente do dia de maior consumo utilizado nos cálculos para ponderar o volume de água consumido por habitante

um mau aproveitamento da bomba, pois ela estará disponibilizando em alguns momentos, pressões acima das necessárias.

Quadro 2 – Dados e características do sub-sistema Bordini. (PORTO ALEGRE, 2004)

Código EBAT			103	
Código PDA			1.1.1	
Nível			2	
Setor de Abastecimento			7	
Denominação do subsistema		EBAT Bordini e reservatório Bela Vista		
Código do subsistema		102-Bordini		
Vazão atual		L/s	88,07	
Aduoras Existentes	Diametro	mm	400	
	Comprimento	m	603	
	Compr.Total	m	603	
	Diam equiv.	mm	400	
	Material	C <sub>unit</sub>		100
		C <sub>equiv</sub>		100
	Velocidade	m/s	0,7	
	Veloc. Equiv.	m/s	0,7	
Reservatório	Bordini	m <sup>3</sup>	5.000	
Reservatório elevado	Bela Vista	m <sup>3</sup>	1.000	
Cota de Fundo	Res. Bordini	m	82,9	
	Res. Bela Vista	m	109,6 (elevado)	

## DESENHO DO TRAÇADO E PROPRIEDADES DOS COMPONENTES DO SUBSISTEMA EBAT BORDINI E DO RESERVATÓRIO BELA VISTA

Ao se utilizar o programa de computação para simulações de redes de abastecimento de água, deve-se fornecer ao programa todas as variáveis existentes no cenário a ser testado. Isto implica em fornecer valores de diâmetro de rede, especificações do reservatório, cotas nos nós, etc., no qual se caracterizam como sendo os componentes físicos. Por se tratar de uma simulação dinâmica, também é necessário complementar os dados fornecidos com os componentes não físicos que, para este caso em estudo, são definidos como padrões temporais e controles, no qual descrevem o comportamento e os aspectos operacionais do subsistema de distribuição de água.

Para este caso, tem-se como padrões temporais a variação de consumo de água ao longo do dia e, como controle, a pressão em um nó específico e a possibilidade de variação de rotação do rotor das bombas. Estes padrões, aplicados às grandezas hidráulicas, simulam o modo como o subsistema de abastecimento de água se comporta ao longo do tempo. Com todos estes parâmetros a serem especificados e fornecidos ao programa, o desenho do traçado do subsistema é composto por Bombas, trechos de redes de água, nós e reservatório.

Os dados inseridos no programa, relativos às bombas, são suas cotas de instalação, a curva da bomba (valores de carga hidráulica e vazão que definem a curva de funcionamento) e a curva de rendimento da bomba (que mostra o local dentro de um intervalo de vazões possíveis da bomba, onde se dá o melhor rendimento e seu respectivo valor).

As bombas situam-se na cota 83,1m e trabalham com pressões de sucção variando ao longo do tempo. Já os valores da curva das bombas e curva de rendimento foram obtidos do catálogo do fabricante. A vazão, a altura manométrica e o rendimento referentes ao rotor de diâmetro de 285mm estão representados no quadro 3.

Quadro 3 – Valores de vazão, altura manométrica e rendimento da bomba em estudo.

Q (l/s)	H (m)	H (%)
0,00	36,5	-
22,22	36,4	38
25,00	36,2	42
27,77	36,0	45
33,33	35,9	52
41,66	35,6	59
55,55	34,2	70
69,44	32,8	77
83,33	31,8	81
111,11	25,0	79
138,38	16,0	62

Também fazem parte do cenário em estudo trechos que ligam a EBAT Bordini ao reservatório Bela Vista, outros trechos que ligam às redes de distribuição e trechos que também ligam aos nós. Cada trecho possui as características da rede de distribuição de água (diâmetro, comprimento e coeficiente adimensional). Este coeficiente adimensional (C) é obtido em função do tipo de tubulação utilizada na instalação. Como todos os trechos são em ferro fundido, este coeficiente vale 130. Os valores de diâmetro e comprimento dos trechos estão mostrados no quadro 4.

Inserem-se nós no cenário simulado, que são pontos onde os trechos se ligam entre si e por onde a água entra e sai da rede. Cada nó possui suas respectivas cotas altimétricas e suas vazões acumuladas. Para o caso estudado realizado, foi fixada uma vazão no nó J-3 que representa a demanda média, mas com uma variação de consumo ao longo do dia, adquirindo ao programa uma condição de contorno para a simulação.

Quadro 4 – Características da rede de distribuição em estudo.

Trecho	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11
D mm	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
L (m)	3,0	1,0	3,0	3,0	3,0	1,0	3,0	3,0	551,0	93,0	36,0
C	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130

Os nós com seus valores de cotas e vazões estão mostrados no quadro 5. O reservatório de nível variável (elevado) tem cota de fundo de 109,6m, cota da tampa de 117,84m, altura mínima de água de 110,1m, altura máxima de água de 114,2m e volume de 1.000m<sup>3</sup>.

Quadro 5 – Cotas e vazões referentes aos nós fixados na simulação.

Nó	J-1	J-2	J-3	J-4	J-5	J-6	J-7
Q (l/s)	0	0	83,33	107,50	107,50	0	0
Cota (m)	83,1	90,5	90,0	83,1	83,1	83,1	83,1

Após a criação do projeto com o traçado da rede de distribuição e configuração das propriedades dos componentes (nós, trechos, bombas e reservatório), a figura 1 traz a representação esquemática do subsistema a ser estudado.



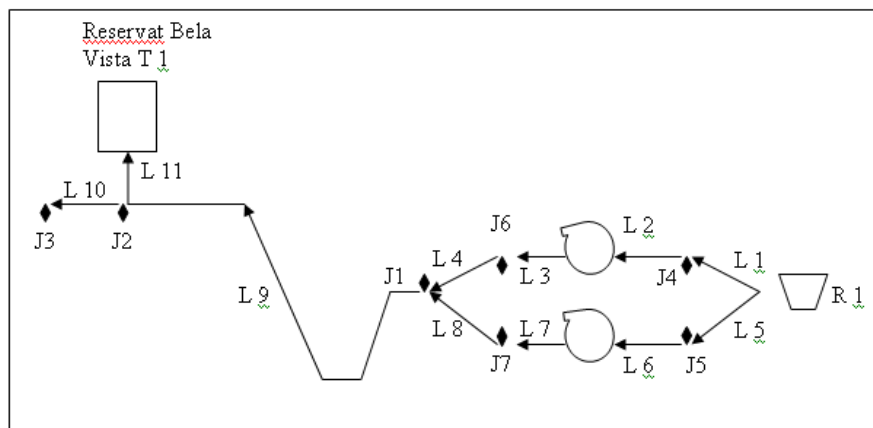


Figura 1: representação gráfica do subsistema a ser estudado.

## DESCRIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DO SUBSISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA EBAT BORDINI E RESERVATÓRIO BELA VISTA

As variáveis do sistema ao longo do tempo, através de uma sequência de soluções de equilíbrio hidráulico obtidas para sucessivos instantes e de cálculo da rede governados pela conservação da massa, conservação da quantidade de movimento e princípio de energia, foram executados de forma dinâmica. Para isso, foram condições de contorno da simulação, na qual agem como controles simples ou regras gerais a ser seguida pelo programa, a fixação da pressão no nó J-1 no valor de 107,5 metros de coluna de água e, demanda média de água e pressões variáveis ao longo de um dia apresentadas graficamente pela figura 16 e fixados no nó R-1 da simulação. O nó R-1 representa o restante do sistema Moinhos de Vento na qual não faz parte do caso estudado.

Estes controles simples alteram o estado da bomba do sistema de abastecimento em função da pressão a ser mantida no nó e da demanda diária. Para uma melhor visualização gráfica dos resultados, a simulação foi feita para gerar resultados referentes a três dias (72 horas), ou seja, os gráficos representados nas figuras 2 a 13 mostram resultados de vazões, pressão no nó, percentual de volume de água no reservatório e demanda de água simulados para uma duração de 72 horas seguidas.

## SELEÇÃO DE UM CONJUNTO DE OPÇÕES DE SIMULAÇÕES E ANÁLISES

O uso do software para a simulação e obtenção dos resultados caracterizou-se como uma ferramenta de extrema utilidade pela rapidez com que os cálculos hidráulicos são efetuados, pela flexibilidade de se proceder a análise de situações alternativas para a solução dos problemas bem como a busca de melhorias nas operações dos sistemas de abastecimento de água.

Dentro do contexto do trabalho, na qual versa especificamente sobre o uso do variador de frequência como uma ferramenta para a redução do consumo de energia elétrica no subsistema EBAT Bordini e reservatório Bela Vista, com o uso do software para as simulações, são possíveis duas opções de análise de dados.

A primeira opção refere-se à simulação do modelo dinâmico do subsistema estudado, sem o uso do variador de frequência. Após o desenho do traçado do subsistema e a edição das propriedades de seus componentes (nós, trechos, bombas e reservatório), obteve-se o comportamento hidráulico do modelo testado. Usando como condição de operação os níveis máximos e mínimos que deveria atingir o reservatório T-1 (reservatório Bela Vista).

A segunda opção refere-se à simulação do modelo dinâmico do subsistema incluindo o uso do variador de frequência. A partir da determinação de uma condição de contorno (valor fixo de pressão no nó J-1) e da possibilidade de variação da velocidade de rotação do rotor da bomba, o programa recalcula todos os parâmetros envolvidos na simulação para este novo cenário, onde se tem alterações na curva característica e condições de funcionamento das bombas.

Ambas as opções são calculadas ao longo do tempo, na qual foi estipulado em três dias (72 horas), para uma melhor visualização dos resultados. O único dado alterado entre a primeira e segunda opção de simulação foi o uso do variador de frequência, na qual varia a rotação do rotor das bombas.

## RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES HIDRÁULICAS E DISCUSSÃO

Para facilitar a análise dos resultados da simulação, foram inseridos no trabalho diversos gráficos que representam os cenários do sistema hidráulico **sem o uso do variador de frequência** (figuras 2 a 7) e do sistema hidráulico **com o uso do variador de frequência** (figuras 8 a 13). Para ambos os cenários (com e sem variador de frequência), utilizou-se os valores de consumo de água por hora num período de 24 horas (um dia), a variação da pressão de sucção (como multiplicador) ao longo do dia e a pressão na sucção, representada em metros, pelo tempo do Sistema Moinhos de Vento. Na simulação foi utilizada condição de um reservatório de nível fixo, diferentemente de uma realidade de campo. A variação foi retirada de dados reais de operação da EBAT Bordini.

A velocidade de rotação do rotor da bomba é sempre a mesma para o caso de não se utilizar o variador de frequência. A figura 2 representa os instantes em que a Bomba 1 é ligada e desligada, fazendo com que a velocidade caia a zero.

O primeiro cenário de simulação ocorre **sem o uso do variador de frequência** acoplado às bombas do subsistema, ou seja, elas trabalham com rotação do rotor constante de 1800 rpm (rotações por minuto). Como análise geral dos resultados deste cenário, tem-se os seguintes aspectos a serem considerados:

- utilização da Bomba 1 durante 625 horas de 720 horas simuladas, o que representa 86,8% do tempo;
- acionamento da Bomba 2 nos horários de maior consumo, que equivale a 150 horas de 720 horas simuladas e representa 20,8% do tempo;
- grande variação de energia cedida pela Bomba 1 conforme demanda requerida;
- variação do nível do reservatório conforme demanda requerida;
- pressão no nó J-3 com média de 23 mca, bem acima da mínima requerida (10 mca).

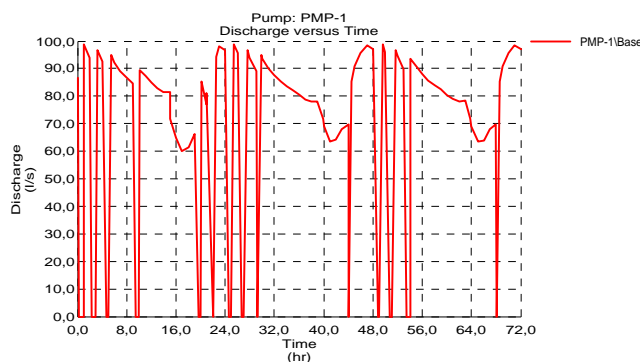


Figura 2: vazão fornecida pela bomba 1 ao longo de 72 horas (3 dias). Sem variador de frequência.

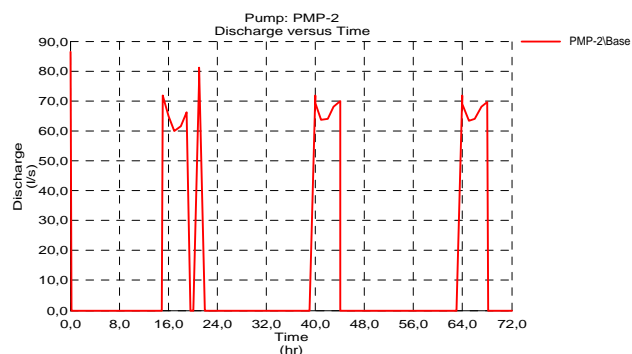


Figura 3: vazão fornecida pela Bomba 2 ao longo de 72 horas (3 dias). Sem variador de frequência.

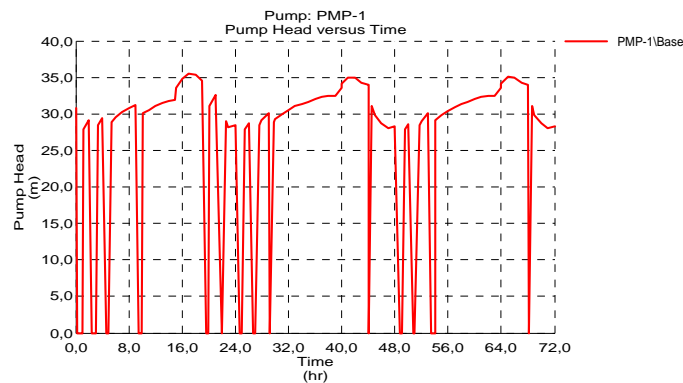


Figura 4: energia cedida pela bomba 1 ao longo de 72 horas (3 dias). Sem variador de frequência.

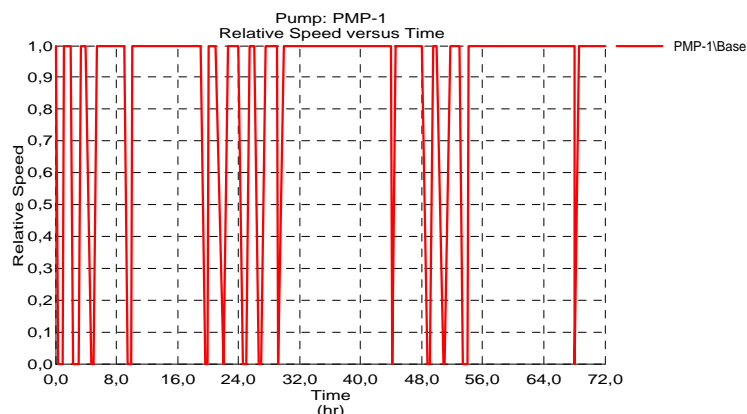


Figura 5: velocidade relativa de rotação do rotor da bomba 1 ao longo de 72 horas (3 dias). Sem variador de frequência.

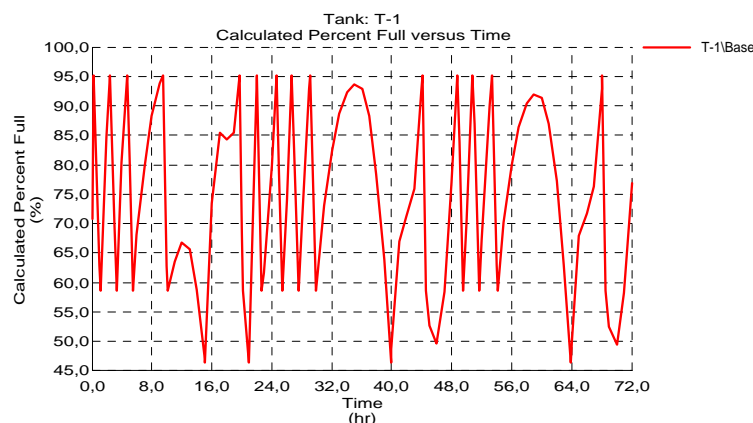


Figura 6: percentual de cheia do reservatório ao longo de 72 horas (3 dias). Sem variador de frequência.

Para o segundo cenário de simulação, no qual temos o **uso do variador de frequência** nas bombas do subsistema e, conseqüentemente, variação na rotação do rotor conforme demanda de água solicitada, os resultados são muito diferenciados do primeiro cenário simulado. Como análise geral da segunda simulação, pode-se citar os seguintes aspectos:

- utilização da Bomba 1 durante 719 horas de 720 horas simuladas, o que representa 99,9% do tempo;
- a Bomba 2 não foi acionada em nenhum momento da simulação;
- pouca variação de energia cedida pela Bomba 1;
- o reservatório se manteve vazio;
- variação controlada da velocidade do rotor na medida em que varia a demanda durante o dia;

f) pressão em J-3 acima da mínima e com boa margem de segurança (valor médio de 16 mca).

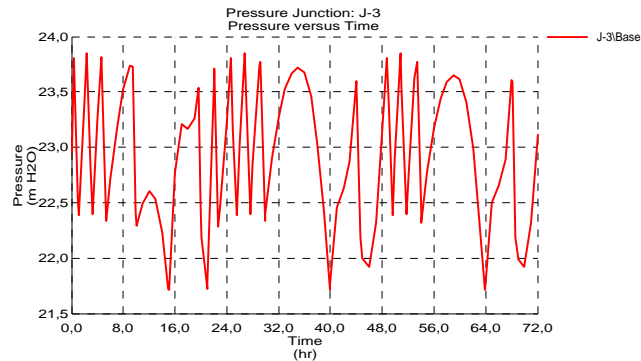


Figura 7: pressão disponível no Nó J-3 ao longo de 72 horas (3 dias). Sem variador de frequência.

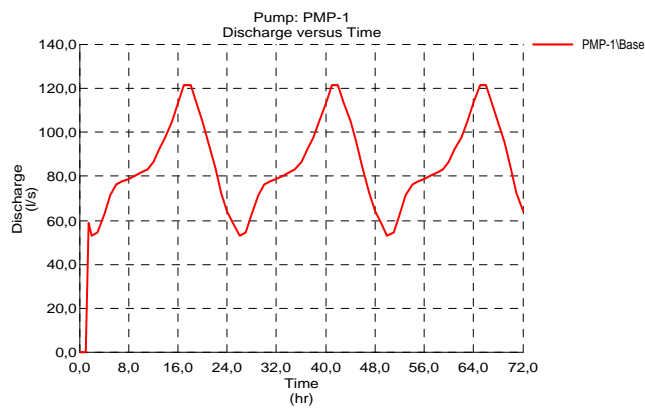


Figura 8: vazão fornecida pela bomba 1 ao longo de 72 horas (3 dias). Com variador de frequência.

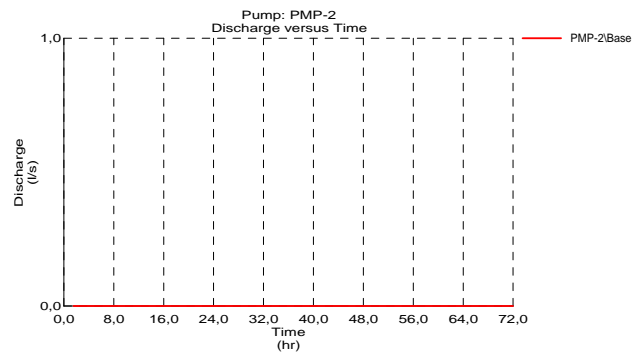


Figura 9: vazão fornecida pela bomba 2 ao longo de 72 horas (3 dias). Com variador de frequência.

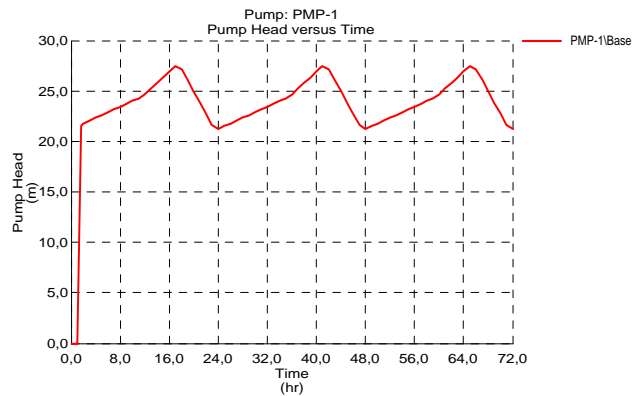


Figura 10: energia cedida pela bomba 1 ao longo de 72 horas (3 dias). Com variador de frequência.

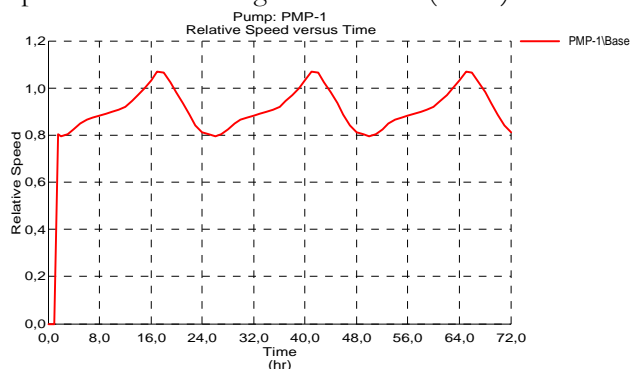


Figura 11: velocidade relativa de rotação do rotor da bomba 1 ao longo de 72 horas (3 dias). Com variador de frequência.

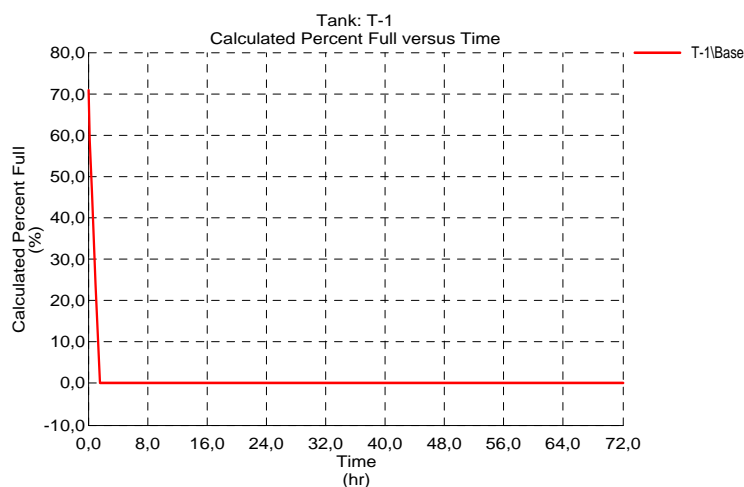


Figura 12: percentual de cheia do reservatório ao longo de 72 horas (3 dias). Com variador de frequência.

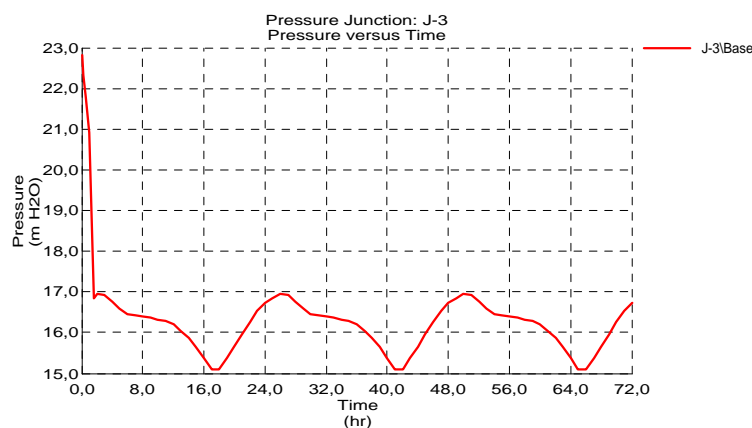


Figura 13: pressão disponível no Nó J-3 ao longo de 72 horas (3 dias). Com variador de frequência.

O quadro 6 apresenta valores de dados de funcionamento das bombas para os dois cenários simulados, obtidos pelo programa de computação. Nele tem-se que o conjunto de bombas possui uma eficiência média maior utilizando menos energia elétrica na situação onde temos o uso do variador de frequência, sendo que ambos cenários encontram as mesmas condições de demanda de água horária e pressão a ser suprida.

Analisando os valores obtidos nas simulações apresentados no quadro 6, tem-se uma redução no consumo de energia elétrica de aproximadamente 30% sendo utilizada apenas uma bomba e tendo esta uma eficiência 18% maior do que quando utilizada sem o variador de frequência.

Quadro 6 - Dados de funcionamento das bombas para os dois cenários simulados

Bomba	CENÁRIO 1 – SEM VARIADOR DE FREQUÊNCIA		CENÁRIO 2 – COM VARIADOR DE FREQUÊNCIA	
	PMP-1	PMP-2	PMP-1	PMP-2
Tempo de uso (horas)	625,13	149,87	719	1
Utilização (%)	86,8	20,8	99,9	0,1
Volume Bombeado (m <sup>3</sup> )	190.693,41	30.698,99	221.010,41	Zero
Volume Total Bombeado (m <sup>3</sup> )	221.392,40		221.010,41	
Potência média cedida para a água (kW)	22,94	18,49	20,4	Zero
Eficiência média da bomba (%)	72,0	62,2	79,3	Zero
Eficiência do sistema das bombas (%)	67,1		79,3	
Energia média cedida pelo motor para a água (%)	67,6	68,9	75,4	Zero
Potência nominal do motor (kW)	33,95	26,83	27,07	Zero
Energia total usada pela bomba (kWh)	21.222,40	4.020,42	19.466,49	Zero
Energia total usada pelo sistema (kWh)	25.242,82		19.466,49	
Energia usada por dia (kWh)	707,41	134,01	648,88	zero

## ANÁLISE FINAL E CONSIDERAÇÕES

As análises apresentadas neste trabalho mostraram resultados significativos na implantação do variador de frequência neste subsistema de bombeamento. O uso deste equipamento manteve o subsistema de abastecimento de água trabalhando em um cenário mais estável, o que contribui para um melhor aproveitamento e eficiência das bombas.

A utilização do variador de frequência como meio de redução de consumo de energia elétrica pode ser viável nesta situação analisada, levando em consideração que foi feito simulações quanto ao seu uso e verificou-se uma redução significativa de aproximadamente 30% no consumo de energia elétrica, alcançando assim o objetivo principal deste trabalho.

Além da economia de energia causada diretamente pelo uso do variador de frequência, teria-se num sistema real a economia causada pela diminuição da pressão de operação do sistema, o que reduz de forma significativa as perdas de água.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BACCARELLI C. L.; MASSELLI F. Inversores de Frequência. Altus: informando e automatizando, São Leopoldo, n. 63, p. 4-5, 1. sem. 2007. Disp em: <[http://www.altus.com.br/ftp/Public/Portugues/Altus%20Institucional/Informativo\\_I&A/I&a63.pdf](http://www.altus.com.br/ftp/Public/Portugues/Altus%20Institucional/Informativo_I&A/I&a63.pdf)>. Acesso em: 5 dez. 2008.
- MACINTYRE, A. J. Bombas e Instalações de Bombeamento. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1987.
- MONACHESI, M. G.; MONTEIRO, M. A. G. Eficiência Energética de Sistemas de Bombeamento: manual prático. Brasília: Eletrobrás/Procel, 2005.
- MOURA, V. M. Modelação Matemática e Sistema de Informação Geográfica como suporte ao gerenciamento de sistema de abastecimento de água: subsistema CoopHEMA de Cuiabá/MT. 2006. 131 f. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra. Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá.
- PORTO ALEGRE. Departamento Municipal de Água e Esgoto. Plano Diretor de Água. Porto Alegre, 2004.
- RODRIGUES, W.; LUVIZOTTO JÚNIOR, E. Inversor de Frequência em Sistemas de Bombeamento. 2007. Disponível em: <<http://www.saneamentobasico.com.br/acervoTecnico/arquivos/24-5-2007%2009-19-00.pdf>>. Acesso em: 17 out. 2008.
- SAFFI, L. A. Sistema de bombeamento: redução do consumo de energia elétrica utilizando variador de frequência. 2009. 63 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

---

## 13 Gestión para la eficiencia hidráulica y energética en sistemas de distribución de agua

---

### Holger Benavides Muñoz



Universidad Técnica Particular de Loja, Unidad de Ingeniería Civil, Geología y Minas, Área de Ingeniería Hidráulica y Saneamiento. San Cayetano Alto, C/ Paris, (Loja, Ecuador). Teléfono: (593) 72 570 275 ext. 2939. E-Mail: [hmbenavides@utpl.edu.ec](mailto:hmbenavides@utpl.edu.ec). [www.utpl.edu.ec/blog/holgerbenavides](http://www.utpl.edu.ec/blog/holgerbenavides)

### José Sánchez Paladines



Universidad Técnica Particular de Loja, Unidad de Ingeniería Civil, Geología y Minas, Área de Ingeniería Hidráulica y Saneamiento. San Cayetano Alto, c/ Paris, (Loja, Ecuador). Teléfono: (593) 72 570 275 ext. 2509. E-Mail: [jasanchez@utpl.edu.ec](mailto:jasanchez@utpl.edu.ec); y, Universidad Nacional de Loja, Área de Recursos Naturales Renovables.

## INTRODUCCIÓN

La gestión sostenible del recurso hídrico en el entorno urbano, escenario constitutivo del desarrollo, precisa –para ser efectivo el manejo técnico de todos los componentes que la conforman–, de la aplicación de un marco legal y político – práctico, en un tiempo adecuado y con estrategias de intervención efectivas, teniendo como actor principal al usuario presente y futuro.

Es la buena gestión de los sistemas de ingeniería urbana la que, de forma general, aporta para que la eficiencia sea creciente durante su vida útil. La poca o gran incidencia del aporte que los proyectos de infraestructura civil brindan al entorno, con frecuencia depende de lo razonadamente diseñados, estratégicamente evaluados y prolijamente ejecutados que estén. Cuando se encuentran en una fase de concepción ideal hasta la etapa de diseño definitivo son sometidos a evaluaciones técnicas, económico-financieras, ambientales y socio-políticas, principalmente, los resultados ayudan a entender y prevenir el comportamiento dinámico - temporal que el sistema tendrá una vez que sea puesto en marcha y al servicio correspondiente.

Los sistemas urbanos de agua, infraestructura civil básica e imprescindible para el bienestar y salubridad de la población, incluyen elementos cuyas características hidráulicas-energéticas varían con el tiempo. El uso, las maniobras de mantenimiento, los sucesos eventuales operativos, la variación de presión, los incrementos de velocidad, entre otros agentes, provocan en las redes y en sus elementos desgaste, deterioro y fallo.

Un sistema de abastecimiento de agua se mantendrá dentro de una franja de eficiencia siempre que se lo gestione de forma proactiva y se tome las decisiones en el tiempo y espacio más propicias. Esto significa, entre otras acciones directivas, agenciar correctamente los componentes del sistema: personal (técnicos - de gabinete y campo -, administrativo y su “*know how*”); infraestructura (captaciones, aducciones, conducciones, tratamiento, almacenamientos, distribuciones, redes.- nudos y líneas, etc.); operación y mantenimiento (planificación, demanda y oferta, presiones, consumo energético, fugas, renovaciones parciales de tubería); económico (tarifas y costos, amortizaciones, inversiones versus oportunidad, búsqueda de capitales, etc.); recurso (cuencas fuente, calidad de agua, calidad de vida); tecnología (ofimática, instrumentación para medición en línea, SCADA, telemetría, SIG, etc.); logística y bodega (vehículos, maquinaria, herramientas, instrumentos y equipo), entre otros.

Para el presente caso de estudio (fase uno), tomando en consideración el nivel de profundidad del tema, nos hemos propuesto investigar únicamente la *eficiencia hidráulica y la eficiencia energética*.

## PROBLEMÁTICA

En países considerados “en vías de desarrollo”, la disminución gradual de la eficiencia hidráulica y energética de sus abastecimientos urbanos de agua se debe principalmente a que sus gestores no toman “a tiempo” las acciones de operación y mantenimiento adecuadas, ora por la no gestión de recursos, ora por criterios políticos.



Está claro que ningún sistema de agua potable del mundo es totalmente estanco, los nuestros están dentro de ese número. Para desagregar las pérdidas de agua de los sistemas de distribución urbana se dice que estas son: *pérdidas reales o físicas* y *pérdidas aparentes o comerciales*. Las primeras se producen principalmente por fugas (en las tomas o conexiones domiciliarias, en las tuberías, válvulas, accesorios, nudos, etc.); las segundas son aquellos volúmenes de agua que se consumieron pero no fueron identificados ni facturados por la empresa. (Cabrera E. 2007).

Al producirse considerables pérdidas de agua se producen también pérdidas económicas cuantiosas, por el exceso de energía consumida.

Con el tiempo y el uso, el rendimiento del grupo motor-bomba de cada estación de bombeo del sistema disminuye, y cada vez cuesta más impulsar una misma cantidad de agua a las mismas cotas. El problema se agrava si tampoco se dispone de las curvas características actualizadas, tanto del nudo de impulsión ( $H_B$ ) como del sistema resistivo ( $H_R$ ).

Se presentan entonces otros problemas que, sea de forma sinérgica o sea de forma directa, son consecuencia de los anteriores, así por ejemplo:

- a) Los sistemas de agua que no gestionan fugas a tiempo, se deterioran crecientemente; con mayores pérdidas de agua (y por ende de energía), menores volúmenes registrados y facturados (con gastos energéticos superiores a los obligados).
- b) Aumento de la huella ecológica por mal-gasto energético (volúmenes fugados o no contabilizados).
- c) En la gestión del sistema de agua disminuye la eficiencia y sostenibilidad.

## **OBJETIVO**

Proponer alternativas para mejorar la eficiencia hidráulica y energética de un sistema urbano de agua, mediante la detección de fugas por flujos mínimos nocturnos y la actualización de las curvas características de las estaciones de bombeo y resistivas del sistema, a través de su modelación y ajuste práctico.

## **ESTADO DEL ARTE**

Las características físicas y el estado funcional de cada sistema de distribución de agua es una particularidad que se debe considerar a la hora de hablar de eficiencia y gestión. Dentro de esto destaca que, la casi totalidad de los municipios de los países en vías de desarrollo, manejan abastecimientos insuficientes, deficientes e ineficientes.

El origen de los múltiples problemas que se generan en sistemas urbanos de agua, carentes de una apropiada gestión, posiblemente se debe al creciente porcentaje de agua no contabilizada, a la edad del sistema, a la no gestión de la presión ni de la demanda, a los frecuentes cortes y racionamientos con la consecuente intrusión patógena, junto con las malas costumbres de consumo y una escasa sensibilidad ciudadana para mantener consumos moderados; asimismo, no existen criterios para establecer políticas de mantenimiento; además, las tarifas de cobro al abonado no garantizan la sostenibilidad propia de un sistema bien gestionado y debe acudir a subsidios.

La mayoría de los países Iberoamericanos, por su parte, han estructurado sistemas autónomos de valoración del desempeño, en los que las propias empresas de agua de las principales ciudades han establecido y adaptado para sí, conjuntos de variables cuyos valores (que son obtenidos de campo y/o gabinete) dan cabida a análisis e interpretaciones matemáticas que a su vez permiten obtener indicadores de gestión. La buena práctica y aplicación de criterios con base en la interpretación de sus indicadores apoya constantemente a la toma de decisiones y buena administración de las empresas operadoras y permiten, en la mayoría de las veces, un progresivo incremento de la eficiencia interna. (Benavides M. H.; et. al. 2008)

## MEJORA DE LA EFICIENCIA DE LA GESTIÓN URBANA DE SISTEMAS DE AGUA

Una alternativa recomendada por los expertos a nivel mundial para mejorar la gestión de sistemas de agua, es aquella que la empresa operadora encargada de esta tarea selecciona estratégicamente una gama de variables e indicadores de gestión (*performance indicators*) que le permitan evaluar la efectividad (*eficacia + eficiencia*) de los procesos que lleva a cabo para servir a sus usuarios abonados. Entre los expertos antes mencionados se puede citar que, por ejemplo el Banco Mundial – BM –, la International Water Assosiation – IWA – conjuntamente con el Instituto Tecnológico del Agua – ITA –; la OFWAT, entre otros, propusieron cada uno de ellos una herramienta que permite: medir el desempeño y comparar la gestión de las operadoras de sistemas de agua urbana, mediante la práctica de benchmarking métrico entre empresas homologables, (Benavides M. H. 2007).

Los indicadores relacionan variables que tienen su base en la información que se recaba de cada sistema operador y de los componentes de los distritos hidrométricos contemplados en el sistema de agua. Para mejorar la calidad del servicio de las empresas operadoras de forma permanente se recomienda implementar procedimientos para recopilación y manejo de información veraz y oportuna, que den a conocer en cualquier momento los resultados y metas alcanzadas; y, que permitan ser verificados fácilmente, en espacio y tiempo.

Asimismo, dentro de la mejora de la gestión hídrica y energética de sistemas urbanos de agua, cuya capacidad instalada aún esté en proceso de mejoramiento, se plantean actividades para la reducción del *agua no contabilizada* y concretamente de las fugas reales de agua; y, optimización de consumo energético mediante el incremento en los rendimientos de los grupos motor-bomba de las estaciones de bombeo que incluya el sistema.

Nuestra propuesta para mejorar la eficiencia hidráulica y energética se basa en dos aspectos:

- a) Reducir las fugas de agua, que primeramente requiere detectarlas en la red, luego localizarlas, a veces también confirmarlas y, finalmente, repararlas; y,
- b) Reducir los gastos de energía, que implica que se debe mejorar el rendimiento de los grupos motor-bomba, y esto significa conocer su estado actual, comportamiento hidráulico y condición resistiva del sistema.

Un procedimiento apropiado para poner en práctica lo que constituye esta propuesta y que es aplicable a nuestro medio, es la que resulta de combinar la detección de fugas mediante el análisis de flujos mínimos nocturnos y la actualización de las curvas características de las estaciones de bombeo.

En resumen, un sistema de agua para consumo humano mejorará su eficiencia hidráulica y energética cuando, al mismo tiempo, las fugas se reduzcan y las impulsiones trasieguen más caudal con menor consumo de energía. Dicho de otro modo, el consumo energético será menor en tanto y en cuanto las fugas de agua disminuyan y los rendimientos de los grupos de impulsión se mantengan o incrementen.

Una de las formas de balance hídrico técnico existente para facilitar el cálculo de rendimientos volumétricos se esquematiza en la figura 01.

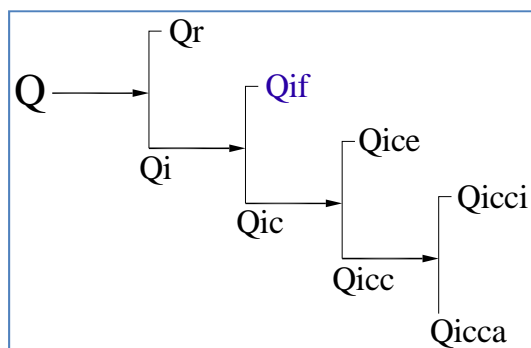


Figura 01. Esquema del balance hídrico, criterio técnico

Fuente: (Benavides M. H.; et. al. 2008)

Donde:

- Q - volumen inyectado en el sistema. Medido con caudalímetros en las entradas.
- Q<sub>r</sub> - volumen registrado. Debe instalarse contadores en todos los usos.
- Q<sub>i</sub> - volumen incontrolado. Por diferencia de caudales entre Q y Q<sub>r</sub>.
- Q<sub>if</sub> - volumen incontrolado fugado. Detección de fugas, (flujos nocturnos).
- Q<sub>ic</sub> - volumen incontrolado consumido. Por diferencia entre Q<sub>i</sub> y Q<sub>if</sub>.
- Q<sub>ice</sub> - volumen incontrolado consumido con error en la medición. Se obtiene mediante proyección del error del parque de contadores.
- Q<sub>icc</sub> - volumen incontrolado consumido carente de contador. Por diferencia entre Q<sub>ic</sub> y Q<sub>ice</sub>.
- Q<sub>icci</sub> - volumen incontrolado consumido carente de contador instalado de forma ilegal. Este valor se determina con campañas permanentes para la identificación de acometidas clandestinas o ilegales.
- Q<sub>icca</sub> - volumen incontrolado consumido carente de contador, con uso autorizado por la propia empresa.  $Q_{icca} = Q_{ic} - (Q_{ice} + Q_{icci})$ .

De este balance se pueden formular tres rendimientos volumétricos:

$$\eta_g = \frac{Q_r}{Q} \quad (01)$$

$$\eta_r = \frac{Q_s}{Q} \quad (02)$$

$$\eta_m = \frac{Q_r}{Q_s} \quad (03)$$

$$Q_s = Q - Q_{if} = Q_r + Q_{ic} \quad (04)$$

Donde:

- $\eta_g$  - rendimiento global
- $\eta_r$  - rendimiento de la red
- $\eta_m$  - rendimiento de medición y registro
- Q<sub>s</sub> - volumen suministrado

Los intervalos de comparación del estado de la gestión, respecto del rendimiento volumétrico global, es el siguiente:

$\eta_g \geq 0.9$	excelente
$0.8 \leq \eta_g \leq 0.9$	muy bueno
$0.7 \leq \eta_g \leq 0.8$	bueno
$0.6 \leq \eta_g \leq 0.7$	regular
$0.5 \leq \eta_g \leq 0.6$	malo
$\eta_g \leq 0.5$	inaceptable

Con este sistema de rendimientos volumétricos se debe tener particular cuidado al momento de interpretarlos. "El rendimiento es un indicador "perverso" pues a mayor consumo, mejor rendimiento, aunque las fugas sean iguales" (García-Serra J. 2009).

El balance hídrico propuesto por la *International Water Association* - IWA, no considera el término *agua no contabilizada* (ANC), porque según su filosofía las pérdidas de agua también se pueden cuantificar; mas, se involucra el término *non revenue water* (NRW), o agua no rentable.

La división de los componentes de un suministro de agua con base en su rentabilidad se lo presenta en el cuadro 01.

Una mejor alternativa para la evaluación de sistemas de agua consiste en involucrar la propuesta internacional de **indicadores relativos**. A continuación se presentan los siguientes:

$$IFE = \frac{VIF}{UMF} \tag{05}$$

$$VIF = \frac{Q_{if}}{N_a \times d} \tag{06}$$

$$UMF = \frac{(18 \times L_t + 0.8 \times N_a + 25 \times L_a) \times p}{N_a} \tag{07}$$

Donde:

- IFE - índice de fugas estructural [adimensional]
- VIF - volumen incontrolado fugado, [L/acom./día]
- UMF - umbral mínimo de fugas, [L/acom./día]
- Q<sub>if</sub> - volumen fugado [L]
- N<sub>a</sub> - número de acometidas, [unidades]
- d - número de horas al día de presión de la red, [días]
- L<sub>t</sub> - longitud total de tubería
- L<sub>a</sub> - longitud de acometidas, (número de acometidas por longitud promedio de acometidas), [km]
- p - presión, [m c.a.]

Cuadro 01. Balance hídrico propuesto por la IWA

Volumen suministrado al sistema	Consumo autorizado	Consumo autorizado facturado	Consumo medido facturado	agua rentable
		Consumo autorizado no facturado	Consumo no medido facturado	
	Pérdidas de agua	Pérdidas aparentes	Consumo no autorizado	agua no rentable
			Errores de medición y de manejo de información	
		Pérdidas reales	Fugas en conducción y/o distribución	
			Fugas debidas a derrames en tanques de regulación y/o almacenamiento	
			Fugas en tomas ocurridas antes de la medición	

Fuente: (Lambert A. O. 2002).

Si el índice de fugas estructural es igual a uno (IFE = 1) se considera un sistema gestionado de muy buena manera; para un IFE > 4 (en países desarrollados) y un IFE > 8 (en países en vías de desarrollo) (Liemberger R. & Partners 2010), las características del sistema son muy mejorables y se recomienda intensificar esfuerzos para reducir pérdidas. En la ecuación (07) para el cálculo del UMF, los coeficientes: 18, 0.8 y 25 son el resultado del estudio de 27 abastecimientos bien gestionados. (García-Serra J. 2008).

## EFICIENCIA HIDRÁULICA

Las pérdidas reales según la concepción de la IWA, establece que estas pérdidas de agua desde la red no se pueden eliminar por completo de los sistemas de abastecimiento. Existirá, en la totalidad de los casos, un volumen mínimo de pérdidas reales inevitables y un volumen de pérdidas potencialmente recuperables.

La reducción del volumen de pérdidas se puede conseguir aplicando las consideraciones siguientes: (Benavides M. H.; et. al. 2008).

- a) Control activo de fugas; detección y localización.
- b) Reparaciones oportunas y efectivas.

- c) Gestión de presión; reducción y control funcional.
- d) Rehabilitación y mantenimiento permanente de la infraestructura hidráulica.

Es de fácil deducción el hecho que para aplicar la valoración de los indicadores de desempeño propuestos por la IWA, la OFWAT y por las normas ISO 24512, los sistemas requieren contar con un mínimo de características constructivas, de equipamiento y de inversión, que permitan obtener los datos requeridos para luego introducirlos en las variables correspondientes y finalmente determinar los indicadores que se necesitan. (Benavides M. H.; et. al. 2008).

### Detección de fugas

La detección de fugas es la fase previa a la localización, confirmación y reparación de las mismas. Entre los métodos recomendados para las redes sectorizadas, está el del análisis de flujos mínimos nocturnos. Un indicador de la existencia de fugas es el incremento en el volumen de consumo nocturno. El volumen nocturno fugado tiene relación directa, entre otras variables, con la mayor presión del sistema en horas de la noche y madrugada.

Se debe indicar que el análisis de caudales mínimos nocturnos es una técnica fácil de aplicar siempre que la red en análisis esté sectorizada y que se tenga registros de caudal y presión continuos del mes más representativo.

El caudal mínimo nocturno se podría dividir en el caudal que se entrega a los clientes del sistema y el caudal que se pierde por fugas en la red. *Este último es el que nos interesa determinar.*

Cuadro 02. Componentes del caudal mínimo nocturno

<b>Caudal mínimo nocturno</b>	Caudal nocturno distribuido al cliente	Consumo nocturno del cliente: (excepcional, doméstico y no doméstico)	
		Pérdidas de caudal nocturno en las instalaciones del cliente	<b>Caudal nocturno fugado</b>
	Caudal nocturno perdido en la red	Pérdida de caudal en las tuberías de la red principal	
		Pérdida de caudal en las tuberías de la red secundaria y conexiones domiciliarias	
		Pérdida de caudal en depósitos, válvulas, accesorios y otros.	

Fuente: Adaptado por los autores, referido a (Cabrera E. 2008).

### Caso práctico. Aplicación de FMN según el manual Managging leakage

En primera instancia se debe seleccionar los usuarios *no domésticos*, que para nuestro caso práctico corresponde a 25 clientes; 425 clientes corresponden a abonados domésticos y de los 25 uno es excepcional. Para los consumos nocturnos domésticos, esta metodología propone un valor de 1.7 L/viv/h que son los correspondientes a caudales entregados a las viviendas. (Lambert A. O. 2002).

Al consumo no doméstico se le asigna un factor de 8 L/(usuario no doméstico)/h. (Arregui de la Cruz F. 2006).

Tabla 01. Caudal entregado a los usuarios

Tipos de consumo	Característica	# usuarios	q unitario (L/h)	Caudal total (L/h)
Excepcionales	Domésticos	0	0	0.0
	No domésticos	1	600	600.0
Nocturno doméstico	(1.7 * N <sub>v</sub> ) =	425	1.7	722.5
Nocturno no doméstico	(8 * N <sub>u</sub> ) =	25	8	200.0
<b>SUB TOTAL (A)</b>				<b>1522.5</b>

Fuente: Adaptado por los autores, referido a (Benavides M. H.; et. al. 2008)

Para la estimación del caudal de fugas latentes, en *Managing leakage*, se propone la ecuación [08] en la que se considera el número de acometidas y la longitud de las tuberías de distribución:

$$Q_{FL} = (F \times N_a) + (G \times L) \quad (08)$$

Donde:

- Q<sub>FL</sub> - caudal de fuga latente, (L/h).
- N<sub>a</sub> - número de acometidas.
- L - longitud de tuberías de distribución, [km].
- F - factor (*commun pipes + supply pipes*) [L/prop/h]
- G - factor (*dist mains*) [L/km/h]

Cuadro 03. Factores para determinar el caudal de fugas latente

Estado	F (L/acom/h)	G (L/km/h)
Bueno	2.0	20
Medio	4.0	40
Malo	6.0	60

Fuente: Adaptado por los autores, referido a (U.K. Water Industry 1994).

Tabla 04. Fugas latentes

Tramo	Estado	Longitud (km)	Factor (L/km/h)	G	Caudal total (L/h)
Tuberías de distribución	Bueno			20	0.0
	Medio	9.5		40	380.0
	Malo			60	0.0
<b>SUB TOTAL (B)</b>					<b>380.0</b>
Tramo	Estado	# usuarios	Factor (L/usuario/h)	F	Caudal total (L/h)
Acometidas	Bueno			2	0.0
	Medio	450		4	1800.0
	Malo			6	0.0
<b>SUB TOTAL (C)</b>					<b>1800.0</b>
<b>(D=B+C)</b>					<b>2180.0</b>
<b>AZNP (m c.a.)</b>		60		PCF	1.27
<b>SUB TOTAL CORREGIDO (E)</b>					<b>2768.6</b>

Fuente: Adaptado por los autores, referido a (U.K. Water Industry 1994)

Tabla 05. Determinación del caudal mínimo nocturno y su desviación estándar

Caudal mínimo nocturno inevitable (L/h)		(A + E) =	4291.1
Desviación estándar en una medida	Característica	# usuarios	Caudal total (L/h)
En consumo doméstico	3.8 (Nu) <sup>0.5</sup>	425	78.3
	2.4 (Nh) <sup>0.5</sup>	0	0.0
Consumo no doméstico	11.0 (Nnd) <sup>0.5</sup>	25	55.0
<b>SUB TOTAL (F)</b>			<b>133.3</b>

Fuente: Adaptado por los autores, referido a (Cabrera E. 2008) y (Arregui de la Cruz F. 2006).

El valor del caudal nocturno fugado máximo y mínimo que se puede esperar serán de 4.42 m<sup>3</sup>/h y 4.16 m<sup>3</sup>/h, respectivamente, obtenidos con la afectación de la desviación estándar para el presente caso. A continuación se extrapolan los caudales de fuga con la ecuación [09], (U.K. Water Industry 1994).

$$Q_{fugas(t)} = Q_f(t_{MNF}) \times \left( \frac{P_t}{P_{(t_{MNF})}} \right)^{N_1} \tag{09}$$

Donde:

- Q<sub>fugas(t)</sub> - caudal de fuga extrapolado.
- Q<sub>f(tMNF)</sub> - caudal de fugas en la hora de mínimo caudal nocturno.
- P<sub>(t)</sub> - presión promedio en el instante *t*.
- P<sub>(tMNF)</sub> - presión promedio en el instante *t* de mínimo caudal nocturno.
- N<sub>1</sub> - exponente entre 1.00 y 1.15.

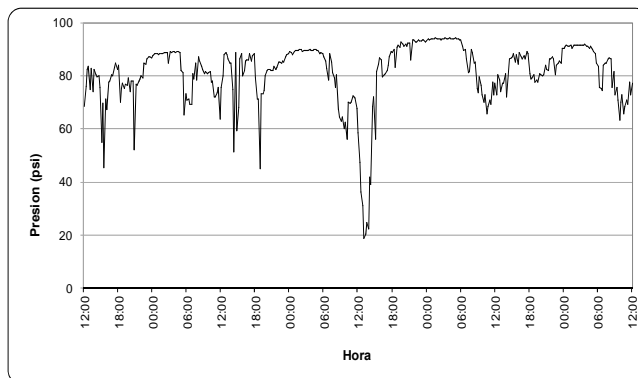


Gráfico 01 - Variación de presiones en zona media del distrito hidrométrico  
Fuente: (Benavides M. H.; et. al. 2008).

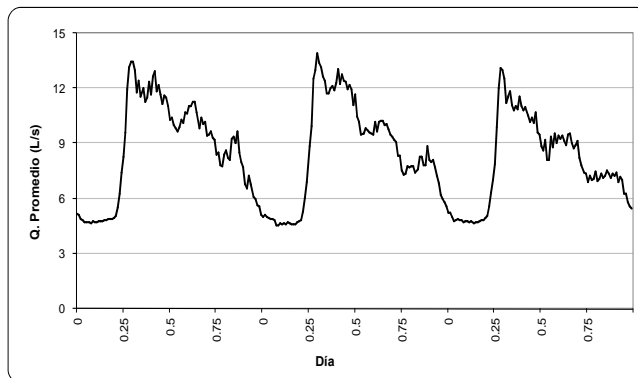


Gráfico 02 - Caudales inyectados & registrados al distrito hidrométrico  
Fuente: (Benavides M. H.; et. al. 2008).

Si las presiones del distrito hidrométrico son las representadas en el gráfico 01 y la variación de caudales inyectados a la red los mostrados en el gráfico 02, entonces la variación de caudales (fugados extrapolados, inyectados y registrados) se resume y presentan en el gráfico 03.

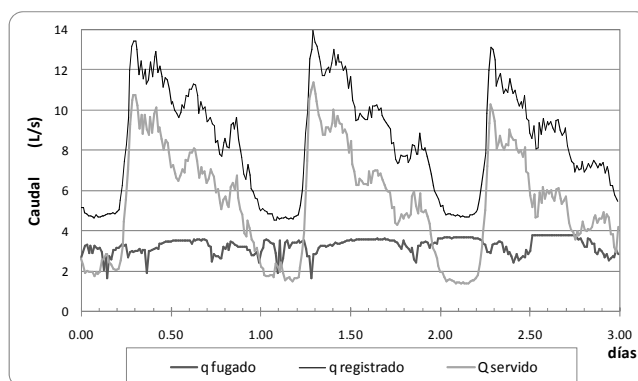


Gráfico 03 - Evolución de caudales registrados, entregados y fugados

Fuente: (Benavides M. H.; et. al. 2008).

Como conclusión para este caso, el caudal mínimo nocturno (ó caudal mínimo inevitable) que se alberga para el sistema, si las fugas detectadas han sido reparadas, es de  $4.29 \text{ m}^3/\text{h}$ .

El volumen de agua fugada será entonces:

$$W_{\text{fugas}} = Q_{\text{fugas}(t)} \times (t) \quad (10)$$

Donde:

$W_{\text{fugas}}$  - volumen fugado en el período de análisis  $t$ .  
 $t$  - tiempo.

Con el valor del ( $Q_{\text{fugas}(t)}$ ) caudal extrapolado obtenido para el tiempo de análisis, se proyecta un volumen fugado de  $847 \text{ m}^3$ .

## EFICIENCIA ENERGÉTICA

Para la República del Ecuador, hoy más que nunca, es urgente que se apliquen planes estratégicos de reducción del consumo energético y principalmente en el sector de los abastecimientos urbanos. Como referencia, los operadores de servicio de sistemas de agua y saneamiento de Brasil gastan más del 2% del consumo eléctrico total de su país ( $7 \text{ PW-h/año} \equiv 7 \times 10^{12} \text{ kW-h}$ ). (PROCEL SANEAR 2005).

Esta crisis del sector eléctrico obliga al Estado a plantear, cuanto antes, políticas y acciones para una gestión de la demanda y usos racionales de la electricidad.

La mejora de la eficiencia energética se relaciona directamente con la reducción de la cantidad de energía consumida, y este hecho, en términos generales, se puede conseguir sobre la base de disminuir los consumos de agua y reacondicionar los sistemas de bombeo. Dicho de un modo ampliado, los gastos en exceso por consumo de electricidad que se producen en los sistemas de agua potable se deben, entre otros aspectos, a:

- Fugas de agua en las redes donde se utiliza energía eléctrica para impulsarla.
- Redes con características resistivas superiores a las concebidas en el diseño.
- Desconocimiento de las curvas características actuales del grupo motor-bomba.
- Instalación de grupos motor-bomba con bajos rendimientos.
- Mantenimiento inadecuado de las estaciones de bombeo.
- Gestión deficiente de la oferta y demanda del agua.
- Estaciones de bombeo que cumplieron su vida útil y siguen operando sin renovación de sus elementos.
- Tarifas desactualizadas de cobro por consumo de agua.



- i) No utilización de variadores de frecuencia, donde puedan ser aprovechados.
- j) Prácticas operativas y administrativas no acordes con la eficiencia requerida.
- k) Desperdicios y consumos inapropiados de agua. \*\*
- l) Mal dimensionamiento de las redes. \*\*
- m) Deficiente o poca aplicación de tecnologías. \*\*

\*\* Adaptadas de (Gomes P. H. 2005).

Las medidas correctoras pueden ser de: Operación y mantenimiento, y administrativas; estas últimas no requieren de mayor inversión para ser ejecutadas. (Gomes P. H. 2005).

En el marco de los abastecimientos, son los grupos motor-bomba y sistema resistivo, los elementos de mayor consumo energético.

En el siguiente análisis se proyecta determinar las curvas características y las resistivas de cada sistema de impulsión.

### Creación de curvas características, caso práctico

Mediante una evaluación física, hidráulica y energética se verificó la calidad del servicio de agua que el sistema presta a sus usuarios; además se constató el comportamiento hidráulico de los componentes de las estaciones de bombeo del sistema local.

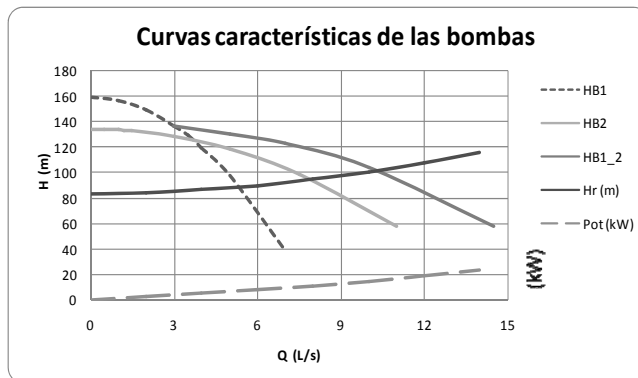


Figura 5 - Esquema del funcionamiento de dos bombas diferentes en paralelo

### Cálculo de las curvas características de los conjuntos motor—bomba

Para actualizar las curvas características de los conjuntos motor-bomba del sistema investigado se hizo lo siguiente:

- Aforo a la salida de la línea de impulsión (Q).
  - Estaciones con dos conjuntos motor-bomba, con las combinaciones: B<sub>1</sub>; B<sub>2</sub>; B<sub>1-2</sub>.
  - Estaciones con tres conjuntos motor-bomba, posibles combinaciones: B<sub>1</sub>; B<sub>2</sub>; B<sub>3</sub>; B<sub>1-2</sub>; B<sub>1-3</sub>; B<sub>2-3</sub>.
- Cálculo de la altura estática total (H<sub>g</sub>).
- Cálculo de las pérdidas de carga en las tuberías de succión e impulsión (hf<sub>suc</sub>, hf<sub>imp</sub>).
- Proyección de las curvas características (grupos motor-bomba y resistiva del sistema).

### Cálculo de la curva resistiva del sistema Hr

La curva resistiva del sistema muestra la variación altura H - caudal Q. Permite establecer, cómo las variaciones de caudal provocan aumentos notables en las pérdidas.

Para determinar la curva resistiva del sistema partimos de la expresión (11):

$$H_r = H_g + H_{f\_succión}(Q) + H_{f\_impulsión}(Q) + H_v(Q) \tag{11}$$

Donde:

$H_r$	-	ordenada de la curva resistiva
$H_g$	-	columna estática total
$H_v$	-	carga residual
$H_{f\_suc}(Q)$	-	pérdidas por fricción en el sistema, función del caudal de impulsión
$H_{f\_imp}(Q)$	-	pérdidas locales en el sistema en función del caudal de impulsión

Por tratarse de bombas con características diferentes entre sí, fue preciso encontrar una relación de pesos, para ponderar el caudal aportado por ellas cuando trabajan en paralelo, así:

$$\Delta_i = \frac{Q_{Bi}}{Q_{Bj}} \quad (13)$$

$$\Delta_j = \frac{Q_{Bj}}{Q_{Bi}} \quad (14)$$

Luego se establece un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas para cada par de grupos motor-bomba, de la siguiente manera:

$$H_B = f(Q)$$

$$H_B = A - \overbrace{B \times (Q_B)}^{\approx 0} - C \times (Q_B)^2$$

Entonces para la bomba  $i$ , se tiene que:

$$\left\{ \begin{array}{l} H_{Bi} = A - C \times (Q_{Bi})^2 \\ H_{Bij} = A - C \times \left( \frac{Q_{Bij}}{1 + \Delta_i} \right)^2 \end{array} \right. \quad (15) \text{ y } (16)$$

De las ecuaciones (15) y (16), se encuentra los valores de A y C, que permiten obtener la ecuación característica de la bomba  $i$ , y con ella construir la curva característica correspondiente  $H_{Bi} = f(Q)$ .

Entonces:

$$C = \frac{H_{Bi} - H_{Bij}}{\left( \frac{Q_{Bij}}{1 + \Delta_i} \right)^2 - Q_{Bi}^2} \quad \vee \quad A = H_{Bi} + C \times Q_{Bi}^2$$

En la curva de la bomba, corresponde para cada valor de  $Q_i$  uno de  $H_{Bi}$ , lo que sirve de base para construir la curva característica de las dos bombas en paralelo, regentadas por las expresiones siguientes:

$$H_{Bij} = \frac{H_{Bi} \times \Delta_i + H_{Bj} \times \Delta_j}{\Delta_i + \Delta_j} \quad (17)$$

$$Q_{Bij} = Q_{Bi} + Q_{Bj} \quad (18)$$

Ecuaciones adoptadas para determinar las pérdidas por fricción y locales

$$H_f = \frac{8 \times f \times L \times Q^2}{\pi^2 \times g \times D^5} \quad (19)$$

$$H_{fm} = \frac{8 \times k \times Q^2}{\pi^2 \times g \times D^4} \quad (20)$$

Donde:

- $H_f$  - pérdida de carga por longitud
- $H_{fm}$  - pérdida de carga en accesorios
- $k$  - sumatoria de coeficientes para accesorios
- $f$  - factor de fricción
- $L$  - longitud de la tubería
- $D$  - diámetro de la tubería
- $g$  - aceleración de la gravedad
- $Q$  - caudal

Con los valores generados de  $Q_{Bij}$  y  $H_{Bij}$  para las dos bombas en paralelo, podemos obtener los valores de los coeficientes  $A_{ij}$  y  $C_{ij}$ , mediante mínimos cuadrados. Ver Ec. (21) y Ec. (22).

$$A_{ij} = \frac{\sum H_{Bi} \times \sum Q_{Bi}^4 - \left( \sum (H_{Bi} \times Q_{Bi}^2) \times \sum Q_{Bi}^2 \right)}{n \times \sum Q_{Bi}^4 - \left( \sum Q_{Bi}^2 \right)^2} \quad (21)$$

$$C_{ij} = \frac{n \times \sum (H_{Bi} \times Q_{Bi}) - \sum H_{Bi} \times \sum Q_{Bi}^2}{n \times \sum Q_{Bi}^4 - \left( \sum Q_{Bi}^2 \right)^2} \quad (22)$$

$$H_{Bij} = A_{ij} - C_{ij} \times (Q_{Bij})^2 \quad (23)$$

La variación de las condiciones físicas que las tuberías experimentan con el paso del tiempo, son un factor importante a la hora de proyectar pérdidas de carga por fricción. Se demostró en laboratorio el aumento del valor de la rugosidad absoluta de algunas tuberías de diferente material; así, para tuberías de hierro fundido con más de 35 años de uso, se determinó que ésta aumenta hasta 4.6 veces el valor original, esto es, de un valor inicial de 0.25 mm (dado por algunos fabricantes para tubo nuevo) hasta un valor de 1.15 mm.



Figura 02 - Cambio de las condiciones físicas internas de una tubería con su uso

Fuente: (Benavides M. H.; Pineda E. 2008).

La expresión (27) es válida para relacionar el coeficiente  $C$  de Hazen-Williams, la velocidad y el diámetro, respecto del factor de fricción  $f$  para Darcy – Weisbach.

$$f = \frac{133.9}{C_{HW}^{1.852} \times D^{0.167} \times V^{0.1482}} \quad (27)$$

Se experimentó con un  $C_{HW} = 89$  para 20 años y un  $C_{HW} = 70$  para 35 años.

Del gráfico 04 se deduce que por cambio en la resistividad del sistema a los 35 años, el caudal disminuye 5.5% y la carga requerida se incrementa en un 5%.

El factor de fricción aumenta entre 2 y 3 veces, lo que significa que para tener el mismo volumen de agua debemos incrementar el tiempo de bombeo un porcentaje aproximadamente semejante.

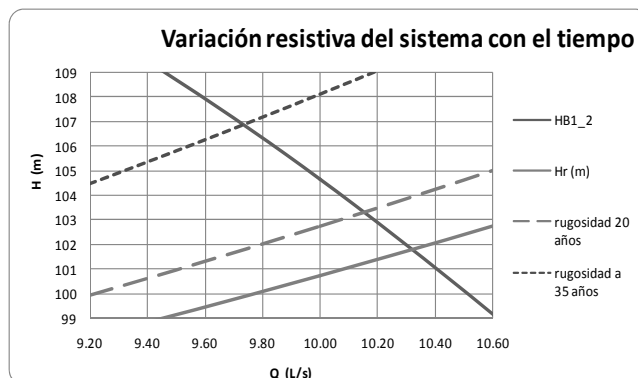


Gráfico 04 - Cambio de las condiciones resistivas del sistema, hasta 5, 20 y 35 años

### Consumo energético

El consumo energético depende directamente de la potencia requerida por la estación de impulsión (P en kW); la misma se determina con:

$$P = \frac{9.81 \times Q \times H}{\eta} \quad (24)$$

Donde:

- H - altura total ó altura manométrica de elevación en m c.a.
- $\eta$  - rendimiento global ( $\eta_{\text{motor}} \times \eta_{\text{bomba}}$ )
- Q - caudal en m<sup>3</sup>/s

Para proyectar la potencia requerida en la impulsión con las características del sistema al año 35 de operación, se debe considerar el nuevo valor resistivo del sistema, así como también el aumento del tiempo de bombeo.

La energía necesaria (E en kWh) se calcula con la siguiente expresión:

$$E = \left( \frac{9.81 \times Q \times H}{\eta} \right) \times t \quad (25)$$

Donde:

- t - número de horas de bombeo (24 h para el presente análisis)

Gráficamente se puede determinar dos situaciones, para cuando las dos bombas trabajan en paralelo:

- 1) El incremento porcentual del consumo energético en un 14.5 %, para las condiciones resistivas del sistema proyectadas al año 35 y suponiendo el mismo rendimiento del grupo motor-bomba con el que se diseñó inicialmente.
- 2) El incremento porcentual del consumo energético es mayor que el 20%, para las condiciones resistivas del sistema proyectadas al año 35 y suponiendo una reducción del rendimiento del grupo motor-bomba en solamente un 5%, que es lo mínimo que se podría esperar por deterioro y uso.

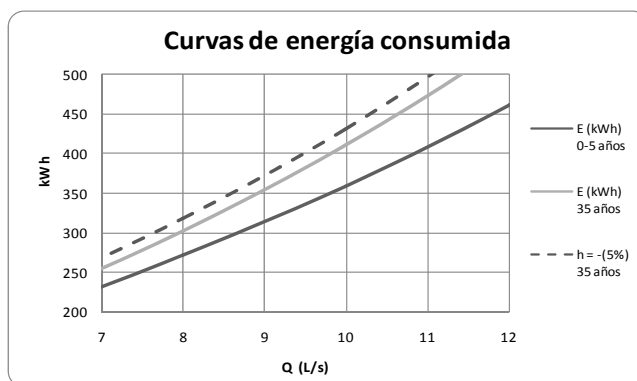


Figura 6 - Variación del requerimiento energético

Los costos de explotación, son el resultado de sumar los costos energéticos con los costos por mantenimiento (labores y reparaciones previstas) y con los costos por personal (salarios necesarios para el buen funcionamiento de la estación).

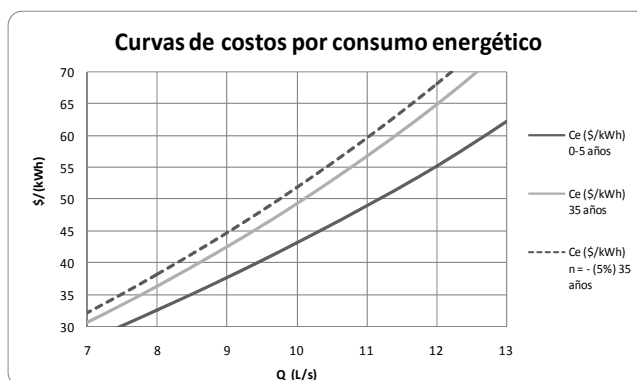


Figura 7 - Variación del costo por consumo energético

El costo de energía ( $C_e$  en unidades monetarias para el intervalo de tiempo, \$/mes, \$/año, etc.) será entonces:

$$C_e = E \times C_{unit} \tag{26}$$

Donde:

$C_{unit}$  - costo unitario de energía (para el intervalo de análisis)

Del mismo modo que el caso anterior –condición resistiva del sistema proyectado a 35 años–, el incremento del costo por consumo energético, visto para las dos bombas en paralelo, varía desde un 14.4% hasta un valor superior al 20%, según se considere o no una reducción del 5% del rendimiento de los grupos motor-bomba.

En el presente caso, los datos de consumo eléctrico acumulado en kWh e inversión económica en dólares americanos, para un intervalo de análisis de siete meses, para once estaciones de impulsión, se presentan en los siguientes gráficos:

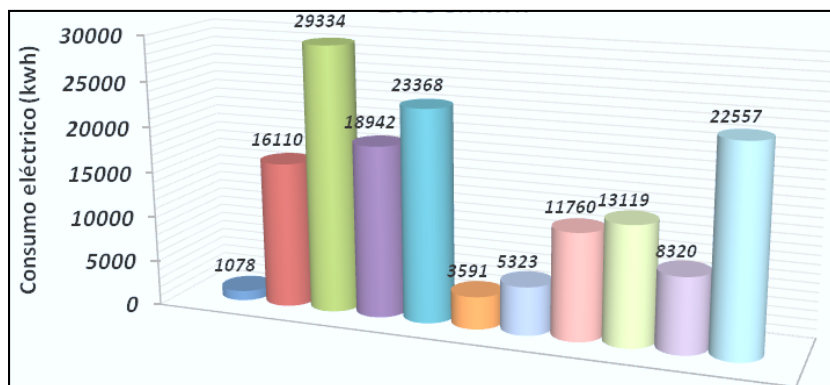


Gráfico 02 - Consumo eléctrico acumulado (kWh). Oct. 2007 – Abr. 2008

Fuente: (Benavides M. H.; Idrobo D. 2008)

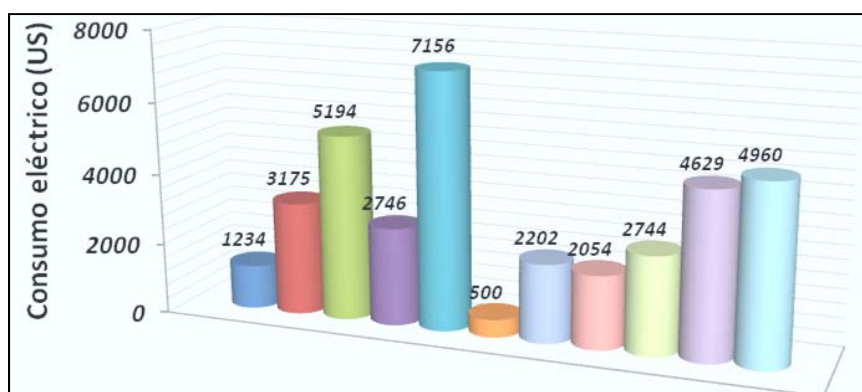


Gráfico 03 - Consumo eléctrico en US\$. Oct. 2007 – Abr. 2008

Fuente: (Benavides M. H.; Idrobo D. 2008)

En forma general y sobre el análisis anterior, los valores de gasto económico por consumo energético en estaciones de bombeo se podrían reducir hasta en un 20%, siempre que se mejore las condiciones físicas – resistivas del sistema y se garantice un rendimiento adecuado para los grupos de impulsión. No obstante, se debe considerar cada sistema de impulsión como un caso particular, al cual se lo puede y debe gestionar con miras a optimizar su desempeño hidráulico y de este modo su mejora en la eficiencia energética.

A estos valores se debe sumar: el costo del agua fugada (agua no facturada) y el debido a la reducción de la eficiencia del sistema.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:

### Conclusiones

- 1) La gestión de sistemas de agua con base en la mejora de la eficiencia hidráulica y energética reduce el consumo de recursos.
- 2) La reducción de fugas de agua de la red, es una actividad que aporta de forma directa a la disminución del gasto por consumo energético por impulsión.
- 3) Para reducir fugas de agua primeramente se debe detectarlas, lo cual puede llevarse a cabo de forma general, mediante el método de flujos mínimos nocturnos, mismo que por su aplicabilidad se lo recomienda para abastecimientos que cuentan con: red sectorizada, datos de caudal (cada 10, 15 ó 30 minutos) a la salida de los depósitos ó en inyección del D.H., loggers de presión distribuidos estratégicamente en la red, datos de consumos mensuales de los clientes, y datos topológicos de la red, principalmente.

- 4) Para actualizar las curvas características de los grupos motor-bomba y resistiva del sistema, es preciso contar con instrumentos de aforo, manometría, y datos topológicos de la succión e impulsión.
- 5) Se demostró que todo gestor de sistemas de agua que conoce el comportamiento hidráulico de la red (pérdidas por fugas y características hidromecánicas de las impulsiones), cuenta con una herramienta fiable a la hora de tomar decisiones de operación y mantenimiento, que conduzcan a la mejora de la sostenibilidad del sistema.
- 6) Las dificultades de aplicación de las metodologías se debe principalmente a que:
  - a. La gran mayoría de los sistemas de abastecimiento de agua potable del Ecuador no cuentan con la infraestructura para poder practicar periódicamente medición, control y seguimiento de caudales y presiones, ó calidad en línea.
  - b. No se cuenta con redes sectorizadas lo que no permite la operación adecuada de las líneas de distribución de agua.

## Recomendaciones

### Propuestas de mejora

La mejora de la eficiencia hidro-energética significa, entre otros, servir mejor al cliente, con menores gastos de recursos, un incremento en los niveles de productividad y satisfacción junto con una, no menos importante, reducción de costos.

Se proponen algunas alternativas que podrían sentar las bases para marchar con ese rumbo.

Para sortear estas dificultades y mejorar la gestión, hace falta tomar en consideración los siguientes detalles:

- Inversión económica en las redes de distribución, para sectorizarlas y con ello conformar distritos hidrométricos, o subsectores de medición.
- Seguidamente es necesario instalar sistemas de medición y registro continuo de volúmenes, caudales y presiones, tanto en tramos de inyección como en los de distribución y consumo.
- En los depósitos será necesario instalar, entre otros equipos, al menos un aparato de medición y registro de volúmenes ingresados y extraídos, medición de niveles de la superficie libre del agua almacenada, válvulas y accesorios para evitar derrames e intrusión de aire. Hará falta dotar de loggers de presión con registro de información.
- Seguimiento estadístico y almacenamiento permanente de los datos obtenidos de los nudos de control para su análisis, interpretación y diagnóstico independiente y oportuno.
- Poner en marcha una campaña mediática informativa para que la población esté al tanto de todos los cambios que se produzcan en el sistema a nivel administrativo, hidráulico, sanitario, ambiental, financiero, social y político, entre los principales.

### Consideraciones para la mejora de la gestión

- a. La sectorización de las redes se debe incluir como un ítem prioritario para la detección, localización y reparación de fugas.
- b. El control activo de fugas, demanda por su parte una estrategia autónoma e integradora al proceso de reducción de pérdidas reales del sistema. Al menos una detección de fugas trimestral / subsector.
- c. Reparación y renovación de tuberías cuyos daños y materiales así lo exijan. El cambio o mantenimiento de tuberías cuyas pérdidas sean muy superiores a las de diseño, debe decidirse con base en consideraciones de orden técnico y económico.
- d. De la misma manera, en este análisis se debe incluir la renovación de válvulas, hidrantes, collarines y más accesorios que hayan cumplido con su vida útil y que estén ocasionando problemas en el funcionamiento de la red.
- e. El enfoque de calidad deberá reflejarse en una progresiva eficiencia y eficacia en las reparaciones de las redes, junto con un sistema integral de gestión de la información.

## Financiamiento y ejecución de actividades programadas

- f. Todos los proyectos que componen este programa de mejora de la gestión de sistemas de abastecimiento deben contar, en forma oportuna y estable, con su partida presupuestaria completa. Esto significa que se deberá incluir entre las estrategias gerenciales, la búsqueda pertinaz de fuentes de financiamiento.
- g. Entre las fuentes de financiamiento recomendadas en la sostenibilidad, están los ingresos por las propias tarifas, reajustadas para estos nuevos episodios incluidos en la gestión (aplicar un precio sostenible y justo del agua).
- h. Instituir convenios de pago y recuperación de cartera vencida. Mejorar la calidad de atención al cliente.

## Operación, mantenimiento y retroalimentación

- i. La operación requiere de la selección de un distrito hidrométrico (o un subsector) que previamente se lo haya identificado como crítico y prioritario de intervención.
  - j. Obtener los caudales de consumos: doméstico, industrial, comercial, oficial y los subsidiados por discapacidad o tercera edad.
  - k. Determinar el balance hídrico del distrito en evaluación y verificar las características hidráulicas (caudal y presión) de la red.
  - l. El equipo gestor de la empresa operadora deberá escoger un sistema de variables e indicadores, según sea su capacidad de generar valores confiables y permanentes, después de los cual se emprenderá en el cálculo de indicadores de desempeño: económicos, sociales, ambientales, operacionales, hídrico-energéticos, rehabilitación, económico – financieros y de calidad de servicio al cliente, principalmente.
  - m. Determinación del nivel óptimo de fugas concatenado con el umbral mínimo de fugas. Inspección de campo y aplicación de las metodologías más competentes para detección y localización de fugas.
  - n. Políticas para la gestión del suministro de agua en época de sequía o temporadas críticas.
  - o. Identificar y aplicar las experiencias mejor adaptadas y buenas prácticas para una reingeniería de procesos y retroalimentación continua al programa de mejora de la calidad.
  - p. Almacenamiento y actualización permanente de la base de datos e información del desempeño del sistema. Publicar resultados.
  - q. Mantenimiento y calibración periódica de equipos y herramientas para obtención veraz de información.
- Además será necesario contar con el análisis, interpretación y modelación de los balances hídricos, así como el planteamiento de medidas correctoras a la gestión para mejorar permanentemente su desempeño, reduciendo al mínimo económico el caudal de agua no contabilizada.

Para esto se requiere:

- Contar con las curvas características actualizadas,
- Realizar mejoras en la operación de las EB,
- Identificar los conjuntos motor-bomba con un rendimiento limitado, para así darles mantenimiento y remplazarlos si hace falta.

## Otras recomendaciones

- Cada EB debe contar con un medidor de volumen impulsado (caudalímetro electromagnético o ultrasónico).
- El mantenimiento de las EB debe ser preventivo (política activa).
- Implementar alarmas de nivel en las cámaras húmedas y depósitos receptores (mejor si se instalan válvulas de altitud).
- Instalar sensores de arranque y parada automáticos. En general, aumentar el nivel de automatización en toda la estación de bombeo.



## GLOSARIO

Para una mejor comprensión de los temas aquí presentados es conveniente apoyarse en el siguiente léxico.

*Sustentabilidad:* o desarrollo sustentable, también llamado sostenibilidad ambiental o desarrollo verde, tiene un enfoque referido prioritariamente al ambiente. Es el tipo de desarrollo en el que las modificaciones que actúan en el ambiente producen polución pero no contaminan.

- a. Polución, se entiende así a aquella alteración de los componentes ambientales, por causa de la actividad humana, que no pone en peligro la continuidad de la vida natural, pese a su alteración, lo cual implica que el ambiente tiene la capacidad de asimilar y subsidiar dichos cambios.
- b. Contaminación, es un tipo de polución cuyo nivel de afectación sobrepasa la capacidad del ambiente por regenerar o recuperar las condiciones naturales perdidas y se compromete la calidad ambiental de uno o más elementos del medio, de tal modo que constituye un peligro para su permanencia, generación, desarrollo o continuidad sobre el planeta.

*Sostenibilidad:* o desarrollo sostenible, es considerado con un enfoque socio-económico-ambiental. Implica mantener –sostener– la producción y desarrollo siempre a una tasa que refleje crecimiento o al menos equilibrio, a corto y largo plazo, de cada aspecto, recurso, componente, bien, capital o ecosistema.

Sostenible o desarrollo sostenible o sostenibilidad, alberga los aspectos de la actividad humana que fortalece su crecimiento económico, con equidad y bienestar social de tal modo que mejora la calidad de vida de los individuos, sin contaminar el ambiente. Todo aspecto o proyecto que se considera sostenible, necesariamente debe ser primero sustentable. Esta directiva semántica y conceptual quedó adjudicada y ratificada en las varias Cumbres Mundiales referentes al tema.

*La eficiencia* mide el grado de aprovechamiento y uso de los recursos disponibles en las empresas operadoras de sistemas de abastecimiento. Un abastecimiento será eficiente cuando brinde un servicio de calidad con el empleo óptimo de recursos.

*La eficacia*, por su parte, indica el grado de cumplimiento de los objetivos trazados por la empresa a satisfacción de la sociedad, la economía y el ambiente.

*El costo de oportunidad:* Es el valor máximo sacrificado alternativo al tomar una decisión económica. Existen varias nociones adicionales que pueden servir:

- El costo alternativo de oportunidad de producir una unidad del bien X, es la cantidad del bien Y que se debe sacrificar para el efecto.
- Valor que representa el desaprovechar una oportunidad.
- Tasa de interés o retorno esperado más alto alternativo al del activo en cuestión.

*Datos topológicos,* comprenden los aspectos constitutivos de la red que la conforman, como su aspecto geométrico, su contexto físico y las propiedades características de conectividad, seguridad e instrumentos accesorios, instalados para su operación y mantenimiento.

*Distrito hidrométrico y subsector,* Configuración de la red sectorizada que distingue su forma de conexión con el resto de redes sectorizadas en un sistema de agua. Si la red sectorizada es aislada mediante válvulas –cerradas– entonces diremos que se trata de distritos hidrométricos. Si la red no se conecta con otros sectores, entonces se conocen como subsectores. Por su parte, el sector agrupa a varios subsectores. Todas estas conformaciones hidráulicas, conforman una parcela hidrométrica.

*Gestor de sistemas,* Se conoce como gestor (de sistemas) de abastecimientos de agua, a la persona o equipo de personas que se encargan de concatenar los aspectos administrativos, técnicos, legales y sociales del sistema, para mejorar su desempeño continuo, junto con el de la empresa operadora. La toma de decisiones se ampara en el marco gerencial, técnico y político.

*Data loggers* de presión, equipos de manometría automática, que permite medir, registrar y almacenar los datos de presión a intervalos de tiempos programados, según la necesidad de la investigación. Usualmente se configuran para que hagan un registro de presión a intervalos de 15, 30 ó 60 minutos, por un tiempo mínimo de 10 días continuos y en los dos meses más representativos del año.

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA:

- ARREGUI de la Cruz F. (2006). Evaluación de las fugas mediante el análisis de los caudales inyectados. Evaluación y control de pérdidas de agua en redes urbanas. Formación ITA. Valencia - España, ITA - UPV: 23.
- BENAVIDES M. H. (2007). Indicadores de gestión internacional para la eficiencia en la gestión urbana del agua.- El benchmarking en el Ecuador. IX Congreso Nacional de Hidráulica y I de Manejo integral de recursos hídricos. Quito, Asociación de Ingenieros Hidráulicos del Ecuador. IX Congreso
- BENAVIDES M. H.; et. al. (2008). Auditoría de redes de distribución de agua. Metodologías existentes. Dificultades de aplicación y alternativas para soslayarlas en el Ecuador. Valencia: 128.
- BENAVIDES M. H.; Idrobo D. (2008). Evaluación y diagnóstico de las estaciones de bombeo y depósitos de almacenamiento del sistema de agua potable de la ciudad de Loja. Ingeniería Civil. Loja, Universidad Técnica Particular de Loja. Ingeniero Civil.
- BENAVIDES M. H.; Pineda E. (2008). Determinación del coeficiente de rugosidad en tuberías, nuevas y usadas, destinadas a las gestión urbana del agua. Ingeniería Civil. Loja, Univerisdad Técnica Particular de Loja. Ing. Civil.
- CABRERA E. (2007). Actuaciones orientadas a disminuir las pérdidas de agua. Evaluación y control de pérdidas de agua en redes urbanas. I. T. Agua. Cartagena: 25.
- CABRERA E. (2008). Determinación por el método de los flujos mínimos nocturnos del nivel de fugas. ITA-UPV. S. i. s. p. d. agua. Pereira, Colombia.
- GARCÍA-Serra J. (2008). Abastecimientos urbanos: problemática actual y propuesta de soluciones. Agua y ciudad en el contexto de la Directiva Marco. Planenado el futuro. I. T. d. Agua. Valencia.
- GARCÍA-Serra J. (2009). Redes de distribución. Trazado y criterios prácticos de diseño. Seminario - taller de Hidráulica Avanzada. I. T. d. Agua. Loja.
- GOMES P. H. (2005). Eficiência hidráulica e energética em saneamento. Río de Janeiro, ELETROBRAS/PROCEL.
- LAMBERT A. O. (2002). "International Report: Water Management and Techniques." Water Science and Technology: Water Supply 2(4): 20.
- LIEMBERGER R. & Partners (2010). WB-EasyCalc. The Free Water Balance Software, <http://www.liemberger.cc/>.
- PÁEZ Zamora J. C. (1996). Introducción a los métodos de evaluación de impactos ambientales, recomendaciones para los gobiernos seccionales del Ecuador. Quito, Comisión Asesora Ambiental de la Presidencia de la República del Ecuador – USAID. F. Natura.
- PROCEL SANEAR (2005). Programa Nacional de Conservación de Energía Eléctrica del sector de saneamiento. [www.eletrobras.com/procel/site/areadeatuacao/saneamento](http://www.eletrobras.com/procel/site/areadeatuacao/saneamento).
- U.K. Water Industry (1994). Managing leakage. Report E, F, G. Engineering and Operations Committee. WRc, WRc. U.K. Water Industry.



---

## 14 Manejo de aguas de tormenta: Validación de alternativas mediante un modelo físico

---



### Fernando Oñate-Valdivieso

Universidad Técnica Particular de Loja, Unidad de Ingeniería Civil, Geología y Minas, Área de Hidrología y Climatología. San Cayetano Alto, C/. Paris, s/n (Loja, Ecuador). Teléfono: (593) 72 570 275 ext. 2613. E-Mail: fronate@utpl.edu.ec

### INTRODUCCIÓN

Una de las estructuras más importantes para la preservación y el mejoramiento de las áreas urbanas es un sistema de drenaje de aguas lluvias adecuado y que funcione correctamente (Chow, 1994). El constante crecimiento de las ciudades conlleva un incremento de las superficies impermeables en la cuenca hidrográfica a la que pertenece el entorno urbano reduciendo la infiltración. La disminución de áreas impermeables implica una disminución del tiempo de respuesta hidrológica de la cuenca, incrementándose los volúmenes de escorrentía superficial. Las tendencias de crecimiento urbano en muchos casos rebasan las proyecciones realizadas para el diseño de sus sistemas de alcantarillado pluvial, produciéndose su colapso ante eventos extremos de precipitación. Los costos de las tareas tendientes a incrementar la capacidad de los sistemas existentes ha motivado la búsqueda de alternativas efectivas y económicas.

El manejo del agua de tormenta se constituye como un nuevo enfoque para abordar los problemas de drenaje urbano, éste supone minimizar la escorrentía, favorecer la retención, tratar los problemas de contaminación localmente, usar y mantener la red natural de drenaje. Para ello se recurre al empleo de pequeñas obras que facilitan la infiltración o reducen el efecto de la crecida.

Una de las alternativas de manejo de agua de tormenta es el almacenamiento de aguas lluvias que tienen por objeto diferir en el tiempo la alimentación de aguas lluvias hacia las redes de drenaje o los cauces receptores disminuyendo el valor de los gastos máximos a evacuar sin que necesariamente afecten el volumen total escurrido. (Walesh, 1989).

Otra opción es la infiltración de aguas lluvias que conduce a una disminución de los gastos máximos y de los volúmenes a evacuar disminuyendo adicionalmente la carga de contaminantes que llega a los cauces superficiales, ya que estos quedan retenidos en el suelo, atrapados al infiltrarse parte importante de la escorrentía superficial que los transporta (Walesh, 1989).

En el presente trabajo se describen tres alternativas de manejo de agua de tormenta que permiten atenuar el efecto de la escorrentía superficial sobre los sistemas existentes de alcantarillado pluvial de una ciudad. El efecto de su uso se estudiará con un modelo físico de cuenca hidrográfica en el que se han implementado cada una de las alternativas planteadas. Al inicio del artículo se describirán los tres elementos objeto de estudio, incluyendo varios criterios de diseño a considerarse, para posteriormente describir los elementos usados para modelar las alternativas planteadas en el modelo físico de cuenca hidrográfica, para finalmente centrarse en el análisis de su desempeño.

### ALTERNATIVAS DE MANEJO DEL AGUA DE TORMENTA

#### Pavimentos Celulares

Los pavimentos celulares son un tipo especial de pavimentos de adoquines, en los cuales la carpeta de rodado está formada por bloques con aberturas, y la subbase permite la acumulación temporal del agua infiltrada, para percolarla posteriormente al suelo. Una vez que el agua filtra a través de la carpeta de rodado, existen dos procedimientos alternativos para su disposición final. Uno es continuar la percolación hacia el suelo bajo el pavimento (disposición difusa local) y el otro es recogerla mediante

drenes y disponer de ella en otro lugar (disposición concentrada externa), obteniéndose la estructura que se observa en la figura 01.

Una de las principales ventajas de los pavimentos celulares es que permiten infiltrar la lluvia que cae sobre ellos mediante un pavimento firme y permeable. Presentan una apariencia atractiva, pudiendo emplearse diferentes colores y diseños con propósitos funcionales y estéticos, proporcionando variedad a sitios uniformes. Además, son fáciles de reemplazar y reponer para efectuar reparaciones locales. Sus mayores inconvenientes son su elevado costo y su necesidad de mantenimiento periódico para evitar obstrucciones por sedimento.

### Dimensionamiento.

El dimensionamiento de pavimentos celulares debe considerar los aspectos siguientes:

La durabilidad del está en función del tráfico al cual se verá sometido durante su operación. Este análisis se realiza considerando el deterioro que produce cada vehículo en el pavimento considerando los diferentes pesos por rueda, ejes simples o tándem y su frecuencia de operación en el período de diseño.

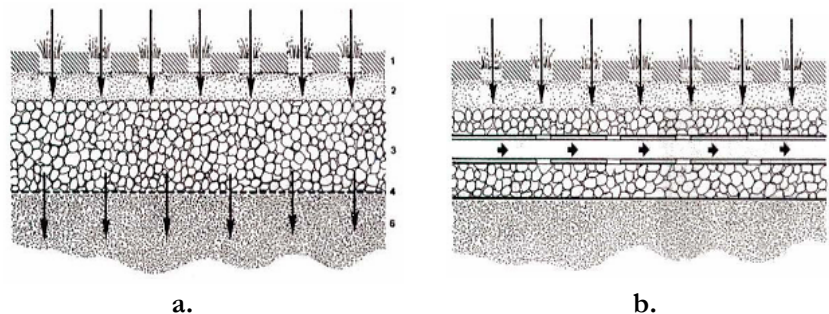


Figura. 01 Esquema de los elementos principales de un pavimento celular

a. Infiltración directa al terreno, b. infiltración recolectada mediante subdrenes. (1. Carpeta de rodado, 2. Cama de arena y filtro granular, 3. Subbase, 4. Geotextil, 5. Membrana impermeable, 6. Subrasante, 7. Tubos perforados o drenes.)

Fuente: (Walesh, 1989).

La carpeta de rodado puede estar compuesta por elementos prefabricados como bloques rugosos individuales y bloques enrejados con diferentes figuras formando aberturas. Las celdas de los pavimentos celulares deben ser llenadas con arena gruesa o arena limosa o maicillo para formar una superficie lisa y firme. También se pueden llenar con tierra vegetal para sembrar pasto en el caso de superficies de estacionamiento. La cama de arena tiene por función servir de base para la colocación de los bloques de pavimento y proporcionar material para el relleno de las celdas. Debe tener un espesor mínimo de 3 cm una vez compactada. El filtro granular debe tener como mínimo 10 cm de espesor, y estará formado por gravilla de 0.3 cm a 1.9 cm de diámetro, limpia y bien gradada, es decir con una buena proporción de piedras de todos los tamaños dentro del rango indicado. No es conveniente usar un filtro geotextil en este estrato. Normalmente la subbase está formada por gravas chancadas o partidas y limpias, de un diámetro variable entre 3.5 cm y 7.5 cm, es decir formado por gravas o ripios, con un espesor que depende del volumen de almacenamiento requerido y de las condiciones de tránsito. El espesor mínimo de la subbase debe cumplir una restricción adicional relacionada con el índice CBR de la subrasante y con el tráfico que deberá soportar el pavimento. Finalmente, la subrasante de suelo nativo se deberá excavar evitando que el suelo original sea compactado, para conservar su capacidad de infiltración. Debe dejarse limpia de elementos sobresalientes para apoyar sobre su superficie el geotextil o la membrana. La tasa de infiltración del terreno natural se debe determinar in situ mediante ensayos normalizados.

El espesor de la subbase puede calcularse con la expresión:

$$e = \frac{V_{alm}}{(p \times A_e)} \quad (01)$$

$$V_{alm} = \text{Max}(V_{afl}(t) - V_{inf}(t)) \quad (02)$$

$$V_{afl}(t) = 0.00125 \times C \times A \times P_r \quad (03)$$

$$V_{inf}(t) = 0.001 \times C_s \times f \times A_e \times t \quad (04)$$

En donde: ***V<sub>alm</sub>*** es el volumen de almacenamiento, ***p*** Es la porosidad del material de la subbase, considerado como 0.3 para efectos de diseño. ***A<sub>e</sub>*** es el área del pavimento poroso, en m<sup>2</sup>. ***V<sub>afl</sub>(t)*** es el volumen del afluente acumulado. ***V<sub>inf</sub>(t)*** es el volumen infiltrado. ***C*** es el coeficiente de escorrentía superficial del área total aportante ***A*** (m<sup>2</sup>). ***P<sub>r</sub>*** corresponde a la precipitación, en mm, de duración ***t*** y periodo de retorno ***T*** en el lugar. ***C<sub>s</sub>*** es un coeficiente de seguridad que afecta la capacidad de condiciones de mantenimiento, que toma en cuenta los efectos de la colmatación en el tiempo que experimenta el suelo. ***f*** es la capacidad de infiltración del suelo en mm por hora. ***t*** corresponde al tiempo acumulado, en horas.

Si la tasa de infiltración del terreno es siempre mayor que la lluvia, incluso que la de menor duración, entonces no se requiere un volumen de acumulación en la subbase, sino que bastará con la superficie de contacto con la subrasante para la infiltración. El espesor definitivo de la subbase será el mayor entre el requerido por condiciones de tránsito y de almacenamiento.

En el caso de pavimentos que no infiltran las aguas lluvias en el lugar es necesario instalar drenes en el fondo de la subbase. Estos drenes, son normalmente de tuberías de PVC perforadas, se colocan en una zanja rodeada de un filtro geotextil, para prevenir el ingreso de partículas.

### Zanjas de infiltración

Las zanjas de infiltración son obras longitudinales, con una profundidad recomendada del orden de 1 m a 3 m, que reciben el agua en toda su longitud, interceptando el flujo superficial de una tormenta y evacuándolo mediante infiltración al subsuelo. El agua proveniente de la tormenta llega a la zanja a través de la superficie y es almacenada temporalmente en su interior, para posteriormente ser evacuada a través del suelo mediante infiltración (Azzout et al., 1994).

La zanja de infiltración puede ser diseñada con dos enfoques: El primero que pretende evacuar todo escurrimiento superficial generado por la tormenta de diseño, lo que implica un volumen de almacenamiento diseñado para el efecto, por lo que en tormentas superiores a las de diseño, parte de su escurrimiento superficial se evacuará superficialmente. El segundo enfoque pretende captar solo parte del escurrimiento superficial producido por la tormenta de diseño por lo que parte del volumen se evacúa hacia otros elementos o hacia el sistema de drenaje superficial, usando una tubería perforada ubicada cerca de la parte superior de la zanja. Dichas alternativas de diseño se esquematizan en la figura 02.

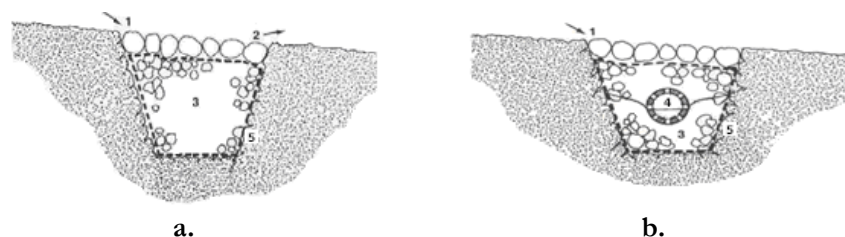


Figura. 02 Esquema de los elementos principales de una zanja de infiltración).  
 a. Zanja para infiltración completa b. zanja para infiltración parcial (1. Alimentación superficial, 2. Reboce, 3. Relleno 4. Tubos perforados o drenes, 5. Geotextil.)

Fuente: (Azzout et al., 1994)

Una ventaja especial de las zanjas de infiltración es su facilidad para integrarse a la estructura urbana, ya que son poco visibles y comprometen sólo una franja delgada del suelo en la superficie. Adicionalmente, tienen un bajo costo y una fácil puesta en marcha. Entre las desventajas se destacan los

problemas de colmatación que se pueden presentar, en períodos menores a 5 años, al retener las partículas finas presentes en el agua (Azzout et al., 1994). La instalación de zanjas de infiltración es recomendable cuando el terreno presenta pendientes menores al 20%, tasa de infiltración mayores a 7 mm/h, bajo contenido de arcilla (< 30%), estratos impermeables profundos (a más de 1.2 m bajo el fondo de la zanja) y superficies aportantes menores a 5 Ha.

## Dimensionamiento

El diseño de las zanjas de infiltración requiere de los siguientes parámetros:

$$\frac{V_{alm}}{p} = L \times b \times h \quad (05)$$

$$V_{inf} = 0.001 \times C_s \times f \times A_{perc} \times t \quad (06)$$

$$A_{perc} = 2 \times h \times (L + b) \quad (07)$$

En donde:  $V_{alm}$ , es el volumen de almacenamiento que se determina mediante la ecuación 2.  $p$  corresponde a la porosidad del material pétreo.  $V_{inf}$  es el volumen infiltrado.  $f$  es la capacidad de infiltración del suelo en condiciones de saturación (mm/hora).  $A_{perc}$  equivale al área total de percolación de la zanja en metros cuadrados.  $t$  es el tiempo de percolación en horas.  $L$  es la longitud de la zanja.  $b$  ancho de la zanja y  $h$  es la altura de la zanja rellena con piedras.

El volumen afluente se determina con la ecuación 3. Debido a que el volumen infiltrado, empleado para estimar el volumen de almacenamiento (ecuación 2), también depende de las dimensiones de la zanja, se debe proceder por aproximaciones sucesivas, empleando como variables de diseño el valor del largo de la zanja  $L$ , suponiendo valores conocidos de  $b$  y  $h$  ya que estos pueden estar condicionados por restricciones constructivas y del terreno.

Se debe estimar el tiempo total de infiltración para la lluvia de diseño como el tiempo para el cual el volumen acumulado aportado por la lluvia es igual al volumen acumulado infiltrado. Es recomendable que el tiempo total de infiltración sea inferior a 24 horas para la lluvia de diseño.

El fondo de la zanja debe ser horizontal. Si el terreno presenta una pendiente a lo largo de la zanja, la altura de ésta es la del extremo de menor profundidad. Para mejorar las condiciones de estabilidad de las paredes de la zanja, es necesario rellenarla con un material pétreo. El material agregado para la zanja consiste en un agregado limpio, tipo ripio, sin polvo ni material fino, con un diámetro uniforme variable entre 3.5 cm y 7.5 cm. También pueden usarse bolones. Por los supuestos de diseño, la porosidad del agregado se puede suponer que es igual a un 30%. El agregado debería estar completamente rodeado por un filtro geotextil.

## Lagunas de Retención

Una laguna de retención mantiene un volumen permanentemente ocupado por agua, el cual es reemplazado total o parcialmente durante las tormentas. Sobre este volumen permanente se provee de un volumen adicional destinado a amortiguar las crecidas provocadas por las aguas lluvias. Estas lagunas están diseñadas para captar y retener un volumen de agua determinado para las tormentas más frecuentes. Estas lagunas están formadas por una serie de elementos básicos cuya disposición general se ilustra la figura 03.

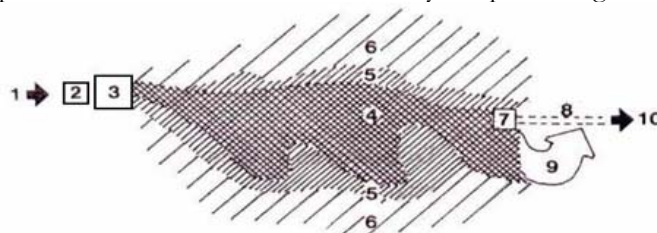




Figura 03. Elementos principales de una laguna de retención.

- (1. Entrada, 2. Disipador de energía (opcional), 3. Sedimentador (opcional), 4. Zona laguna permanente, 5. Zona litoral (opcional), 6. Zona de inundación, 7. Cámara de descarga, 8. Tubería de descarga, 9. Vertedero de seguridad, 10. Conexión a la red de drenaje.)

Fuente: (DICTUC, 1996).

Las lagunas de retención pueden ser muy apropiadas para áreas aportantes relativamente grandes. Además de la amortiguación de crecidas urbanas, crear o proveer de espacio para la recreación, paisajismo y áreas abiertas, almacenar agua para otros fines como riego de áreas verdes y volúmenes de incendio entre las tormentas. Un inconveniente es la dificultad para limpiar sedimentos atrapados, y si reciben aguas poco limpias pueden observarse problemas de cuerpos flotantes, espumas, crecimiento indiscriminado de algas, olores y en algunos casos mosquitos.

### Dimensionamiento.

La forma en planta de la laguna se debe considerar una expansión gradual desde la zona de entrada del flujo y una contracción hacia la salida, para de esta manera evitar el efecto de cortocircuito del flujo en condiciones de diseño. La razón entre el largo y el ancho máximo no debe ser menor de 2, y cuando sea posible al menos del orden de 4.

Se recomienda un diseño con dos niveles de la laguna, considerando una zona litoral de menor profundidad y otra central más profunda. La zona litoral debe tener profundidades del orden de 0.15 m a 0.5 m y ocupar entre el 25% y el 50% de la superficie de la laguna. En esta zona, que debiera tener un ancho de al menos 3 m, se favorece el crecimiento de plantas acuáticas y actúa además como borde de seguridad. La zona central con profundidades entre 1.2 m y hasta 2.5 m permite la sedimentación. La profundidad máxima no debe ser mayor que 3.5 m para el nivel de agua permanente.

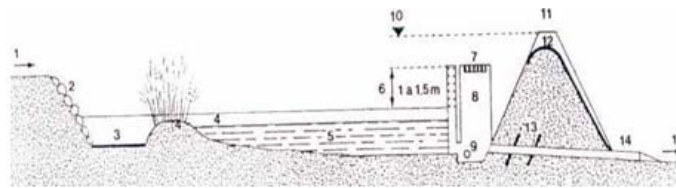


Figura 4. Elementos en el perfil longitudinal de la laguna

- (1. Entrada, 2. Disipador de energía, 3. Sedimentador, 4. Zona litoral, 5. Zona de laguna permanente, 6. Zona de inundación, 7. Umbral cámara de descarga y reja, 8. Cámara de descarga, 9. Descarga de fondo para vaciamiento total, 10. Umbral de muros, 11. Muros de la laguna, 12. Vertedero de seguridad, 13. Anillos para evitar filtraciones, 14. Tubería de descarga, 15. Conexión a la red de drenaje.)

Fuente: (DICTUC, 1996).

En el caso de lagunas de retención existe siempre una zona permanentemente llena de agua (zona 5. en la figura 04.). Este volumen depende de los otros fines de regulación de la laguna, los aportes que reciba, o los niveles del agua subterránea en el lugar. Para ello el fondo de la laguna debe colocarse a un nivel que asegure que esta zona esté permanentemente con agua.

El volumen de almacenamiento principal de una laguna de retención corresponde a la capacidad de la laguna desde el nivel de agua permanente hasta el umbral del vertedero de seguridad (entre el nivel del punto 4. y el del punto 12. en la figura 04). Este volumen se calcula para retener la crecida generada por tormentas medianas del orden de 10 años a 20 años de periodo de retorno, con la cuenca aportante en su condición de desarrollo urbano máximo, de manera que hacia aguas abajo de la laguna no se entreguen caudales máximos mayores que los permitidos. El volumen necesario está dado por:

$$V_{laguna} = 0.5 \times T_b \times (Q_{me} - Q_{evac}) \quad (08)$$



Siendo: ***Vlaguna*** es el volumen estimado para almacenar la crecida, en m<sup>3</sup>. ***Tb*** es el tiempo base del hidrograma de entrada, segundos, igual al doble del tiempo de concentración de la cuenca aportante, de acuerdo al método racional modificado. ***Qme*** corresponde al gasto máximo del hidrograma de entrada para la crecida de periodo de retorno de diseño y condiciones de máximo desarrollo urbano, m<sup>3</sup>/s. ***Qevac*** es el gasto máximo que puede evacuar la cámara de descarga, m<sup>3</sup>/s.

A más del almacenamiento principal se considera el volumen de tormentas menores que se calcula para almacenar el volumen generado por crecidas provocadas por tormentas con períodos de retorno de alrededor de 5 años con la cuenca totalmente desarrollada. Este volumen ocupa la porción de la laguna comprendida entre el nivel de agua permanente y el nivel del umbral de la cámara de descarga (entre el nivel del punto 4. y el del punto 7. en la figura 04) En general puede ser del 50 al 80% del volumen principal de la laguna. Se puede estimar con la ecuación 08, en la cual el gasto máximo de entrada y el tiempo base corresponden a la crecida de tormentas menores y el gasto de evacuación al máximo del elemento de descarga.

Finalmente, se debe tener en cuenta el volumen máximo que puede almacenar la laguna en condiciones extraordinarias, es decir cuando recibe una crecida provocada por tormentas con períodos de retorno 100 a 200 años. Es el volumen hasta el nivel de los muros, considerando un borde libre de seguridad de seguridad (entre el nivel del punto 4 y el nivel del punto 10 en la figura 04.). El volumen sobre el umbral del vertedero no se calcula como tal, sino que es el resultado de considerar una altura de agua, o carga hidráulica, sobre el nivel del umbral del vertedero de seguridad, de manera que éste sea capaz de evacuar la crecida correspondiente.

La crecida de diseño que se empleará en el dimensionamiento de los elementos constitutivos de la laguna de retención se debe determinar considerando el área de drenaje y el tiempo de concentración de la cuenca aportante, así como tormentas de diseño para diferentes períodos de retorno. El caudal máximo que podrá descargar la laguna a través de las obras diseñadas para el efecto, dependerá de las condiciones de aguas abajo, es decir de la capacidad de recibir caudales que tenga el sistema de drenaje, existente o no, hacia el cual la laguna entrega el agua retenida.

Entre los elementos de la laguna de retención cabe mencionar a la cámara de descarga que permite controlar los caudales que la laguna entrega hacia aguas abajo, siempre y cuando que no se sobrepasen los caudales máximos permitidos por ésta. El conducto de salida desde la cámara se dimensiona de manera que en las condiciones de descarga máxima, con la laguna llena hasta el umbral del vertedero de seguridad, no se sobrepase el gasto máximo permitido hacia aguas abajo, considerando una tormenta de periodo de retorno correspondiente a lluvias medianas.

El vertedero de seguridad debe diseñarse sin elementos de control, con capacidad para evacuar crecidas de al menos el periodo de retorno de lluvias grandes o extraordinarias (100 años a 200 años) considerando la cuenca aportante con el mayor grado de desarrollo urbano. Para el dimensionamiento del vertedero se puede considerar el gasto adicional al evacuado por la obra de descarga y sin considerar el posible efecto de amortiguación de la onda de crecida que puede provocar el estanque. El umbral del vertedero se coloca de manera que bajo él se pueda almacenar el volumen de la crecida de diseño de periodo de retorno de lluvias medianas.

## MODELO FÍSICO

Para el análisis comparativo del desempeño de los pavimentos celulares, las zanjas de infiltración y las lagunas de retención se utilizó un modelo físico de 6 m<sup>2</sup> de superficie con una pendiente del 0.5% provisto de aspersores para simular eventos de precipitación, un canal recolector de la escorrentía superficial en la parte baja del modelo y un dispositivo volumétrico para la determinación del caudal.

Las alternativas a estudiarse se diseñaron escala real según los criterios ya enunciados y luego fueron transformados a la escala del modelo, guardando la proporción entre las superficies aportantes reales y la superficie aportante del modelo. Para el caso de los pavimentos celulares se construyeron con hormigón elementos similares a adoquines a una escala de 1/25 de los existentes en el mercado y la superficie total cubierta conservó la misma escala. Para la zanja de infiltración se utilizó material granular dispuesto convenientemente en una celda metálica de la forma deseada, la misma que fue colocada en una excavación realizada en el piso del modelo, en este caso se empleó escala de 1/4. Para la laguna de retención se utilizó una lámina plástica que recubre un hoyo excavado en el modelo de cuenca.

Considerando el área de drenaje de la cuenca real, se utilizó una escala 1/250 para integrarla en el modelo físico planteado. El modelo físico y los elementos utilizados en el estudio se presentan en la figura 5.

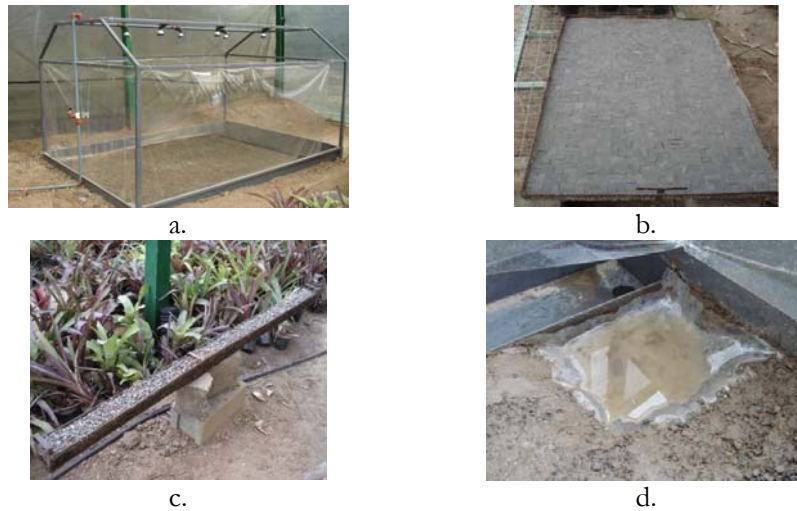


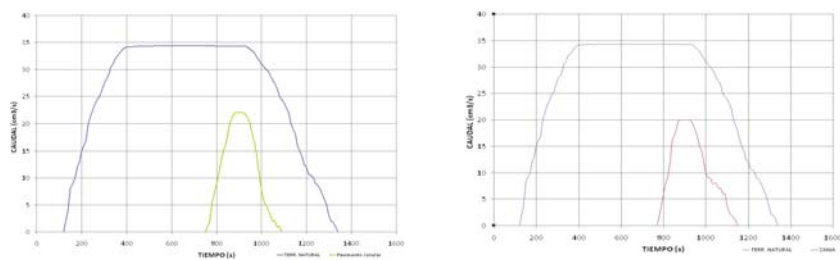
Figura 5. Elementos utilizados para la validación del desempeño de las alternativas planteadas: Modelo físico de cuenca hidrográfica (a.), pavimento poroso (b.), Zanja de infiltración (c.) Laguna de retención (c.)

Fuente: Elaboración propia

Mediante ensayos in situ se determinó una tasa de infiltración media de 25 mm/h para el suelo de modelo. En todos los ensayos se mantuvo constante una precipitación de 10 mm, las características de humedad del suelo y se comparó individualmente el escurrimiento superficial en condiciones naturales con el obtenido luego de instaladas cada una de las alternativas estudiadas. Se ensayó una tormenta de 15 minutos de duración y se registró el volumen escurrido en intervalos de tiempo de 10 segundos, construyéndose un hidrograma para cada caso de estudio.

## RESULTADOS OBTENIDOS

La comparación gráfica entre las alternativas puede apreciarse en la figura 6. En esta se puede apreciar que las tres alternativas planteadas reducen de manera considerable la magnitud de los caudales de crecida y retardan su tiempo de de ocurrencia. Las tres alternativas reducen el caudal pico en aproximadamente un 40 % siendo la laguna de retención ligeramente más eficiente que la zanja de retención y que el pavimento celular. La ocurrencia de la crecida ocurre aproximadamente en el mismo instante para el pavimento celular y la zanja de infiltración que la retardan considerablemente con respecto al instante de ocurrencia para el caso del terreno natural. El tiempo de ocurrencia del caudal pico en el caso de la laguna de almacenamiento es mayor con respecto al caso del terreno natural pero es considerablemente menor a la reducción que se observa en las otras dos alternativas.



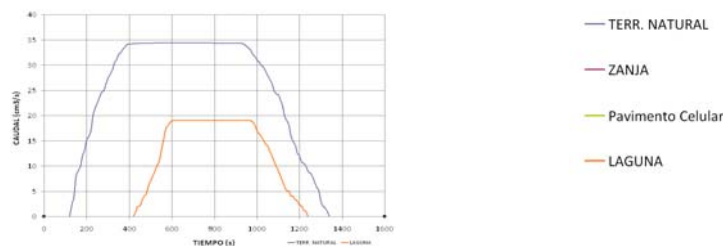


Figura 6. Hidrogramas comparativos entre las alternativas de manejo de agua de tormenta analizadas.

Fuente: Elaboración propia

En apariencia, la laguna de retención es la que presenta un peor desempeño, pero no hay que perder de vista que la escala empleada implica que la laguna de retención reduce los aportes de una cuenca drenante de mucho mayor superficie que las de los casos de la zanja de infiltración y del pavimento celular, por lo que claramente su desempeño es el mejor. Bajo el mismo criterio se puede observar que la superficie drenante del pavimento celular es mayor que la de la zanja de infiltración, y al mostrar ambas un desempeño similar podríamos suponer un mejor desempeño del pavimento celular.

En los tres casos su eficiencia depende mucho de su volumen de almacenamiento (laguna de retención) o de su superficie de infiltración (pavimento celular), aunque su real desempeño en un caso práctico estará supeditado a la factibilidad de implantación de cada una de las alternativas así como de sus correspondientes costos de construcción y mantenimiento.

## CONCLUSIONES

El manejo de agua de tormenta permite reducir el flujo superficial hacia los sistemas de drenaje de aguas lluvias de las ciudades, constituyéndose en una alternativa relativamente económica para mitigar los problemas ocasionados por eventos extremos de precipitación.

Las lagunas de retención reducen notablemente la escorrentía superficial pero requieren de amplias zonas que puedan ser inundadas. Por sus dimensiones, las zanjas de infiltración pueden ser fácilmente integradas a la estructura urbana, al igual que los pavimentos celulares muy útiles para cubrir amplias zonas de estacionamiento vehicular.

El mejor desempeño en la reducción del caudal de crecida se observó en la laguna de retención siendo su eficiencia dependiente en gran medida de su volumen de almacenamiento. En el caso de los pavimentos celulares y las zanjas de infiltración su eficiencia su desempeño también fue considerable dependiendo su superficie de infiltración. Su real desempeño en un caso práctico estará supeditado a la factibilidad de implantación de cada una de las alternativas así como de sus correspondientes costos de construcción y mantenimiento.

La combinación en el entorno urbano de varias alternativas de manejo de agua de tormenta puede ser una solución interesante al problema del drenaje de aguas lluvias en entornos urbanos y más aún si estas se integran armónicamente con el paisaje.

## BIBLIOGRAFIA

- AZZOUT, Y., S. BARRAUD, E. ALFAKIH y F. N. Cres. (1994) Techniques alternatives en assainissement pluvial. technique et documentation, Lavoisier, París.
- CHOW, V. T., MAIDMENT, D., MAYS, L.,(1994). Hidrología Aplicada. McGraw-Hill, Bogotá. 584 p.
- DICTUC, (1996), Técnicas Alternativas Para Soluciones de Aguas Lluvias En Sectores Urbanos, Santiago, Chile
- WALESH, G. S., (1989), Urban surface water managements. John Wiley and sons Inc. New York

---

## **15 Reflexão sobre a rede de distribuição de água - vazamento como mecanismo hidráulico de proteção**

---

**Cristovão Vicente Scapulatempo Fernades, Alex Jonhny Simplicio, Sérgio Michelotto Braga, Roberto Suse e Daniel Costa dos Santos**  
Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil

### **INTRODUÇÃO**

A redução das perdas físicas e econômicas relacionadas à distribuição de água tem sido uma preocupação constante das Empresas de Saneamento. Esta preocupação não está somente relacionada à perda de um bem de valor econômico, mas possíveis alterações do comportamento hidráulico da rede para situações que não são previstas em projetos, incluindo-se o impacto de transientes hidráulicos, alterações de qualidade da água e aumento de custos de operação.

As perdas físicas de água são motivadas pelos vazamentos que ocorrem nas tubulações e acessórios das redes de distribuição, nos ramais, redes prediais e nos reservatórios. As principais causas dos vazamentos são: a idade da tubulação e acessórios; natureza e qualidade dos materiais empregados e a adequada utilização técnica dos mesmos; pressão hidráulica a que o sistema de distribuição está sujeito; as intervenções nos subsolo na vizinhança da rede.

Para se conseguir um eficaz combate às perdas físicas necessita-se: velocidade no reparo dos vazamentos; controle ativo das perdas; controle da pressão na rede; e, mais importante, planejamento e Gestão do Sistema de Distribuição.

Dentro deste contexto, cabe lembrar que as perdas econômicas são constituídas de fornecimentos não faturados e pelas perdas devidas a erros de medição e leitura. Para uma eficaz redução das perdas econômicas é necessário: controle da água medida e não faturada; diminuição de erros de leitura e medição; diminuição de consumos clandestinos e, acompanhamento das características hidráulicas da rede de distribuição de água.

Este artigo pretende destacar a relevância destes aspectos, anteriormente indicados. O vazamento/perda de água em uma rede de abastecimento acarreta diminuição de pressão e aumento no consumo de energia. Uma questão relevante, e cuja solução não é trivial, é o de se entender o equilíbrio entre o impacto das perdas hidráulicas e os benefícios da proteção dos sistemas de distribuição de água. Complementarmente, uma outra motivação interessante é o de quantificar se aumento do custo de energia e o volume de água perdida nos vazamentos compensam o custos operacionais de reparo e substituição da tubulação danificada.

### **EVIDÊNCIAS DE INTERESSE E OBJETIVOS**

COLOMBO e KARNEY (2002) produziram uma interessante discussão sobre a questão das perdas físicas (vazamentos) e Custos de Energia. Nesta pesquisa, os autores destacaram a complexidade de se avaliar os diferentes aspectos envolvendo as questões econômicas, hidráulicas e de qualidade da água, de tal maneira que a decisão de fixar vazamentos não é tão óbvia assim. Através de diversas simulações utilizando o modelo EPANET 2.0 (ROSSMAN, 2000) os autores defendem a tese de uma análise hidráulica mais abrangente que permita avaliar o papel dos vazamentos e reparos, de tal sorte a não se produzir uma alteração sistêmica na rede. Os autores esclarecem o papel dos vazamentos como uma forma de se proteger a rede de distribuição em análise. Ou seja, vazamentos também possuem um aspecto positivo de proteção de uma rede de distribuição de água. Os autores produziram seus resultados para um coeficiente de vazamento de 12,5%.

## METODOLOGIA

A fim de se estabelecer as condições para se buscar uma referência entre a questão de perdas de água e a proteção hidráulica da rede, definiu-se uma metodologia complementar a estabelecida por COLOMBO e KARNEY (2002). Para a demonstração das perdas físicas e econômicas foram analisadas duas redes de distribuição de água: 1 rede hipotética proposta por COLOMBO e KARNEY (2002) – REDE 1 (vide Tabela 1 em anexo), e outra a ser construída pelo LENHS/UFPR – Laboratório de eficiência energética da UFPR (SANTOS, 2007) (vide Tabela 2 em anexo).

Nas simulações realizadas nesta pesquisa foram acrescentados vazamentos pré-definidos nos nós com distintos coeficientes de vazamentos. Aqui, indica-se a primeira diferença conceitual relativamente ao trabalho de COLOMBO e KARNEY (2002). Procurou-se dar uma dimensão mais abrangente das simulações indicadas naquela pesquisa, com o objetivo de generalizar as conclusões apresentadas naquela pesquisa. O modelo EPANET 2.0 (EPA, 2000) foi utilizado para a representação hidráulica e avaliação dos resultados do impacto das perdas físicas de 2 sistemas, apresentados a seguir. As perdas são representadas hidraulicamente, como sendo o escoamento através de um orifício, como descreve a equação 1.

$$q = C * p^g$$

Onde:

q = vazão em m<sup>3</sup>/s;

p = pressão no nó em m.c.a.;

g = “emitter exponent” com valor usual igual a 0,5;

C<sub>e</sub> = “emitter coefficient”;

Colombo e Karney (2001) propuseram o “emitter coefficient” (coeficiente do orifício – vazamento) dado por (equação 2):

*opiiijhpoi*

$$C_e = \frac{\alpha * Q_d}{p^y}$$

Onde:

a = % de vazamento;

Q<sub>d</sub> = vazão de demanda quando não há vazamento;

## DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO

### Rede 1

A rede hidráulica 1 foi adaptada a partir da rede utilizada por COLOMBO e KARNEY (2002), com destaque para o fato de se uma única bomba e um reservatório de estabilização próximo, como apresentado na Figura 1. A Figura 1 destaca a rede de distribuição de água, sem vazamento, com uma demanda de 24 MLd e, respectivas pressões e elevações nos Nós.

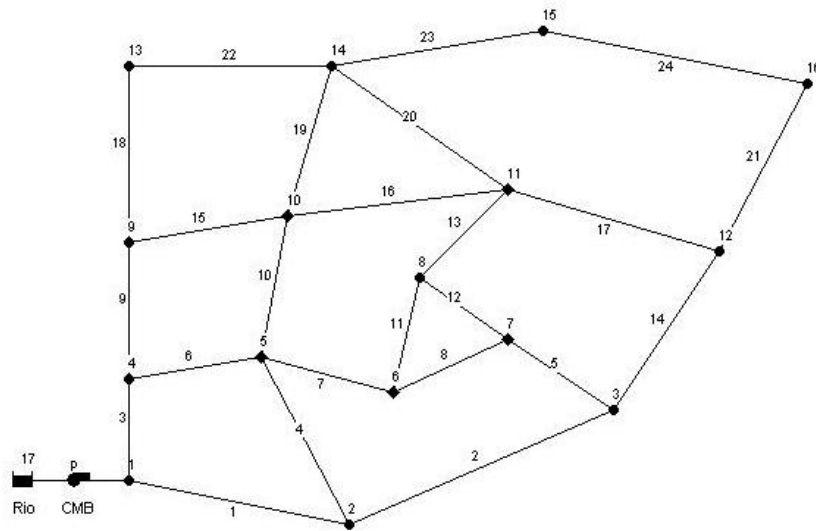


Figura 1. Rede hipotética adaptada da rede de COLOMBO E KARNEY (2002).

## Rede 2

A rede 2 é a que está sendo proposta pelo LENHS conforme SANTOS (2006) é apresentada na Figura 2. Possui alta complexidade devido à sua configuração e presença de componentes que não foram representados pelo EPANET como: hidrômetros, válvulas solenóides, calha PARSHALL e sensor de nível ultra-sônico.

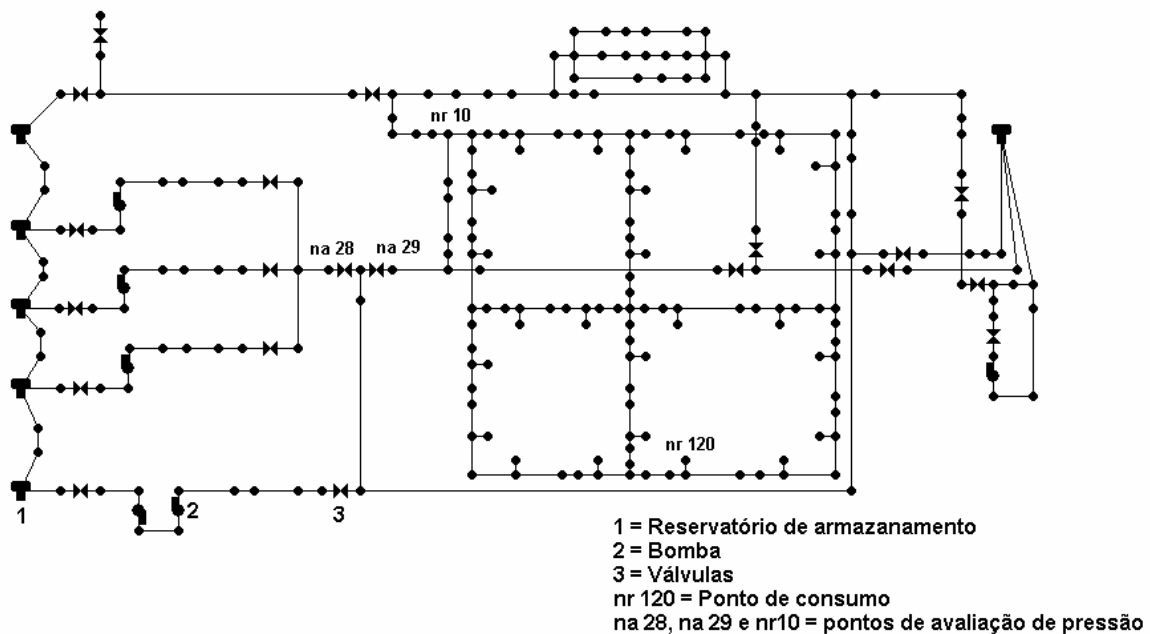


Figura 2. Representação do LENHS.

Para efetuar as simulações com o intuito de avaliar o comportamento hidráulico e energético do LENHS, efetuou-se o seguinte procedimento:

- a) Uso da demanda máxima no ponto de consumo;

- b) Acionamento da quantidade de bomba de acordo com o consumo;
- c) Leitura da pressão no ponto de consumo e em outros pontos da rede;

## SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Os resultados destas simulações foram divididos para facilitar o entendimento de cada rede especificamente, conforme descrito a seguir.

### Rede 1

Os resultados das simulações, para diversos cenários de perdas no sistema da Figura 1, foram inicialmente analisados conforme indicado na figura 3, a seguir. Pode-se observar, para o anel aonde se estabeleceram as condições de vazamento, uma sensível redução de pressão com as perdas. Para os pontos em destaque, a redução foi de aproximadamente 60%. Curiosamente, a redução de pressão não é significativa com o aumento do tamanho das perdas. Este resultado confirma aqueles apresentados por COLOMBO e KARNEY (2002) e destaca a importância do efeito de escoamento em orifício, função basicamente do gradiente de pressão no nó em análise. Fatores de capacidade de descarga foram admitidos como homogêneos para todos os nós. Cabe destacar, o fato das perdas como válvulas de alívio.

Complementando esta análise, o gráfico da Figura 4 apresenta a variação de pressões para os nós, 2 (nó mais próximo da bomba), 3 e 16 (nó mais distante da bomba). Pode-se observar uma redução da pressão com a presença de vazamento, variando de 7% para o nó 2 a 45% para o nó 16. Fica claramente indicado, o potencial de redução de pressão com o vazamento. Cabe destacar que o efeito de redução não é linear e depende da topologia da rede e de suas características hidráulicas.

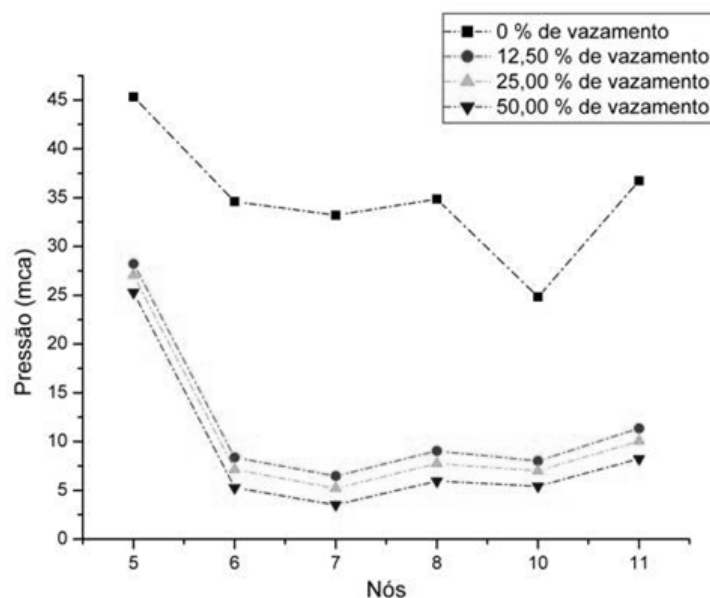


Figura 3. Pressão nos nós com vazamentos.

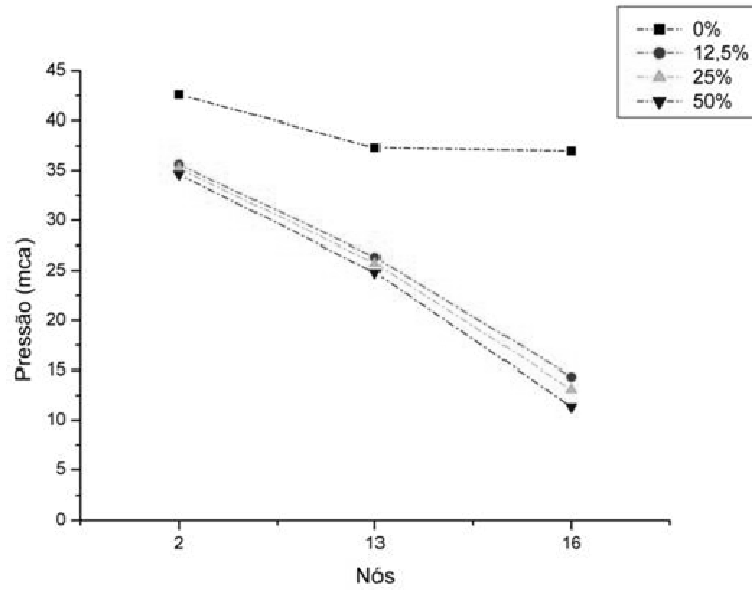


Figura 4. Condição de pressão para os nós 2, 13 e 16.

O gráfico da Figura 5 destaca em contrapartida, o efeito da variação da demanda, como consequência, da presença das perdas físicas do sistema. O aumento de demanda de aproximadamente 20% é a compensação física do sistema para se ajustar as perdas físicas. Novamente, como esperado, o aumento do tamanho dos vazamentos não produziu um impacto significativo na variação de demanda.

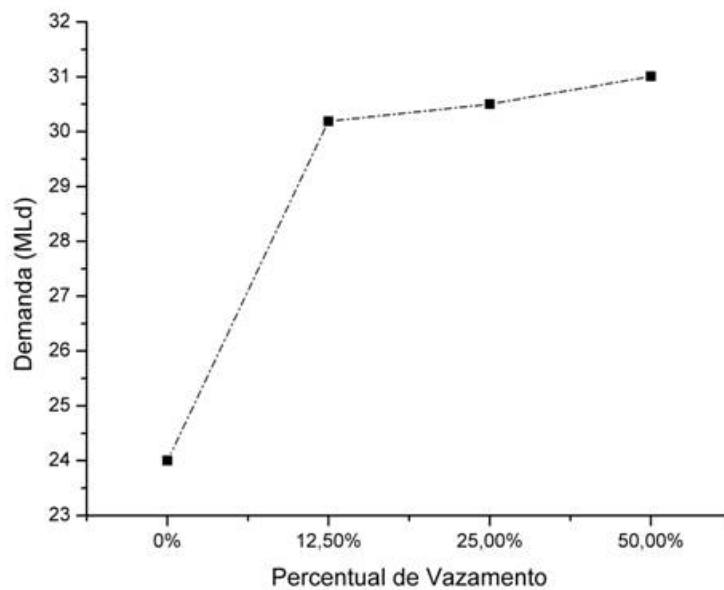


Figura 5. Demanda x Percentual de vazamento.

Por fim, o gráfico da Figura 6 compila os resultados em termos de Custo de energia, associados à presença dos vazamentos indicados na Figura 3. O impacto é um aumento da ordem de 15% nos custos de energia para o sistema indicado.



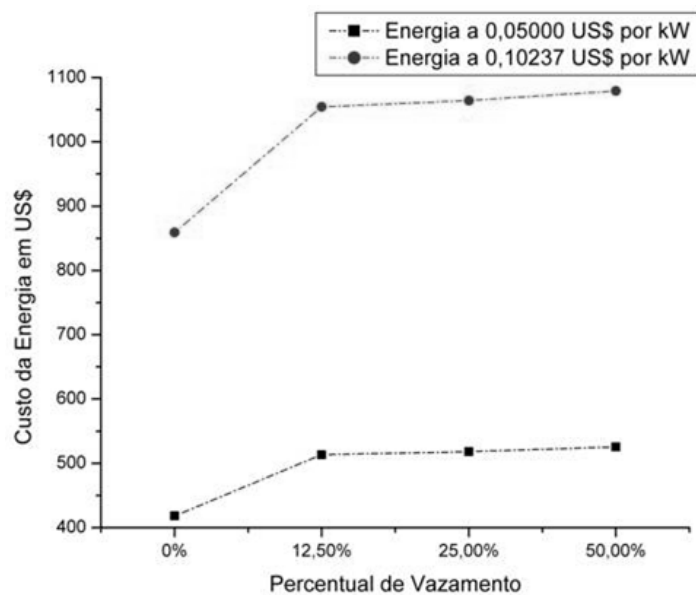


Figura 6. Custo diário de energia – US\$

## Rede 2

A partir do procedimento para avaliar o comportamento hidráulico e energético do LENHS, efetuaram-se quatro simulações, de acordo com a demanda máxima no ponto de consumo. Em todas as simulações, foi utilizado um rendimento de 60% para o conjunto moto-bomba. Para facilitar a compreensão foram convertidos os valores em Real para Euro utilizando a cotação disponibilizada pelo Banco Central do Brasil do dia 19/03/2008. E, utilizou-se um preço de R\$ 0,35 kWh (Euro 0,13). Desta forma, foi possível avaliar a rede do LENHS para diversos cenários.

### Simulação 1

Nesta simulação, a demanda máxima utilizada foi de 1,25 L/s e acionamento de duas bombas dispostas em paralelo. O custo diário foi de R\$ 4,79 (Euro 1,80). A variação de pressão em alguns pontos da rede e no ponto de consumo pode ser verificada pela Figura 7.

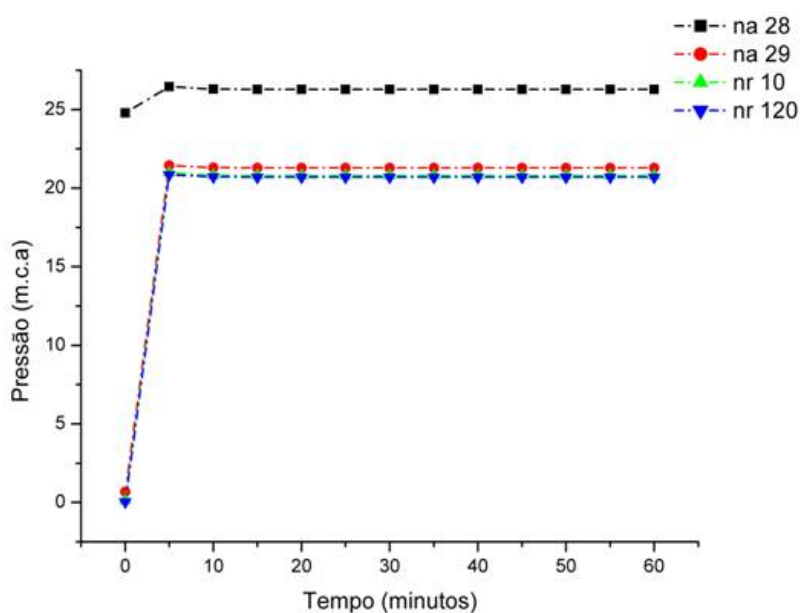


Figura 7. Variação da pressão. Simulação 1.

## Simulação 2

Na segunda simulação houve aumento da demanda no ponto de consumo, com demanda máxima igual a 1,42 L/s. Foram acionadas as três bombas dispostas em paralelo. E o custo diário foi de R\$ 5,43 (Euro 2,04). A pressão em alguns pontos da rede e no ponto de consumo pode ser representada pela Figura 8.

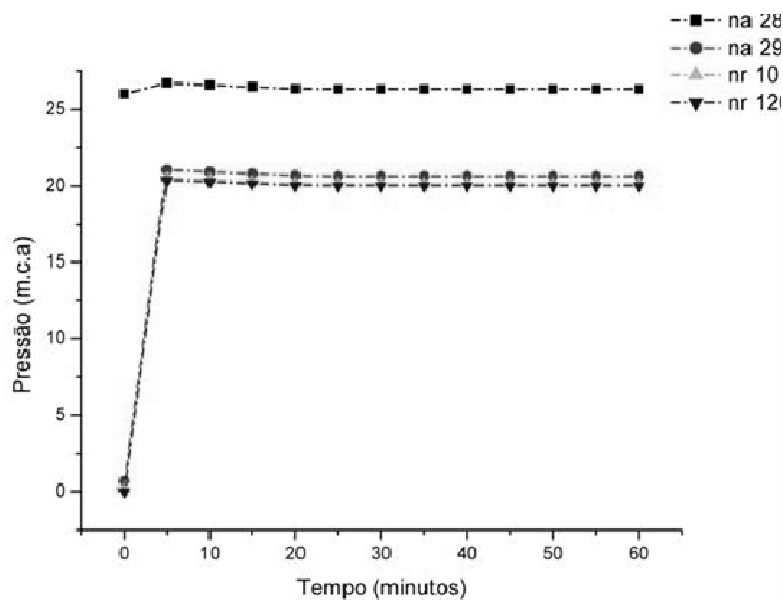


Figura 8. Variação da pressão. Simulação 2.

## Simulação 3

Nesta simulação, a demanda máxima utilizada no ponto de consumo foi de 1,71 L/s. Foi necessário o uso das bombas dispostas em paralelo mais as bombas dispostas em série. O custo diário de energia foi de R\$ 6,37 (Euro 2,39). A avaliação da pressão pode ser efetuada através da Figura 9.

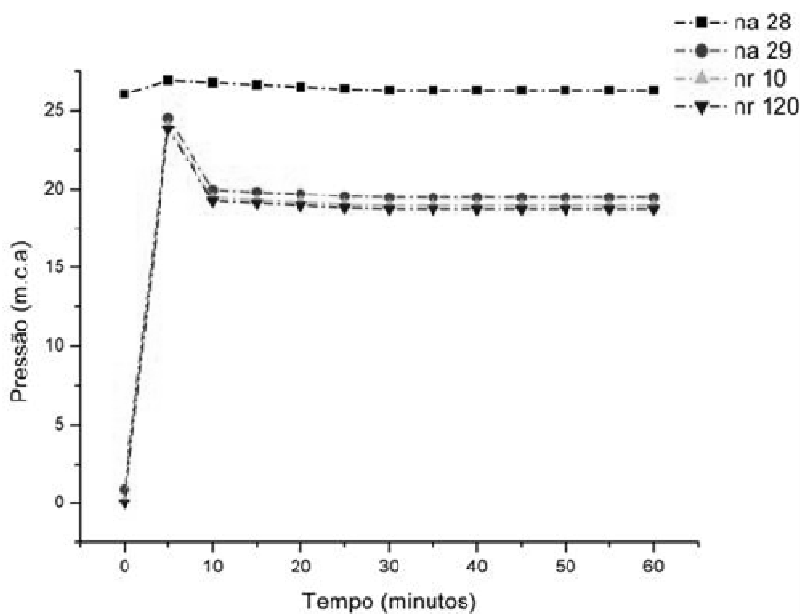


Figura 9. Variação da pressão. Simulação 3.

### Simulação 4

Nesta simulação, foi utilizada a demanda máxima de 1,76 L/s, com acionamento de todas as bombas existentes na rede. Teve-se um custo diário de R\$ 6,77 (Euro 2,54). A pressão em alguns pontos e no ponto de consumo pode ser avaliada a partir da Figura 10.

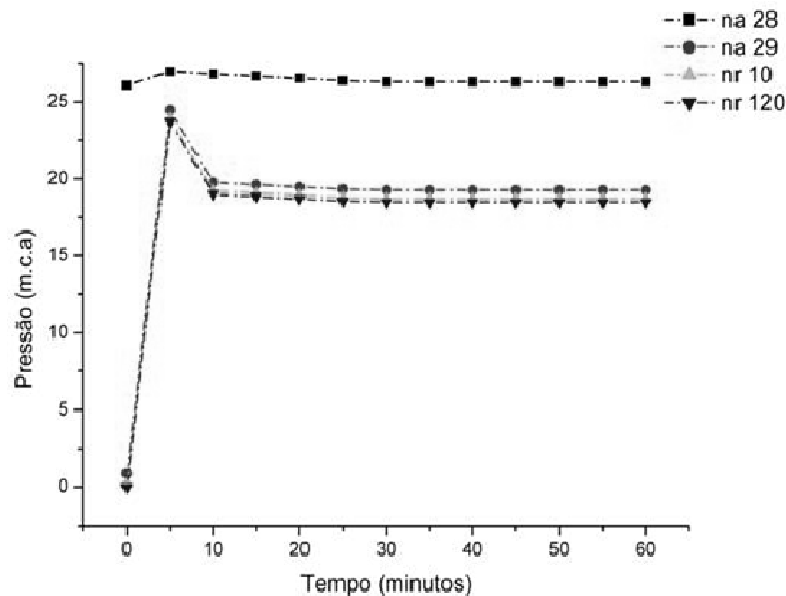


Figura 10. Variação da pressão. Simulação 4.

Em todas as simulações realizadas verifica-se que ocorre um pulso da pressão no momento do acionamento das bombas. Em seguida há uma diminuição e a pressão tende a se estabilizar. Observando as Figuras 3 e 4, é possível observar que o pulso da pressão é maior com decaimento intenso da pressão, até o ponto de estabilização.

Para a simulação 1, a estabilização da pressão ocorre depois de 15 minutos, enquanto que para a simulação 2, ocorre depois de 25 minutos, para a simulação 3 e 4, 30 minutos.

Observando as Tabelas 1 e 2, o aumento da demanda provoca diminuição da pressão na rede. Porém, comparando as pressões da simulação 2 com a simulação 3 ocorre aumento da pressão devido ao acionamento de mais bombas para atender o aumento da demanda no ponto de consumo. Mas a pressão volta a diminuir com o aumento da demanda, como pode ser observado pelas pressões da simulação 4. No entanto, mesmo que há a diminuição da pressão, o custo diário de bombeamento aumenta de acordo com o aumento da demanda no ponto de consumo.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados indicados nesta pesquisa, baseados em uma rede de distribuição de água hipotética, tem por objetivo principal a generalização das observações de Colombo e Karney (2002). Ao mesmo tempo, destacar o dilema conceitual da questão das perdas físicas sob o enfoque da hidráulica de uma rede de distribuição de água. As limitações destas análises estão claramente associadas às limitações do EPANET (2000). O modelo de representação hidráulica não considera os efeitos de inércia e compressibilidade de um sistema, em especial, quando do impacto de ações externas a rede induzindo alterações físicas, como é o caso que envolve perdas físicas e que pode ser sensivelmente maior que os resultados aqui apresentados.

Neste trabalho estão lançados os desafios para uma melhor representação hidráulica na modelagem de uma rede de distribuição de água, e com atenção especial para destacar que um vazamento, apesar do custo da perda física, possui um aspecto de proteção da rede.

Enfim este artigo mostra a importância do estudo de sistemas de distribuição de água e a sua complexidade. Através de comportamentos diferenciados para situações de bombeamento distintas. Isso significa que cada rede de abastecimento necessita de um estudo próprio, para cada situação particular. É possível encontrar uma generalização para obtermos o efeito benéfico do vazamento, que é a proteção da rede. Mas deve-se ter cuidado para não sub-dimensionar o sistema e provocar o efeito inverso da proteção da rede.

Já que a construção da rede do LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E HIDRÁULICA EM SANEAMENTO (LENHS) não está concluída, a comparação dos dados hidráulicos obtidos através das simulações realizadas pelo programa computacional EPANET 2.0 com dados experimentais não pode ser efetuada. Assim, há a dificuldade da avaliação das simulações do LENHS, pois na representação da rede optou-se pelo uso de bombas que podem ser diferentes dos conjuntos moto-bomba que serão instalados futuramente.

Nas simulações realizadas, a solução hidráulica do sistema está diretamente relacionada à escolha do tipo de bomba, de modo que, o uso de bombas superdimensionadas provoca gastos adicionais de energia, enquanto que o uso de bombas subdimensionadas não atende as pressões mínimas disponíveis para efetuar o transporte de água até o consumidor final.

No entanto, para efetuar uma análise completa do comportamento energético da rede do LENHS é necessário considerar os custos adicionais de manutenção necessários ao longo da vida útil do projeto, já que a oscilação e alto valor da pressão podem provocar fadigas nas tubulações, gerando vazamentos e consequentemente aumento do gasto de água e energia.

Portanto, as simulações da rede do LENHS efetuada pelo programa computacional EPANET 2.0 podem ser consideradas como ferramentas de gerenciamento de sistemas de abastecimento de água, com o intuito de efetuar medidas de conservação de água e energia.

## BIBLIOGRAFIA

- BANCO CENTRAL DO BRASIL – BACEN – Conversão de Moedas – disponível em:<  
<http://www5.bcb.gov.br/pec/conversao/Resultado.asp?idpai=convmoeda>> acessado em  
 20/03/2008.
- COLOMBO, A.F. and KARNEY, B.W., Energy and costs of leaky pipes: toward comprehensive picture. Journal of water resources planning and management: november/december 2002.
- COPEL, Companhia paranaense de energia elétrica, disponível em:  
 <[http://www.copel.com/sitearquivos.nsf/arquivos/adimpago05/\\$FILE/adimpago05.pdf](http://www.copel.com/sitearquivos.nsf/arquivos/adimpago05/$FILE/adimpago05.pdf)>, acesso em 10/05/2007.
- FOX, R. & MCDONALD, A. Introdução à Mecânica dos Fluidos, 5ª edição, Editora Livros Técnicos e Científicos, 2001
- ROSSIGNEUX, N.V.Q. e FERNANDES, C.V.S., Estabelecendo a importância relativa do controle de perdas em redes de distribuição de água – O exemplo de uma rede hipotética. SEREA, 2004.
- ROSSMAN, L. EPANET2 users Manual, Environmental Protection Agency, 2000.
- WHITE, F. M. Fluid Mechanics 4th, McGrawHill, 1999
- SANTOS, D C. Eletrobrás – Projeto LENHS – Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento – UFPR

**ANEXO**

Tabela 1 – Dados da rede de distribuição de água hipotética descrita em Colombo e Karney (2002)

Número Tubulação	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	C	Número do Nó	Elevação (m)	Demanda (MLd)
P1	890	305	65	N17	100	Reservatório
P2	1015	152	140	N1	152	1,2
P3	243	406	70	N2	145	1,2
P4	570	152	70	N3	125	1,2
P5	422	152	65	N4	155	1,2
P6	450	203	70	N5	133	1,92
P7	320	152	70	N6	128	1,2
P8	580	152	65	N7	127	1,92
P9	750	406	70	N8	126	0,0
P10	750	203	70	N9	149	1,2
P11	500	152	70	N10	152	2,4
P12	378	152	80	N11	124	2,16
P13	570	152	70	N12	122	1,2
P14	560	152	65	N13	139	2,4
P15	700	254	70	N14	129	2,4
P16	610	152	70	N15	123	1,2
P17	631	152	75	N16	121	1,2
P18	875	305	75			
P19	890	152	75			
P20	808	152	75			
P21	826	203	80			
P22	810	203	140			
P23	585	152	140			
P24	631	152	75			

---

## **16 Reflexões sobre medidas de variáveis hidráulicas em laboratório – Caso LENHS-UFPR**

---

**Alex Johnny Simplicio, Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes, Sérgio Michelotto Braga, André Luiz Tonso Fabiani e Daniel Costa dos Santos**  
Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil

### **INTRODUÇÃO**

As companhias de saneamento têm o dever de fornecer água de qualidade, em quantidade e regularidade a toda população a qual atendem (HELLER, 2006), por isso, o monitoramento de redes de abastecimento de água se tornou uma ferramenta indispensável para que esse serviço seja realizado de melhor maneira possível, atendendo a todas essas necessidades.

Para se ter conhecimento do que acontece na rede, medições de vazão e pressão são realizadas em alguns pontos da mesma. Com esses dados é realizada a sua modelagem computacional, ferramenta que permite ter uma idéia do que acontece nas áreas onde não foram feitas medições.

Com o monitoramento é possível distinguir e delimitar áreas de pressões, e tratá-las individualmente visando a eficiência energética e hidráulica que cada uma pode contribuir ao sistema.

Sendo assim, para se ter uma caracterização melhor da rede e garantir que os parâmetros físicos utilizados estejam corretos, como coeficientes de perda de carga contínua e localizada, é necessário previamente avaliar os resultados obtidos com os medidores de vazão e de pressão, analisando se os mesmos fazem sentido físico.

Tendo isso em vista, este artigo pretende avaliar dados de vazão e pressão obtidos com o monitoramento de um trecho em uma rede de laboratório, a do LENHS-UFPR, e verificar por eles a aferição dos equipamentos utilizados para a medição desses parâmetros. Uma importante reflexão para avaliação de medidas hidráulicas em laboratórios.

### **A REDE**

A rede do LENHS-UFPR, projetada por SANTOS (2006), é composta por uma rede principal, constituída por tubulações de ferro fundido de 3” de diâmetro, e uma rede secundária de PVC com 1” de diâmetro ( Figura 1).

O trecho estudado se concentra na rede principal. Ele foi isolado do restante da rede através da manobra das válvulas e dos registros que compõem a rede. Este trecho é composto por duas VRPs, sendo que apenas uma está em operação, uma válvula de retenção, sete de válvulas globo, uma cruzeta, quatro curva de 90° e 3 joelhos de 90° (Figura 2). Os dados com as características físicas da rede podem ser consultados na tabela 8 do Anexo.

### **APECTOS OPERACIONAIS**

A simulação em laboratório foi executada para três velocidades de rotação do conjunto moto-bomba.

A bomba do trecho compreendido apresenta uma velocidade de rotação de projeto de 3.500 RPM e um rotor com 235 mm de diâmetro.

Foram feitas 10 leituras de cada medidor de vazão e de pressão instalado na rede para cada velocidade de rotação simulada. A média das leituras de cada cenário foi calculada, e os resultados estão dispostos nas tabelas 1 e 2.

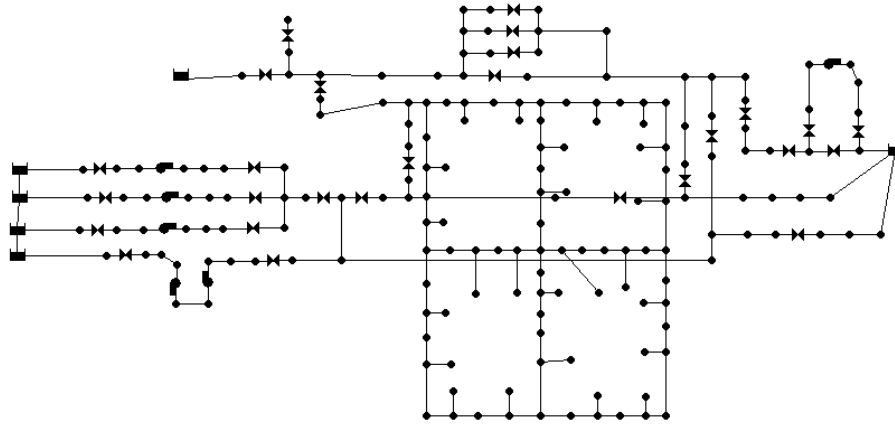


Figura 1: Rede completa do LENHS-UFPR

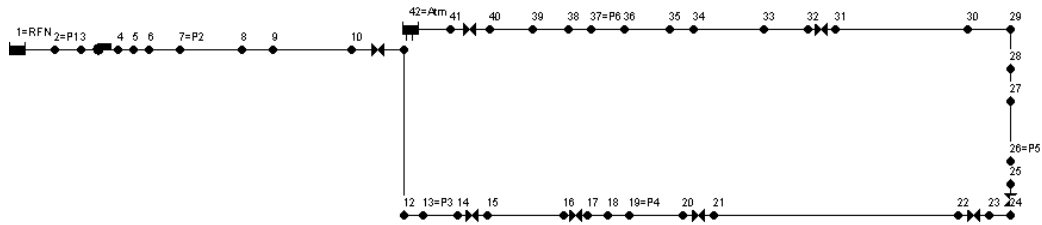


Figura 2: Trecho do LENHS-UFPR estudado.

Tabela 1: Média das leituras das leituras de pressão para os três cenários de operação de bomba.

Rotação*	P <sub>1</sub> **	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub> **	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub> **	P <sub>6</sub> **
	Nó 2	Nó 7	Nó 13	Nó 19	Nó 26	Nó 37
58%	0,261	10,056	10,172	2,833	0,153	-0,357
72%	0,246	14,962	15,059	3,367	0,748	-0,366
86%	0,203	19,939	19,961	4,572	2,041	0,013

Tabela 2: Leituras de vazão para os três cenários de operação de bomba.

Rotação	Vazão (m <sup>3</sup> /h)			
	MV <sub>1</sub>	MV <sub>2</sub>	MV <sub>3</sub>	Média
58%	3,38	3,33	3,31	3,34
72%	5,22	5,17	5,17	5,19
86%	9,20	9,16	9,14	9,16

Alguns valores indicados na Tabela 1 não apresentaram sentido físico (P<sub>3</sub> - nó 13 e P<sub>6</sub> - nó 37), e por isso foram descartados na resolução do cálculo de perda de carga. A pressão no ponto 3 (P<sub>3</sub>) foi desconsiderada devido apresentar um valor maior que o medido a um ponto mais a montante, sendo que os pontos apresentam a mesma cota. Já o ponto P<sub>6</sub>, foi descartado por apresentar pressão negativa, sendo que este fica próximo ao ponto de descarga da atmosfera.

\* Valor de rotação percentual referente à rotação de projeto da bomba.

\*\* Valores descartados para o cálculo de perdas de carga contínua e localizadas.

Esses desacertos encontrados na medição dessas variáveis hidráulicas provam a importância da calibração dos equipamentos utilizados em monitoramento, assim como a instalação em local adequado, onde possam fornecer mais informações sobre o comportamento da rede.

Outras leituras descartadas foram as das pressões nos pontos 1 e 5, devido não serem muito relevantes para a solução analítica da rede. Portanto, foram consideradas apenas as leituras dos pontos P<sub>2</sub> e P<sub>4</sub>.

As leituras de vazão não tiveram um desvio significativo, portanto nenhuma foi rejeitada.

## AVALIAÇÃO DE PERDAS DE CARGA

Para avaliar as perdas de cargas ocorrentes na rede foi feita uma resolução analítica, tendo como propósito definir os valores dos coeficientes físicos referentes à perda de carga contínua e localizada, assim como a altura manométrica que a bomba proporciona ao escoamento.

Para a sua resolução, o trecho de estudo foi dividido em três partes:

- Trecho reservatório-bomba;
- Trecho bomba-VRP;
- Trecho VRP-Atmosfera (descarga na atmosfera).

### Perdas Contínuas

Como foi constatada uma leve corrosão na tubulação do LENHS-UFPR. Para os cálculos de perda de carga contínua foi considerado como coeficiente de rugosidade ( $\epsilon$ ) o valor de 1,0 mm, indicado como um valor mínimo para casos com corrosão em tubos de ferro fundido.

Para os trechos citados, foi calculada a perda de carga contínua, através da equação de Colebrook-White e de Darcy-Weisbach, para as três velocidades de operação da bomba simulada em laboratório, tendo esses números dispostos na tabela 3. A tabela 4 sumariza os valores de perda de carga contínua para os trechos indicados, considerando distintas características de operação da bomba.

$$f = \frac{0,25}{\left[ \log \left( \frac{\epsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{\text{Re}^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (1)$$

$$h_p = f \frac{L U^2}{D 2g} \quad (2)$$

Tabela 3: Fator de atrito da tubulação correspondente ao valor de Reynolds para cada operação de bomba.

Reynolds	$f$
15769,31	0,04562
24455,63	0,04444
43209,98	0,04343

Tabela 4: Perda de carga contínua em cada trecho estudado para os três cenários de operação de bomba.

Rotação	Perda de Carga Contínua (m)		
	Reservatório-Bomba	Bomba-VRP	VRP-Atmosfera
58%	0,000	0,003	0,008
72%	0,001	0,008	0,019
86%	0,003	0,025	0,058

Pela tabela 4 é possível constatar que a perda de carga contínua na tubulação é desprezível, isso ocorre devido à baixa velocidade que o escoamento apresentou para os três casos.



## Perdas localizadas

Uma segunda análise consiste da avaliação das perdas de carga localizadas no sistema. (válvulas, curvas, joelhos, “tês” e cruzetas).

Para a determinação desses coeficientes foi utilizado o conceito de comprimento equivalente ( $L_i$ ) de componentes da rede para o cálculo de perda de carga. O valor do comprimento equivalente para cada componente da rede foi retirado da Norma Brasileira de Água Fria – NBR 5626/82.

Esse estudo foi feito tendo como base os dados do trecho VRP-Atmosfera. A diferença entre a carga hidráulica no medidor de pressão  $P_4$  e a carga na atmosfera, resulta na perda de carga total no trecho. Retirando o valor da perda de carga contínua tem-se a perda de carga ocasionada pelos componentes da rede neste trecho.

Com os valores de comprimento equivalente, diâmetro, vazão e perda de carga foi possível calcular o fator de atrito representativo as peças, isolando-o da equação 2.

$$f_{loc} = \frac{(H_4 - H_{Atmosfera} - h_{cont})2gD}{U^2 \sum L_i} \quad (3)$$

Tabela 5: Fator de atrito de Darcy-Weisbach referente a perda de carga localizada calculado para cada cenário simulado.

<b>Rotação</b>	<b>f<sub>loc</sub></b>
58%	0,55707
72%	0,28201
86%	0,12632

O coeficiente de perda de carga localizado foi obtido ao se igualar a equação de Darcy-Weisbach (2) com a equação de perda de carga localizada (4).

$$h_{loc} = K \frac{U^2}{2g} \quad (4)$$

$$K = f_{loc} \frac{L_i}{D} \quad (5)$$

Os valores dos coeficientes para as três simulações estão apresentados na tabela 5.

É possível notar um decaimento dos coeficientes de perda de carga localizada de acordo com o aumento da velocidade do fluido na tubulação. Isso acontece devido esses coeficientes terem sido calculados por meio do fator atrito, que é regido pela equação de Colebrook-White, tornando-os sensíveis em função da variação do número de Reynolds.

A partir dos coeficientes de perda de carga localizada, foi possível calcular a pressão antes e após a bomba e a VRP, conseguindo dessa forma determinar, respectivamente, a altura manométrica da bomba e o coeficiente de perda de pressão na VRP, sendo esse último também sensível a variação do número de Reynolds.

Com a determinação de todos esses coeficientes e da altura manométrica de bomba, foi possível simular a rede no EPANET e obter as pressões para cada nó na rede.

Tabela 6: Valores dos coeficientes de perda de carga localizada para cada componente da rede para os três cenários rodados em laboratório

	$L_i(m)^*$	K		
		Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Curva	2	14,9	7,5	3,4
3 Joelhos	8	62,4	31,6	14,1
Válvula de Retenção	6,4	47,5	24,1	10,8
Válvula Globo	26	193,1	97,8	43,8
Cruzeta (saída lateral)	4,1	30,5	15,4	6,9
Tê (passagem direta)	0,5	3,7	1,9	0,8
Tê (saída lateral)	4,1	30,5	15,4	6,9
VRP	----	2718	1892	796

Tabela 7: Perda de carga correspondente aos componentes da rede de acordo com o cenário de rotação de bomba.

	Perda de Carga Localizada (m.c.a.)		
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Curva	0,03	0,04	0,06
3 Joelhos	0,14	0,17	0,24
Válvula de Retenção	0,11	0,13	0,18
Válvula Globo	0,44	0,53	0,74
Cruzeta (saída lateral)	0,07	0,08	0,12
Tê (passagem direta)	0,01	0,01	0,01
Tê (saída lateral)	0,07	0,08	0,12
VRP	6,12	10,25	13,47

## SIMULAÇÃO NO EPANET

O EPANET, software de domínio público criado pela Agência de Proteção Ambiental Americana, tem como função a simulação do comportamento da água em redes hidráulicas, tanto malhadas quanto ramificadas, levando em consideração em seus cálculos a estática e a dinâmica dos fluidos, tendo como principal uso a simulação de escoamentos pressurizados (ROSSMAN, 2000).

A rede em questão foi modelada no EPANET e os coeficientes de perda de carga calculados pela solução analítica foram introduzidos ao programa.

Também foi feita a introdução dos dados de altura manométrica e de vazão (tabela 8) para o cálculo da curva característica de bomba, com as seguintes equações. Os valores da carga hidráulica em cada nó da rede estão sumarizados na tabela 7, em anexo.

$$\bullet \quad Hm = 13,55 - 0,3029 Q^2 \quad (6)$$

$$\bullet \quad Hm = 20,44 - 0,1897 Q^2 \quad (7)$$

$$\bullet \quad Hm = 27,17 - 0,08097 Q^2 \quad (8)$$

Tabela 8: Altura manométrica e vazão referente a cada rotação de bomba.

Rotação	58%	72%	86%
Altura Manométrica (m)	10,4	15,33	20,13
Vazão média (m <sup>3</sup> /h)	3,34	5,19	9,16

\* Comprimento equivalente dos componentes da rede para uma diâmetro de 75mm.

As figuras 3 a 5, sintetizam os resultados para os 3 cenários avaliados. Uma primeira observação de caráter geral, indica que os resultados simulados representam bem a perda de carga na tubulação, principalmente as perdas de carga localizadas, dando destaque para o impacto da VRP, atenuando a distribuição de pressões para o trecho mais a montante. Em todos os casos, para os trechos de maior pressão (0-5m), os valores simulados estão consistentes com os dados medidos.

Na figura 3, destaca-se o efeito da diferença entre valores observados e simulados para os nós mais a jusante. Este efeito diminui significativamente (Figuras 4 e 5), para condições de maior energia inserida adicionada ao sistema em estudo. Embora o efeito de perdas localizadas seja significativo, poder-se afirmar que a calibração inicial realizada conduziu a resultados satisfatórios.

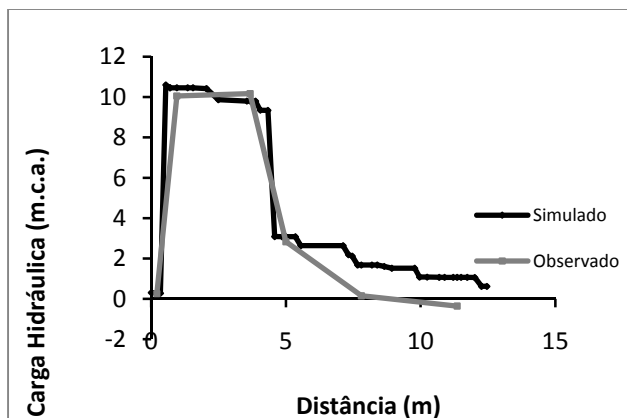


Figura 3: Carga hidráulica no trecho para uma velocidade de rotação na bomba de 58%.

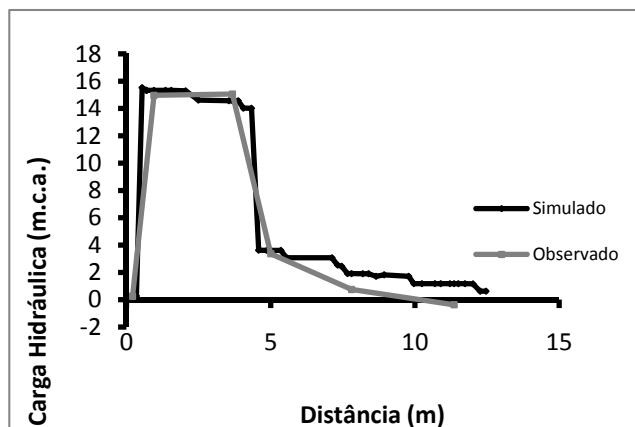


Figura 4: Carga hidráulica no trecho para uma velocidade de rotação na bomba de 72%.

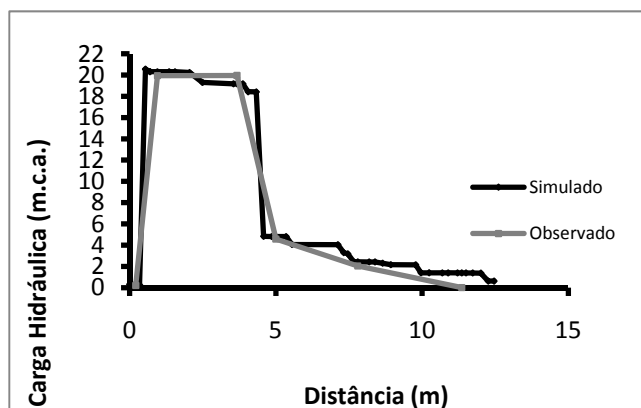


Figura 5: Carga hidráulica no trecho para uma velocidade de rotação na bomba de 86%.

## ANÁLISE DOS RESULTADOS

O cálculo dos valores de coeficiente de perda de carga localizada (K) foi realizado da forma apresentada neste artigo para garantir que a equação 9 seja validada, ou seja, toda a energia adquirida pela rede em forma de altura manométrica seja perdida, podendo assim, simulá-la no EPANET.

$$H_m - h_{cont} - h_{loc} = 0 \quad (9)$$

Na realidade, o comprimento equivalente utilizado para simulação deve possuir o mesmo e do material que a constitui. No caso feito neste trabalho, o comprimento equivalente foi utilizado para dar uma idéia da dimensão da perda de carga causada pelo componente, não sendo, portanto, uma simulação real do seu comportamento físico. No entanto, conduziu a resultados que podem ser considerados satisfatórios.

Os coeficientes de perda de carga localizada apresentaram valores altos, bem aquém dos valores indicados em tabelas comerciais ou pelas próprias normas brasileiras. Claramente, este efeito é marcante em função das peculiaridades da rede experimental, e cuja análise deve ser detalhada. Uma possível descalibração dos medidores de vazão foi descartada, devidos os três equipamentos presentes no trecho simulado apresentarem a mesma vazão para cada situação de operação de bomba. A calibração dos sensores de pressão faz-se necessária. Além disso, uma avaliação mais precisa dos coeficientes de perda de carga localizada dos componentes da rede será feito, para que se tenha o cadastro dos mesmos para a realização de estudos futuros.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse desacerto nos dados de pressão atenta a necessidade de uma calibração programada e constante dos equipamentos que realizam esse tipo medição quando se faz o monitoramento de uma rede real, já que uma simulação mais precisa necessita uma inserção de dados corretos e de baixa dispersão. Desse modo, tem-se uma simulação mais fidedigna do sistema, garantindo uma postura melhor frente às decisões de gerenciamento e operação da rede, visando a sua eficiência energética e hidráulica. Neste caso, uma rede experimental de laboratório estes pequenos detalhes ganham relevância e devem ser analisados com profundidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 5626: Instalação Predial de Água Fria. Rio de Janeiro. 1982
- HELLER, L., PÁDUA, V. L. Abastecimento de água para consumo humano, Editora UFMG, 2006.
- ROSSMAN, L. EPANET2 users Manual, Environmental Protection Agency, 2000.
- WHITE, F. M. Fluid Mechanics 4th, McGrawHill, 1999
- SANTOS, D C. Eletrobrás – Projeto LENHS – Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento – UFPR

## ANEXOS

Tabela 9: Valores de carga hidráulica da rede simulada em EPANET para as três velocidades de rotação do conjunto motor-bomba.

Rotação			58%	72%	86%
Nó	Cota	Distância	Carga Hidráulica	Carga Hidráulica	Carga Hidráulica
1=RFN	0,31	0	0,31	0,31	0,31
2=P <sub>1</sub>	0	0,21	0,31	0,31	0,31
3	0	0,34	0,28	0,27	0,25
4	0,2	0,54	10,6	15,53	20,56
5	0,2	0,69	10,46	15,33	20,32
6	0,2	0,7	10,46	15,33	20,32
7=P <sub>2</sub>	0,2	0,95	10,46	15,33	20,31
8	0,2	1,35	10,46	15,33	20,31
9	0,2	1,55	10,46	15,33	20,31
10	0,2	2,05	10,42	15,29	20,24
11	0,2	2,49	9,87	14,62	19,31
12	0,2	3,55	9,8	14,57	19,18
13=P <sub>3</sub>	0,2	3,67	9,8	14,57	19,18
14	0,2	3,87	9,8	14,57	19,18
15	0,2	4,05	9,35	14,03	18,43
16	0,2	4,33	9,34	14,02	18,42
17	0,2	4,58	3,09	3,62	4,83
18	0,2	4,86	3,08	3,61	4,81
19=P <sub>4</sub>	0,2	5	3,08	3,61	4,81
20	0,2	5,35	3,08	3,61	4,81
21	0,2	5,55	2,64	3,07	4,06
22	0,2	7,12	2,64	3,07	4,04
23	0,2	7,32	2,19	2,53	3,3
24	0,2	7,46	2,12	2,44	3,18
25	0,2	7,66	1,68	1,91	2,43
26=P <sub>5</sub>	0,2	7,8	1,68	1,91	2,43
27	0,2	8,19	1,68	1,9	2,42
28	0,2	8,39	1,68	1,9	2,42
29	0,62	8,65	1,61	1,71	2,3
30	0,62	8,93	1,52	1,82	2,16
31	0,62	9,78	1,52	1,71	2,15
32	0,62	9,96	1,08	1,17	1,4
33	0,62	10,24	1,08	1,17	1,4
34	0,62	10,69	1,07	1,17	1,39
35	0,62	10,89	1,07	1,17	1,39
36	0,62	11,21	1,07	1,17	1,39
37=P <sub>6</sub>	0,62	11,355	1,07	1,17	1,39
38	0,62	11,5	1,07	1,17	1,39
39	0,62	11,73	1,07	1,17	1,38
40	0,62	12,01	1,06	1,16	1,37
41	0,62	12,26	0,62	0,62	0,62
42=Atm	0,62	12,46	0,62	0,62	0,62

Tabela 10: Dados geométricos do trecho estudado.

Nó Inicial	Nó Final	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Componente
1=RNF	2	0,21	75	
2	3	0,13	75	1 curva
3	4	<b>Bomba</b>	----	
4	5	0,01	75	3 joelhos
5	6	0,15	75	
6	7	0,25	75	
7	8	0,4	75	
8	9	0,2	75	
9	10	0,5	75	1 curva
10	11	<b>V1</b>	75	Válvula Retenção + Esfera
11	12	1,06	75	Cruzeta (saida lateral)
12	13	0,12	75	
13	14	0,2	75	
14	15	<b>V2</b>	75	Válvula Esfera
15	16	0,01	75	"Tê" (passagem dir.)
16	17	<b>VRP1</b>	75	
17	18	0,28	75	"Tê" (passagem dir.)
18	19	0,14	75	
19	20	0,35	75	
20	21	<b>V3</b>	75	Válvula Esfera
21	22	1,57	75	
22	23	<b>V4</b>	75	Válvula Esfera
23	24	0,14	75	"Tê" (saída lateral)
24	25	<b>V5</b>	75	
25	26	0,14	75	
26	27	0,39	75	
27	28	0,2	75	
28	29	0,26	75	2 Curvas
29	30	0,01	75	2 "Tê" dir. e 1 Lateral
30	31	0,85	75	
31	32	<b>V6</b>	75	Válvula Esfera
32	33	0,28	75	
33	34	0,45	75	
34	35	<b>V7</b>	75	Válvula Esfera
35	36	0,32	75	
36	37	0,145	75	
37	38	0,145	75	
38	39	0,23	75	
39	40	0,01	75	"Tê" direto
40	41	<b>VRP2*</b>	75	
41	42	0,2	75	

\* VRP não operável. A perda de carga localizada ocasionada pela VRP foi encarada como a perda causada por uma válvula esfera.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$P_i$  : média das 10 leituras de pressão no ponto  $i$ ;  
 $MV_i$  : média das 10 leituras de vazão no sensor  $i$ ;  
 $f$  : fator de atrito de Darcy-Weisbach;  
 $\varepsilon$  : rugosidade de areia equivalente;  
 $Re$  : número de Reynolds;  
 $D$  : diâmetro da tubulação;  
 $U$  : velocidade do escoamento;  
 $f_{loc}$  : fator de atrito equivalente a perda de carga localizada;  
 $H_4$  : carga hidráulica referente ao ponto de leitura 4;  
 $H_{atmosfera}$  : carga hidráulica na saída para atmosfera;  
 $b_{cont}$  : perda de carga contínua;  
 $L_i$  : comprimento equivalente;  
 $h_{loc}$  : perda de carga localizada;  
 $K$  : coeficiente de perda de carga localizada;  
 $H_m$  : altura manométrica de bomba;  
 $Q$  : vazão.  
 $V_i$  : válvula  $i$ ;  
 $\nabla RP_i$  : válvula redutora de pressão  $i$ .

---

## **17 Tecnologias de suporte a decisão para auxiliar a gestão hidroenergética em sistemas de abastecimento de água**

---

**Peter B. Cheung, Keila R. F. O. Dassan, Agustin M. E. A. Pérez, Ricardo Coutinho, Guilherme V. Girol, Katheryne L. N. Bardales, Paulo A. Oliveira e Carlos Nobuyoshi Ide**

Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, Brasil

### **INTRODUÇÃO**

O gerenciamento eficiente das infraestruturas urbanas de abastecimento de água é o constante desafio para os prestadores de serviços de saneamento. O crescimento acentuado da economia associado ao aumento populacional exercem forte impacto nas fontes de água com potencial de potabilidade, principalmente para atender núcleos urbanos que concentram grande parte da população. No Brasil, muitas das infraestruturas de abastecimento de água encontram-se degradadas e com graves problemas de conservação. Entre os problemas mais comuns com que as entidades gestoras se deparam, encontram-se as elevadas taxas de rompimentos de tubulações, os elevados volumes de perdas e os problemas de qualidade da água. Essa demografia dinâmica associada a infraestrutura deteriorada reflete diretamente na qualidade dos serviços prestados, na contabilidade das entidades gestoras, nos ativos de infraestrutura e nas tarifas praticadas.

A falta de legislação no saneamento sempre foi apontada como um forte entrave para a busca da universalização do atendimento e da modernização da infraestrutura, pois os investidores que poderiam aportar os recursos complementares, necessários e importantes ao processo, tinham percepção do alto risco. A Lei Federal 11.445/07, conhecida como a Lei do Saneamento Ambiental, estabeleceu uma série de condições à prestação dos serviços de saneamento, visando, em especial, à universalização do acesso e a continuidade dos serviços. As obrigações e responsabilidades do poder público e dos prestadores de serviço estão claramente definidas, assim como os direitos da sociedade. Após a promulgação da lei, o ambiente tornou-se seguro e transparente propiciando aos investidores públicos e/ou privados aportarem recursos para projetos de infraestrutura. Embora haja legislação, os serviços prestados de saneamento ambiental ainda são caracterizados por diversas falhas institucionais, dentre as quais destaca-se o regime de monopólio que naturalmente não induz a busca da eficiência. Visando fomentar a eficiência e a inovação, alguns estados brasileiros estão intervindo nos serviços prestados através das agências reguladoras que definem regras, controlam e supervisionam as entidades gestoras com objetivo de garantir o equilíbrio tarifário praticado.

O presente capítulo apresenta tecnologias para auxiliar o gerenciamento das infraestruturas urbanas de água. Algumas delas são pautadas em métodos computacionais.

### **TECNOLOGIAS PARA CONTROLE DE PERDAS EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

Os sistemas coletivos de abastecimento de água (SDA) são definidos como sendo uma combinação de tubos, componentes hidráulicos (bombas e válvulas) e estruturas hidráulicas (reservatórios e estações de bombeamento) que são interconectados com propósito de produzir água de boa qualidade e transportar água tratada aos consumidores, em quantidade e qualidade satisfatória.

A inexistência de sistemas estanques de abastecimento faz o gerenciamento de perdas de água se tornar um assunto de alta relevância. Minimizar os volumes perdidos tornou-se o principal desafio dos prestadores de serviços de saneamento. Embora existam vários fatores que elevam aos elevados índices de



perdas, os aspectos técnico/físico, relacionados à infra-estrutura (idade do sistema, material das tubulações, qualidade dos medidores), bem como aqueles associados ao gerenciamento são os principais condicionantes. Além dos prejuízos financeiros (energia, produtos químicos, faturamento), as perdas de água afetam o comportamento operacional dos sistemas (rebaixamento do nível de pressão), impactando diretamente os consumidores. Conceitualmente, a perda de água é calculada pela diferença entre o volume total ofertado ao sistema e o volume total faturado (micromedido). Desse total, atribui-se as perdas reais a parcela de água referente aos vazamentos distribuídos (aqueles que não afloram na superfície) e as perdas aparentes (não físicas ou comerciais) aquela parcela de água associada ao volume de água que não chega aos consumidores devido aos erros de medição nos hidrômetros, as fraudes, a problemas na gestão comercial dentre outros.

A maior dificuldade dos prestadores de serviços então é identificar, em cada setor de fornecimento, os volumes de perdas reais e aparentes. Essa informação é altamente relevante uma vez que ações de controle e correção são diferenciadas dependendo da característica das perdas. Existem ferramentas gerenciais importantes para que o prestador de serviços de saneamento elabore uma estratégia para controle de perdas (plano de controle e ação). É necessário em primeiro lugar seguir algumas etapas para elaboração de uma estratégia para controle de perdas (ckecklist das perdas).

Tabela 1. Etapas para o desenvolvimento de uma estratégia para controle de perdas (Cheung et al. 2009a)

Etapas/Solução	Metodologia
<p>QUANTO de água está sendo perdida?</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificar o sistema de medição (macro e micro)</li> </ul>	<p>BALANÇO HÍDRICO</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pitometria, técnicas para estimação</li> <li>• Procedimentos de calibração de medidores</li> <li>• Verificação contínua de medidores</li> <li>• Melhoria nos procedimentos de leitura</li> </ul>
<p>ONDE a água está sendo perdida?</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Quantificar as perdas reais (vazamentos)</li> <li>• Quantificar as perdas aparentes</li> </ul>	<p>AUDITORIA DE REDES</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estudos de vazamentos (reservatórios de armazenamento, sistemas adução, sistemas distribuição)</li> <li>• Investigações operacionais/clientes</li> </ul>
<p>PORQUE a água está sendo perdida?</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Auditar a infra-estrutura e a operação</li> </ul>	<p>REVISÃO DAS PRÁTICAS DE OPERAÇÃO</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Investigar: razões históricas, práticas deficientes,</li> </ul>
<p>COMO melhorar o desempenho do sistema?</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reabilitar o sistema</li> <li>• Projetar e planejar</li> </ul>	<p>DESENVOLVIMENTO DE ESTRATÉGIA</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Atualizar os registros históricos do sistema</li> <li>• Setorizar o sistema</li> <li>• Introduzir monitoramento de vazamento</li> <li>• Identificar causas de perdas aparentes</li> <li>• Incentivar a detecção de vazamentos e os procedimentos de reparo</li> <li>• Elaborar planos de ação de curto, médio e longo prazo</li> </ul>
<p>COMO SUSTENTAR o desempenho - Garantir a sustentabilidade com equipe apropriada e estruturas organizacionais</p>	<p>PROCEDIMENTOS, TREINAMENTO E MOBILIZAÇÃO SOCIAL</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Treinamento: conscientização, motivação, transferência de habilidades e introdução de melhores práticas nas equipes.</li> <li>• Mobilização Social: envolvimento com a comunidade, programas de conservação da água e demanda.</li> <li>• Monitoramento dos Planos de Ação: introduzir maneiras para monitorar os planos de ação</li> </ul>

As informações coletadas nos sistemas de distribuição bem como as informações lógicas como a partida da bomba, podem ser utilizadas para aumentar o conhecimento do funcionamento do sistema e dessa forma melhor gerenciar a operação dos mesmos. Uma das tecnologias para coleta e tratamento dessas informações é implantar sistemas tipo SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) nos centros de controle operacional (figura 1) com objetivo de monitorar remotamente variáveis relevantes nas estações operacionais do sistema de distribuição de água (nível, estado operação de bomba, pressão, vazão).



Figura 1. Centro de controle operacional (CCO) com sistema SCADA



Figura 2. Macromedidor

### IMPORTÂNCIA DA AFERIÇÃO DE MACROMEDIDORES PARA CONTROLE DE PERDAS

As medições mais usuais em sistemas urbanos de abastecimentos de água são realizadas através de macromedidores (figura 2) e as principais incertezas são relacionadas às medições de vazão (Nisic *et al.*, 2004), é fundamental direcionar as preocupações para tais medidas, de forma a elevar a confiabilidade dos modelos utilizados como base para tomada de decisões. Em tais sistemas urbanos, a macromedição é uma das poucas ferramentas de monitoramento e controle de distribuição, e muitas vezes, não há rotinas de manutenção em tais equipamentos, que podem sofrer danos e obstruções, causando leituras irreais de volumes e vazão. Medições periódicas simples e pontuais poderiam ser realizadas para identificar possíveis problemas de leituras de equipamentos, que são cada vez mais adaptados à armazenagem e transferência de dados, dispensando a presença de operadores, e conseqüentemente, da identificação de erros de medições.

O LENHS UFMS tem atuado no desenvolvimento de procedimentos para aferição de macromedidores. Um estudo de caso foi realizado no município de Campo Grande. Estabeleceu-se quatro setores para análise, nos quais foram efetuadas medições pelo grupo de trabalho, e leituras dos macromedidores, no mesmo período por setor, para efeito de comparação dos resultados. Os setores avaliados foram identificados com setor 1, 2, 3 e 4 para facilitar a apresentação dos resultados, sendo que cada setor possui tubulações com diâmetros nominal de 200mm, 500mm, 600mm e 900mm respectivamente. As medições efetuadas pela equipe localizaram-se em poços de visita próximos dos macromedidores. Para efetuar as leituras de diferença de pressão foi utilizado tubo de pitot acoplado a um sensor de pressão diferencial e um data logger para armazenagem de dados (Figura 3).

Com os dados obtidos foram estabelecidos perfis de velocidade, e determinados os fatores de velocidade (FV), com as respectivas velocidades centrais. Para a determinação da constante da estação pitométrica ( $K_c$ ), necessária ao cálculo da vazão, foram consideradas também as correções de diâmetro, tap e área, com o auxílio de um galgador (Figura 3). As técnicas de instalação, medições e determinações adotadas foram descritas por Frangipani (2005). Em paralelo, realizou-se medição de vazão por aparelho ultrassônico para comparação de valores. Em todos os setores inspecionados, determinou-se o fator de velocidade e outros coeficientes para a determinação da vazão nos pontos estabelecidos. Os perfis característicos das velocidades dos setores são apresentados na Figura 4.



Figura 3. Instalação do tubo de pitot e determinação de diâmetro interno.

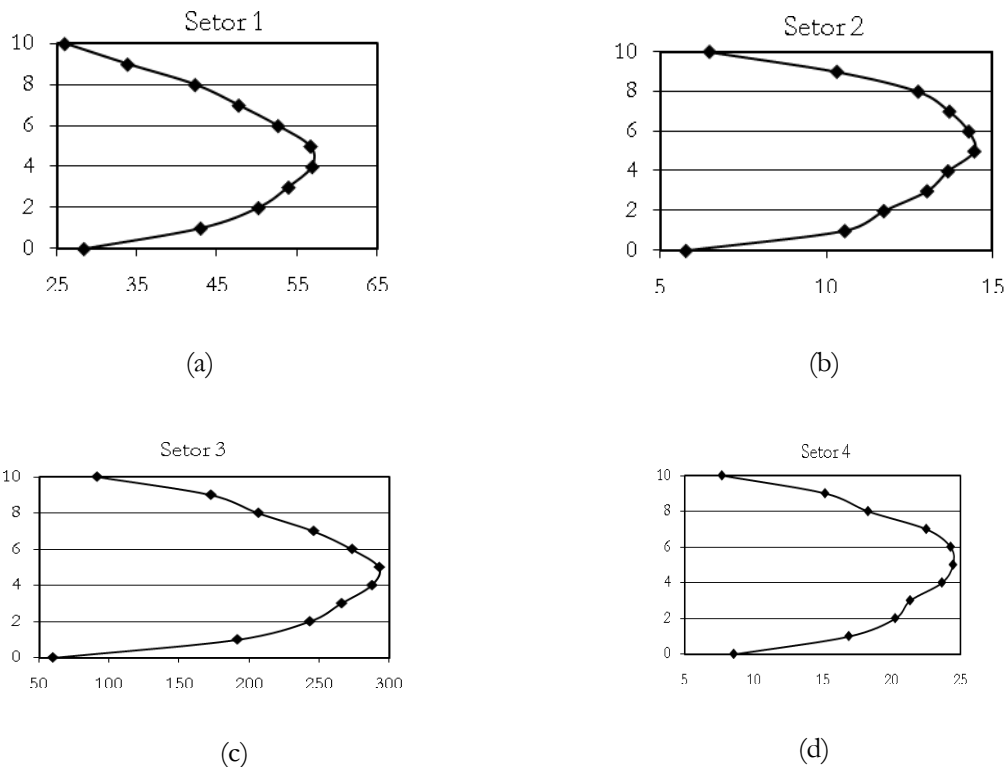


Figura 4. Perfis de Velocidade dos setores inspecionados.

Nos setores 2 e 4 foram constatados que a parte mecânica dos macromedidores havia sido retirada para conserto, em função de defeitos observados, sendo a vazão medida pela tubulação, por aparelho ultrassônico. A Figura 5 evidencia a comparação entre os valores de volume e vazão obtidos nos setores. Foi constatado que o macromedidor do setor 1 de fornecimento de água se apresentava travado e registrava a vazão em apenas pequenos períodos de tempo deixando de medir a maior parte do volume de água distribuído na região. Os índices de produção neste setor estavam sendo minimizados e, conseqüentemente, os índices de perdas da mesma forma, estavam sendo subestimados. Portanto, foi identificado um erro de 94,77% na aferição pontual do setor.

No setor 2, houve uma diferença de 0,03 % com relação ao método utilizado para aferição dos macromedidores. Esta informação foi relevante para constatar que a metodologia adotada se mostrou adequada ao objetivo proposto. A aferição do macromedidor de entrada de água da estação de tratamento do setor 3, demonstrou uma diferença de 0,82% na medição, aceitável em aferições de macromedidores, o que indicou o bom estado de operação do macromedidor. Finalmente, no setor 4, não foi possível comparar os valores de vazão e volume, uma vez que as medições foram realizadas em períodos distintos.

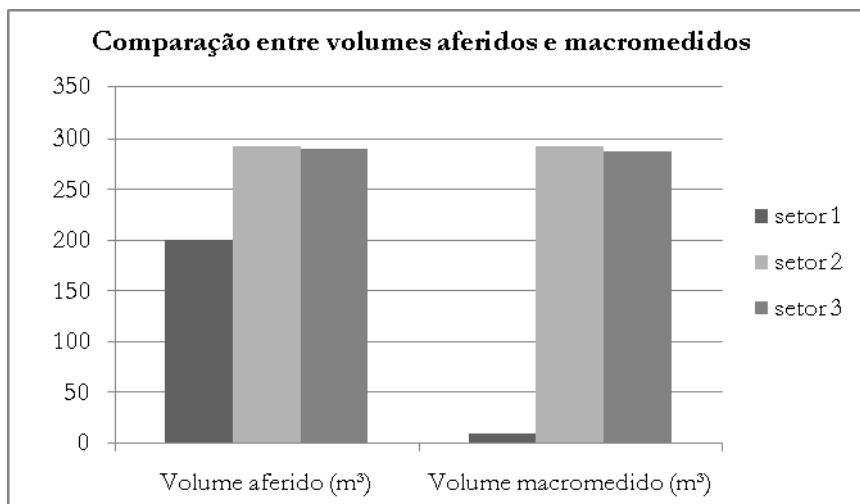


Figura 5. Comparação entre os volumes obtidos e registrados pelos macromedidores.

### TÉCNICAS PRÁTICAS PARA ESTIMAÇÃO DE PERDAS REAIS EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO

As perdas reais em sistemas coletivos de abastecimento de água podem ser estimadas através de ensaios de campo ou através de procedimentos computacionais. O método das vazões mínimas noturnas é baseado na variação dos consumos ao longo do dia e parte do pressuposto que no período entre 2h às 4h a demanda é mínima e as caixas d'água já estão completas. A vazão registrada (Figura 6) nesse período, denominada "Vazão Mínima Noturna", corresponde então aos vazamentos. Partindo-se des sa lógica, a estimacão do volume de vazamentos diários poderia ser obtida pela multiplicacão da vazão mínima noturna pelo número de horas do dia (24 h). Como os vazamentos são sensíveis à pressão, o resultado obtido estaria supervalorizando os volumes diários perdidos. Para solucionar esse erro, foi criado o "Fator Noite/Dia" (FND), que é um número, dado em horas por dia, que multiplicado pela Vazão Mínima Noturna, resulta no Volume Médio Diário dos Vazamentos. Os detalhes desta técnica são obtidas em Cheung et al. (2009a).



Figura 6. Medidores de vazão (ultra-sônico e medidor diferencial/pitot)

A metodologia acima mencionada foi aplicada em dois sistemas reais de distribuição de água nos quais são denominados PILOTO 1 e PILOTO 2. O FND, obtido no setor PILOTO 1 foi de 19,12. A vazão mínima noturna média do PILOTO 1, durante o período das 3h00min às 4h00min, foi de 2,8 m³/h. Com isso, foi possível calcular o Volume Diário de Perdas Reais igual a 53,54 m³/dia. A Figura 7 apresenta as vazões mínimas noturna no setor PILOTO 2 (Girol, 2008). Essas vazões foram monitoradas através de sensores diferenciais de pressão acoplados a tubos de Pitot e de medidores de vazão ultrassônico. A vazão mínima noturna média do PILOTO 2 foi de 6 L/S (21,60 m³/h). Com isso, foi possível calcular o Volume Diário de Perdas Reais igual 480 m³/dia sendo o FND igual a 22,26 h/dia.

Comparando-se os sistemas PILOTO 1 e PILOTO 2 (Tabela 2) e aplicando-se o Indicador de Perda Real por Ligação observa-se que o sistema PILOTO 2 é menos eficiente que o sistema PILOTO 1.

#### PILOTO 1

População atendida: 2000  
 Extensão total das tubulações: 6,7 km  
 Diâmetro das tubulações: 20 à 100 mm  
 Número de ligações (ramais): 470  
 Volume macromedido: 230 m<sup>3</sup>/dia  
 Volume micromedido: 156 m<sup>3</sup>/hab/dia  
 Consumo per capita: 78 l/hab/dia

#### PILOTO 2

População atendida: 5656  
 Extensão total das tubulações: 9,7 km  
 Diâmetro das tubulações: 50 à 150 mm  
 Número de ligações (ramais): 1414  
 Volume macromedido: 1085 m<sup>3</sup>/dia  
 Volume micromedido: 579 m<sup>3</sup>/dia  
 Consumo per capita: 102 L/hab/dia

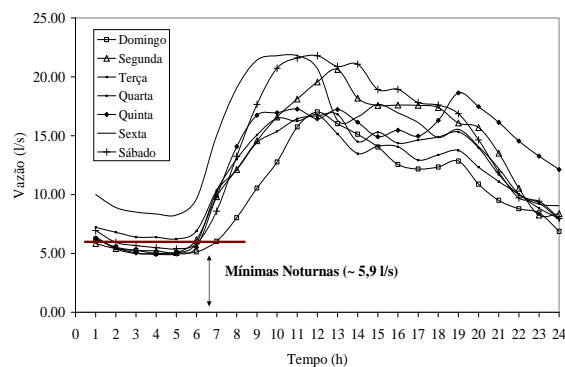


Figura 7. Vazão macromedida setor PILOTO 1 (Cheung, et al. 2009a)

Tabela 2. Estimativa das perdas reais por ligação para os diferentes setores (Girol, 2008)

PILOTO 1	PILOTO 2
114 l/lig/dia	340 l/lig/dia

Um parâmetro importante na estimativa de vazamentos através das mínimas noturnas é o valor de  $N_1$ . Para regiões com tubulações em PVC, Girol (2008) encontrou valores de  $N_1$  no intervalo de 1,23 a 1,74 para pressões variando de 20 mca a 45 mca, respectivamente.

## TÉCNICAS COMPUTACIONAIS PARA AUXILIAR O GERENCIAMENTO DE PERDAS EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO

A aplicabilidade dos modelos computacionais que simulam o comportamento hidráulico das redes de distribuição depende da confiabilidade dos dados de entrada. Partindo do pressuposto que o cadastro e o consumo estão corretos, os erros nas simulações são atribuídos aos parâmetros hidráulicos: rugosidade das tubulações e parâmetros de vazamentos (coeficiente emissores e expoentes). Um procedimento simples que se faz para saber se o modelo representa a situação de funcionamento real é comparar dados observados em campo com aqueles simulados através do modelo. Os valores observados são obtidos através da instalação de equipamentos de medição (Figura 6) em alguns pontos do sistema. Em grande parte dos casos, quando as séries observadas e simuladas são comparadas, observa-se que existem diferenças. Esses desvios estão associados aos parâmetros físicos do sistema que mudaram ao longo do tempo e se transformam em fontes de incertezas. A ideia então é ajustar os parâmetros variáveis do sistema (rugosidades, demandas, coeficientes do modelo pressão-vazamento) no sentido de forçar que valores simulados se aproximem dos observados em campo.

O Epanet é um programa computacional que permite realizar simulações estáticas e dinâmicas de sistemas de distribuição de água. Para isso, é necessário representar o sistema através de modelos que

agregam as informações físicas do sistema (topografia, comprimentos e diâmetros de tubulações, coeficientes de rugosidade, consumos nos nós, níveis dos reservatórios). Nas simulações estáticas, todas as demandas e operações são tratadas como constantes no tempo e uma única solução é obtida. Nas análises dinâmicas, consideram-se variações nas demandas, nos níveis de reservatórios e nas condições operacionais e, com isso, é possível obter uma série de soluções.

O Epanet Calibrator (Abe e Cheung, 2009) é uma ferramenta computacional desenvolvida no *front-end* do Epanet para possibilitar a calibração de modelos. O procedimento se inicia através da alimentação do modelo com dados observados em campo. Isso é feito clicando no botão *i* (informação). Após isso, pode-se classificar os grupos de tubulações que possuem semelhança (material ou idade). Após a inserção dos dados observados e criação das regiões desejadas, basta inserir os dados de otimização para que a rede seja calibrada automaticamente.

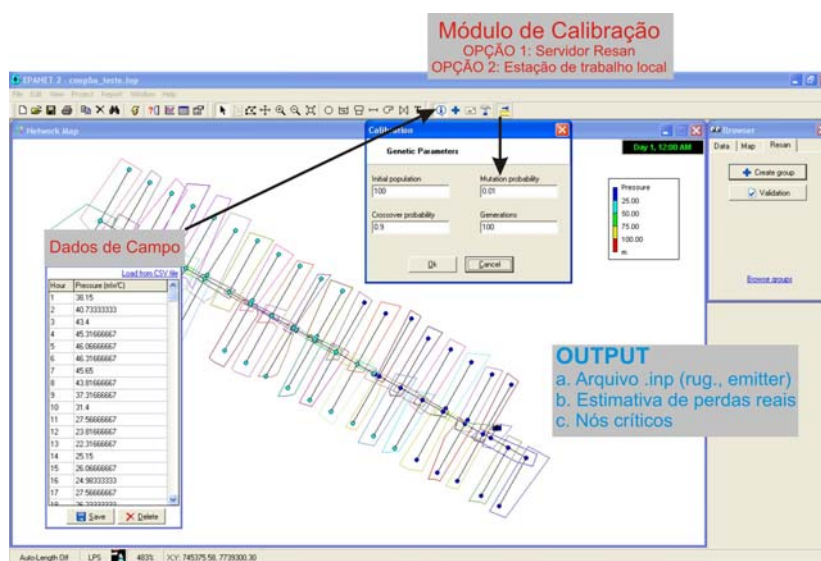


Figura 9. Epanet calibrator

A aplicação foi efetuada em um setor real com 59 km de comprimento de rede (597 trechos) e 3700 m<sup>3</sup> de vazão diária. O setor possui tubulações com diâmetros de 50, 75, 150 e 200mm e foi dividido em 13 grupos. Foram utilizados dois pontos de pressão e um ponto de vazão. A vazão foi medida na saída do reservatório. Os valores dos expoente de vazamentos permitem indicar áreas críticas (Figura 10).

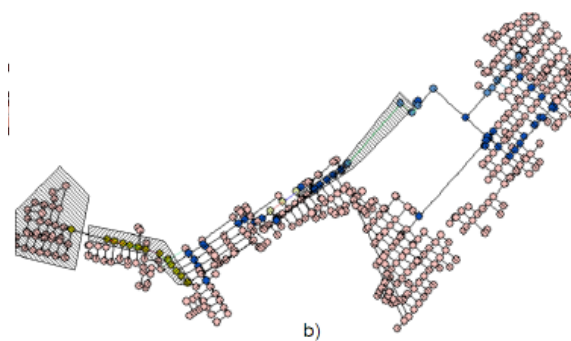


Figura 10. Epanet calibrator

Cheung et al. (2009b) aplicou o Epanet Calibrator para estimar perdas reais em sistemas de abastecimento de água em dois municípios brasileiros. Além disso, comparou os valores de perdas estimadas pela técnica de calibração com o método das mínimas noturnas. A principal conclusão do trabalho foi que a técnica de calibração para estimar perdas por vazamentos tende a superestimar os



vazamentos, entretanto sua principal vantagem é a possibilidade de identificar os possíveis locais de vazamentos (Figura 10).

## IMPACTO DAS PERDAS NO CONSUMO DE ENERGIA

Para avaliar a relação entre as perdas reais e o consumo de energia dos sistemas elevatórios, utilizou-se o modelo computacional de um setor piloto do sistema de distribuição de água do município de Campo Grande, Mato Grosso do Sul. Este setor foi escolhido por ser isolado do restante do sistema de distribuição do município e por apresentar, atualmente, pontos de monitoramento de pressão e vazão, cujos dados gerados possibilitaram a calibração do modelo de forma que o mesmo representasse, aproximadamente, a operação real do sistema. O modelo do setor piloto foi construído no software de modelagem e simulação hidráulica EPANET. A Figura 11 mostra o modelo do sistema de distribuição estudado. Nas simulações, utilizou-se a unidade de vazão em L/s e a fórmula de Darcy-Weisbach para o cálculo da perda de carga. Os demais parâmetros hidráulicos foram preenchidos com os valores padrão do EPANET.

O setor de distribuição avaliado foi modelado, basicamente, como um reservatório que fornece água a rede de distribuição. Para sua construção foram utilizados dados de micromedição (volume faturado junto ao consumidor final) e das características físicas do sistema (cota dos nós, comprimento e diâmetro das tubulações), fornecidos pela prestadora de serviço de água do município, além de dados medidos em campo, como a variação da lâmina d'água no interior do reservatório, a vazão de saída do reservatório e a pressão em quatro pontos da rede de distribuição (figura 11, b). O período de simulação do modelo é de 24 horas, e representa o comportamento do sistema em um dia típico de operação.

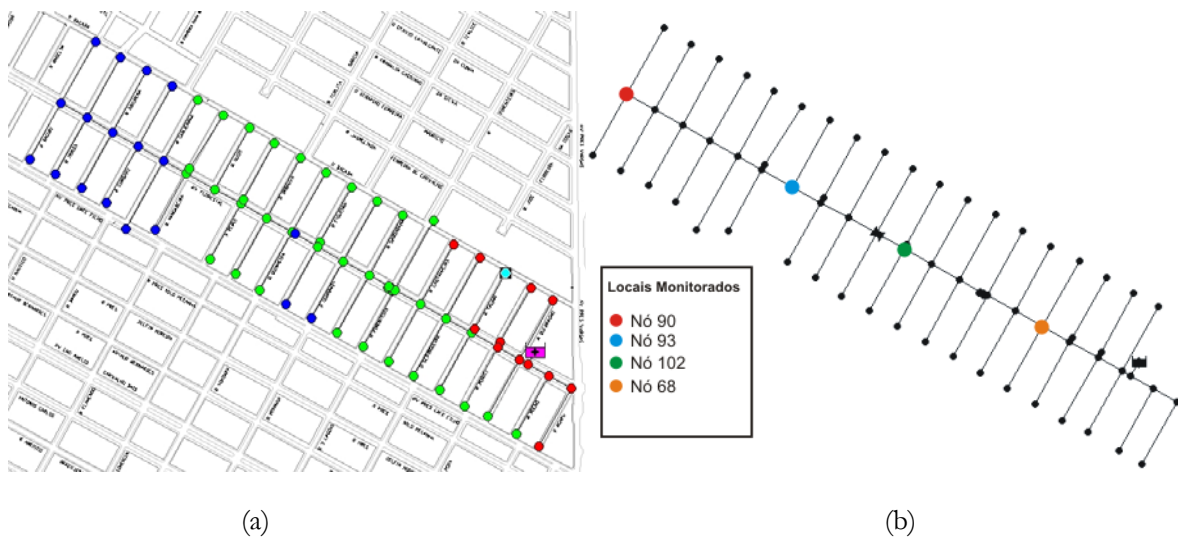


Figura 11. (a) Modelo do sistema de distribuição no EPANET; (b) Pontos de monitoramento da pressão.

Foram realizadas adaptações no modelo original (Figura 11 b) com o intuito de avaliar o impacto de diferentes cenários de perdas reais sobre o consumo de energia do conjunto elevatório para duas concepções hipotéticas e distintas de bombeamento, conforme mostram as figuras 12 e 13:

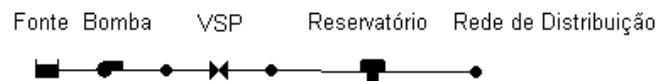


Figura 12 – Bombeamento para reservatório de distribuição (concepção 1).

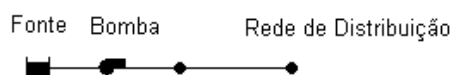


Figura 13 - Bombeamento direto na rede de distribuição (concepção 2).

Esta adaptação foi feita porque o sistema de distribuição foi modelado como um reservatório de nível fixo que abastece uma rede de distribuição. Desta forma, a aplicação de um balanço hídrico no reservatório, após a variação das perdas reais na rede de distribuição, resultaria tão somente numa variação do volume de água na entrada do reservatório. Como não se dispunha de dados referentes às características e operação do sistema elevatório real, julgou-se necessária tal modificação.

Para a concepção 1, adotou-se um reservatório de distribuição com 6,43 m de diâmetro de base, alimentado por uma bomba de rotação constante. Estipulou-se, também, a altura de 1,68 m e 5,60 m como sendo, respectivamente, os níveis mínimos e máximos de operação do reservatório, os quais correspondem ao volume útil de 30% e 95%. Para o tempo inicial de simulação (0:00 h) foi considerada a altura de lâmina d'água de 2,46 m, a qual corresponde ao nível d'água verificado no modelo original, neste mesmo tempo.

O ponto de operação da bomba foi determinado por tentativa e erro, de forma que a vazão e a energia fornecida pela bomba fossem suficientes para vencer o desnível geométrico mais as perdas de carga, e proporcionassem um PRD (quando aplicado o respectivo CE em todos os nós da concepção 1) e uma pressão no nó mais desfavorável próximos dos valores encontrados no modelo original. Por fim, a curva da bomba foi traçada pelo próprio EPANET a partir do ponto de operação fornecido.

Também foi estipulada a operação da bomba (ligamento e desligamento), a partir da ferramenta de “controle simples” fornecida pelo EPANET. Cada vez que o nível de água do reservatório atingisse o nível mínimo ou máximo de operação, a bomba era, respectivamente, acionada ou desligada.

Já a válvula sustentadora de pressão (VSP) foi utilizada, neste caso, somente como um artifício de modelagem para simular a entrada “por cima” no reservatório, mantendo o ponto de operação da bomba constante durante o seu funcionamento.

Para a concepção 2 também foi utilizada uma bomba de velocidade constante, cujo ponto de operação foi determinado de forma análoga ao da concepção 1, e a partir do qual foi traçado a curva da bomba pelo próprio EPANET.

A área sob a curva do hidrograma de saída do reservatório (figura 2), resultou em um volume de entrada no sistema igual a 1.059,55 m<sup>3</sup>, para o período de análise considerado. Este volume de entrada, juntamente com o volume micromedido (estimado a partir de dados mensais de micromedição fornecidos pela empresa) e o volume de perdas reais do sistema (estimado a partir da equação 1), foi utilizado como dado de entrada da matriz de balanço hídrico (Tabela 3), a qual apresenta o diagnóstico das perdas de água no sistema atual.

Tabela 3 – Balanço hídrico do sistema atual, para um dia típico de operação.

Água que entra no sistema: 1059.55 m <sup>3</sup>	Consumo autorizado: 420.77 m <sup>3</sup>	Consumo autorizado faturado: 420.77
		Consumo autorizado não faturado: 0
	Perdas de água: 638.78 m <sup>3</sup>	Perdas aparentes: 14.04 m <sup>3</sup>
		Perdas reais: 624.74 m <sup>3</sup>

Os dados obtidos no balanço hídrico revelam que o sistema atual possui um índice de perda real na distribuição (PRD) de aproximadamente 59%, ou seja, a cada 100 L de água que entra no sistema, 59 L são perdidos através de vazamentos. A tabela 4 apresenta os valores de CE que, quando aplicados em todos os nós do sistema resultam, nos PRD's avaliados.

As curvas características dos sistemas elevatórios da concepção de bombeamento 1 e 2 são mostradas na Figura 14. Elas foram traçadas pelo próprio EPANET a partir dos seguintes pontos de operação: concepção 1 (21 L/s, 21 m) e concepção 2 (21 L/s, 15 m). Os erros médios, em relação à situação original, resultantes da adoção destes pontos de operação são mostrados na Tabela 5.



Os valores apresentados na Tabela 5, mostram que as modificações feitas tanto na concepção 1 quanto na concepção 2, em relação ao sistema original, não provocaram uma mudança significativa no PRD do sistema e na pressão do nó 70. O valor de erro mais elevado (7,29 %), encontrado na análise da pressão do nó mais desfavorável, decorre do fato de que nesta concepção o reservatório foi modelado de forma a operar com lâmina d'água variável, ao contrário do reservatório de lâmina d'água fixa utilizado no modelo da situação original.

Tabela 4 – Relação entre CE e PRD

CE	PRD (%)
0.0040	25.45
0.0130	50.11
0.0190	58.75
0.0450	75.13

Tabela 5 – Erro relativo médio das concepções de bombeamento avaliadas, em relação ao sistema original

Parâmetro		PRD	Pressão nó 70
Erro Relativo Médio	Concepção1	0.10 %	7.29 %
	Concepção2	0.15 %	0.70 %

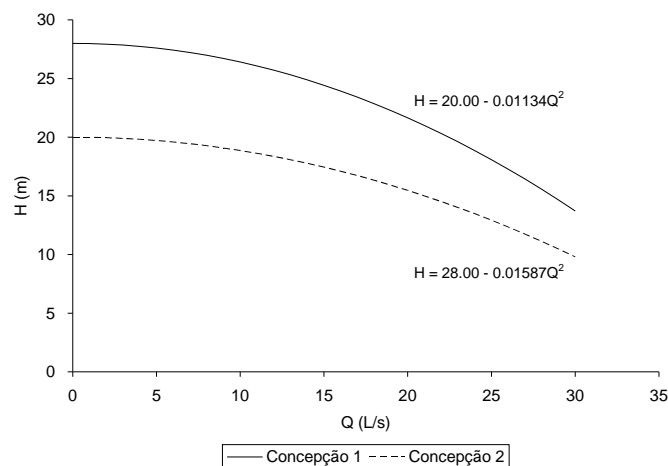


Figura 14 – Curvas características das bombas.

A Figura 15 apresenta a potência consumida pelo conjunto elevatório de cada uma das concepções avaliadas, para os diferentes cenários de perdas reais. Da figura 14 observa-se que para os diferentes cenários de perdas reais avaliados na concepção 1, a potência consumida pelo conjunto elevatório depende somente do número de vezes que o mesmo é acionado e de seu tempo de funcionamento. Ainda para esta concepção, a figura 15 também mostra que somente para o PRD igual a 75 % a bomba operou continuamente durante todo o período de simulação (24 horas). Nota-se, portanto, que quanto maior o PRD, ou seja, quanto maiores as perdas reais no sistema, maior é o tempo de funcionamento do conjunto elevatório e, conseqüentemente, maior é a quantidade de energia consumida pelo mesmo.

Já na segunda concepção de bombeamento, o conjunto motor-bomba operou de forma contínua para todos os cenários de perdas reais, para o período de simulação considerado. A Figura 15 mostra que a potência consumida pelo conjunto elevatório aumenta com o incremento do PRD do sistema. É importante notar que a distância entre as curvas de potência tende a aumentar com o aumento dos PRD's, mostrando que variações no PRD do sistema, caso o mesmo encontre-se em uma faixa de valores

elevados (maiores que 50%), resulta em uma maior variação do consumo de energia do sistema de bombeamento. O consumo de energia das duas concepções avaliadas, para os diferentes cenários de perdas, é mostrada na Figura 16.

Pela Figura 15 observa-se que, para ambas as concepções, o consumo de energia elétrica aumenta com o aumento das perdas reais do sistema. Para todos os cenários de perdas reais avaliados, o consumo de energia da concepção 1 foi maior do que o da concepção 2, embora a diferença mais significativa tenha ocorrido no cenário correspondente a um PRD igual a 75%. Assim, para este sistema e considerando-se somente este parâmetro (consumo de energia elétrica), o bombeamento direto na rede mostrou-se a opção de concepção mais vantajosa.

A Figura 16 apresenta a variação no consumo de energia resultante da mudança do cenário de perdas reais, em relação ao PRD verificado no diagnóstico do sistema atual (59%). Observa-se que a redução do PRD de 59% (situação atual) para 50%, resulta em uma economia no consumo de energia da ordem de 15% para ambas as concepções. Esta economia pode chegar a 38,5% e 42,2%, para as concepções 1 e 2, respectivamente, caso as perdas reais do sistema sejam reduzidas para um patamar de PRD igual a 25. Por outro lado, um aumento das perdas reais no sistema, que pode estar associado ao envelhecimento dos materiais, má execução de obras e operação inadequada (elevadas pressões e manobras no sistema), provoca um incremento significativo no consumo de energia do conjunto elevatório, chegando a alcançar os valores de 84.6 % (concepção 1) e 39.1 % (concepção 2), para um PRD de 75% .

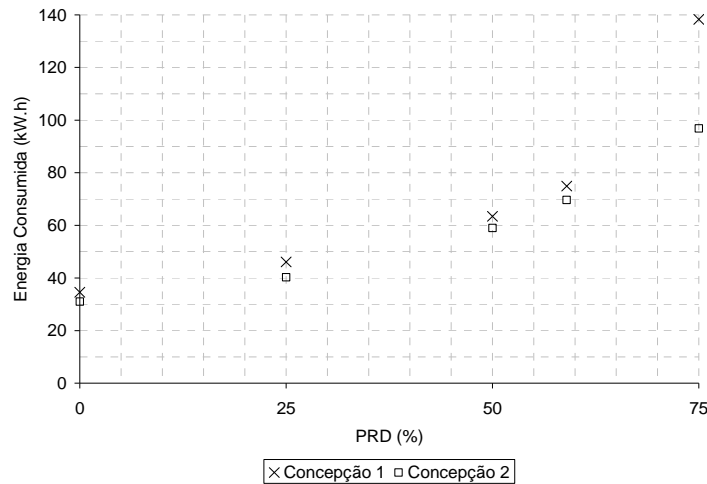


Figura 15 – Consumo de energia para diferentes cenários de perdas reais.

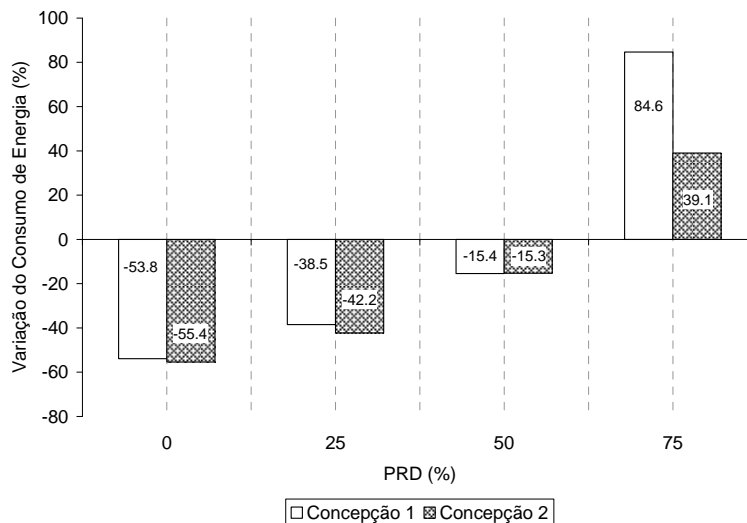


Figura 16 – Variação no consumo de energia em relação situação atual (59%).

A Figura 17 apresenta o consumo específico de energia do conjunto elevatório de cada uma das concepções propostas, para cada um dos cenários de perdas reais avaliados. Da figura 17, observa-se que o consumo específico de energia (CEE) da concepção 1 foi maior do que o da concepção 2 em todos os cenários de perdas reais avaliados. Entretanto, não se pode afirmar que a concepção 2 apresenta um melhor desempenho energético do que a concepção 1, uma vez que este indicador não é recomendado para comparar estações de bombeamento distinta.

A Figura 17 também revela que este indicador não se mostrou sensível aos diferentes cenários de perdas reais avaliados na concepção 1, permanecendo constante para os diferentes valores de PRD's. Já na concepção 2, os valores do indicador diminuiu com o aumento das perdas reais no sistema, ou seja, o sistema apresentou, segundo este indicador, um melhor desempenho energético para o cenário de maior valor de perdas reais. Assim, a utilização deste indicador para a análise do desempenho energético dos conjuntos elevatórios de um sistema, em diversos cenários de perdas reais, deve ser visto com reservas, uma vez que ele não mostra a parcela de energia desperdiçada alimentando-se vazamentos.

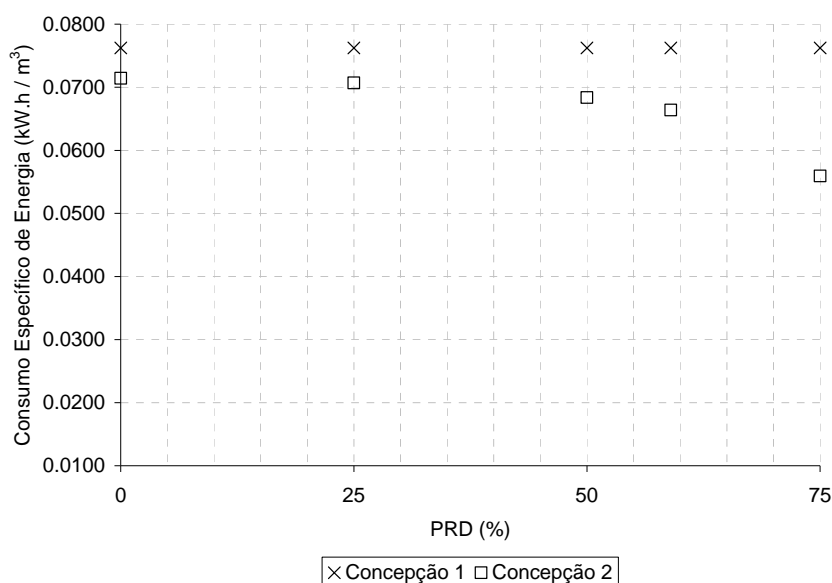


Figura 17 – Consumo específico de energia elétrica.

## TÉCNICAS COMPUTACIONAIS AUXILIAR O CONTROLE OPERACIONAL DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO

Modelos de simulação hidráulica podem ser utilizados na análise de planos estratégicos de desenvolvimento como: a modificação do funcionamento operacional de grupos elevatórios e reservatórios para minimização de custos energéticos e tempos de percurso; para planejar e melhorar o desempenho hidráulico de um sistema, seja no projeto, ou na operação diária, ou no estudo de cenários de emergência; na modelação de bombas de velocidade constante ou variável; no cálculo da energia de bombeamento e do respectivo custo; na modelação de dispositivos para os quais a vazão dependa da pressão no nó; na configuração das condições de operação do sistema em controles simples, dependentes de uma só condição (período do dia, altura de água num reservatório de nível variável) ou em controles com condições múltiplas (desligar/ligar a bomba e abrir/fechar a tubulação de by-pass, quando a altura de água no reservatório de nível variável está acima ou abaixo de um determinado valor especificado).

Diante desse problema, de objetivos múltiplos e conflitantes, muitas técnicas de otimização multiobjetivo vêm sendo utilizadas para a operação ótima dos sistemas de abastecimento de água. Destacam-se, entre essas técnicas, os Algoritmos Evolucionários Multiobjetivo (AEMO), os quais apresentam facilidades de aplicação, principalmente, em problemas complexos com objetivos múltiplos nos quais os métodos convencionais se tornam desvantajosos.

Um sistema adutor de água tratada, tal como ilustrado na Figura 18, é composto de estações elevatórias, tubulações e reservatórios. O procedimento para uma efetiva operação deste sistema deve visar a minimização dos custos operacionais, mantendo a operação das bombas de forma estável, além de garantir uma alta confiabilidade do sistema, através da manutenção dos níveis de água nos reservatórios próximos dos máximos.

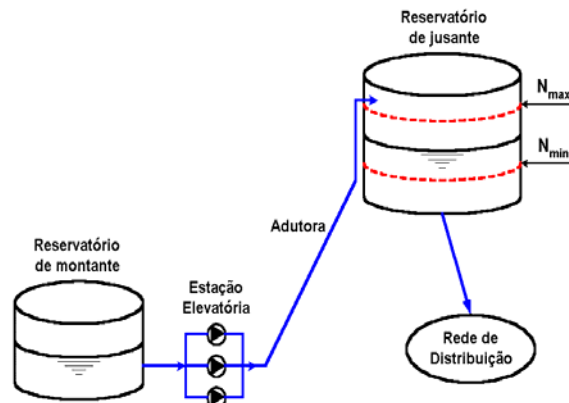


Figura 18 – Sistema de Adução Simples

A eficiência energética pode ser definida como a capacidade de realizar um serviço e/ou produzir um bem com uma quantidade de energia inferior à que era usualmente consumida, sem que isso prejudique sua qualidade, conforto e eficiência. Baseando-se neste conceito, a eficiência energética é maximizada mediante a redução dos custos relativos ao consumo energia elétrica nas estações elevatórias de água. Por outro lado, a confiabilidade hidráulica tende a buscar soluções com maior pressão, de forma que, ao ocorrer uma falha, o sistema possua pressão suficiente para suprir a demanda. Pode-se definir a confiabilidade como a capacidade do sistema de atender as demandas dos usuários com um nível aceitável de interrupção, independente das condições anormais que possam ocorrer. As funções objetivo estudadas foram:

- Custos de fornecimento de energia elétrica onde foram avaliados os custos de consumo de energia, de demanda de potência e de ultrapassagem de potência segundo o estabelecido na Resolução ANEEL N° 456
- Confiabilidade hidráulica ( $f_2$ ), que considera os níveis adequados de água nos reservatórios.

A otimização realizada para um período de um dia, dividido em 24 horas e da seguinte forma:

$$FO = \text{Min} | f_1 | + \text{Max} | f_2 | \quad (\text{eq. 1})$$

O modelo foi aplicado a uma parte do sistema adutor de um município, tendo-se diversos planos ótimos de operação (frentes Pareto) para as bombas com custos mínimos de energia e alta confiabilidade hidráulica em um horizonte de 24 horas, tal como é apresentado na Figura 18. O gráfico da Figura 19 reúne todas as frentes Pareto obtidas a partir de uma população inicial de 300 e 1000 gerações.

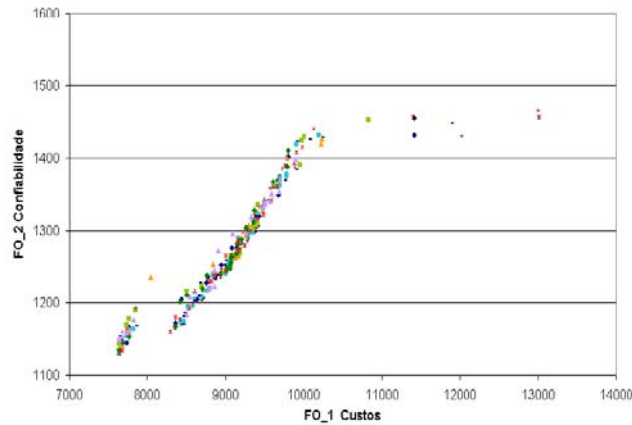


Figura 19 – Frentes Pareto (Bardales et al., 2007)

A Figura 20 apresenta os resultados obtidos após a aplicação do conceito de não-dominância. São apresentadas as melhores estratégias operacionais que atendem os objetivos traçados. Cada ponto representa uma regra operacional ótima para o sistema ao longo de 24 horas de funcionamento, fornecendo opções para que o responsável pela operação do sistema adote uma estratégia operacional segundo as necessidades do sistema.

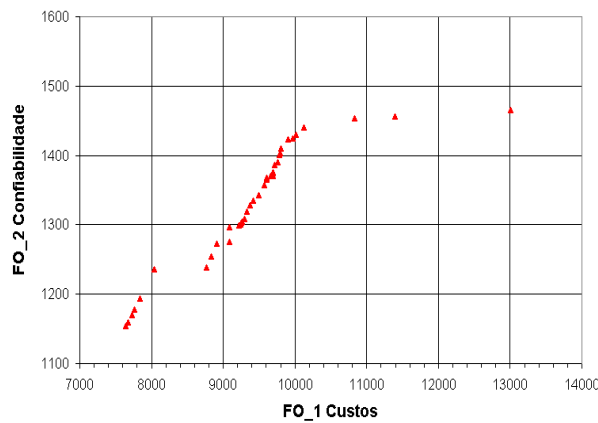


Figura 20 – Frente Pareto não Dominada

A Figura 21 apresenta três soluções obtidas do gráfico da Figura 20, nela são detalhadas as regras operacionais de funcionamento das bombas em um horizonte de 24 horas.

Hora	1		2		...	23		24		FO_1	FO_2
Bomba	B1	B2	B1	B2	...	B1	B2	B1	B2		
Solução 1	0	0	0	0	...	0	0	0	0	7639.53	1154.15
Solução 2	1	0	1	0	...	0	0	0	0	9416.11	1335.36
Solução 3	1	0	0	0	...	1	0	1	0	13007.9	1465.86

Figura 21. Detalhamento de soluções extremas e meia.

### LOCALIZAÇÃO DE VÁLVULAS REDUTORAS DE PRESSÃO E A RELAÇÃO COM VAZAMENTOS

Os vazamentos produzem efeitos negativos tanto do ponto de vista econômico como operacional. Sistemas de distribuição de água com vazamentos precisam de maior energia de bombeamento para compensar as perdas de pressão e aumentam o risco de intrusão de contaminantes, caso as pressões de operação encontrar-se abaixo do mínimo recomendado, comprometendo assim a qualidade da água

distribuída. Com frequência, o controle de perdas envolve altos investimentos de capital para reabilitação do sistema ou para combater a deterioração de estruturas. Embora não forneça uma resposta eficaz ao problema de perdas de água, a otimização de um sistema hidráulico de abastecimento, orientada ao controle de pressões, pode resultar em um conjunto de procedimentos a serem implantados para efetivamente diminuir o nível dos vazamentos, os custos de energia associados e dessa forma melhorar as condições do serviço.

O trabalho de Perez, A. M. E. A. (2008) apresenta uma metodologia para localização ótima de válvulas redutoras de pressão, como solução alternativa ao controle de pressão, baseada na técnica de otimização multiobjetivo. Nela são estabelecidos objetivos para determinação, de maneira ótima, do número, da localização e da configuração de válvulas redutoras de pressão em um modelo de sistema de distribuição de água, visando a minimizar os vazamentos e maximizar confiabilidade hidráulica e eficiência energética através do índice de resiliência.

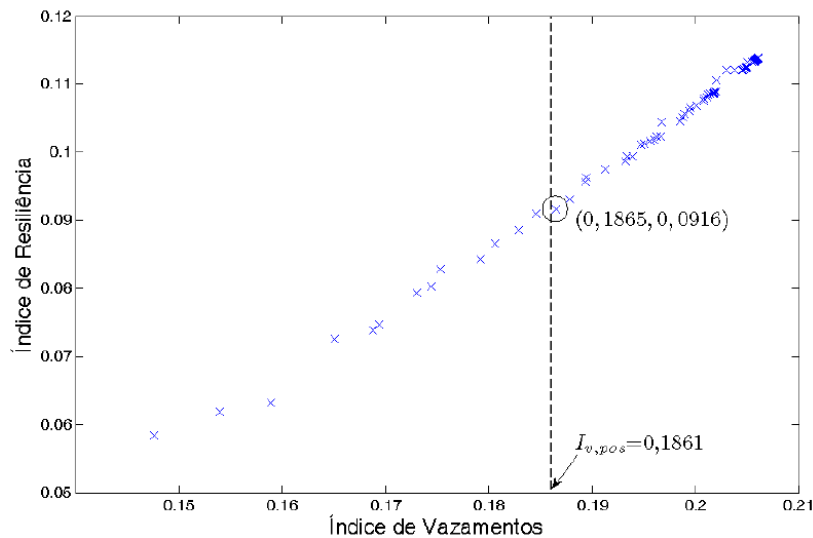


Figura 22. Conjunto de possíveis soluções (posicionamento de válvulas) que relacionam vazamentos e eficiência energética (resiliência).

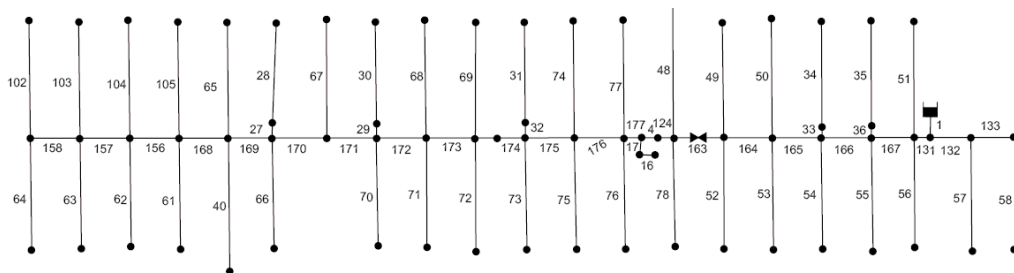


Figura 23. Localização ótima da válvula (trecho 163) que considera respectivamente níveis mínimos e máximos de vazamentos e eficiência energética.

A metodologia foi aplicada na sistema PILOTO 1 (Figura 11). Na primeira parte do processo, escolhe-se a meta de vazamentos que se quer atingir (Figura 12). Após esse processo, aplica-se o módulo de otimização multiobjetivo para localização ótima das VRP's.

## AUDITORIAS ENERGÉTICAS

A energia elétrica tem representado um custo crescente para os prestadores de serviços de abastecimento de água e de esgotamento sanitário no Brasil. Para a elaboração de um Plano de Uso Racional de Energia no Saneamento, faz-se necessário realizar preliminarmente uma auditoria energética

que consiste na identificação e na quantificação da realidade energética do sistema. Após isso, estabelecem-se as prioridades e as intervenções de melhoria (cumprimento de metas do plano). A auditoria energética é uma etapa que permite responder as seguintes questões:

- Quanto de energia está sendo consumida?
- Quem está consumindo energia?
- Como está sendo consumida energia, com qual eficiência?

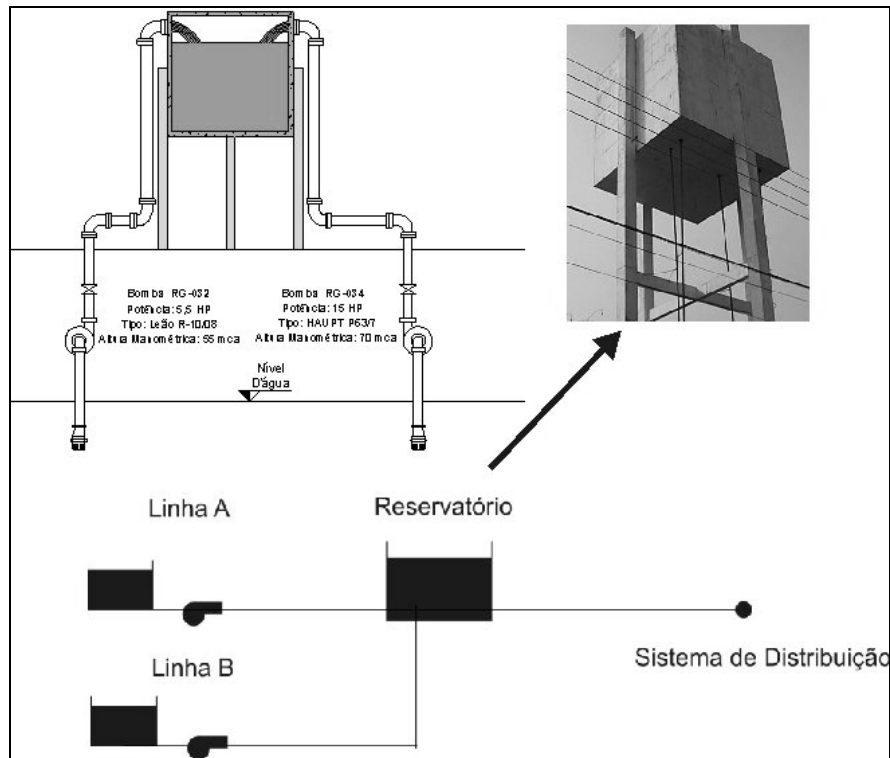


Figura 24. Concepção do sistema de bombeamento do setor piloto

O LENHS UFMS contemplou a investigação das relações entre perdas reais e consumo de energia elétrica no sistema PILOTO 1 (Figura 11). Para isso, a equipe aplicou técnicas de análise energética em um sistema experimental piloto. Os objetivos delineados para esta investigação foram:

- Identificar e caracterizar o sistema elevatório do sistema piloto;
- Quantificar o consumo de energia no sistema piloto;
- Construir indicadores de desempenho do sistema piloto.

### **CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA ELEVATÓRIO**

O reservatório do referido setor é abastecido por duas linhas de recalque, respectivamente Linha A e Linha B (Figura 24), ambas realizam captação de água subterrânea. O cálculo dos parâmetros elétricos foi realizado com o uso de analisadores de energia (Figura 25). Para o cálculo da curva característica das bombas foram realizadas manobras nas válvulas na linha de recalque, obtendo os pontos necessários para o levantamento da curva, obtendo as alturas manométricas de elevação (Linha A = 53.4 mca e Linha B = 68.8 mca). A Figura 26 representa a variação da vazão e da potência da bomba (Linha B) em relação ao tempo. A Tabela 6 apresenta os dados das bombas.



Figura 25. Analisador de energia instalado no quadro elétrico do conjunto motor bomba do setor piloto

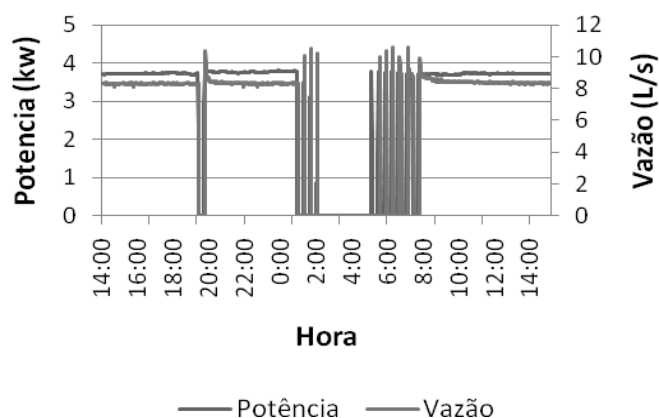


Figura 26 – Comportamento da vazão e potência no sistema piloto, em um período de 24 horas

Tabela 6 – Dados das bombas do sistema piloto

CÓDIGO DO POCO	VAZÃO MEDIA	ALTURA (m.c.a)	TIPO DE BOMBA	POT.
	(m <sup>3</sup> /h)		Marca/Mod./Estágios	kW
Linha A	11.60	53.4	LEÃO R-10/08	2.69
Linha B	29.50	68.8	HAUPT P63 / 7	3.70

Uma forma de avaliar a potencialidade de melhoria na eficiência energética de um sistema é a partir da construção de indicadores de eficiência, que podem ser usados para comparar a eficiência energética de sistemas e cenários distintos. A Tabela 7 apresenta os resultados dos índices de eficiência energética para o período de 24 horas do setor Piloto. Observa-se que o conjunto motor-bomba do recalque B está com fator de potência abaixo (0,68) do recomendado (0,92).

O Consumo Específico de Energia Elétrica (CE). é um indicador de desempenho passível de comparação à padrões estabelecidos internacionalmente. Para a composição deste indicador são necessários registros de grandezas físicas durante o mesmo período de tempo. Para o cálculo do CE, faz-se:

$$CE = \frac{P_a \times t}{V} \text{ (kWh / m}^3\text{)} \quad (\text{eq. 2})$$

onde  $P_a$  é a potência elétrica medida (kW);  $t$  é o tempo de bombeamento (h) e  $V$  é o volume bombeado (m<sup>3</sup>).

O Consumo Específico Normalizado de Energia Elétrica (CEN) é um indicador que leva em consideração as diferentes topologias de sistema de abastecimento de água. A *International Water Association* (IWA) tem adotado o CEN para comparar o desempenho de sistemas. Este indicador reduz as alturas manométricas (H) de diferentes instalações a uma altura única, de modo a permitir a comparação do desempenho destas, sendo definido como “a quantidade média de energia gasta para elevar 1 metro



cúbico de água a 100 m de altura por meio de instalações de bombeamento”. Este indicador é calculado pela expressão seguinte:

$$CEN = \frac{P_a \times t}{V \times \frac{H_{man}}{100}} \text{ (kWh / m}^3 \text{ / 100)} \quad (\text{eq. 3})$$

onde  $H_{man}$  é a altura manométrica de recalque. Segundo Alegre (2000) o valor médio deste indicador é da ordem de 0,5 kWh/m<sup>3</sup> para 100 m de altura manométrica.

Tabela 7 – Indicadores de eficiência energética convencionais

BOMBAS	FP	CE	CEN
Recalque A	0.98	0.233	0.435
Recalque B	0.68	0.123	0.178

## CONCLUSÕES

É indiscutível a importância dos sistemas de abastecimento de água para o desenvolvimento urbano e industrial de uma determinada sociedade. No Brasil, houveram modelos de gestão (planasa) sucedidos que contribuíram para rápida expansão da cobertura dos serviços de saneamento na década de 70. Entretanto, quando as fontes de financiamento se esgotaram, os prestadores de serviços estaduais de água e esgoto foram obrigados a arcar com despesas financeiras elevadas em decorrência das dívidas contraídas. Assim, os recursos que poderiam ser utilizados para ganhar eficiência administrativa, econômica e operacional foram utilizados para o pagamento dessas dívidas. Associado a isso, houve negligência do Estado em relação a uma política governamental para garantir o acesso de água e esgoto a toda população. O crescimento urbano desordenado, aliados a falta de investimentos financeiros e as práticas inadequadas foram alguns dos fatores que levaram os prestadores de serviços de saneamento operarem os sistemas de abastecimento de água com baixo grau de eficiência.

A recente Lei de Saneamento (11.445/07), que tem como uma das metas a eficiência econômica e que ainda fornece algumas diretrizes de como os incentivos devem ser desenhados, traz explícito em seus artigos a necessidade da evolução e modernização dos prestadores de serviços de saneamento e ainda sugere formas de se mensurar e sistematizar os indicadores e assim acompanhar a evolução do desempenho dos sistemas.

Considerando que o gerenciamento de infraestruturas urbanas são problemas de engenharia de extrema complexidade uma vez que possuem extensa distribuição, múltiplos caminhos percorridos pela água e vazões que variam temporalmente e espacialmente, o presente capítulo procurou contribuir na apresentação de tecnologias de auxílio a tomada de decisão operacional e traz resultados pertinentes sobre o binômio água e energia.

Inicialmente, enfatizou-se as tecnologias de estimação de perdas reais. Observou-se que os métodos convencionais (mínimas noturnas) mostram-se vantajosos em termos de facilidade de aplicação, por outro lado, os métodos computacionais demonstram robustez em tentar identificar a localização das ocorrências dessas perdas reais. Na sequência, foram levantadas preocupações com relação aos erros de medição, principalmente em macromedidores. A relação perda real x consumo de energia em sistemas de bombeamento sob diversas concepções também foi estudada. Concluiu-se que para sistemas ramificados com perdas acima de 50%, o aumento do consumo de energia pode ser exponencial. Seguindo o tema controle operacional, foram apresentadas tecnologias para otimização de conjuntos motor bomba e para localização de válvulas redutoras de pressão considerando múltiplos objetivos. Demonstrou-se que essas tecnologias quando pautadas em técnicas de análise de sistemas e de simulação, aplicadas em conjunto com a instrumentação em campo, permitem analisar de forma integrada os sistemas de distribuição e fazem com as complexidades temporais e espaciais sejam consideradas em um ambiente mais flexível.

## BIBLIOGRAFIA

Abe, N.; Cheung, P. B. Epanet Calibrator - an integrated computational tool to calibrate hydraulic models. In: Integrating Water Systems ed. London, UK : Taylor & Francis Group, 2009, p. 129-133.

Alegre, H.; Baptista, J. M.; Cabrera Jr., E.; Cubillo, F.; Duarte, P.; Hirner, W.; Merkel, W.; Parena, R. (2006). Performance indicators for water supply services. Manual of Best Practice Series, 2nd Edition, IWA Publishing, London, ISBN 1843390515 (289 pág.).

Cheung, P. B.; Kiperstok, A.; Cohim, E.; Alves, W. C.; Philippi, L. S., Zanella, L.; Abe, N.; Gomes, H. P.; Silva, B. C.; Pertel, M.; Gonçalves, R. F. Consumo de Água In: Conservação de água e energia em sistemas prediais e públicos de abastecimento de água. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2009a, v.1, p. 36-98.

Cheung, P. B.; Girol, G. V.; Abe, N.; Propato, M. Night flow analysis and modeling for leakage estimation in a water distribution system In: Integrating Water Systems ed. London, UK : Taylor & Francis Group, 2009b, p. 509-513.

Janković-Nišić, B.; Maksimović, Č.; Butler, D.; Graham, N. J. D. Use of flow meters for managing water supply networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130:2(171), 2004.

Frangipani, M. Guia prático de ensaios pitométricos. Programa de Modernização do Setor Saneamento – PMSS, Brasília, (102), 2006. Disponível em <http://www.snis.gov.br>.

Girol, G. V. Análise de perdas reais em um setor do sistema de abastecimento de água no município de Capinzal – SC. Trabalho de conclusão de curso de engenharia ambiental. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. UFSC. 85P, 2008.

Núñez, K.; Cheung, P. B.; Silva Junior, A. R.; Ide, C. N. Eficiência energética na operação de um sistema adutor de água utilizando otimização multiobjetivo. In: II Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, 2007, Vitória - ES. II Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, 2007.

Perez, A. M. E. A. Estudo ótimo da localização de válvulas redutoras de pressão em sistemas de distribuição de água considerando objetivos múltiplos. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Tecnologias Ambientais. p. 158, 2008.



---

## 18 Instrumentação e controle de uma bancada de bombeamento

---

Bruno H. G. Barbosa<sup>1</sup>, Luis A. Aguirre<sup>2</sup> e Carlos B. Martinez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Lavras, Lavras, Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

### INTRODUÇÃO

Constitui-se como objetivo deste trabalho a construção e instrumentação de uma planta piloto de ensaios que simula uma carga constante por meio de um sistema de bombeamento e algoritmos de controle em malha fechada, permitindo o ensaio em modelo reduzido. Os autores deste trabalho desconhecem a utilização desse tipo de sistema, para os mesmos fins aqui empregados, no Brasil. Sendo que os sistemas mais utilizados para simular carga constante são os hidro-pneumáticos e caixas d'água elevadas, que, por sua vez, possuem como desvantagens um elevado custo e pouca flexibilidade, respectivamente. As principais características do sistema serão descritas no restante do artigo.

### O PROCESSO

O processo utilizado nesse trabalho pode ser dividido em duas partes distintas: sistema de bombeamento de água e o módulo a ser ensaiado. O sistema de bombeamento tem por finalidade simular uma carga constante por meio de uma associação de bombas centrífugas. O sistema de bombeamento de água é constituído de duas bombas de características semelhantes (10HP), que podem ser operadas em associação, paralelo ou série, ou independentes, apenas uma operando (Figura 1) (Caixeiro, 2003). O projeto elétrico e a instrumentação foram desenvolvidos e implementados no contexto deste trabalho. O diagrama de instrumentação do sistema, de acordo com a norma ANSI/ISA - S5.1 - 1984, é mostrado na Figura 2. A instrumentação foi realizada de forma a atender diferentes aplicações para as quais a instrumentação se destina, sejam elas (Doebelin, 1990): monitoramento de processos, controle de processos e análise experimental.

Os instrumentos de medição adquiridos foram:

- três transmissores de pressão (4-20mA), sendo um para pressão de saída (recalque) do sistema (PT 03) e os outros para sucção de cada bomba (PT 01 e PT 02). Estes transmissores utilizam sensor piezorresistivo;
- dois transmissores de vazão eletromagnéticos (FIT 01 e FIT 02 – 4-20mA);
- indicadores de pressão.
- 

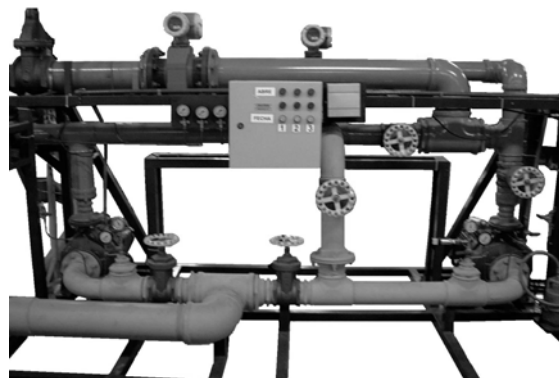


Figura 1: Sistema de bombeamento de água.

Além dos instrumentos de medição, o sistema é composto por válvulas, que determinam o tipo de associação das bombas e a saída do sistema a ser utilizada. Para acionamento das duas bombas centrífugas, são utilizados dois inversores de frequência dedicados.

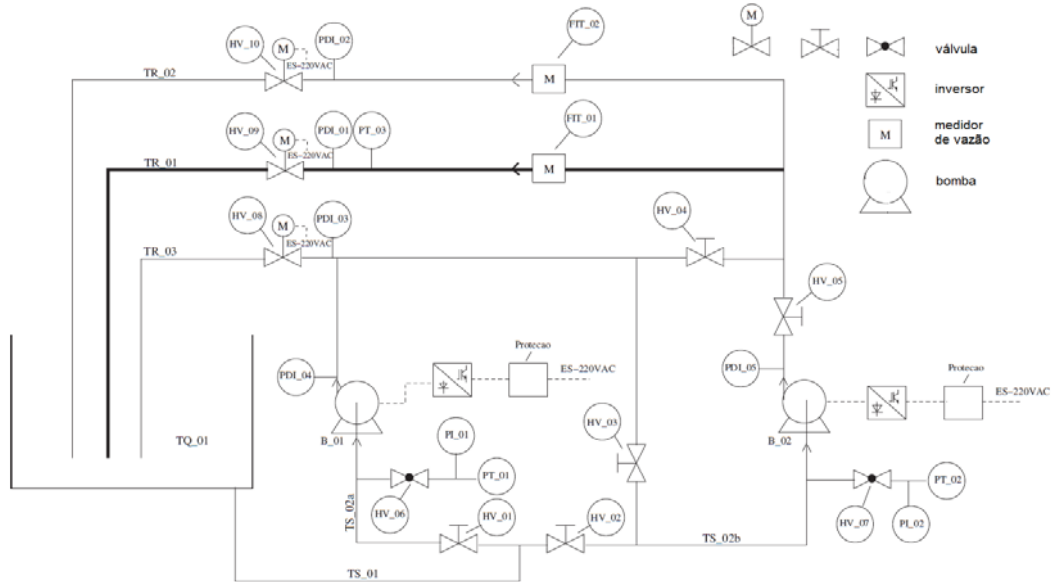


Figura 2 – Diagrama de instrumentação do sistema de bombeamento de água. Notação: HV (válvula manual/motorizada), PI e PDI (indicadores de pressão), PT (transmissor de pressão), FIT (indicador e transmissor de fluxo), TR (tubulação de recalque), TS (tubulação de sucção).

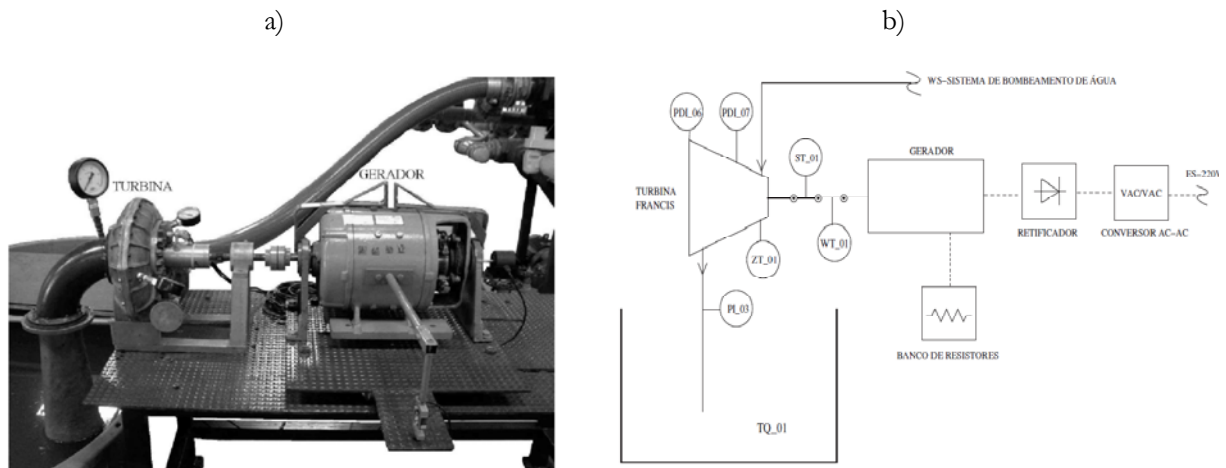


Figura 3 – Carga a ser abastecida pelo sistema de bombeamento, no caso uma bancada de ensaios de turbinas hidráulicas, sendo b) o diagrama de instrumentação. Notação: ZT (transmissor de posição da abertura das pás), ST (transmissor de velocidade angular), WT (transmissor de força).

A carga a ser abastecida é caracterizada por um conjunto turbo-gerador cujas características são: 3 HP de potência, velocidade específica de 174 rpm, vazão igual a 26 l/s e altura de trabalho de 11 mca. As principais características dessa bancada (módulo turbina-gerador), mostrada na Figura 3, são a estabilidade, fazendo com que o conjunto possa ser operado em velocidades elevadas, e a flexibilidade, pois o gerador de corrente contínua (4HP) pode ser deslocado vertical e horizontalmente. Além do conjunto turbina-gerador, a bancada é constituída dos seguintes componentes:

- um *encoder* utilizado na medição velocidade angular do eixo da turbina;

- um potenciômetro de precisão para medir a posição angular das pás do distribuidor da turbina;
- uma célula de carga para medição do conjugado da turbina;
- um conversor Vac-Vac monofásico de 220 V;
- um retificador, com corrente máxima de 20 A;
- um banco de resistores.

## CONDICIONAMENTO DE SINAIS E AQUISIÇÃO DE DADOS

A placa PCL-711B, Advantech Co. Ltd, é utilizada para aquisição de dados do processo. Os sinais do processo chegam à placa de aquisição por meio de cabos par-trançado e blindados. Além disso, foram projetadas duas placas de circuito impresso (SIBATG-DAQ e SIBATG-Sensores) para adequação dos sinais dos sensores e transmissores à entrada da placa de aquisição. A Figura 4 apresenta o diagrama de blocos das funcionalidades das placas.

Para tratamento dos sinais bem como ajuste das curvas de calibração dos sensores, foi construída uma placa denominada SIBATG-Sensores (Sistema de Bombeamento de Água e módulo Turbina-Gerador). Essa placa recebe dos transmissores instalados no processo sete sinais referentes à: pressão de recalque (PR), pressão de sucção bomba 1 (PS1), pressão de sucção bomba 2 (PS2), vazão (VA), velocidade angular da turbina (VE), conjugado de eixo da turbina (CEL) e abertura das pás (AP). Essa placa é alimentada por uma única fonte regulada de  $\pm 12V$ .

Os componentes utilizados para condicionamento dos sinais dos transmissores foram: quatro integrados (RCV420 da *Texas Instruments*) para conversão dos sinais transmitidos em corrente 4-20mA (transmissores de pressão e vazão), para a faixa e característica de operação da placa de aquisição de dados (0-5V). A utilização do integrado para essa conversão é preferível à utilização de resistores, pois o sinal convertido pelo integrado é menos sensível a alterações da temperatura ambiente. Uma porta lógica ou-exclusivo (SN54ACT86 da *Texas Instruments*) para dobrar a resolução do tacômetro e um integrado (VFC320 da *Texas Instruments*) para conversão do sinal de pulsos TTL em tensão. Amplificador de instrumentação e amplificador operacional (INA101 e LM741 da *Texas Instruments*, respectivamente) para ajustes do sinal da célula de carga.

Foi observado que a utilização, pela placa de aquisição de dados, do mesmo terra dos inversores, ocasionava uma piora significativa da relação sinal-ruído de todos os sinais coletados pela placa de aquisição - isso foi constatado quando a saída analógica da placa e a entrada analógica dos inversores foram conectados pela mesma referência.

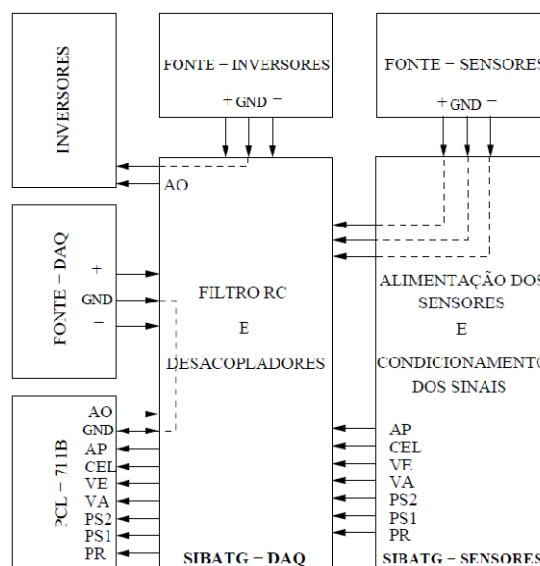


Figura 4 – Diagrama de blocos das funcionalidades das placas de circuito eletrônico projetadas.

Sendo assim, após o condicionamento dos sete sinais provindos do processo para a faixa das entradas analógicas da placa de aquisição, esses sinais são enviados à placa SIBATG-DAQ, responsável pelo isolamento das entradas e da saída analógica da placa de aquisição de dados. O isolamento das entradas e da saída foi realizado por meio do circuito integrado ISO124 da *Texas Instruments*, com o propósito de reduzir o ruído sobre os sinais obtidos pela placa, evitando o fechamento de laços de terra na placa de aquisição de dados e a utilização do terra “contaminado” dos inversores.

Esse integrado necessita de duas fontes: uma para referenciar o sinal de entrada do circuito e outra para referenciar o sinal de saída. Com isso, foram construídas mais duas fontes, totalizando três (ver Figura 4): uma fonte para referenciar sinais a serem enviados ou recebidos dos inversores - o terra dessa fonte é conectado ao terra dos inversores; uma fonte para referenciar sinais de saída ou de entrada analógica da placa de aquisição - o terra dessa fonte é conectado ao terra da placa de aquisição; uma fonte para referenciar os sinais condicionados dos transmissores - fonte da placa SIBATG-Sensores, utilizada na alimentação dos transmissores, com terra conectado à entrada dos integrados ISO124.

Além do desacoplamento dos sinais, há um filtro passa-baixa, de primeira ordem, passivo, com frequência de corte igual a 10Hz, em cada uma das entradas da placa de aquisição e na referência de velocidade transmitida aos inversores. Por meio de *jumpers* é possível determinar a utilização ou não de cada um desses filtros.

A melhoria da relação sinal-ruído devido à utilização de filtro e desacoplador pode ser verificada na Figura 5. A redução de potência espectral das componentes de frequência mostrada nessa figura foi de aproximadamente 40 vezes, resultando em uma melhoria significativa da relação sinal-ruído. A Tabela I apresenta os erros obtidos em cada medição do processo.

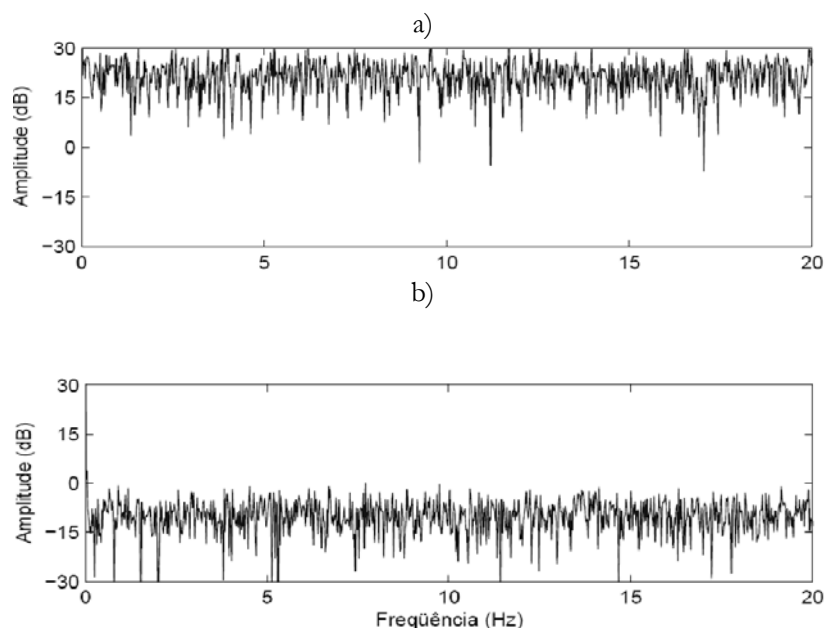


Figura 5 – Transformadas rápidas de Fourier do sinal transmitido pelo potenciômetro, para posição fixa do ângulo de abertura das pás do distribuidor da turbina. Sendo (a) sem utilização de desacoplador e filtro, (b) com utilização do desacoplador e filtro.

Tabela I – Desvio padrão (STD) e desvio padrão percentual (PSTD) das variáveis do processo para três velocidades angulares (VEL) das bombas, operando em paralelo, em rpm. Sendo PR, PS1 e PS2 as pressões de recalque, sucção da bomba 1 e da bomba 2 em mca, respectivamente; VA a vazão do sistema em l/s; VE a velocidade angular do conjunto turbina-gerador em rpm; AP a abertura das pás do distribuidor da turbina em porcentagem; e CEL a massa medida pela célula de carga em kg, utilizada no cálculo do conjugado de eixo do conjunto turbina-gerador.

Índice	VEL	PR	PS1	PS2	VA	VE	AP	CEL
STD	0	0,016	0,007	0,009	0,010	1,680	0,114	0,004
	800	0,038	0,025	0,035	0,218	4,800	0,257	0,060
	1400	0,096	0,053	0,116	0,162	6,240	0,240	0,191
PSTD(%)	0	-	0,07	0,08	-	-	0,14	0,15
	800	0,94	0,27	0,35	1,44	0,31	0,32	2,32
	1400	0,72	0,66	1,39	0,61	0,21	0,29	7,35

## O SISTEMA DE CONTROLE E SUPERVISÃO

O sistema de supervisão tem por objetivo apresentar ao usuário os valores das variáveis importantes do processo bem como controlar a pressão de recalque do sistema de bombeamento. Para controle da pressão de recalque foi utilizado um controlador PI (Proporcional e Integral) clássico.

O programa desenvolvido pode ser dividido em duas partes executadas de forma paralela:

- aquisição de dados e controle: são efetuadas as funções mais críticas, ou seja, conversão A/D de todas as entradas, cálculo da saída do controlador e conversão D/A em uma frequência determinada pelo usuário e alta prioridade;
- monitoramento: são realizadas as tarefas de construção de gráficos das entradas e saída analógicas no tempo, bem como a apresentação dos valores de cada variável, com baixa prioridade.

A implantação de um sistema em malha fechada tem por objetivo controlar a pressão de saída da associação paralela das bombas - variável controlada. Sendo, a variável manipulada, a velocidade angular das bombas, controladas pelos inversores - controle vetorial.

Por meio de modelos NARMAX neurais identificados em (Barbosa, 2006), os ganhos do controlador PI foram sintonizados pelo método de Ziegler-Nichols (Ziegler e Nichols, 1942). Devido à variação do ganho e da dinâmica do processo de acordo com a abertura das pás da turbina Francis utilizada, foi necessário a implementação de uma tabela de ganhos desse controlador PI para diferentes pontos de operação da turbina (Tabela. II). Essa prática é bastante comum em se tratando de processos que operam em condições de operação distintas e que, para diferentes operações, o comportamento dinâmico do sistema modifica significativamente (Bazannela e da Silva Jr., 2005).

A Figura 6 apresenta as respostas em malha fechada do sistema, para diferentes aberturas de pás, utilizando o controlador PI com ganhos ajustados de acordo com a Tabela II. Como pode ser observado, com o ajuste dos ganhos, foram obtidas respostas satisfatórias em qualquer configuração do mesmo (Tabela III), embora o sistema tenha apresentado mais oscilações com aberturas muito pequenas.

Tabela II – Tabela de ganhos do controlador PI, com referência à abertura das pás ( $\Phi$ ).

$\Phi$ (%)	$K_p$	$T_I$ (s)
$\Phi \geq 50$	4,0	0,021
$50 > \Phi \geq 20$	4,0	0,024
$20 > \Phi \geq 10$	3,4	0,023
$10 > \Phi \geq 5$	3,1	0,024
$\Phi < 5$	3,0	0,026



Tabela III – Comparação de respostas em malha fechada para diferentes aberturas de pás. Sendo  $t_s$  o tempo de subida e  $t_{ss}$  o tempo de assentamento ( $\pm 2\%$ ).

$\Phi$ (%)	$t_s$ (s)	Sobre-elevação (%)	$t_{ss}$ (s)
90	1,23	4	2,30
60	1,15	6	2,15
50	1,04	5	1,55
30	1,10	5	1,62
20	0,93	3	1,16
10	1,00	3	2,20
5	1,50	1	1,45
0	1,60	2	2,94

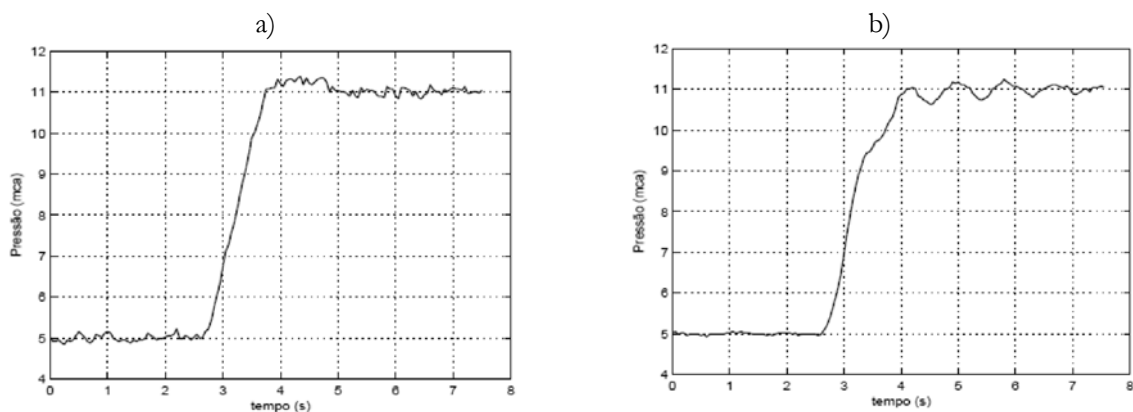


Figura 6 – Resposta em malha fechada do sistema, para diferentes aberturas de pás, utilizando a tabela de ganhos (Tabela II), com *setpoint* de pressão alterado de 5 mca para 11 mca aos 2,5 s. Abertura das pás iguais a: a) 90% e b) 0%.

A Figura 7 apresenta uma comparação do sistema em malha aberta e malha fechada variando-se a abertura das pás da turbina. Pode-se constatar que a principal razão da utilização do sistema com retroalimentação é sua característica de regulação. Para o tipo de ensaio pretendido, o nível de erro ocorrido durante a mudança da abertura das pás, em malha fechada, é aceitável.

As variáveis monitoradas pelo sistema são: pressão de recalque - variável monitorada e controlada; velocidade angular das bombas - variável monitorada e manipulada; pressão de sucção da bomba 1 e da bomba 2; vazão; abertura das pás da turbina; velocidade angular da turbina; conjugado da turbina; eficiência da turbina.

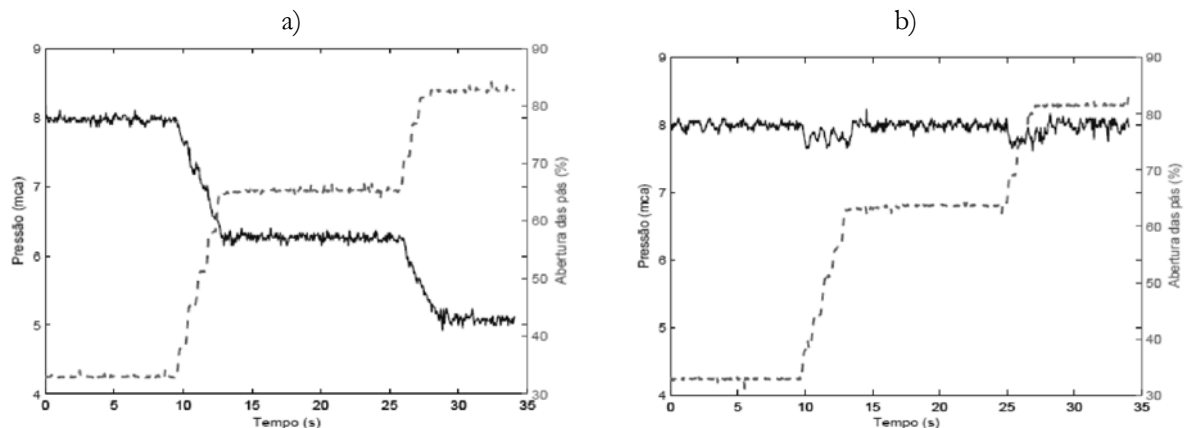


Figura 7 – Comportamento do sistema com a variação da abertura das pás. Sendo (a) sistema em malha aberta - a abertura das pás é representada pela linha tracejada; e (b) sistema em malha fechada.

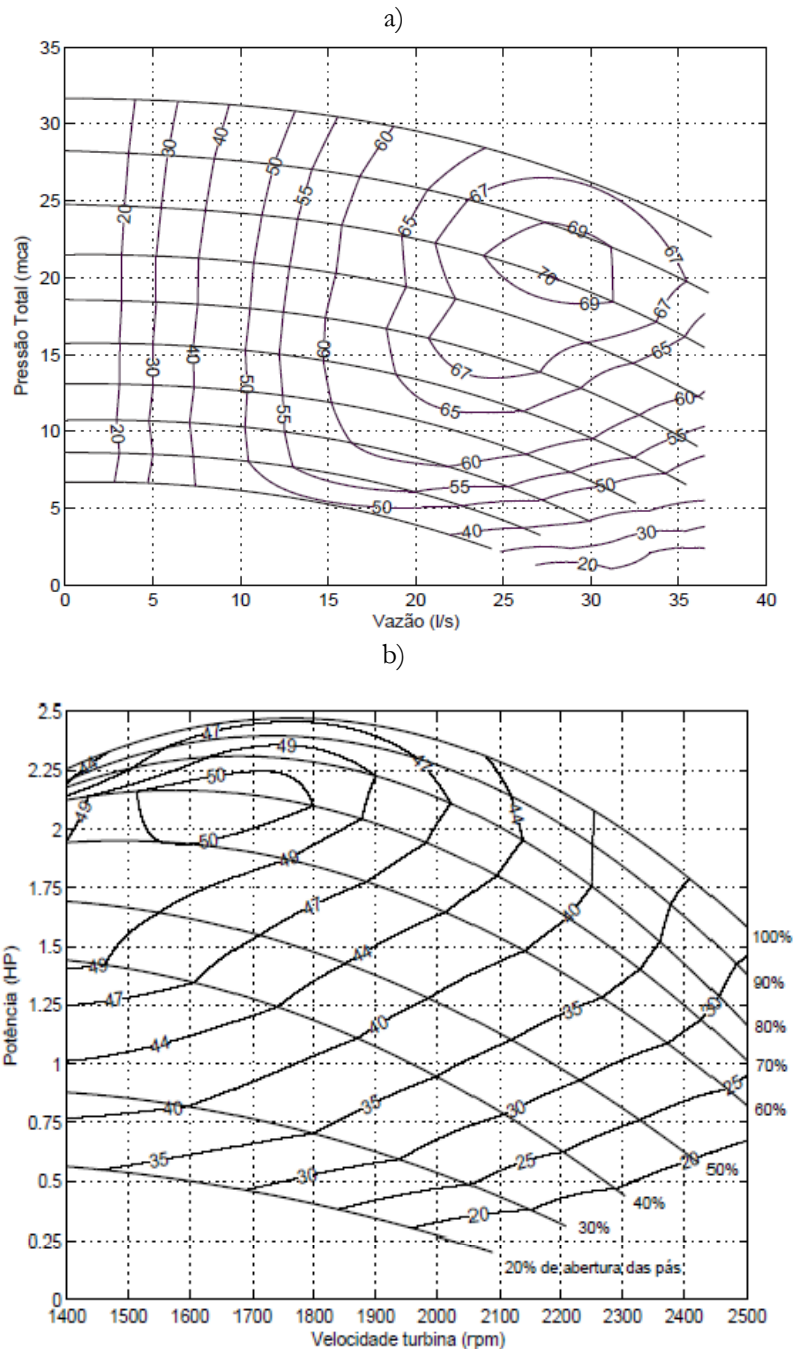


Figura 8 – Curvas do sistema de bombeamento e da turbina Francis. Sendo (a) curvas  $H \times Q$  do sistema de bombeamento operando com as bombas em paralelo e (b) curvas de potência da turbina Francis em função da velocidade angular da mesma, em diferentes aberturas das pás do distribuidor. As curvas de nível representam o rendimento em porcentagem.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo descreveu, de forma sucinta, a instrumentação de um sistema simulador de carga constante e de uma bancada de ensaios para turbina ou bomba funcionando como turbina. Apresentou-se um sistema eletrônico para condicionamento dos sinais e para reduzir os efeitos indesejáveis de ruído em ambientes ríspidos como este o qual o sistema está inserido.

Foram obtidas informações qualitativas do modelo reduzido (turbina Francis), o que será de grande valia na construção e estudo de modelos reduzidos futuros. Por meio do software desenvolvido, características dinâmicas do sistema foram também estudadas (Barbosa, 2006).

O sistema de bombeamento de água, com uso de retroalimentação, simula uma carga constante, fazendo com que a turbina opere em condições semelhantes a uma turbina de uma usina hidrelétrica. Esse sistema, em diversas aplicações, pode substituir os dispendiosos sistemas hidro-pneumáticos ou de reservatórios elevados, além de ser mais flexível. Acredita-se que a presente descrição seja útil para outros laboratórios construírem bancadas semelhantes.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores são gratos ao Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos da UFMG e ao apoio financeiro da CEMIG, Furnas Centrais Elétricas, Eletrobrás e CNPq.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- BARBOSA, B. H. G.(2006). Instrumentação, Modelagem, Controle e Supervisão de um Sistema de Bombeamento de Água e Módulo Turbina-Gerador. Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
- BAZANNELA, A. S. e G., J. M. (2005). Sistemas de Controle: princípios e métodos de projeto. Editora UFGRS.
- CAIXEIRO, L. F. (2003). Análise, pré-projeto, projeto e re-projeto e Orçamento de uma plataforma de Bombeamento. Monografia final de curso em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais.
- DOEBELIN, E. O. (2003). Measurement Systems. McGraw-Hill Publishing Company.
- DUARTE, E. A. (2004). Projeto e Construção dos Componentes de Uma Turbina Hidráulica do Tipo Francis. Monografia final de curso em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais.
- ZIEGLER, J. G. e Nichols, N. B. (1942). Optimum settings for automatic controllers. Transactions of the ASME , 64, 759-768.

# 19 Avaliação de parâmetros técnicos e econômicos na aquisição e substituição de motores de indução trifásicos de 1 CV a 10 CV

Marcos Antonio da Silva<sup>1</sup>, Manuel Losada y Gonzalez<sup>2</sup>, Selênio Rocha Silva<sup>2</sup> e Carlos B. Martinez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil

## INTRODUÇÃO

O ano de 1866 pode ser considerado como o de invenção da máquina elétrica, quando o alemão Werner Siemens inventou o primeiro gerador de corrente contínua auto-excitado, provando que a tensão necessária para o seu magnetismo podia ser retirada do próprio enrolamento do rotor, isto é, que a máquina podia ser autoexcitada. O primeiro gerador de Werner Siemens possuía uma potência de aproximadamente 30 watts e uma rotação de 1.200 rpm. A máquina podia também funcionar como motor, desde que se aplicasse uma corrente contínua aos seus bornes.

Em 1885, o engenheiro eletricitista italiano Galileu Ferraris construiu um motor de corrente alternada de duas fases. Em seguida, em 1887, o iugoslavo Nikola Tesla apresentou um pequeno protótipo de motor de indução bifásico com rotor em curto-circuito. No ano de 1889, o engenheiro eletricitista russo Michael von Dolivo Dobrowolsky, da Empresa AEG, em Berlim, persistindo na pesquisa do motor de corrente alternada, entrou com pedido de patente de um motor trifásico com rotor em gaiola. O motor era simples, robusto, silencioso e tinha menos manutenção e alta segurança em operação. Em 1891, Dobrowolsky iniciou a fabricação em série de motores de indução, nas potências de 0,4 a 7,5 kW, sendo que até o final do século XIX quase todos os tipos de motores elétricos foram desenvolvidos [Sens, 2001].

A figura 1 mostra os principais tipos de motores elétricos, divididos em: motores de corrente alternada, motores de corrente contínua e motor universal, ressaltando que este último pode operar tanto em tensão contínua quanto em tensão alternada [Mamede, 1997].

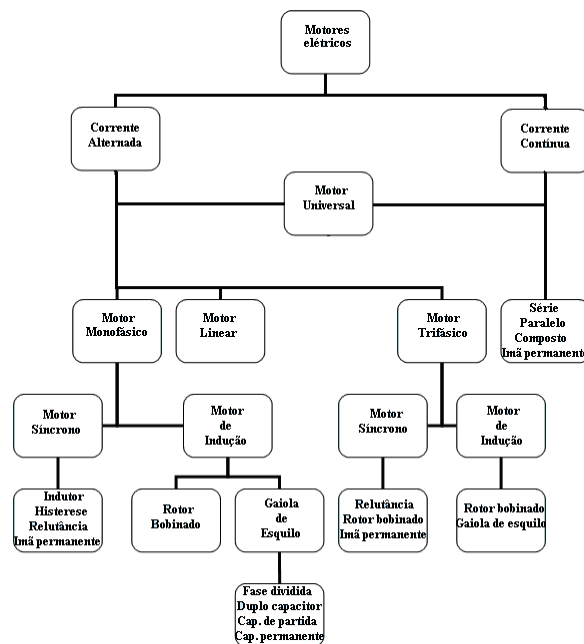


Figura 1- Principais tipos de motores elétricos

Nos anos 80, com o desenvolvimento dos conversores estáticos de frequência em escala industrial, os motores de corrente contínua e os motores síncronos começaram a ser substituídos pelos motores de indução. Isto foi motivado pelo fato de que a utilização de conversores estáticos, acionando e controlando a velocidade e o conjugado dos motores de indução, fez com que a utilização destes tornasse mais vantajosa quando comparada aos motores de corrente contínua e motores síncronos. Por outro lado, para atender a demanda e as condições de mercado, projetos cada vez mais arrojados foram sendo desenvolvidos para melhorar o desempenho e custo dos motores de indução. Um exemplo é a relação peso-potência, que em 1891 era da ordem de 88 kg/kW e passou para 5,7 kg/kW no ano 2.000, como mostrado na figura 2 [Santos, 2006].

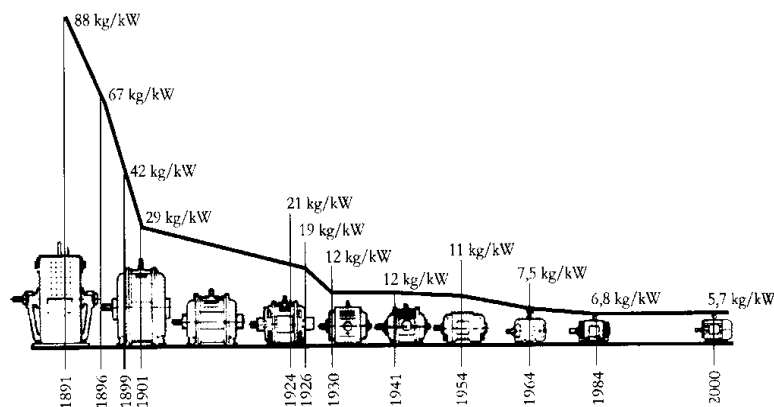


Figura 2 - Evolução dos motores elétricos

Atualmente, no mercado brasileiro, os esforços de projetos e fabricação são direcionados para o aumento de rendimentos e consequente redução de consumo de energia dos motores de indução. Os motores de potência igual e inferior a 10 CV representam aproximadamente 89% de todos os motores trifásicos vendidos, como mostrado na figura 3.

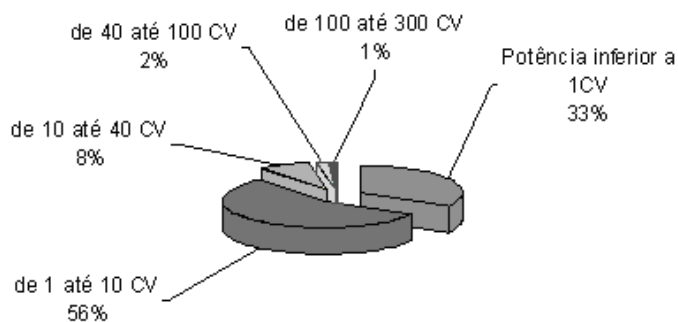


Figura 3 - Motores vendidos por faixa de potência

Em 2002, principalmente devido ao racionamento de energia elétrica de 2001-2002, foi sancionado o Decreto N<sup>o</sup> 4508 [Presidência da República, 2002], que dispunha da regulamentação dos níveis mínimos de eficiência energética de motores elétricos trifásicos de indução de rotor gaiola de esquilo, de fabricação nacional ou importados para comercialização e uso no Brasil. Posteriormente, a Portaria Interministerial N<sup>o</sup> 553 [Ministério de Minas e Energia, 2005] estabeleceu os níveis mínimos de rendimento nominal, sem a distinção entre as linhas padrão e de alto rendimento. A figura 4 mostra as curvas de rendimento dos motores de alto rendimento e padrão de quatro pólos e potência de 1 até 200 CV, definidos no decreto N<sup>o</sup> 4508 [Presidência da República, 2002].

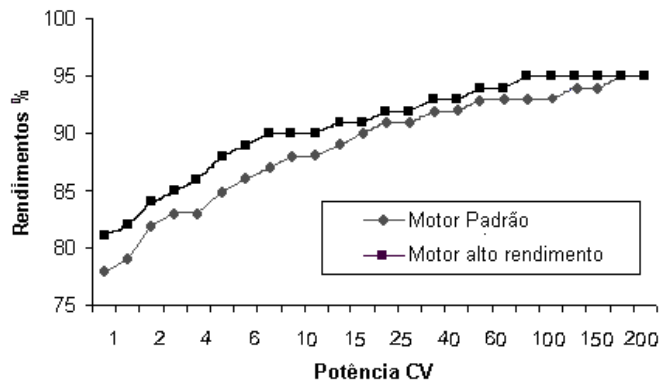


Figura 4 - Rendimentos de motores padrão e de alto rendimento de 4 pólos

A NBR-7094 [ABNT, 2003] define os tipos de motores que se enquadram na definição de motores de alto rendimento. Esses motores são de indução, rotor de gaiola, trifásicos, regime tipo S1, velocidade única, categorias N e H, potência nominal igual ou superior a 0,75 kW até 185 kW, com 2, 4, 6 e 8 pólos, 60 Hz, tensão nominal igual ou inferior a 600 V, grau de proteção IP44, IP54 ou IP55. Os motores de indução tipo padrão não possuem valores de rendimento normalizado.

Quanto aos aspectos construtivos, o que difere o motor de alto rendimento do motor padrão são: chapas magnéticas com aço-silício de melhor qualidade; maior volume de cobre, o que reduz a temperatura de operação; enrolamentos especiais que reduzem as perdas estatóricas; rotores tratados termicamente reduzindo as perdas rotóricas; baixo fator de preenchimento das ranhuras que possibilita a melhor dissipação do calor gerado; anéis de curto-circuito dimensionados para produzir menores perdas e projetos das ranhuras otimizados para aumentar o rendimento.

De acordo com Almeida [2006], um motor de indução em uma indústria, com um ciclo de vida de 12 a 20 anos, pode ter um custo de energia anual equivalente entre 5 a 10 vezes o custo de sua aquisição, e, em sua vida, de 60 a 200 vezes deste custo de aquisição. Portanto, uma análise de custo econômico é muito significativa para definir o momento da sua substituição, apesar da relevância dos fatores técnicos, pois o custo total de energia corresponde a 97,3% do custo total das despesas efetuada com o motor durante a sua vida útil. A figura 5 mostra os custos percentuais do consumo de energia, de aquisição e de rebobinamento de um motor [Holmquist, 2006].

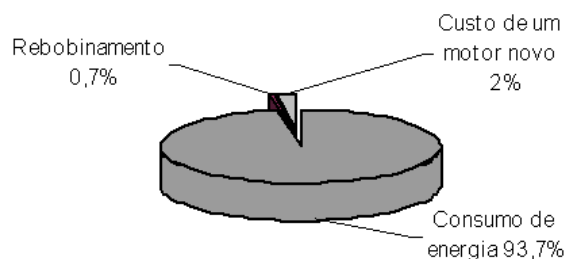


Figura 5 - Custos de energia, aquisição e rebobinamento de um motor

A análise de fatores técnicos consiste em verificar as condições de operação do motor, avaliando seu rendimento, situação da rede elétrica de alimentação, horas anuais de operação, localização física, temperaturas ambiente e de operação, classe de isolamento, altitude de operação, carregamento e procedimentos de manutenção. Portanto, uma abordagem técnica minuciosa de cada item deve ser realizada.

A legislação vigente no Brasil permitiu a industrialização simultânea de motores tipos padrão e de alto rendimento até dezembro de 2009, mas sua comercialização se estende até 2010. Em face a esta situação, pode-se definir as seguintes opções de análise:

- instalar um motor novo tipo padrão ou de alto rendimento em um projeto novo ou uma ampliação de projeto existente;
- substituir um motor padrão em operação por um motor de maior rendimento;
- manter o motor padrão existente.

Na primeira opção, a escolha de um motor de alto rendimento ao invés de um motor padrão é, em princípio, viável economicamente, pois o que difere é a diferença de custos entre eles, que é relativamente pequena. Entretanto, há também de ressaltar que a aplicabilidade do motor de alto rendimento nem sempre é viável tecnicamente. Pode-se, citar como exemplo, o acionamento de cargas de elevada inércia com frequentes acelerações, cujas perdas elétricas podem ser muito maiores que as perdas elétricas em operação contínua, inviabilizando sua utilização. Outro exemplo é o acionamento de bombas e ventiladores, cujo conjugado resistente solicitará um acréscimo de potência mecânica variando com o cubo da velocidade, e tendo, como consequências, o aumento das perdas elétricas do motor.

Na segunda opção, o investimento a ser considerado não é somente o custo de aquisição do motor de alto rendimento. Este custo deve ser acrescido de revisão de projeto de instalação e transporte, instalação e parada de produção. Esses custos adicionais podem tornar a opção inviável economicamente.

Na terceira opção, devem ser analisados os custos de manutenção do motor, sua expectativa de vida útil, custos de paralisações não programadas do sistema produtivo, variação de rendimento após manutenção e o acréscimo de consumo de energia elétrica. Tais fatos podem também tornar a opção inviável economicamente.

## INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA VIDA ÚTIL DO MOTOR

A temperatura de operação é um dos principais fatores que afetam o desempenho e a vida útil dos motores de indução. Isto ocorre quando o motor fica submetido às condições adversas de operação, tais como sobrecarga, altitude elevada, sistema de ventilação obstruído, temperatura ambiente elevada, desequilíbrio da tensão de alimentação, componentes harmônicas, partículas abrasivas, poeira, desequilíbrio mecânico, entre outras situações inadequadas de operação.

A elevação da temperatura do motor de indução basicamente tem origem em três dos seus principais componentes: o estator, o rotor e os mancais de rolamento. Idealmente, cada um desses componentes deveria ser analisado individualmente, e, em seguida, verificar a ação conjunta destes no que tange à transferência de calor para outros componentes e seus efeitos, tais como a degradação do isolamento das bobinas do estator e rotor. Deve-se também verificar quanto isto afeta a vida útil do equipamento. O catálogo do fabricante, em conformidade com a norma NBR 7094 [ABNT, 2003], deve apresentar a temperatura de operação máxima admissível para os enrolamentos das bobinas do estator. A tabela 1 mostra as temperaturas para algumas classes de isolamento [WEG, 2007].

Tabela 1 – Temperaturas para classes de isolamento

Descrição das temperaturas	Classe de isolamento				
	A	E	B	F	H
Temperatura ambiente	40	40	40	40	40
$\Delta t$ - elevação da temperatura (método da resistência)	60	75	80	105	125
Diferença entre o ponto mais quente e a temperatura média	5	5	10	10	15
Total de temperatura no ponto mais quente	105	120	130	155	180

O isolamento das bobinas do estator de um motor de indução em baixa tensão normalmente tem classe de isolamento do tipo B ou F, e é composto dos materiais isolantes seguintes [WEG, 2007]:

- Classe B, materiais à base de poliéster e poli-imídicos aglutinados com materiais orgânicos ou impregnados com ésteres;
- Classe F, materiais à base de mica, amianto e fibra de vidros aglutinados com materiais sintéticos, usualmente silicones, poliésteres ou epóxis.

Com base nas propriedades desses materiais isolantes, pode-se traçar as curvas de vida de isolamento das classes de isolamento, como são mostrados na Figura 6, onde se tem a vida média do isolamento (em horas) para as temperaturas do enrolamento.

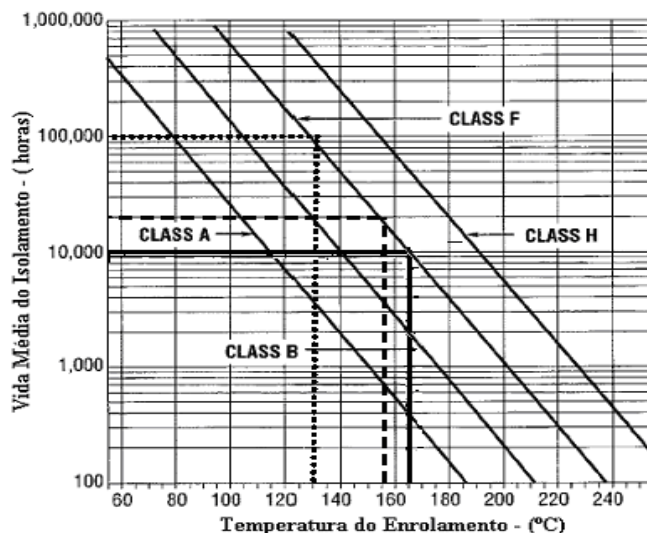


Figura 6 - Vida útil do isolamento em função da temperatura de operação

Analisar o comportamento térmico do motor a partir do aquecimento de seus componentes (estator, rotor e mancais de rolamentos) não é uma tarefa simples. Porém, para os objetivos desta análise, o motor será considerado como um corpo homogêneo no qual toda energia térmica gerada internamente será transmitida de forma uniforme ao ambiente, como se fosse uma única fonte térmica [Sá, 1989]. A intensidade da fonte térmica depende do carregamento que o motor está submetido. A figura 7 mostra as temperaturas de operação  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  e  $T_4$ , para os carregamentos de 50%, 75%, 100% e 125% em um motor de 1 CV.

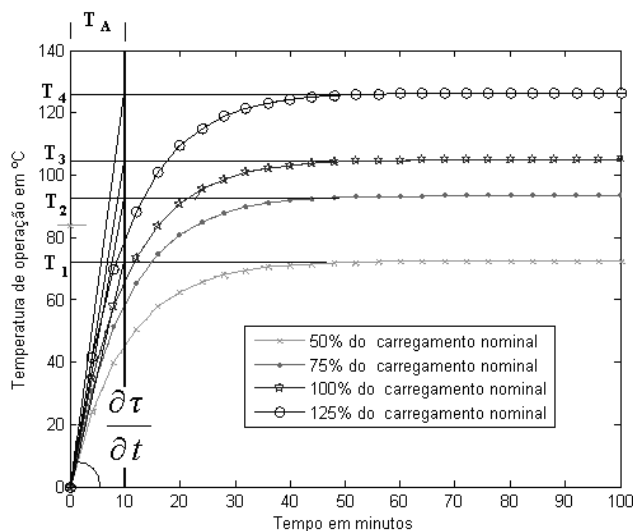


Figura 7 - Curvas de temperatura para diversas condições de carga

Para a análise do desempenho térmico dos motores de indução trifásicos é necessário avaliar as perdas do motor para as diversas condições de carregamento. De uma forma simplificada, as perdas totais podem ser separadas em três parcelas: perdas por efeito Joule nos enrolamentos, perdas por histerese e Foucault no ferro e perdas mecânicas por atrito e ventilação.



As perdas por efeito Joule estão associadas à circulação de corrente nos condutores do estator e rotor, sendo responsáveis por parcela significativa de aquecimento do motor, e podem representar 55% das perdas totais [Andreas, 1982]. Tais perdas variam com a carga no eixo e em proporção quadrática com a variação da corrente.

Considerando que o motor opera com frequência constante, as perdas por histerese ocorrem, em grande parte, no núcleo do estator, e variam diretamente com a tensão aplicada. Já as perdas por correntes de Foucault resultam da circulação das correntes induzidas no interior do material magnético e variam quadraticamente com a tensão aplicada. O conjunto das perdas magnéticas pode representar de 20% a 36% das perdas totais de um motor sob carga nominal. Admitindo que o motor opere com tensão e frequência constantes, essas perdas podem ser consideradas também constantes.

As perdas mecânicas originam-se do atrito dos mancais com o conjunto rotativo dos motores e as perdas de ventilação são relativas ao acionamento dos ventiladores, geralmente acoplados aos seus eixos, para a refrigeração dos mesmos. Em geral, estas perdas representam 9% das perdas totais. Para efeito de simplificação, podem também ser consideradas constantes, pois as mesmas dependem da velocidade que é, em algumas aplicações, praticamente constante.

Há ainda uma pequena parcela de perdas não classificadas, conhecidas como perdas suplementares e representam cerca de 1% das perdas totais. O comportamento do fluxo de potências e perdas no motor de indução trifásico, desde a alimentação elétrica até a saída no eixo, é mostrado na figura 8, onde: 1 – Potência elétrica de entrada [W]; 2 – Potência transferida ao rotor [W]; 3 – Perdas no ferro do estator [W]; 4 – Perdas no cobre do estator [W]; 5 – Potência mecânica desenvolvida [W]; 6 – Perdas no rotor [W]; 7 – Perdas com atrito e ventilação [W]; 8 – Potência mecânica disponível no eixo [W].

Esta figura mostra que uma parte da potência elétrica de entrada do motor é transformada em potência mecânica no eixo, sendo que o restante é transformado em calor devido às diversas parcelas de perdas, aumentando a temperatura de operação do motor.

A potência mecânica no eixo deve fornecer o conjugado exigido pela carga, enquanto que a temperatura não deve ultrapassar o valor admissível de sua classe de isolamento. Portanto, na especificação de um motor, o mesmo deve atender ao conjugado requisitado pela carga conjuntamente com a solicitação térmica. Para atender esta solicitação térmica, é necessário também conhecer o tipo de regime de operação de um motor.

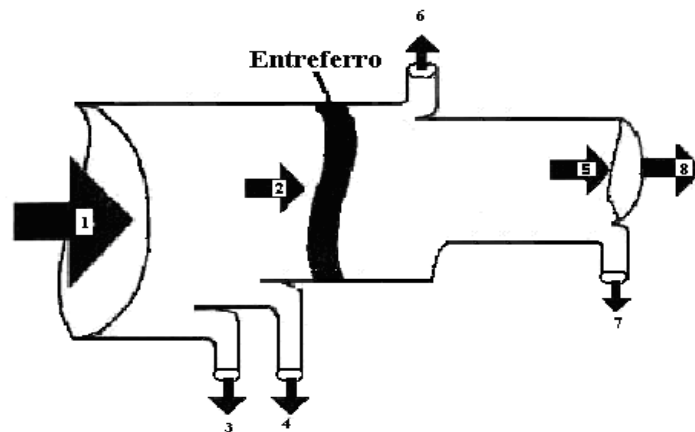


Figura 8 - Fluxo de potências e perdas no motor

Os tipos de regime de operação de um motor elétrico são classificados na norma NBR 7094 [ABNT, 2003], que os identifica pela letra S seguida de um algarismo de 1 a 10. Ao analisar um tipo de acionamento, deve-se procurar encaixá-lo em um tipo de operação que traduza o seu comportamento dentro do tipo específico de regime. O comportamento de um motor em um regime S1 é mostrado na figura 9 e é descrito a seguir. Os demais regimes também são descritos a seguir, mas suas figuras poderão ser vistas na respectiva norma.

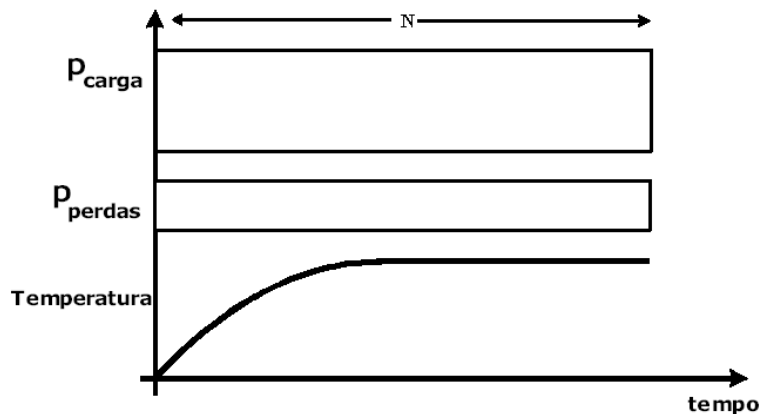


Figura 9 - Regime de operação S1

- O regime S1 pode ser exemplificado pelo acionamento de um sistema de bombeamento de água de grande porte, que usualmente permanece em operação com potência constante por períodos de tempo muito maior que a constante de tempo de aquecimento do motor. Quando desligado, somente volta a ser religado após o motor ter entrado em equilíbrio térmico com o ambiente.
- O regime S2 tem funcionamento à carga constante durante um tempo determinado, inferior ao necessário para atingir o equilíbrio térmico. Como exemplo, pode-se citar o acionamento de comporta de vertedouro de barragem, onde as operações são de curta duração e tão pouco frequentes que certamente a temperatura do motor retornará à temperatura ambiente antes de uma operação subsequente.
- O regime S3 é intermitente e periódico, sendo que em um período opera com carga constante no eixo e no período subsequente permanece em repouso. Neste regime, a corrente de partida não afeta significativamente a elevação de temperatura.
- O regime S4 é intermitente e periódico, sendo que em um período opera com carga constante e no período subsequente permanece em repouso. Neste regime, o período de partida é significativo.
- O regime S5 é intermitente e periódico com frenagem elétrica, sendo que opera inicialmente em um período com carga constante, no período subsequente com frenagem elétrica e posteriormente fica em repouso.
- O regime S6 é contínuo periódico com carga intermitente, sendo um período com carga constante e um período subsequente a vazio, mas sem período de repouso.
- O regime S7 é contínuo periódico com frenagem elétrica, sendo um período para efetuar a partida, um período subsequente com carga constante e, em seguida, um período de frenagem elétrica, mas sem período de repouso.
- O regime S8 é contínuo periódico com mudanças de carga e de velocidade, sendo um período com carga constante e uma determinada velocidade, e, nos períodos subsequentes, com outras cargas constantes em diferentes velocidades.
- O regime S9 possui variações não periódicas de carga e velocidade, incluindo frequentemente sobrecargas superiores aos valores nominais.
- O regime S10 opera com cargas constantes e distintas, sendo recomendado no máximo quatro valores de cargas distintas e que, em cada período de operação, o tempo seja suficiente para que o equilíbrio térmico seja atingido.

Para analisar a viabilidade do uso de um motor em uma determinada aplicação, deve-se levar em consideração também a altitude em que o motor será instalado e a temperatura do meio refrigerante, conforme NBR 7094 [ABNT, 2003]. As condições usuais de serviço, definidas em norma, são de altitude não superior a 1.000 m acima do nível do mar e meio refrigerante (na maioria dos casos à temperatura ambiente do ar) que deve ser inferior ou igual a 40 °C. Até estes valores de altitude e temperatura

ambiente, considera-se condições normais e o motor deve fornecer, sem sobre aquecimento, sua potência nominal.

Segundo essa mesma norma, quando motores são instalados em altitudes superiores aos 1.000 m e inferiores aos 4.000 m, a uma temperatura ambiente de 40 °C, admite-se uma redução na temperatura ambiente de 1% dos limites de elevação de temperatura das classes de isolamentos, para cada aumento de 100 m na altitude acima de 1.000 metros do nível do mar. Para altitudes acima de 4.000 metros, deve-se contatar o fabricante do motor.

## **EFEITOS DA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO NÃO IDEAL NA VIDA ÚTIL DO MOTOR**

Teoricamente, em sistemas de potência trifásicos, as tensões de linhas são senoidais e têm os mesmos valores eficazes e são defasadas de 120°. Entretanto, na prática, sistemas de distribuição podem apresentar as seguintes deformidades: subtensão e sobretensão de longa duração, desequilíbrios, desvios de ângulos de fase, harmônicos, afundamentos e elevações de tensão, impulsos, transitórios e flutuações de tensão. Este capítulo dá ênfase a um sistema de potência, operando com tensão nominal, subtensões, sobretensões, sistema desequilibrado e com harmônicos, enquanto que, afundamentos e elevações de tensão, impulsos, transitórios e flutuação de tensão serão analisados em trabalhos futuros que versará sobre qualidade de energia aplicada aos motores.

Os motores de indução quando submetidos às variações de tensão, tais como subtensão e sobretensão, mudam suas características operacionais e com impactos no tempo de vida útil. Os efeitos destas variações de tensão e procedimentos para minimizá-las são:

- Subtensão - se o motor opera com uma tensão inferior a nominal, a corrente absorvida da rede aumentará para manter o conjugado necessário requisitado pela carga, resultando no aumento das perdas por efeito Joule no estator e rotor, e da temperatura de operação, afetando a vida útil do isolamento. Certos procedimentos técnicos podem ser efetuados para minimizar os efeitos da subtensão, tais como: redimensionar os cabos alimentadores do motor; remanejar o motor para o centro de carga e ajustar a derivação do transformador alimentador.
- Sobretensão - se a tensão aplicada ao motor é superior à nominal, a corrente de magnetização irá aumentar, elevando as perdas de magnetização, podendo saturar o núcleo do motor. A sobretensão também aumenta o ruído de origem magnética e a velocidade do motor. O procedimento técnico para minimizar o efeito da sobretensão é o ajuste da derivação de tensão no transformador alimentador [Santos, 2006].

Os sistemas elétricos trifásicos reais de potência e os seus equipamentos são afetados pelo desequilíbrio de tensão, pois um pequeno desequilíbrio da tensão de fase pode propiciar um desequilíbrio desproporcional de corrente de fase. Sob condições de desequilíbrio, o sistema elétrico terá maiores perdas e aquecimento. O efeito de desequilíbrio de tensão pode também ser severo em equipamentos tais como motores de indução, conversores eletrônicos de potência, controladores eletrônicos de velocidade (ASD). Os desequilíbrios de tensão, em sua grande maioria, têm origem nos sistemas de distribuição, nos consumidores comerciais, residenciais, rurais e industriais [Jouanne e Banerjee, 2001].

Os harmônicos são conhecidos nos sistemas elétricos há décadas, quando os mesmos eram injetados no sistema devido à utilização de fornos a arco, lâmpadas de descargas, dispositivos saturáveis etc. Com o uso crescente da eletrônica em equipamentos de consumidores residenciais, comerciais e industriais nas últimas décadas, as cargas não lineares aumentaram significativamente o conteúdo harmônico no sistema elétrico, aumentando a distorção da forma de onda de tensão. Este conteúdo harmônico quando aplicado ao motor faz com que circule, no estator e rotor, correntes com suas respectivas frequências harmônicas, resultando em aumento das perdas no cobre do estator e rotor, além da alta saturação do circuito magnético, e, como consequência, o aumento das perdas do ferro.

## MANUTENÇÃO DE MOTORES

A manutenção é uma complexa fonte de custos elevados e como tal precisa ser administrada criteriosamente. Sua atividade meio, dentro de um sistema produtivo, é de fundamental importância para a produção e a qualidade final do produto. Todo sistema operacional tem um tempo de vida estimado e a probabilidade de falha aumenta com a redução do tempo de vida. Deste modo, é essencial ter-se uma manutenção confiável para atuar de forma simultânea com o processo, reduzindo a probabilidade de paralisação. Quando um sistema opera sem interrupção e perda da produção, em um período de tempo definido, pode-se dizer que este sistema é confiável. Portanto, a confiabilidade de um sistema é definida como a probabilidade do sistema operar sem interrupção não programada em um período determinado de tempo. Um sistema 100% confiável é economicamente inviável. Efetuando-se a manutenção dentro de custos viáveis, sem impactar os custos do sistema produtivo, pode-se atingir um equilíbrio adequado, dentro de suas respectivas particularidades. Em sistemas motrizes, estas particularidades definem o formato de manutenção que pode ser aplicado em um todo ou em setores específicos da empresa. A manutenção pode ser corretiva e preventiva.

### Manutenção corretiva

A manutenção corretiva deve ser efetuada quando instalações e equipamentos operam como unidades individuais, ou são separados por partes no processo de fabricação, com uma unidade suprindo a falha sem afetar o processo de produção. Em uma instalação que opera com vários equipamentos com funções semelhantes, pode-se chegar à conclusão que é mais barato, fácil e rápido permitir que o motor pare e então substituí-lo por outro que já está recondicionado ou novo. O motor substituído é então recuperado e mantido à disposição para futuras utilizações, verificando seu rendimento para atender a política de eficiência de energia. É importante ressaltar que deve ser efetuado um planejamento do método de reparo, bem como a preparação de ferramental necessário.

Um outro formato de manutenção corretiva, utilizada em setores de sistemas produtivos que usam grande quantidade de motores pequenos de baixo custo, é a substituição não planejada de um motor danificado por um motor novo. O setor de manutenção deve ter em estoque unidades capazes de substituir os motores danificados de forma eficiente. Este procedimento é indicado quando o custo de reparação é maior que o custo de aquisição e, em consequência disto, o motor danificado é substituído por outro motor novo com maior confiabilidade.

Esse tipo de manutenção não deve ser aplicado em motores que interrompam o processo produtivo devido ao elevado custo da perda de produção e da qualidade final dos produtos afetados por uma parada não programada [Penrose, 2003].

### Manutenção preventiva

Manutenção preventiva é dividida em duas formas básicas, sendo uma baseada em períodos de tempos pré-determinados e denominada de manutenção sistêmica, e a outra baseada, em acompanhamento de parâmetros, é chamada de manutenção preditiva. A manutenção sistêmica é utilizada quando o mecanismo de falha é típico de desgaste, como a troca dos mancais antes do travamento do rotor. Já a manutenção preditiva consiste do acompanhamento das condições e/ou desempenho, através da análise de testes periódicos em parâmetros representativos da situação do motor. Um exemplo de manutenção preditiva é a determinação da expectativa de vida útil do isolamento das bobinas do estator através da medição da resistência de isolamento.

A substituição planejada é um formato de manutenção preventiva que é frequentemente utilizada com bons resultados em vários setores industriais, principalmente naqueles em que um determinado motor é responsável pela principal unidade operacional da empresa. Nestes casos, a mesma deve ser realizada dentro de critérios técnicos e administrativos, tendo como suporte o banco de dados do motor ou de informações de fabricantes ou fornecedores. Os procedimentos de manutenção devem ser planejados antecipadamente e efetuados em dia específico de paralisação do processo produtivo, sendo que o conjunto ou parte do conjunto que será substituído deve estar disponível no momento da

manutenção, juntamente com todo ferramental necessário à manutenção, instrumentos de medição e aferição e corpo técnico da empresa. Isto para tornar o tempo de manutenção compatível com o tempo de paralisação sem haver custos adicionais de perda de produção, que acabam aumentando o custo operacional do motor.

Em síntese, a manutenção de um motor implica no acompanhamento do estado de conservação/desgaste dos seus componentes, aquisição e manutenção em estoques desses componentes, definição do momento de substituição, definição de equipes de manutenção e tempo de manutenção. Portanto, os tipos de manutenção devem se adequar a cada tipo específico do processo produtivo, de forma a manter a produção conforme a expectativa preestabelecida, propiciando maior confiabilidade ao sistema.

A manutenção não consiste somente em substituir componentes, mas também em procedimentos básicos, como manter o sistema motriz limpo, seco e bem conectado, evitar umidade, poeira etc. Além disto, efetuar medições da tensão de alimentação, temperatura ambiente e desgaste prematuro de componentes, possibilita uma manutenção eficiente com custo relativo baixo frente à confiabilidade do sistema.

### Confiabilidade

A confiabilidade é a probabilidade de um sistema operar por um período de tempo definido sem ocorrência de falha. Para alcançar este objetivo, é necessário o desenvolvimento de um planejamento fundamentado nos conceitos de confiabilidade. Estes conceitos são: análise da confiabilidade com o uso de métodos probabilísticos, criação de um banco de dados dos motores, avaliar o custo benefício da manutenção, estimar o tempo ideal para o sistema motriz operar sem ocorrência de falhas e acompanhar e comprovar a expectativa de tempo ideal dos procedimentos de manutenção [IEEE, 1997].

### Vida útil de motores

Para determinar a confiabilidade de um motor dentro de um sistema produtivo é necessário ter uma estimativa de sua vida útil. Segundo Andreas [1982], não existe projeto capaz de definir a vida útil de motores, devido à diversidade de fatores que influenciam a mesma. Entretanto, a tabela 2 apresenta uma estimativa de vida média de motores, com base em dados e estudos realizados pelo U. S. Department of Energy. Segundo Almeida [2006], a estimativa de vida média de motores de baixa tensão, com potência na faixa de 1 a 250 kW, é aquela apresentada na tabela 3.

A comparação entre as tabelas 2 e 3 apresenta uma discrepância de vida útil de até 65% quando se trata de motores com potência superior a 50 HP. Essas tabelas são fundamentadas em dados estatísticos de uma determinada empresa.

Tabela 2 - Estimativa de vida de motores elétricos

Faixa de potência (HP)	Vida média (anos)	Faixa de vida média (anos)
Menor que 1	12,9	10 até 15
1 até 5	17,1	13 até 19
5.1 até 20	19,4	16 até 20
21 até 50	21,8	18 até 26
51 até 125	28,5	24 até 33
Maior que 125	29,3	25 até 38

Tabela 3 - Estimativa de vida média de motores de indução com manutenção e troca de componentes

Potência em kW	Vida média em anos
1,0 – 7,5	12
7,5 – 75	15
75 – 250	20

As estimativas das tabelas apresentam discrepâncias em seus valores, mas considerando que a vida dos motores é praticamente definida pela vida útil do isolamento das bobinas do estator [Andreas, 1982], esta é normalmente utilizada como referência.

### Influência dos fatores ambientais na vida útil do isolamento

Os fatores ambientais que influenciam a vida útil dos isolamentos, tais como: poeira, abrasivos, térmicos, umidade, emanções químicas, condições mecânicas de operação, umidade, são mostrados na NBR 7094 [ABNT, 2003]. A norma cita os fatores, como mostrado na tabela 4, porém não os quantifica. Os efeitos destes fatores associados aos parâmetros técnicos são usados para definir a temperatura de operação, confiabilidade e vida útil do motor.

Tabela 4 - Fatores que afetam a vida útil do isolamento

NBR 7094	Exposição
4.4.2.1-a	Poeiras combustíveis, explosivas, abrasivas ou condutoras
4.4.2.1-b	Fibras ou partículas em suspensão
4.4.2.1-c	Emanações químicas
4.4.2.1-e	Vapor d'água, ar salino ou vapor de óleo
4.4.2.1-f	Atmosferas úmidas ou muito secas
4.4.2.1-h	Empuxo axial ou radial imposto ao eixo do motor
4.4.2.2-a	Tensão de alimentação desequilibrada em mais que 1%

### Mancais de rolamentos

Mancal é qualquer superfície que suporta, ou é suportada, por outra superfície. Os mancais servem para suportar o conjunto móvel do motor (rotor) e permitem o movimento giratório em relação ao conjunto fixo (estator). Um bom mancal deve ser composto de material que seja suficientemente forte para resistir às pressões impostas a ele, e deve permitir que a outra superfície se movimente com um mínimo de atrito e desgaste. As peças que o constitui devem ser montadas dentro de pequenas tolerâncias, para proporcionar um funcionamento eficiente e silencioso e, ainda, permitir liberdade de movimento e elevado rendimento. Os mancais são requeridos para suportar cargas radiais, cargas de empuxo axiais ou uma combinação das duas. Existem dois meios pelos quais as superfícies dos mancais se movem uma em relação à outra: pelo movimento de deslizamento de um metal contra o outro e/ou pelo rolamento de uma superfície sobre outra.

Dois tipos de mancais são normalmente utilizados em motores de indução, sendo rolamentos de esfera, para motores com potência igual ou inferior a 10 CV, ou rolamentos de rolos, para potência superior a 10 CV.

O fator mecânico mais significativo para a vida útil do motor são os mancais de rolamentos. A previsão da vida útil de um mancal de rolamento com uma fadiga nominal devida ao desgaste é normalmente definida como o fator "L10", o qual permite estimar que 10% de uma grande população de mancais falham no tempo. Supondo que este tempo seja de um ano, então 50% dos mancais falham em um tempo de cinco anos, sendo esse percentual de falha denominado fator "L50". A outra metade falha no tempo restante de vida útil, como é mostrado na figura 10 [Bonnett, 1992].

Os principais fatores que afetam o tempo de vida útil dos mancais de rolamentos de um motor são o carregamento, o desbalanceamento e o desalinhamento.

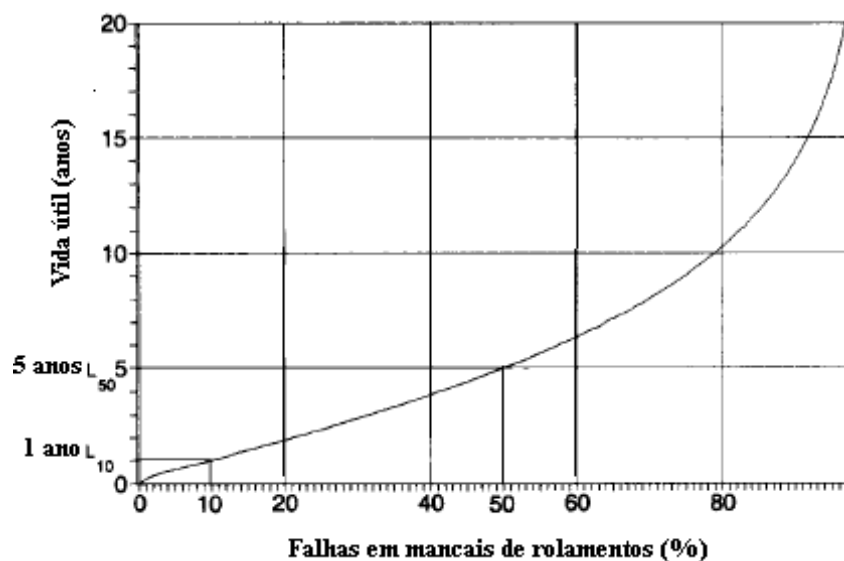


Figura 10 - Relação entre falhas e vida útil de mancais de rolamentos

### Efeito do carregamento

Nos motores de indução sem utilização de inversores, a velocidade é praticamente constante, e, supondo que o motor esteja montado na posição horizontal, onde o esforço mecânico no rolamento é praticamente radial, pode-se então admitir que o tempo de vida útil seja inversamente proporcional ao seu carregamento. Com base nessas condições, pode-se estimar a influência da carga na vida útil dos rolamentos. Quando o carregamento dos motores está abaixo do nominal, os mancais têm aumento de vida útil. Já um carregamento acima do nominal tem uma redução, como é apresentado na tabela 5.

Tabela 5 - Efeito do carregamento na vida útil dos mancais de rolamentos

Motor 1 CV		Motor 5 CV		Motor 10 CV	
Carcaça - 80		Carcaça - 100L		Carcaça - 132S	
Rolamentos		Rolamentos		Rolamentos	
6204 ZZ e 6203 ZZ		6206 ZZ e 6205 ZZ		6206 ZZ e 6206 ZZ	
Carga	Vida útil	Carga	Vida útil	Carga	Vida útil
50	160.000	50	160.000	50	160.000
75	47.407	75	47.407	75	47.407
100	20.000	100	20.000	100	20.000
125	10.240	125	10.240	125	10.240

### Efeito do desbalanceamento

O desbalanceamento do rotor pode ocorrer principalmente devido a erro de fabricação, desgaste de mancais, carregamento fora da especificação nominal, rompimento de barras do rotor e/ou tensão desequilibrada aplicada no estator. A avaliação do balanceamento do rotor de um motor tem um custo elevado, em virtude da tecnologia que é utilizada. Durante o ciclo de vida do motor, o programa de manutenção deve verificar as condições de desbalanceamento e tomar medidas para minimizá-las, pois as mesmas afetam significativamente a vida útil dos mancais.

A tabela 6 apresenta a redução de vida útil devido a um desbalanceamento de 2% da massa dos rotores, onde  $J$  é o momento de inércia em  $\text{kg.m}^2$  e  $v$  é a velocidade em rpm. Os valores dos momentos de inércia e das velocidades dos motores foram retirados do catálogo de fabricante [WEG, 2007].

Tabela 6- Efeito do desbalanceamento na vida útil dos mancais de rolamentos

Motor 1 CV Carcaça – 80		Motor 5 CV Carcaça – 100L		Motor 10 CV Carcaça – 132S	
J	0,00328	J	0,01072	J	0,05427
Veloc.	1730	Veloc.	1720	Veloc.	1760
F	32,04	F	82,8	F	327,19
CM	392,54	CM	784,00	CM	1568,00
LN	20.000	LN	20.000	LN	20.000
Lútil	15.805	Lútil	14.818	Lútil	16.547
Lútil%	79,02	Lútil%	74,09	Lútil%	82,7

Essa tabela mostra que um desbalanceamento tão pequeno como de 2% reduz a vida útil dos mancais para 79,02%, 74,09% e 82,7% no caso dos motores de 1, 5 e 10 CV, respectivamente.

### Efeito do desalinhamento

A vibração produzida pelo desalinhamento do acoplamento motor-carga afeta a vida útil dos acoplamentos mecânicos, causando deterioração progressiva também nos selos de vedação dos mancais de rolamentos, no balanceamento do rotor, no isolamento das bobinas do estator e ruptura do eixo. O alinhamento deve ser efetuado dentro de pequenas faixas de tolerância e com alto nível de precisão. O sistema de alinhamento a laser e o de dois relógios comparadores, estando um apontado radialmente e outro axialmente, são indicados para alcançar estes níveis, e possibilitam verificar o desvio de paralelismo e concentricidade. A tabela 7 apresenta os limites de tolerância recomendado para acoplamentos da General Motors [NASA, 2000].

Tabela 7 - Tolerância recomendada para acoplamento

Tipo de Acoplamento	Velocidade máxima em rpm	Tolerância vertical, horizontal e paralelismo em mm
Acoplamento Direto	600	0,127
	900	0,134
	1200	0,0635
	1800	0,0508
	3600	0,0254

Dados práticos, fornecidos pela indústria petroquímica, indicam que um bom alinhamento pode aumentar em oito vezes a vida do mancal de rolamento, reduzindo o custo de manutenção em sete por cento e ainda aumentar em doze por cento o carregamento do motor [NASA, 2000].

### Custos de manutenção em motores

É importante entender que usualmente os motores falham em seu ciclo de vida, devido à degradação de seus componentes elétricos e mecânicos, sendo que suas eficiências decrescem e as perdas aumentam com o tempo, resultando em uma probabilidade maior de o sistema acionado ter uma paralisação não programada.

A utilização de um programa de manutenção preventiva tem, como consequência, o aumento da produtividade, cumprimento de prazo de entrega com os clientes, redução do custo do produto final, menor consumo de energia, maior qualidade e grande competitividade no mercado. A tabela 8 apresenta uma estimativa de custos de paralisação de algumas modalidades industriais [Penrose, 2003].



Tabela 8 - Estimativa de custos de paralisação

Modalidade industrial	Custo médio de paralisação por hora em dólar
Produtos agrícolas	7.000,00
Indústria de alimentos	30.000,00
Indústria química e de petróleo	87.000,00
Indústria de fundição	100.000,00
Automotiva	200.000,00

## AVALIAÇÃO DA AQUISIÇÃO DE MOTORES

### Custos do motor durante seu ciclo de vida

Um motor, durante seu ciclo de vida útil, tem seus custos divididos em dimensionamento e projeto de instalação, aquisição, instalação, manutenção e operação. A figura 11 mostra a composição dos custos totais de um motor durante o seu ciclo de vida.

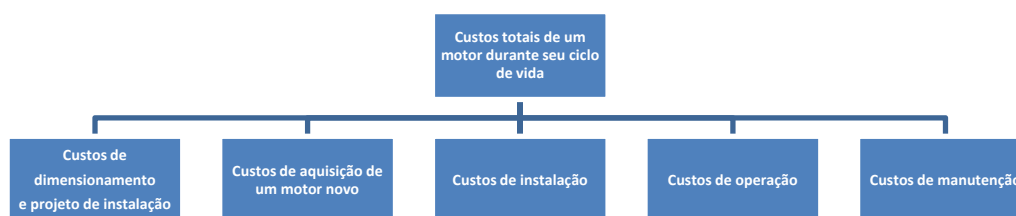


Figura 11 - Custos de um motor durante seu ciclo de vida

Os custos com dimensionamento e projeto de instalação, aquisição e instalação, correspondem a um investimento com valor definido e fixo no tempo, enquanto que os custos com operação e manutenção podem ser variáveis no tempo.

### Custos de dimensionamento, projeto de instalação e da instalação

A quantificação dos custos de dimensionamento, projeto de instalação e da instalação depende das atividades peculiares de cada empresa, principalmente em termos do tipo do produto, da segurança e da qualidade final desse produto, tornando-se assim estes custos bem variados. Uma quantificação aproximada é que o custo de dimensionamento, do projeto de instalação e da instalação constitui a metade do custo de aquisição do motor [Penrose, 1999]. Todavia tal a referência não especifica se este custo é válido para pequenos ou para grandes motores.

### Custos de aquisição

A quantificação do custo de aquisição de motores novos é facilmente obtida junto aos fabricantes de motores. Os fabricantes disponibilizam tabelas com valores dos motores padrão e de alto rendimento, já incluso o preço de transporte sem o imposto de circulação de mercadorias e serviços (ICMS). Nos projetos já implantados e com unidades existentes a serem substituídas, é conveniente contabilizar os custos adicionais inerentes à substituição, tais como os custos de adaptação da instalação para a nova unidade e do número de horas paralisadas.

Uma análise de custos de motores de 1 a 10 CV, apresentados nessas tabelas, conduzem às curvas mostradas na figura 12, onde os preços de aquisição dos motores de alto rendimento são da ordem de 20 a 40% mais elevado que os motores padrão. A diferença de preço mais acentuada entre as duas linhas é

encontrada para o motor de 5 CV, enquanto que a diferença de preço menos acentuada é encontrada para o motor de 6 CV.

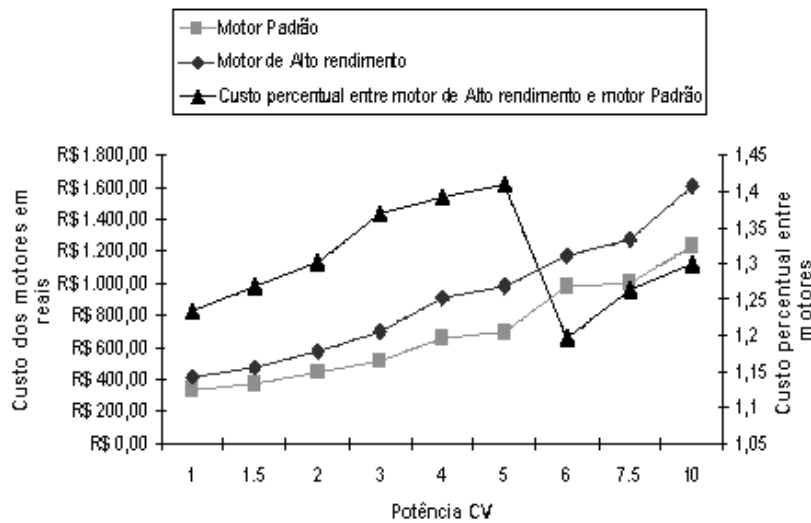


Figura 12 – Preços de motores de alto rendimento e padrão

### Custos de manutenção

Os mancais de rolamentos e as bobinas do estator são responsáveis por aproximadamente 80% das causas de falhas do motor, conforme mostra a figura 13. Com base nesta informação, o correto, em princípio, seria focar a manutenção nos mancais e nas bobinas. Porém, para a faixa de motores de interesse nesse trabalho, a troca das bobinas do estator é inviável por motivos técnicos, como a perda de rendimento, e por motivos econômicos devido ao custo elevado do rebobinamento e aumento do consumo de energia [Penrose, 1999].

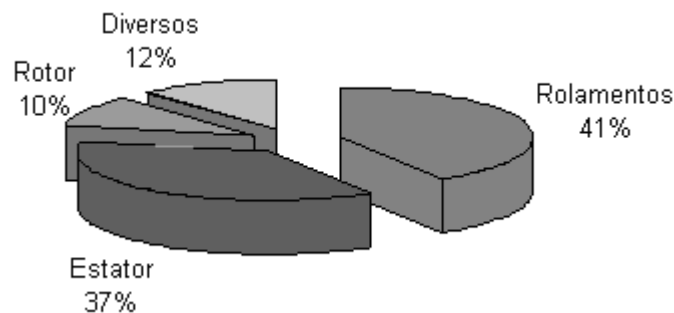


Figura 13 - Falhas percentuais nas partes constituintes de um motor

A tabela 9 apresenta os custos de rebobinamento em relação aos custos de um motor novo, em dólares e em valores percentuais, para motores de 3 a 200 Hp. Ao analisar essa tabela, verifica-se, que somente quando o custo de rebobinamento for menor que 60% do custo do motor novo, é sugerido a reforma do motor, e isto acontece para motores com potência igual ou superior a 60 Hp. Em potências menores, é recomendado a troca do motor [Clayton, 2003].

Bortoni [1999] sugere que o custo de rebobinamento não deve exceder a 60% do custo do motor novo, pois na grande maioria das reformas das bobinas, o motor diminui seu rendimento e, em consequência, consome mais energia, além da vida útil da bobina reformada ser menor que a bobina de um motor novo.

A manutenção para os mancais de rolamentos consiste somente no procedimento de troca dos mesmos, pois a vida útil estimada é de 20.000 horas, tempo este estimado para a troca dos mancais de rolamento.

Tabela 9 - Custo de rebobinamento em relação a um motor novo

Custos de Rebobinamento de Motor - 4 pólos, em dólares				
Motor Hp	Custo de rebobinamento	% do novo	Custo do novo	conclusão
200	\$ 2,985.00	49,0%	\$ 6,087.55	rebobinar
150	\$ 2,420.00	49,9%	\$ 4,950.00	rebobinar
125	\$ 2,028.00	48,0%	\$ 4,224.98	rebobinar
100	\$ 1,716.00	56,5%	\$ 3,037.54	rebobinar
75	\$ 1,365.00	54,1%	\$ 2,525.29	rebobinar
60	\$ 1,171.00	57,3%	\$ 2,043.73	rebobinar
50	\$ 1,033.00	83,9%	\$ 1,231.65	trocar
40	\$ 858.00	73,1%	\$ 1,173.00	trocar
30	\$ 722.00	80,5%	\$ 896.75	trocar
25	\$ 614.00	81,3%	\$ 775.23	trocar
20	\$ 536.00	87,4%	\$ 613.28	trocar
15	\$ 463.00	92,6%	\$ 499.80	trocar
10	\$ 858.00	110,4%	\$ 341.60	trocar
7,5	\$ 319.00	106,4%	\$ 300.00	trocar
5	\$ 271.00	120,1%	\$ 225.60	trocar
3	\$ 249.00	133,3%	\$ 186.80	trocar

O procedimento de troca dos mancais de rolamentos é viável tecnicamente por não afetar o rendimento do motor e economicamente devido ao baixo custo dos mancais. Os custos dos mancais de rolamento de motores até 10 CV são mostrados na tabela 10 [ABECOM Rolamentos, 2005].

Tabela 10 Custos dos mancais de rolamento

Motor 1 CV Carcaça – 80		Motor 5 CV Carcaça – 100L		Motor 10 CV Carcaça – 132S	
Custo unitário		Custo unitário		Custo unitário	
6204 ZZ	6203 ZZ	6206 ZZ	6205 ZZ	6203 ZZ	6206 ZZ
R\$9,91	R\$9,12	R\$14,98	R\$13,95	R\$9,12	R\$14,98

Ao analisar essa tabela, observa-se que os custos dos mancais representam, em média, de 1,5% a 2% dos custos dos motores, justificando troca dos mancais. Os demais custos de manutenção consistem nos custos de homem/hora e equipamentos para análise da tensão de alimentação, da rigidez dielétrica do isolamento das bobinas do estator, do desgaste dos mancais de rolamentos, da limpeza, da vibração, dos ruídos e acondicionamentos dos motores.

### Custo de operação

O custo de operação do motor é composto de fatores técnicos e econômicos, onde os principais são: rendimento do motor conforme seu projeto de fabricação, carregamento, subtensão, sobretensão, desequilíbrio de tensão, tensão com componentes harmônicas e custo da energia contratada.

### Custo com rendimento

Ao adquirir um motor novo, nos seus dados de placa vem especificado o seu rendimento. Quanto maior for o mesmo menor será o custo com o consumo de energia. O consumidor pode pesquisar no mercado o fabricante que ofertar o motor com maior rendimento para motores do tipo padrão. Com

relação aos motores de alto rendimento, os fabricantes se limitam a atender a legislação vigente, o que faz com que todos comercializem motores com o mesmo rendimento. Espera-se, em um futuro recente, que o mercado livre oferte motores de alto rendimento com valores superiores aos previsto pela legislação, como já ocorre nos EUA.

### Custo com carregamento

Esse custo refere-se ao consumo de energia que o motor necessita para movimentar uma carga, de forma que quanto maior for o carregamento, maior será o consumo de energia, assim como o custo. A figura 14 mostra curvas para um motor de 10 CV, onde o aumento da corrente em função do carregamento, para um valor constante de tensão, comprova o aumento do consumo de energia com o aumento do carregamento. Ao analisar a figura, pode-se verificar um aumento do fator de potência e do rendimento com o aumento do carregamento, sendo que o maior rendimento ocorre na faixa de 75 a 100 % do carregamento nominal, permanecendo praticamente constante nesta região (WEG, 2007).

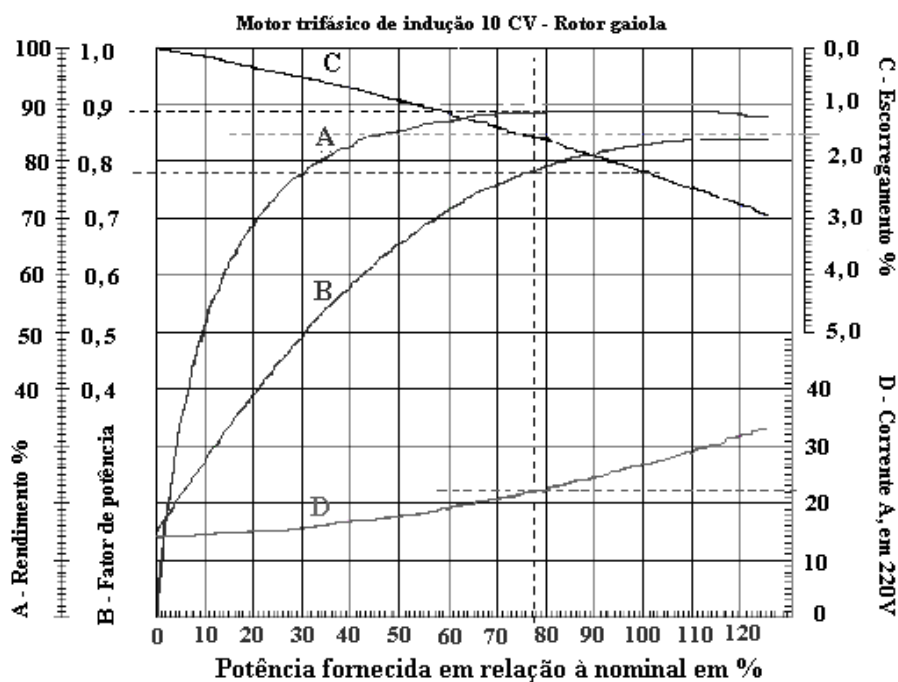


Figura 14 - Curvas características em função da potência

### Custo com o desequilíbrio de tensão

O motor, ao ser alimentado com uma tensão trifásica com desequilíbrio, apresenta um aumento de suas perdas. Como consequência, ocorre uma redução do rendimento, maior consumo de energia e um aumento do custo.

### Custo com subtensão

Quando submetido a uma subtensão, a máquina solicita um acréscimo de corrente da fonte de alimentação para manter o conjugado solicitado pela carga. Como consequência, ocorre uma redução do rendimento, um aumento do consumo de energia e, finalmente, um aumento do custo.

### Custo com sobretensão

Um motor, estando sujeito a uma sobretensão, reduz a solicitação de corrente para manter o conjugado exigido pela carga. Isso pode resultar no aumento do rendimento, redução do consumo de energia e do custo [Santos, 2006].

### Custo devido às componentes harmônicas de tensão

As harmônicas de tensão não contribuem de forma significativa para alterar a componente de corrente fundamental dos motores. A corrente de alimentação do motor aumenta unicamente devido ao acréscimo de suas componentes harmônicas. A corrente fundamental permanece praticamente inalterada, enquanto as suas componentes harmônicas sofrem um aumento linear, de acordo com a relação obtida entre as componentes harmônicas de tensão e as impedâncias harmônicas determinadas a partir das componentes de sequência positiva e negativa do motor para cada harmônica especificada. A presença de componentes harmônicas de corrente eleva as perdas por efeito Joule nos condutores do estator e rotor, reduzindo o rendimento e aumentando o consumo de energia e custo. Os efeitos das harmônicas de ordem superior a 13<sup>o</sup>, para os motores de indução, são desprezíveis.

### Custo da energia contratada

Atualmente, o custo de energia varia com o nível da tensão de alimentação, o horário e o período anual de consumo e o tipo de tarifa contratada junto à concessionária de energia. A tabela 11 apresenta os consumidores dos grupos A e B divididos pelo nível de tensão de alimentação.

Tabela 11 grupos de consumidores

<b>GRUPO A</b>	
<b>Subgrupo</b>	<b>Tensão Fornecimento</b>
A1	≥ 230 kV
A2	88 a 138 kV
A3	69 kV
A3a	30 a 44 kV
A4	2,3 a 25 kV
AS	Subterrâneo
<b>GRUPO B</b>	
<b>Subgrupo</b>	<b>Tensão Fornecimento</b>
B1	Residencial
B1	Residencial Baixa Renda
B2	Rural
B2	Cooperativa de Eletrificação Rural
B2	Serviço Público de Irrigação
B3	Demais Classes
B4	Iluminação Pública

O grupo A é composto de unidades consumidoras com atendimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou, ainda, atendidas em tensão inferior 2,3 kV a partir do sistema subterrâneo de distribuição. Esse grupo é caracterizado pela estrutura tarifária binômica e subdividido nos subgrupos A1, A2, A3, A4 e AS de acordo com a tensão de atendimento.

O grupo B é composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão inferior a 2,3 kV, ou, ainda, atendidas em tensão superior 2,3 kV, nos termos definidos na resolução 456 [ANEEL, 2000]. Esse grupo é caracterizado pela estrutura tarifária monômica e subdividido nos subgrupos B1, B2, B3 e B4.

O horário diário de consumo é dividido em horário de ponta e fora de ponta. O horário de ponta é definido pela concessionária que atende ao consumidor como um intervalo consecutivo de 3 horas de segunda a sexta feira, excluindo os feriados nacionais. O horário fora de ponta é o intervalo consecutivo de 21 horas complementares às 3 horas do horário de ponta, de segunda a sexta feira, acrescido das 24 horas diárias de sábado, domingo e feriados.

O período anual de consumo é dividido em período seco e úmido. O período seco corresponde ao período de sete meses consecutivos, compreendendo os fornecimentos abrangidos de maio a

novembro, e o período úmido corresponde ao período de cinco meses consecutivos, compreendendo os fornecimentos abrangidos de dezembro a abril do ano seguinte [ANEEL, 2000], como mostra a figura 15.

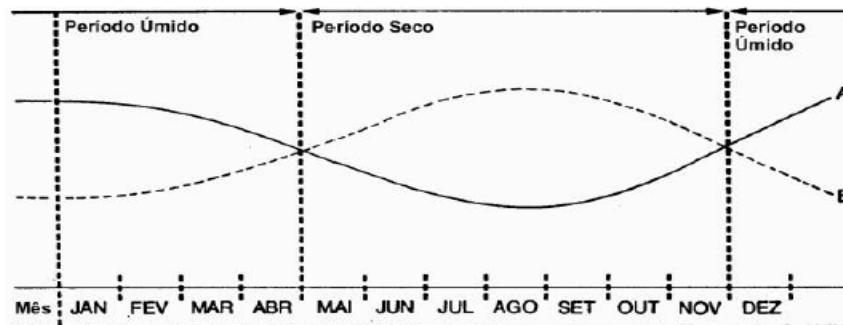


Figura 15- Comportamento da oferta/demanda de energia durante o ano

A curva A representa a disponibilidade média de armazenamento de água nos reservatórios das usinas hidrelétricas do sistema nacional interligado, e a curva B o comportamento do mercado consumidor de energia elétrica [Ramos, 2002].

A estrutura tarifária é dividida em tarifa convencional, horo-sazonal azul e horo-sazonal verde, cuja respectiva regulamentação encontra-se também na Resolução 456 [ANEEL, 2000].

A estrutura tarifária convencional é caracterizada por um custo único de tarifa, independente das horas de utilização do dia e dos períodos do ano. Essa estrutura tarifária é aplicada aos consumidores com atendimento em tensão inferior a 69 kV e demanda contratada inferior a 300 kW. O cálculo do custo de energia elétrica para um usuário de tarifa convencional é feito conforme a equação 1 [Santos, 2006].

$$VPF = (CF.TC + DF.TD) \cdot \left( \frac{1}{1 - ICMS} \right) \quad (1)$$

onde: VPF – valor parcial de fatura de energia elétrica [reais]; CF – consumo de energia elétrica ativa faturada [kWh]; TC – tarifa de consumo [reais]; DF – demanda faturada [reais]; TD – tarifa de demanda [reais]; ICMS – imposto de circulação de mercadorias e serviços [%].

A estrutura tarifária horo-sazonal azul é a aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia, os períodos do ano e tarifa de demanda de potência diferenciada. Essa estrutura tarifária é aplicada de forma compulsória aos consumidores com atendimento em tensão igual ou superior a 69 kV ou para atendimento em tensão inferior a 69 kV e demanda contratada superior a 300 kW. Essa estrutura tarifária é também aplicada de forma opcional a consumidores com atendimento em tensão inferior a 69 kV e demanda contratada inferior a 300 kW. O cálculo do custo de energia elétrica para um usuário de tarifa azul é efetuado conforme as equações:

-Período seco:

$$VPF = (CF_{fs} . TC_{fs} + CF_{ps} . TC_{ps} + DF_f . TD_f + DF_p . TD_p) \cdot \left( \frac{1}{1 - ICMS} \right) \quad (2)$$

-Período úmido:

$$VPF = (CF_{fu} . TC_{fu} + CF_{pu} . TC_{pu} + DF_f . TD_f + DF_p . TD_p) \cdot \left( \frac{1}{1 - ICMS} \right) \quad (3)$$

onde: f – índice que indica o horário fora de ponta, p – índice associado ao horário de ponta, s – índice referente ao período seco, u – índice relativo ao período úmido.

A estrutura tarifária horo-sazonal verde consiste na aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia, os períodos do ano e tarifa única de demanda de potência. Essa estrutura tarifária é aplicada de forma compulsória aos consumidores com atendimento em tensão inferior a 69 kV e demanda contratada superior a 300 kW. Tal estrutura tarifária é

também aplicada de forma opcional aos consumidores com atendimento em tensão inferior a 69 kV e demanda contratada inferior a 300 kW. O cálculo do consumo de energia para um usuário de tarifa verde é efetuado conforme as equações apresentadas na sequência:

-Período seco:

$$VPF = (CF_{fs} \cdot TC_{fs} + CF_{ps} \cdot TC_{ps} + DF \cdot TD) \left( \frac{I}{1 - ICMS} \right) \quad (4)$$

-Período úmido:

$$VPF = (CF_{fu} \cdot TC_{fu} + CF_{pu} \cdot TC_{pu} + DF \cdot TD) \left( \frac{I}{1 - ICMS} \right) \quad (5)$$

## ANÁLISE ECONÔMICA

Dentro dos diversos métodos econômicos, três se destacam por serem equivalentes quando utilizados adequadamente. Esses métodos econômicos são: o valor presente líquido (VPL), a taxa interna de retorno (TIR) e o tempo de retorno de investimento (TRI).

Valor presente líquido (VPL)

O VPL, também conhecido como método do valor atual, é um método econômico financeiro que possibilita calcular os fluxos de caixa de uma série futura de receitas e despesas trazidas a um valor presente, e então comparar tal valor com as despesas efetuadas em investimentos iniciais de um determinado projeto. A quantificação do VPL pode ser efetuada conforme a equação 6.

$$VPL = A \frac{(1 + i)^n - 1}{i(1 + i)^n} - I \quad (6)$$

onde: A – diferença entre receitas e despesas mensais [reais]; i – taxa de juros [anual]; I – investimento inicial [reais]; n – período [anos].

Ao analisar o uso dessa equação, conclui-se que:

- o VPL maior do que zero significa que o investimento é economicamente atrativo, pois o valor presente das receitas é maior do que o valor presente das despesas.
- o VPL igual à zero mostra que o investimento é indiferente, pois o valor presente das receitas é igual ao valor presente das despesas.
- o VPL menor que zero indica que o investimento não é economicamente atrativo porque o valor presente das receitas é menor do que o valor presente das despesas.
- Entre dois ou mais projetos de investimento, o mais atrativo é aquele que tem maior VPL.

As principais vantagens do uso do VPL são:

- Mostra que o projeto de investimento resultará em lucro ou prejuízo para empresa;
- Considera o valor do dinheiro no tempo;
- Inclui todas as receitas e despesas na avaliação.

As principais desvantagens do uso do VPL são:

- É preciso conhecer a taxa juros de mercado;
- É necessário estimar a vida útil do projeto de investimento;
- A resposta é um valor monetário.

Mesmo com essas limitações, o método VPL ainda é um dos mais utilizados na análise de investimentos [Cristiane, 2004].

### Taxa interna de retorno (TIR)

A TIR não depende da taxa de juros vigente no mercado de capitais, daí o nome taxa interna de retorno. É um parâmetro intrínseco ao projeto e não depende de outros parâmetros que não os fluxos de caixa esperados. Esse TIR faz com que o VPL seja igual à zero, tornando igual o investimento inicial ao fluxo de caixa subsequente em um período de tempo estipulado. Isto significa que o fluxo de receitas iguala-se ao fluxo de despesas somado ao investimento inicial, e que o lucro do projeto é nulo, conforme mostrado pela equação.

$$A \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} - I = 0 \quad (7)$$

onde: A – fluxo de receitas menos o fluxo de despesas [reais]; i – taxa interna de retorno [%]; n – período [anos]; I – investimentos iniciais [reais].

### Tempo de retorno de investimento TRI

O TRI é o período de recuperação de um investimento e consiste na determinação do prazo em que o montante gasto do capital investido será recuperado por meio de fluxos de caixa gerados pelo investimento. Esse método é um dos mais difundido no meio técnico para a análise de viabilidade econômica, principalmente devido a sua facilidade de aplicação.

Existem duas formas de calcular o TRI: a primeira, denominada TRI simples, cujo procedimento de cálculo não leva em conta a variação do valor do dinheiro no tempo, sendo o prazo de recuperação do investimento encontrado dividindo-se o custo de implantação do empreendimento pelo benefício auferido. A outra forma, denominada TRI descontado, leva em conta o valor do dinheiro no tempo, e utiliza-se uma taxa de desconto para determinar o prazo da recuperação do capital investido. O TRI descontado é determinado conforme a equação 8 [Stephen, 1993].

$$TRI = - \frac{\ln \left( 1 - \frac{I}{A} i \right)}{\ln (1+i)} = \frac{\ln \left( \frac{A}{A - Ii} \right)}{\ln (1+i)} \quad (8)$$

onde : TRI – tempo [anos]; I – investimento [reais]; A – diferença entre receitas e investimentos mensais [reais]; i – taxa de juros [%].

A grande vantagem apresentada por esse método é que sua resposta é um período de tempo, o que permite comparar os tempos que várias alternativas levam para recuperar um determinado investimento. Como exemplo de aplicação, pode-se avaliar o TRI na aquisição de motores de alto rendimento e do tipo padrão de uma mesma potência com mesma capacidade de produção, de modo que aquele que apresentar menor tempo de retorno será o mais viável economicamente.

Devido a essa particularidade, é o método que melhor contempla o objetivo deste trabalho no que tange a viabilidade econômica, apesar das vantagens do VPL e do TIR. Portanto, ele é utilizado para definir o TRI dos motores de alto rendimento e do tipo padrão.

## ESTIMATIVAS DE VIDA ÚTIL DO MOTOR

A análise técnica da vida útil dos motores de indução está condicionada à vida dos enrolamentos do estator. Para estimar a vida útil com simulações computacionais e abranger a faixa de motores de 1 CV a 10 CV, foram escolhidos um motor de 1 CV, um motor de 5 CV e um motor de 10 CV.

Como os enrolamentos dos estatores dos motores de 1, 5 e 10 CV do tipo padrão e de alto rendimento possuem uma expectativa de vida média de 20.000 horas, operando em condições nominais,



pode-se então levantar a curva de expectativa de vida útil desses motores em função das horas de operação por ano. Essa expectativa de vida é inversamente proporcional às horas de operação anual do motor, conforme mostrado na figura 16. Essa figura mostra que a vida útil dos motores é de aproximadamente dois anos e quatro meses quando operando 8.760 horas/ano, e pode superar a trinta anos, para valores inferiores a 1.000 horas/ano. Para efeito de análise foram assumidos tempos de 1.000, 4.000 e 8.760 horas, definidos com base nos seguintes fatores:

- 1000 horas: é o tempo mínimo usado para viabilizar uma análise econômica;
- 8.760 horas: corresponde ao funcionamento por 24 horas/dia nos 365 dias/ano;
- 4.000 horas: é a estimativa de tempo de operação médio anual.

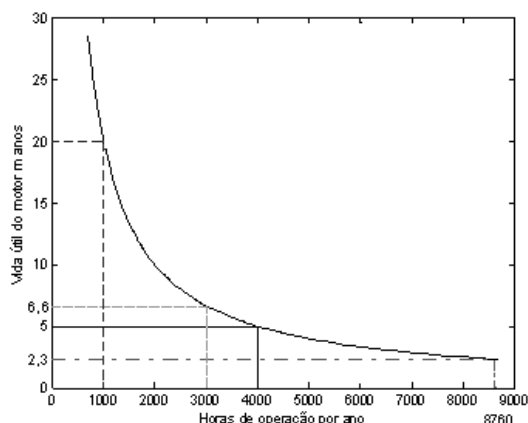


Figura 16 - Expectativa de vida útil em função das horas de operação por ano

Quando um motor opera fora de suas condições nominais, o mesmo tem sua vida útil alterada. Os efeitos dos parâmetros técnicos sobre a vida útil ocorrem de forma cumulativa, gerando um grande número de combinações de cálculo possíveis. Entretanto, nesse capítulo serão analisados os seguintes valores máximos permitidos de parâmetros de acordo com a norma NBR 7094 [ABNT, 2003]:

- Carregamentos de 50%, 75%, 100% e 125% do carregamento nominal;
- Tensão nominal; subtensão de 10%; sobretensão de 10%;
- Desequilíbrio de tensão de 0,0% e 1,5% da tensão nominal;
- Distorção harmônica de tensão de 3%;
- Temperaturas ambientes de 30°C e 40°C.

## Casos simulados

O estudo da viabilidade de troca de motores foi efetuado considerando os motores novos de 1, 5 e 10 CV. A tabela 12 apresenta os casos simulados para cada potência de motor.

Tabela 12 - Casos e parâmetros técnicos simulados

Caso simulado	Carregamentos 50%, 75%, 100%, 125%	Tensão			Desequilíbrio de tensão		Harmônicas de tensão		Temperatura ambiente	
		Nominal	Sub	Sob	Sem	Com	Sem	Com	30°C	40°C
1	X	X			X		X			X
2	X	X				X	X			X
3	X		X			X	X			X
4	X			X		X	X			X
5	X	X				X		X		X
6	X	X				X	X		X	

Onde: Sub – subtensão Sob – sobretensão

O 1º. caso foi realizado para os quatro tipos de carregamentos, tensão nominal, sem desequilíbrio e harmônicas e temperatura ambiente de 40°C. Ele representa o efeito do carregamento na vida útil do motor em condições nominais. O 2º. caso considera o efeito do desequilíbrio de tensão, enquanto o 3º. caso considera os efeitos de subtensão e desequilíbrio de tensão simultaneamente. O 4º. caso leva em consideração os efeitos de sobretensão e desequilíbrio de tensão também simultâneos, ao passo que o 5º. caso considera os efeitos simultâneos de harmônicas e desequilíbrio de tensão. Finalmente, o 6º. caso considera os efeitos simultâneos da temperatura ambiente e desequilíbrio de tensão. Nos procedimentos de cálculo considerou-se que as perdas a vázio são constantes, para os diversos carregamentos.

## Resultados obtidos

### Caso 1 - Efeito do carregamento na vida útil do motor

Os resultados deste caso são apresentados na tabela 13. Ao analisar esta tabela, pode-se concluir que o tempo de vida útil dos motores com 50% e 75% de carregamento é superior a 20000 horas, sendo que em 75% do carregamento as vidas úteis são significativamente maiores que dos motores operando com 100% do carregamento. Isto ocorre devido à redução das perdas internas, ocasionando uma redução da temperatura de operação e gerando um aumento de vida útil. Para os carregamentos de 125%, as vidas úteis são extremamente pequenas em relação aos outros carregamentos. Esse fato deve ser considerado na utilização de motores acima do carregamento nominal.

Tabela 13 - Número de horas de vida útil em função do caso 1

Motor	Carregamentos em %			
	C = 50	C = 75	C = 100	C = 125
	Vida útil em horas			
1 CV	194820	44790	20000	4450
5 CV	266590	97290	20000	220
10 CV	195920	63880	20000	320

### Caso 2 - Efeito do desequilíbrio de tensão

Os resultados são apresentados na tabela 14. O desequilíbrio de tensão produziu uma elevação da temperatura de operação de 4,5 °C, ocasionando uma redução da vida útil dos motores.

Tabela 14 - Número de horas de vida útil em função do caso 2

Motor	Carregamentos em %			
	C = 50	C = 75	C = 100	C = 125
	Vida útil em horas			
1 CV	155070	33380	14370	2920
5 CV	215190	75090	14370	130
10 CV	156050	48380	14370	190

### Caso 3 - Efeitos da subtensão e do desequilíbrio de tensão

Os resultados são apresentados na tabela 15. O desequilíbrio de tensão produziu uma elevação da temperatura de operação de 4,5 °C, enquanto que a subtensão elevou a temperatura de operação em 6 °C, ocasionando uma redução da vida útil dos motores.

Tabela 15 - Número de horas de vida útil em função do caso 3

Motor	Carregamentos em %			
	C = 50	C = 75	C = 100	C = 125
	Vida útil em horas			
1 CV	112850	22150	9060	1680
5 CV	159700	52320	9060	60
10 CV	113650	32990	9060	90

## Caso 4 - Efeitos da sobretensão e do desequilíbrio de tensão

Os resultados são apresentados na tabela 16. O desequilíbrio de tensão produziu uma elevação da temperatura de operação de 4,5 °C, enquanto que a sobretensão reduziu a temperatura de operação em 3 °C, ocasionando uma pequena redução da vida útil dos motores, devido aos efeitos opostos do desequilíbrio e da sobretensão. Considerou-se que o conjugado da carga foi mantido constante para os respectivos carregamentos.

Tabela 16 - Número de horas de vida útil em função do caso 4

Motor	Carregamentos em %			
	C = 50	C = 75	C = 100	C = 125
	Vida útil em horas			
1 CV	181910	41010	18100	3670
5 CV	249960	90020	18100	180
10 CV	182930	58770	18100	270

## Caso 5 - Efeitos de harmônicas e desequilíbrio de tensão

Os resultados são apresentados na tabela 17. O desequilíbrio de tensão produziu uma elevação da temperatura de operação de 4,5 °C, enquanto que o fator harmônico elevou a temperatura de operação entre 3,00% e 3,37%. A ação conjunta desses fatores ocasiona uma grande redução da vida útil dos motores.

Tabela 17 - Número de horas de vida útil em função do caso 5

Motor	Carregamentos em %			
	C = 50	C = 75	C = 100	C = 125
	Vida útil em horas			
1 CV	127120	25820	10770	2060
5 CV	174430	60860	11650	110
10 CV	123430	38260	11360	150

## Caso 6 - Efeitos da temperatura ambiente e desequilíbrio de tensão

Os resultados são apresentados na tabelas 18. O desequilíbrio de tensão produziu uma elevação da temperatura de operação de 4,5 °C, enquanto que temperatura ambiente de 30 °C atenua a temperatura de operação em 10 °C. A ação conjunta ocasiona um aumento da vida útil dos motores.

Tabela 18 - Número de horas de vida útil em função do caso 6

Motor	Carregamentos em %			
	C = 50	C = 75	C = 100	C = 125
	Vida útil em horas			
1 CV	334930	67300	28940	5890
5 CV	433340	151210	28940	260
10 CV	314260	97420	28940	380

## ANÁLISE DE PARÂMETROS ECONÔMICOS

A análise de parâmetros econômicos tem como objetivo determinar a viabilidade da substituição de um motor em uso. O critério básico para a determinação da viabilidade econômica é o tempo do retorno do investimento TRI e o custo por hora de operação.

A análise econômica é apresentada em cenários com taxas de juros, comparação entre os custos totais dos motores das linhas padrão e alto rendimento, horas de operação, potência do motor, tipo e custo da tarifa de energia, custo de demanda e carregamento do motor.

### Casos simulados

As simulações foram realizadas individualmente para os motores de 1, 5 e 10 CV, nos seguintes casos:

- Aquisição de um motor novo de alto rendimento ou um motor novo tipo padrão;
- Aquisição de um motor novo de alto rendimento, enquanto que o motor tipo padrão a ser substituído está depreciado (5 anos de funcionamento).
- Aquisição de um motor novo de alto rendimento, enquanto que o motor tipo padrão a ser substituído é considerado uma sucata (o motor funciona, mas não tem valor econômico).

Para esses 3 casos, as tarifas verde e azul foram utilizadas para os motores de 1, 5 e 10 CV devido ao maior número de consumidores do setor industrial que utilizam essas tarifas, sendo que os mesmos consomem cerca de 60% da energia gerada. A tarifa convencional foi utilizada somente para o motor de 1 CV, devido ao fato de que os consumidores dessa tarifa são pequenos consumidores e utilizam maior número de motores de menor potência [CEMIG, 2009].

O TRI foi determinado para os carregamentos de 50%, 75% e 100%. O carregamento de 125% não foi avaliado, pois o tempo de vida útil definido por parâmetros técnicos mostrou-se extremamente baixo, o que não justifica sua análise.

Em seguida, efetuou-se a comparação do TRI e do tempo de vida útil por parâmetros técnicos.

### Resultados obtidos

É ressaltado que o TRI foi limitado a um valor máximo de 30 anos, pois dependendo do tempo de operação em horas/ano, alguns motores podem superar este tempo. Também limitou-se a vida útil em 30 anos, quando os valores obtidos em simulações foram superiores a este.

#### TRI com tarifa verde – motor de 1 CV

Caso 1: Aquisição de motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão novo

As tabelas 19 a 24 comparam o TRI e o tempo de vida útil definida por parâmetros técnicos anteriormente.

A análise do resultado mostra a viabilidade econômica da opção pelo motor de alto rendimento para todas as condições de carregamento e tempo de operação em horas/ano, permitindo concluir que esta opção é viável economicamente, exceto para tempo de operação igual ou inferior a 1000 horas.

Tabela 19 - Motor de 1 CV e tensão de alimentação sem distorção

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	10,00	30,00	8,20	20,00
4000	4,40	30,00	2,60	11,19	2,20	5,00
8760	2,00	22,40	1,20	5,11	1,00	2,33

Tabela 20 - Motor de 1 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio.

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	10,00	30,00	8,20	14,37
4000	4,40	30,00	2,60	8,34	2,20	3,59
8760	2,00	17,70	1,20	3,81	1,00	1,64

Tabela 21 – Motor de 1 CV e tensão de alimentação com subtensão e desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	10,00	22,15	8,20	9,06
4000	4,40	28,21	2,60	5,53	2,20	2,26
8760	2,00	12,88	1,20	2,52	1,00	1,03

Tabela 22 - Motor de 1 CV e tensão de alimentação com sobretensão e desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	10,00	30,00	8,20	18,10
4000	4,40	30,00	2,60	10,25	2,20	4,52
8760	2,00	20,76	1,20	4,68	1,00	2,06

Tabela 23 - Motor de 1 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio e harmônico

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	10,00	25,82	8,20	10,77
4000	4,40	30,00	2,60	6,45	2,20	2,69
8760	2,00	14,51	1,20	2,94	1,00	1,22

Tabela 24 - Motor de 1 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio e temperatura ambiente de 30 °C

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	10,00	30,00	8,20	28,94
4000	4,40	30,00	2,60	16,80	2,20	7,23
8760	2,00	30,00	1,20	7,67	1,00	3,30

#### Caso 2: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão depreciado

As tabelas 25 a 30 comparam o TRI e o tempo de vida útil. O símbolo (\*\*) nos campos do TRI das tabelas significa que o fluxo de receitas não foi suficiente para cobrir os investimentos durante a vida útil.

Ao comparar o TRI com o tempo de vida útil nas tabelas 25, 26 e 28, verifica-se que, na maioria dos campos analisados, o TRI é maior que o tempo de vida útil, tornando esta substituição inviável economicamente. A viabilidade ocorre somente para o motor operando com 50% da carga nominal em operação de 8.760 horas/ano.

Ao se fazer a mesma comparação nas tabelas 27 e 29, verifica-se que, em todos os campos, o TRI é maior que o tempo de vida útil. Na tabela 30, parte do TRI é maior que o tempo de vida útil, tornando também esta substituição inviável economicamente. A viabilidade ocorre para o motor operando com 50% da carga nominal e tempo igual ou superior a 4.000 horas/ano.

Tabela 25 – Motor de 1 CV e tensão de alimentação sem distorção

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	**	18,19	**	8,12
4000	30,00	19,42	9,60	4,54	7,80	2,03
8760	6,60	9,09	3,70	2,07	3,20	2,07

Tabela 26 - Motor de 1 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	**	13,55	**	5,83
4000	30,00	15,74	9,60	3,39	7,80	1,46
8760	6,60	7,19	3,70	1,55	3,20	0,67

Tabela 27 - Motor de 1 CV e tensão de alimentação com subtensão e desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	**	8,99	**	3,68
4000	30,00	11,45	9,60	2,25	7,80	0,92
8760	6,60	5,23	3,70	1,02	3,20	0,42

Tabela 28 - Motor de 1 CV e tensão de alimentação com sobretensão e desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	**	16,65	**	7,35
4000	30,00	18,46	9,60	4,16	7,80	1,84
8760	6,60	8,43	3,70	1,90	3,20	0,84

Tabela 29 - Motor de 1 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio e harmônico

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	**	10,48	**	4,37
4000	30,00	12,90	9,60	2,62	7,80	1,09
8760	6,60	5,89	3,70	1,19	3,20	0,50

Tabela 30 - Motor de 1 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio e temperatura ambiente de 30 °C

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	**	27,33	**	11,75
4000	30,00	30,00	9,60	6,82	7,80	2,94
8760	6,60	15,52	3,70	3,11	3,20	1,34

Caso 3: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão sucateado

Para analisar a viabilidade técnica-econômica da troca de um motor novo por um motor usado que será sucateado, adotou-se o procedimento de calcular o custo por hora de operação de cada motor. A composição de custo do motor novo, por hora, considerou os seguintes fatores: consumo de energia, tarifa de energia, custo de desinstalação do motor sucateado e instalação do motor novo, custo de aquisição e estimativa de vida útil. O custo, por hora, para o motor sucateado considerou somente o consumo de energia e demanda de energia.

A tabela 31 compara os custos por hora de operação entre o motor novo e motor sucateado, e sugere o procedimento de substituir ou não o motor usado, levando em conta o menor custo.

Tabela 31 - Comparação do custo por hora entre motor novo e motor usado de 1 CV em função do carregamento

Parâmetros técnicos de alimentação	C = 50 %			C = 75 %			C = 100 %		
	Motor novo	Motor usado	troca	Motor novo	Motor usado	troca	Motor novo	Motor usado	troca
Tensão de alimentação sem distorção	0,2284	0,2389	sim	0,2329	0,2326	Não	0,2439	0,2236	não
Tensão de alimentação com desequilíbrio	0,2293	0,2389	sim	0,2376	0,2326	Não	0,2567	0,2236	não
Tensão de alimentação com subtensão e desequilíbrio	0,2309	0,2389	sim	0,2476	0,2326	Não	0,2834	0,2236	não
Tensão de alimentação com sobretensão e desequilíbrio	0,2287	0,2389	sim	0,2339	0,2326	Não	0,2473	0,2236	não
Tensão de alimentação com desequilíbrio e harmônico	0,2302	0,2389	sim	0,2433	0,2326	Não	0,2719	0,2236	não
Tensão de alimentação com desequilíbrio e temperatura ambiente	0,2270	0,2389	sim	0,2277	0,2326	Sim	0,2338	0,2236	não

## TRI com tarifa verde – motor de 5 CV

Caso 1: Aquisição de motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão novo

As tabelas 32 a 37 comparam o TRI e o tempo de vida útil definido por parâmetros técnicos. A análise destas mostra a viabilidade econômica da opção pelo motor de alto rendimento em todas as condições de carregamento e tempo de operação em horas/ano, exceto para operação com 50% da carga nominal e tempo igual ou inferior a 1.000 horas/ano de operação.

Tabela 32 - Motor de 5 CV e tensão de alimentação sem distorção

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	13,00	30,00	8,00	20,00
4000	6,30	30,00	3,00	24,32	2,20	5,00
8760	2,70	30,00	1,40	11,10	1,00	2,33

Tabela 33 - Motor de 5 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	13,00	30,00	8,00	14,37
4000	6,30	30,00	3,00	18,77	2,20	3,59
8760	2,70	24,56	1,40	8,57	1,00	1,64

Tabela 34 - Motor de 5 CV e tensão de alimentação com subtensão e desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	13,00	30,00	8,00	9,06
4000	6,30	30,00	3,00	13,08	2,20	2,26
8760	2,70	18,23	1,40	5,97	1,00	1,03

Tabela 35 - Motor de 5 CV e tensão de alimentação com sobretensão e desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	13,00	30,00	8,00	18,10
4000	6,30	30,00	3,00	22,50	2,20	4,52
8760	2,70	28,53	1,40	10,27	1,00	2,06

Tabela 36 - Motor de 5 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio e harmônico

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	13,00	30,00	8,00	11,65
4000	6,30	30,00	3,00	15,21	2,20	2,91
8760	2,70	19,91	1,40	6,94	1,00	1,33

Tabela 37 - Motor de 5 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio e temperatura ambiente de 30 °C

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	13,00	30,00	8,00	28,94
4000	6,30	30,00	3,00	30,00	2,20	7,23
8760	2,70	30,00	1,40	17,26	1,00	3,30

Caso 2: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão depreciado

As tabelas 38 a 43 comparam o TRI e o tempo de vida útil definido por parâmetros técnicos. Ao avaliar os resultados das tabelas 38, 39, 40, 42 e 43, verifica-se que a viabilidade da substituição ocorre para o motor operando com 50% da carga nominal em 8.760 horas/ano. Na tabela 41 é mostrado que a viabilidade da substituição ocorre para o motor com 50% da carga nominal em 8.760 horas/ano e com 75% da carga nominal em tempo igual e superior a 4.000 horas/ano.

Tabela 38 - Motor de 5 CV e tensão de alimentação sem distorção

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	**	30,00	**	8,12
4000	**	27,06	8,70	9,87	5,80	2,03
8760	7,20	12,36	3,40	4,51	2,50	0,95

Tabela 39 - Motor de 5 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) Em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	**	30,00	**	5,83
4000	**	21,84	8,70	7,62	5,80	1,46
8760	7,20	9,97	3,40	3,48	2,50	0,67

Tabela 40 - Motor de 5 CV e tensão de alimentação com subtensão e desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	**	21,24	**	3,68
4000	**	16,21	8,70	5,31	5,80	0,92
8760	7,20	7,40	3,40	2,42	2,50	0,42

Tabela 41 - Motor de 5 CV e tensão de alimentação com sobretensão e desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	**	30,00	**	7,35
4000	**	25,37	8,70	9,14	5,80	1,84
8760	7,20	11,58	3,40	4,17	2,50	0,84

Tabela 42 - Motor de 5 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio e harmônico

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	**	24,71	**	4,73
4000	**	17,70	8,70	6,18	5,80	1,18
8760	7,20	8,08	3,40	2,82	2,50	0,54

Tabela 43 - Motor de 5 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio e temperatura ambiente de 30 °C

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	**	30,00	**	11,75
4000	**	30,00	8,70	15,35	5,80	2,94
8760	7,20	20,08	3,40	7,01	2,50	1,34

Caso 3: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão sucateado

A tabela 44 compara os custos entre o motor novo e motor sucateado de potência igual a 5 CV, e sugere o procedimento de substituir ou não o motor usado, levando em conta o menor custo.

Tabela 44 - Comparação do custo por hora entre motor novo e motor usado de 5 CV em função do carregamento

Parâmetros de alimentação	C = 50 %			C = 75 %			C = 100 %		
	Motor novo	Motor usado	Troca	Motor novo	Motor usado	troca	Motor novo	Motor usado	Troca
Tensão de alimentação sem distorção	1,0318	1,0572	Sim	1,0125	1,0346	Sim	1,0679	1,0285	Não
Tensão de alimentação com desequilíbrio	1,0332	1,0572	Sim	1,0172	1,0346	Sim	1,0980	1,0383	Não
Tensão de alimentação com subtensão e desequilíbrio	1,0357	1,0572	Sim	1,0849	1,0346	Não	1,1607	1,0383	Não
Tensão de alimentação com sobretensão e desequilíbrio	1,0322	1,0572	Sim	1,0138	1,0346	Sim	1,0760	1,0383	Não
Tensão de alimentação com desequilíbrio e harmônico	1,0349	1,0572	Sim	1,0220	1,0346	Sim	1,1230	1,0383	Não
Tensão de alimentação com desequilíbrio e temperatura ambiente	1,0296	1,0572	Sim	1,0069	1,0346	Sim	1,0442	1,0383	Não



Ao analisar essa tabela, verifica-se que, na maioria dos casos, o custo por hora do motor novo é menor que do motor usado.

### TRI com tarifa verde - motor de 10 CV

Caso 1: Aquisição de motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão novo

As tabelas 45 a 50 comparam o TRI e o tempo de vida útil definido por parâmetros técnicos.

A análise das tabelas 45, 48 e 50 mostram viabilidade econômica da opção pelo motor de alto rendimento em todas as condições de carregamento e tempo de operação em horas/ano, exceto para operação com 50% e 100% da carga nominal e tempo igual ou inferior a 1.000 horas/ano de operação.

As tabelas 46, 47 e 49 mostram viabilidade econômica da opção pelo motor de alto rendimento em todas as condições de carregamento, exceto para operação com 50% da carga nominal e tempo igual e inferior a 1.000 horas/ano de operação, e para todas as condições de 100% da carga nominal.

Tabela 45 - Motor de 10 CV e tensão de alimentação sem distorção

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	27,00	30,00	29,00	20,00
4000	6,60	30,00	4,10	15,97	4,20	5,00
8760	2,80	22,36	1,80	7,29	1,90	2,30

Tabela 46 - Motor de 10 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	27,00	30,00	29,00	14,37
4000	6,60	30,00	4,10	12,09	4,20	3,59
8760	2,80	17,81	1,80	5,52	1,90	1,64

Tabela 47 - Motor de 10 CV e tensão de alimentação com subtensão e desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	27,00	30,00	29,00	9,06
4000	6,60	28,41	4,10	8,24	4,20	2,26
8760	2,80	12,97	1,80	3,76	1,90	1,03

Tabela 48 - Motor de 10 CV e tensão de alimentação com sobretensão e desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	27,00	30,00	29,00	18,1
4000	6,60	30,00	4,10	14,69	4,20	4,52
8760	2,80	20,88	1,80	6,70	1,90	2,06

Tabela 49 - Motor de 10 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio e harmônico

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	27,00	30,00	29,00	11,36
4000	6,60	30,00	4,10	9,56	4,20	2,84
8760	2,80	14,09	1,80	4,36	1,90	1,29

Tabela 50 - Motor de 10 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio e temperatura ambiente

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	27,00	30,00	29,00	28,94
4000	6,60	30,00	4,10	24,35	4,20	7,23
8760	2,80	35,87	1,80	11,12	1,90	3,30

Caso 2: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão depreciado

As tabelas 51 a 56 comparam o TRI e o tempo de vida útil definido por parâmetros técnicos.

Ao comparar o TRI versus o tempo de vida útil nas tabelas, verifica-se que, na maioria dos campos analisados, o TRI é maior que o tempo de vida útil, tornando esta substituição inviável economicamente.

Tabela 51 - Motor de 10 CV e tensão de alimentação sem distorção

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	**	25,94	**	3,68
4000	**	19,89	16,00	6,48	17,00	0,92
8760	8,60	9,08	5,20	2,96	5,30	0,42

Tabela 52 - Motor de 10 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	**	19,64	**	5,83
4000	**	15,84	16,00	4,91	17,00	1,46
8760	8,60	7,23	5,20	2,24	5,30	0,67

Tabela 53 - Motor de 10 CV e tensão de alimentação com subtensão e desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	**	13,39	**	9,06
4000	**	11,54	16,00	3,35	17,00	2,26
8760	8,60	5,27	5,20	1,53	5,30	1,03

Tabela 54 - Motor de 10 CV e tensão de alimentação com sobretensão e desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	**	23,86	**	7,35
4000	**	18,57	16,00	5,96	17,00	1,84
8760	8,60	8,48	5,20	2,72	5,30	0,84

Tabela 55 - Motor de 10 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio e harmônico

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	**	15,53	**	4,61
4000	**	12,53	16,00	3,88	17,00	1,15
8760	8,60	5,72	5,20	1,77	5,30	0,52

Tabela 56 - Motor de 10 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio e temperatura ambiente

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	**	30,00	**	11,75
4000	**	30,00	16,00	9,89	17,00	2,94
8760	8,60	14,56	5,20	4,52	5,30	1,34

Caso 3: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão sucateado

A tabela 57 compara os custos entre o motor novo e motor sucateado de potência igual a 10 CV, e sugere o procedimento de substituir ou não o motor usado, levando em conta o menor custo

Ao analisar essa tabela, verifica-se que o custo por hora do motor novo é maior que do motor usado somente para operação com 100% da carga nominal.

Tabela 57 - Comparação do custo por hora entre motor novo e motor usado de 10 CV em função do carregamento

Parâmetros de alimentação	C = 50 %			C = 75 %			C = 100 %		
	Motor novo	Motor usado	troca	Motor novo	Motor usado	troca	Motor novo	Motor usado	troca
Tensão de alimentação sem distorção	1,9952	2,0283	sim	1,9622	1,9822	sim	1,9937	1,9599	não
Tensão de alimentação com desequilíbrio	1,9976	2,0283	sim	1,9699	1,9822	sim	2,0238	1,9599	não
Tensão de alimentação com subtensão e desequilíbrio	2,0046	2,0283	sim	1,9847	1,9822	sim	2,0864	1,9599	não
Tensão de alimentação com sobretensão e desequilíbrio	1,9961	2,0283	sim	1,9643	1,9822	sim	2,0017	1,9599	não
Tensão de alimentação com desequilíbrio e harmônico	2,0028	2,0283	sim	1,9783	1,9822	sim	2,0521	1,9599	não
Tensão de alimentação com desequilíbrio e temperatura ambiente	1,9903	2,0283	sim	1,9539	1,9822	sim	1,9699	1,9599	não

### TRI com tarifa azul – motor de 1 CV

A tarifa azul será simulada somente para motor alimentado por uma tensão nominal sem distorção, devido a um menor número de usuários nessa tarifa em relação aos consumidores de tarifa verde [CEMIG, 2009].

Caso 1: Aquisição de motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão novo

A tabela 58 compara o TRI e o tempo de vida útil definido por parâmetros técnicos. A análise dessa tabela mostra a viabilidade econômica do motor de alto rendimento em todas as condições de carregamento e tempo de operação em horas/ano, exceto com 50% carga nominal e tempo igual e inferior a 1.000 horas/ano.

Caso 2: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão depreciado

A tabela 59 compara o TRI e o tempo de vida útil definido por parâmetros técnicos. Ao comparar o TRI com o tempo de vida útil dessa tabela, verifica-se que, em todos os campos analisados, o TRI é maior que o tempo de vida útil, tornando a substituição inviável economicamente

Tabela 58 – Motor de 1 CV e tensão de alimentação sem distorção

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	12,30	30,00	9,72	20,00
4000	7,64	30,00	3,81	11,19	3,25	5,00
8760	3,36	22,40	1,85	5,11	1,60	2,30

Tabela 59 - Motor de 1 CV e tensão de alimentação sem distorção

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	**	7,39	**	3,30
4000	**	7,93	19,26	1,84	13,96	0,82
8760	14,80	3,69	6,19	0,84	5,18	0,39

Caso 3: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão sucateado

A tabela 60 compara os custos entre o motor novo e motor sucateado de potência igual a 1 CV, e sugere o procedimento de substituir ou não o motor usado, levando em conta o menor custo.

Esta tabela mostra que, para carregamentos de 75% e 100%, o custo de operação por hora do motor novo é maior que do motor usado. Este fato mostra a inviabilidade da substituição.

Tabela 60 – Comparação do custo por hora entre motor novo e motor usado em função do carregamento

Parâmetros de alimentação	C = 50 %			C = 75 %			C = 100 %		
	Motor novo	Motor usado	troca	Motor novo	Motor usado	troca	Motor novo	Motor usado	troca
Motor de 1 CV e tensão de alimentação sem distorção	0,1423	0,1475	sim	0,1492	0,1440	não	0,1630	0,1380	não

### TRI com tarifa azul - motor de 5 CV

Caso 1: Aquisição de motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão novo

A tabela 61 compara o TRI e o tempo de vida útil definido por parâmetros técnicos. O exame dessa tabela mostra a viabilidade econômica do motor de alto rendimento em todas as condições de carregamento e tempo de operação em horas/ano, exceto com 50% carga nominal e tempo igual e inferior a 1.000 horas/ano.

Tabela 61 - Motor de 5 CV e tensão de alimentação sem distorção

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	16,24	30,00	9,54	20,00
4000	10,56	30,00	4,48	24,32	3,21	5,00
8760	4,30	30,00	2,13	11,10	1,58	2,33

Tabela 62 – Motor de 5 CV e tensão de alimentação sem distorção

TRI (anos) e vida útil (anos) Em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	**	16,04	**	3,30
4000	**	10,99	16,24	4,01	9,54	0,82
8760	15,06	5,02	5,67	1,83	3,99	0,39

## Caso 2: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão depreciado

A tabela 62 apresenta o TRI e o tempo de vida útil definido por parâmetros técnicos. Ao comparar o TRI com o tempo de vida útil dessa tabela, verifica-se que, em todos os campos analisados, o TRI é maior que o tempo de vida útil, tornando esta substituição inviável economicamente. Deve-se manter o motor usado em operação.

## Caso 3: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão sucateado

A tabela 63 compara os custos do motor novo e motor sucateado de potência igual a 5 CV, e sugere o procedimento de substituir ou não o motor usado, levando em conta o menor custo. Esta tabela mostra que, para carregamentos de 50% e 75%, o custo de operação do motor novo é menor que o motor usado, enquanto que para 100% o custo do motor novo é maior que o motor usado. Portanto, para efetuar a substituição, deve-se avaliar o carregamento do motor a ser substituído.

Tabela 63 - Comparação do custo por hora entre motor novo e motor usado em função do carregamento

Parâmetros de alimentação	C = 50 %			C = 75 %			C = 100 %		
	Motor novo	Motor usado	troca	Motor novo	Motor usado	troca	Motor novo	Motor usado	troca
Motor de 5 CV e tensão de alimentação sem distorção	0,6392	0,6526	sim	0,6310	0,6390	sim	0,6890	0,6350	não

## TRI com tarifa azul – motor de 10 CV

## Caso 1: Aquisição de motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão novo

A tabela 64 compara o TRI e o tempo de vida útil definido por parâmetros técnicos. A apreciação dessa tabela mostra que a viabilidade da substituição ocorre somente para o motor com 50% da carga nominal e tempo igual ou superior a 4.000 horas, e para 75% da carga nominal em todas as condições.

Tabela 64 – Motor de 10 CV e tensão de alimentação sem distorção

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	30,00	30,00	**	20,00
4000	10,44	30,00	6,07	15,97	6,21	5,00
8760	4,26	22,36	2,78	7,29	2,84	2,33

Tabela 65 - Motor de 10 CV e tensão de alimentação sem distorção

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	**	10,53	**	3,30
4000	**	8,08	**	2,63	**	0,82
8760	19,29	3,69	9,27	1,20	9,52	0,39

## Caso 2: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão depreciado

A tabela 65 compara o TRI e o tempo de vida útil definido por parâmetros técnicos, e mostra que, em todos os campos analisados, o TRI é maior que o tempo de vida útil. Portanto, esta substituição é inviável economicamente.

## Caso 3: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão sucateado

A tabela 66 compara os custos entre o motor novo e motor sucateado de potência igual a 10 CV, e sugere o procedimento de substituir ou não o motor usado, levando em conta o menor custo. Esta tabela mostra que, para carregamentos de 50% e 75%, o custo de operação do motor novo é menor que o motor usado, enquanto que para 100% o custo do motor novo é maior que o motor usado. Portanto, para efetuar a substituição, deve-se avaliar o carregamento do motor a ser substituído.

Tabela 66 – Comparação do custo por hora entre motor novo e motor usado em função do carregamento

Parâmetros de alimentação	C = 50 %			C = 75 %			C = 100 %		
	Motor novo	Motor usado	troca	Motor novo	Motor usado	troca	Motor novo	Motor usado	troca
Motor de 10 CV e tensão de alimentação sem distorção	1,2360	1,2520	sim	1,2200	1,2240	sim	1,2600	1,2100	não

## TRI com tarifa convencional - motor de 1 CV

## Caso 1: Aquisição de motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão novo

A tabela 67 compara o TRI e o tempo de vida útil definido por parâmetro técnico. A análise dessa tabela mostra que a viabilidade da substituição ocorre para todas as condições e permite concluir que é viável economicamente. Há de se ressaltar que o menor TRI ocorre para o motor com 50% do carregamento. Deve-se esse resultado à diferença maior de rendimento do motor padrão para o motor de alto rendimento com esse carregamento.

Tabela 67 - Motor de 1 CV e tensão de alimentação sem distorção

TRI (anos) e vida útil (anos) Em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	6,87	30,00	16,05	30,00	7,31	20,00
4000	3,36	30,00	6,21	24,32	3,53	5,00
8760	1,86	30,00	3,24	11,10	1,95	2,33

Tabela 68 – Motor de 1 CV e tensão de alimentação sem distorção

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	30,00	**	30,00	**	8,12
4000	14,76	27,06	**	9,87	16,29	2,03
8760	6,25	12,36	13,81	4,51	6,63	0,95

## Caso 2: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão depreciado

A tabela 68 compara o TRI e o tempo de vida útil definido por parâmetros técnicos. Essa tabela mostra que, na maioria dos campos analisados, o TRI é maior que o tempo de vida útil, sendo esta substituição inviável economicamente.

## Caso 3: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão sucateado

A tabela 69 compara os custos entre o motor novo e motor sucateado de potência igual a 1 CV, e sugere o procedimento de substituir ou não o motor usado, levando em conta o menor custo.

Tabela 69 - Comparação do custo por hora entre motor novo e motor usado em função do carregamento

Parâmetros de alimentação	C = 50 %			C = 75 %			C = 100 %		
	Motor novo	Motor usado	troca	Motor novo	Motor usado	troca	Motor novo	Motor usado	troca
Motor de 1 CV e tensão de alimentação sem distorção	0,1542	0,1601	sim	0,1610	0,1558	não	0,1742	0,1498	não

Esta tabela mostra que para carregamentos de 75% e 100% o custo de operação do motor novo é maior que do motor usado. Este fato mostra a inviabilidade da substituição.

## CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma metodologia fundamentada em parâmetros técnicos e econômicos, com o objetivo de definir o melhor motor novo a ser adquirido e o momento ideal da substituição de um motor usado em consumidores industriais. Os motores analisados têm potências de 1, 5 e 10 CV, pois a faixa de 0 a 10 CV representa aproximadamente 86% dos motores vendidos no mercado brasileiro nos últimos vinte anos.

Inicialmente é apresentada a evolução histórica dos motores elétricos, justificando a importância do motor de indução na eficiência energética para o país. Em seguida, são analisados parâmetros técnicos, tais como: temperatura de operação, tensão de alimentação, harmônicas, altitude de operação, agentes químicos e ações de manutenção, que afetam a vida útil de um motor de indução. Posteriormente, com o uso de matemática financeira, é feita uma análise econômica dos custos do motor durante sua vida útil. Finalmente, são apresentados resultados de simulações computacionais onde é confrontada a vida útil do motor e o tempo de retorno de investimento (TRI), mostrando inúmeras possibilidades, fundamentadas em parâmetros técnicos e econômicos, que definem a escolha de aquisição de um motor de alto rendimento ou padrão e o momento correto de substituição de um motor de indução trifásico.

O procedimento de simulação com parâmetros técnicos foi, inicialmente, realizado para definir o tempo de vida útil dos motores selecionados para esse trabalho, o qual foi determinado em função do carregamento e do tempo de operação em horas, dentro da faixa permitida por normas vigentes.

A primeira simulação considerou que os motores foram alimentados por uma tensão senoidal ideal; ao passo que nas demais foram incluídos distúrbios da seguinte forma: presença do desequilíbrio de tensão na segunda simulação; ocorrência de subtensão e desequilíbrio de tensão na terceira; influência de sobretensão e desequilíbrio de tensão na quarta; presença de harmônicas e desequilíbrio de tensão na quinta. Todas elas com temperatura ambiente de 40 °C. A sexta considerou temperatura ambiente de 30 °C e desequilíbrio de tensão.

Os resultados dessas simulações indicaram que os parâmetros técnicos desequilíbrio de tensão, subtensão e harmônicas provocam uma redução da vida útil do motor, pois os efeitos desses distúrbios é o de produzir uma elevação na temperatura de operação, na situação de temperatura ambiente de 40 °C. A sobretensão e temperatura ambiente de 30 °C provocam um aumento de vida útil devido à redução da temperatura de operação, quando comparado com a temperatura ambiente de 40 °C.

O procedimento de simulação com parâmetros econômicos foi realizado em uma segunda etapa, onde são considerados os seguintes fatores para determinar o tempo de retorno de investimento: custo do motor padrão e de alto rendimento, rendimento do motor padrão e de alto rendimento, custo do motor padrão depreciado, taxa de juros praticada pelo mercado financeiro, custo das tarifas verde, azul e convencional, custo das tarifas de demanda, horas de operação por ano e potência do motor. De posse desses dados, efetuaram-se simulações para três condições. A primeira condição consiste na instalação de um motor de rendimento padrão novo ou um motor de alto rendimento novo. A segunda condição foi a substituição do motor padrão com 5 anos de uso por um motor de alto rendimento novo, sendo que o

motor substituído seria vendido por um valor depreciado. A terceira condição envolveu a substituição do motor padrão por um motor de alto rendimento novo, sendo que o motor substituído seria sucateado.

A comparação entre a vida útil e o TRI para as diversas condições citadas possibilitam obter as seguintes conclusões:

- Na situação de aquisição de motor novo de alto rendimento ou padrão, verificou-se que a maior viabilidade ocorre para o caso de instalação de motor de alto rendimento sobre o motor padrão novo.
- Na situação de substituição de motor usado por motor novo, em tempos de operação iguais ou inferiores a 1.000 horas/ano, verifica-se a inviabilidade econômica da substituição de quase todos os casos simulados.
- As simulações com tarifa verde mostram a inviabilidade em quase todos os casos em que o motor substituído é depreciado ou sucateado, e somente apresenta viabilidade econômica nos casos de instalação de motores novos de alto rendimento em relação ao motor tipo padrão.
- As simulações com tarifa azul e convencional mostraram a inviabilidade da substituição do motor nos casos em que o motor substituído é depreciado ou sucateado. A viabilidade econômica só foi verificada nos casos de instalação de motores novos de alto rendimento em relação ao motor tipo padrão.
- Os motores operando na faixa de 75% do carregamento nominal apresentaram os maiores índices de viabilidade de substituição dentro de parâmetros técnicos e econômicos.
- Com relação ao custo por hora de operação na situação de motor sucateado, a opção de substituição é viável economicamente para os motores de 5 e 10 CV.

Dessa forma, conclui-se que consumidores industriais usuários de motores trifásicos de indução com potência igual ou inferior a 10 CV, sejam orientados a verificar a viabilidade de substituir seus motores em uso, com objetivo de obter ganhos financeiros com a troca.

Portanto, procedimentos técnicos de manutenção, tais como melhoria de equilíbrio e ajuste do nível da tensão de alimentação, instalações de filtros harmônicos bem projetados para minimizar a ação das componentes harmônicas, redução do nível de poeira, umidade e ajuste do carregamento dos motores, são soluções recomendadas para obter retorno financeiro e principalmente reduzir o consumo de energia e aumentar a vida útil dos motores.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

ABECOM Rolamentos, “Custos de Mancais de Rolamentos”, Diário Oficial da Prefeitura de Campinas, p. 21, 13 de Dezembro de 2005, Campinas.

ABNT; “NBR 7094 - Máquinas elétricas girantes – Motores de indução – Especificação” Associação Brasileira de Normas Técnicas, Fevereiro de 2003.

ALMEIDA, A.T.; “Analysis of Existing Technical and Market Information First Stakeholder Meeting”, University of Coimbra, June 29, 2006, Brussels.

ANDREAS, J.C.; “Energy Efficient Electric Motors Selection and Applications”, Marcel Dekker Inc, 1982, New York.

ANEEL, “Legislação Básica do Setor Elétrico Brasileiro”; Agência Nacional de Energia Elétrica, Resolução 456, volume II, de 29 de Novembro de 2000, Brasília.

BONNETT, A. H.; “Motor Performance and Life in Accordance with NEMA MG-1 Standards” IEEE U.S. Electrical Motors, Division of Emerson Electric, 1999, St. Louis, Missouri.

- BORTONI, E.C.; Haddad, J.; Afonso H.M.; “Análise do Reparo de Motores de Indução Trifásicos” Eletrobrás - procel ,7 à 22 de outubro de 1999, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil.
- CEMIG, “Consumidores Industriais”, [www.cemig.com.br/pesquisa](http://www.cemig.com.br/pesquisa), acessado em junho de 2009.
- CLAYTON, T.; “Practical Perspectives on Motor Management” Kaman Industrial Technologies, Glen Falls, 12801, 2003, Nova York.
- CRISTIANE, F. E. e Gustavo, M.; “Avaliação dos Métodos da Taxa Interna de Retorno Modificada” Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, UFRGS, 2004, Porto Alegre.
- HOLMQUIST, J. e MALINOWSKI, J. “IEEE 841-1994 versus IEEE 841-2001”, IEEE Industry Applications Magazine, 2006.
- IEEE; “IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems” IEEE Std 493, Gold Book, 16 December 1997.
- JOUANNE, A. V. e BANERJEE, B.; “Assessment of Voltage Unbalance”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 16, No. 4, pp. 782-790, Oct. 2001
- MAMEDE, J.; “Instalações Elétricas Industriais”, Editora LTC, p 284, 1997, Rio de Janeiro.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; “Portaria Interministerial Nº 553”, Consultoria Jurídica, 8 de Dezembro de 2005.
- NASA; “Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment” National Aeronautics and Space Administration, February 2000.
- PENROSE, H.W.; “A Novel Approach to Industrial Assessments for Improved Energy, West Stream, Process and Reliability”, 1999, Connecticut.
- PENROSE, H.W.; “Financial Impact of Electric Motor System Reliability Programs”; BJM Corp, All-Test Division, ITC August 2003.
- PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA; “Decreto Nº 4508”, Subchefia para assuntos Jurídicos. 11 de Dezembro de 2002, BRASIL.
- RAMOS, M. G. e PENTEADO, A. P.; “Methodology for the Resizing the Spinning Machine Motor at Textile Industry” Conferência de Aplicações Industriais, 2002, Salvador.
- SÁ, J. S.; “Contribuição à Análise do Comportamento Térmico de Motores de Indução Trifásicos com Rotor Tipo Gaiola”, 1989, Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas.
- SANTOS, A.H.M. et al. “Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos”. Itajubá: Ed. da EFEI, 2006. 3ª edição revista e ampliada.
- SENS, M.; “Avanços Tecnológicos dos Motores Elétricos” WEG em Revista, Janeiro/Fevereiro 2001.
- STEPHEN, A. R. e Randolph, W. W.; “Corporate Finance”; Editora Atlas S. A., 1993, São Paulo.
- WEG, “Manual WEG de Motores Trifásicos”, Alto rendimento Plus, Mod. 050. Abril de 2007.





---

## 20 Comparação de modelos caixa-branca e caixa-preta de um sistema de bombeamento hidráulico real utilizando conversores de frequência

---

Erlon Cavazzana, Bruno Henrique Barbosa, Leonardo Antônio Borges Tôres e Carlos Barreira Martinez

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil

### INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a evolução das técnicas de controle e da eletrônica de potência permitiu que os Conversores de Frequência ou Acionadores de Frequência Variável (VFDs) se tornassem equipamentos comuns na indústria.

O uso de VFDs em sistemas de bombeamento é de grande interesse (IRVINE; GIBSON, 2002) devido aos benefícios trazidos pela abordagem da velocidade variável de bombeamento (PEMBERTON, 2005), tais como: economia de energia (CARLSON, 2000), operação suave do sistema hidráulico e, portanto, menos necessidade de manutenção (GUEVARA; CARMONA, 2005). Além disso, esta estratégia de controle parece ser mais efetiva do que outras alternativas (DRIEDGER, 1995). Nesse contexto, uma modelagem precisa dos sistemas de bombeamento de velocidade variável é essencial para elaborar algoritmos de controle altamente eficientes.

O objetivo do presente trabalho é obter e comparar o desempenho de modelos estático e dinâmico para uma bancada de testes hidráulicos que usa VFDs. Esta representação é realizada de forma a desenvolver um sistema de controle de pressão e/ou vazão para o equipamento apresentando na seção 2, num futuro próximo. A estratégia de controle é baseada em controlar diretamente o torque aplicado ao motor de indução (NASH, 1997).

Este artigo é organizado como se segue. Na seção 2 a bancada de testes hidráulicos, com seus principais subsistemas, é apresentada. Na seção 3, modelos caixa-branca e caixa-preta para os sistemas são desenvolvidos. Finalmente, na seção 4, os desempenhos dos modelos são comparados e considerações finais são feitas sobre os resultados obtidos.

### BANCADA DE TESTES HIDRÁULICOS

O sistema estudado neste artigo é uma bancada de testes hidráulicos utilizada para analisar as características estáticas e dinâmicas de equipamentos hidráulicos (BARBOSA, 2006). A bancada de testes hidráulicos é composta por duas bombas centrífugas conectadas a motores de indução de 7,5 kW conduzidos por VFDs, e um circuito hidráulico que permite implementação em série, em paralelo, ou configurações de bomba individual. A configuração de bomba individual foi usada para obter os resultados apresentados nas próximas seções.

Na Fig. 1 é mostrada uma visão geral do sistema e seu Diagrama de Processo e Instrumentação (P&ID). A carga hidráulica variável opcional é representada com um círculo pontilhado no final da tubulação principal. Esta carga hidráulica representa qualquer equipamento sendo testado.

É importante notar que o transmissor de velocidade indicado no diagrama foi usado apenas para identificar os parâmetros do motor e para validar os modelos apresentados na seção 3, e isto não é empregado durante a operação normal do sistema.

Uma carga hidráulica opcional foi simulada, no presente trabalho, com o auxílio de uma válvula motorizada no final da tubulação principal. Esta válvula foi aberta parcialmente de forma que 19,2l/s fluíssem quando a bomba operasse em velocidade nominal ( $58,3\pi$  rad/s).

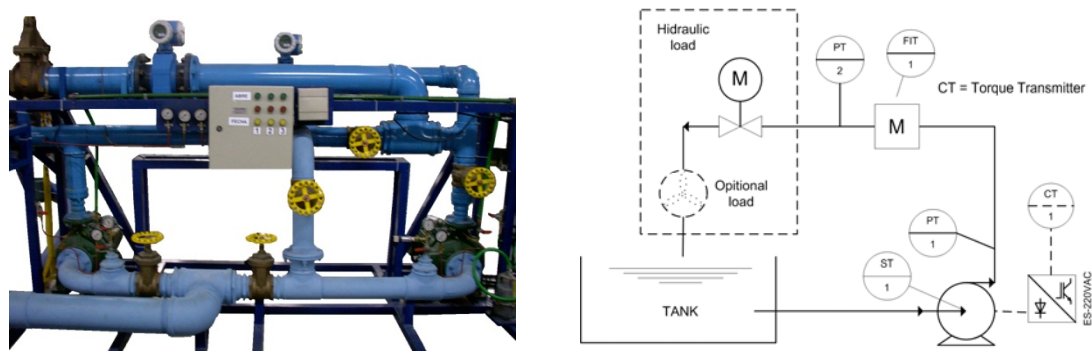


Figura 1. (a) bancada de testes hidráulicos; e (b) diagrama (P&ID) correspondente.

## MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem de sistemas reais pode ser caracterizada (SJÖBERT et al., 1995) como: (i) modelagem caixa-branca, quando o modelo é obtido baseado em equações físicas, onde um conhecimento mais profundo do sistema é comumente requerido; (ii) modelagem caixa-cinza, quando algum conhecimento prévio sobre o sistema é utilizado na identificação do processo; e (iii) modelagem caixa-preta, quando o sistema é identificado baseado apenas em séries temporais experimentais adquiridas no processo, sem o uso de conhecimento prévio.

No presente trabalho um modelo caixa preta NARMAX neural (NORGAARD, 1997) é apresentado. A representação e estrutura deste modelo particular conduz a resultados melhores do que outras alternativas, como apresentado em Barbosa (2006).

Um modelo caixa-branca também é obtido através de princípios físicos, e seus parâmetros são estimados baseados em dados reais adquiridos durante testes específicos na bancada de testes hidráulicos.

### Modelo Caixa-preta

Um ponto importante que merece consideração durante o processo de identificação caixa-preta é a seleção adequada de sinais de excitação – neste artigo a entrada de para o modelo é a referência de torque, que é expressa como uma porcentagem do torque nominal do motor. De acordo como Aguirre (2004) esta seleção depende de como e quando o sistema será estimulado, e também da taxa de amostragem disponível.

Considerando que o sistema de bombeamento hidráulico tem uma constante de tempo variável (BARBOSA et al., 2006) e um comportamento estático não-linear, o sinal de entrada deve excitar o sistema em torno de diferentes pontos de operação ou condições de equilíbrio. O sinal de entrada foi implementado para excitar o processo de 5% para 85% do torque nominal do motor de indução através do uso de pulsos de amplitudes não correlacionadas. A velocidade da bomba alcança aproximadamente  $11,7\pi$  rad/s e  $58,3\pi$  rad/s com esses valores de torque.

A Fig. 2a apresenta algumas amostras do sinal de entrada. Na identificação do problema, a auto-covariância do sinal de excitação deve ser similar à auto-covariância do ruído branco, como pode ser visto na Fig. 2b. Além disso, as amplitudes de torque foram obtidas de uma distribuição de probabilidade uniforme.

O último passo para definir o sinal de entrada é a seleção do tempo de amostragem  $T_s$ . Para escolher adequadamente o  $T_s$ , deve ser levado em consideração a auto-covariância do sinal de entrada, o qual pode ser tanto a pressão quanto a vazão produzida pelo sistema de bombeamento para um torque de referência fornecido.

Considerando que a saída do sistema é a vazão, é necessário escolher o tempo de amostragem de pelo menos 100ms, uma vez que este é o tempo de estabilização do transmissor de vazão observado em uma série de testes. Para o transmissor de pressão, a taxa de amostragem de 1kHz é viável (BARBOSA, 2006), desta forma um tempo de amostragem mínimo de 1ms seria possível.

Fazendo uso do sinal de entrada mencionado anteriormente (Fig. 2), com tempos de amostragens diferentes, e aplicando-o ao sistema de bombeamento, os  $T_s$  adequados foram de 50ms e de 100ms para a saída do sistema pressão e vazão, respectivamente, de acordo com a análise da auto-covariância dos sinais de vazão mostrados na Fig. 3. Como pode ser visto, estes tempos de amostragem parecem ser razoáveis para identificação do sistema, uma vez que o primeiro mínimo de cada curva de auto-covariância é próximo ao intervalo recomendado de 5 a 25 atrasos (AGUIRRE, 2004).

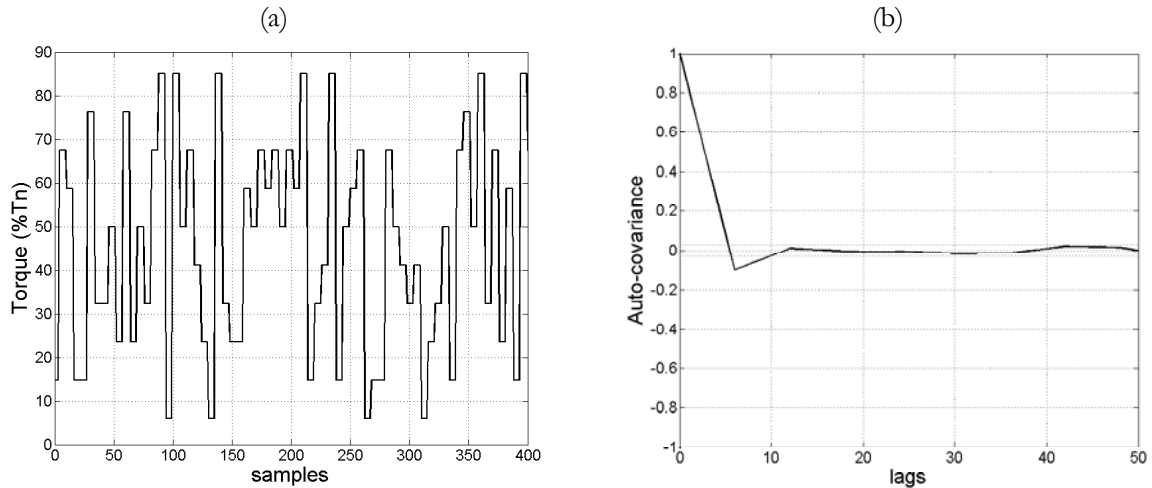


Figura 2. Sinal de entrada (referência de torque em porcentagem de torque nominal) – (a) torque, (b) auto-covariância

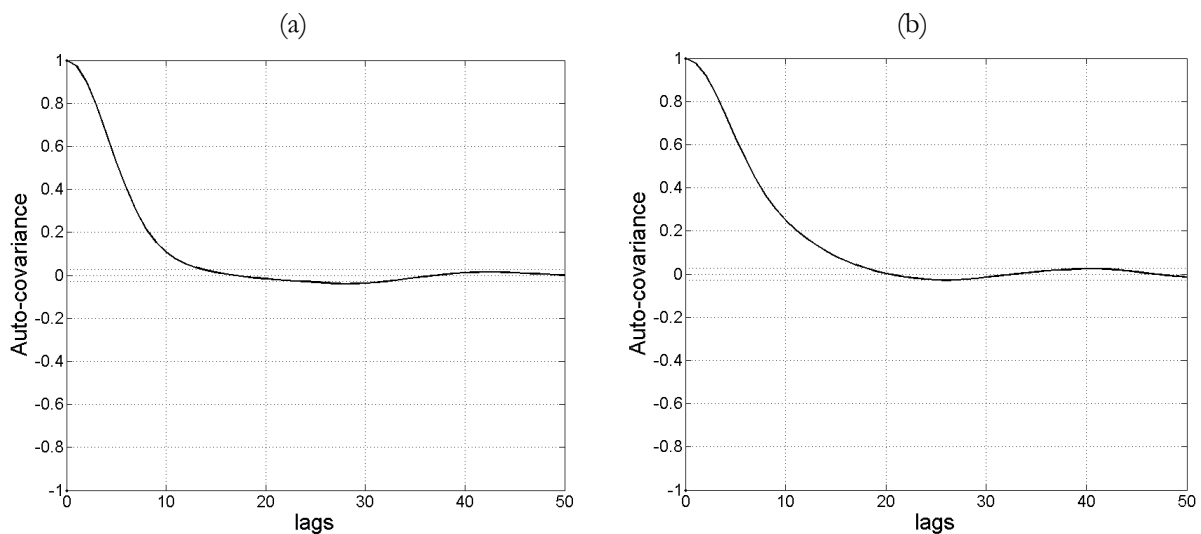


Figura 3 – Sinais de vazão. (a) sinal de auto-covariância da pressão, e (b) sinal auto-covariância da vazão.

Uma vez que o sinal de entrada foi determinado e os dados foram adquiridos, o próximo passo para a identificação do modelo é definir a estrutura do modelo. Modelos neural NARMAX foram implementados para os sistemas de vazão e de pressão, utilizando redes *feed-forward multilayer perceptron* implementadas e descritas por Norgaard (1997). Foi utilizada a função *nnarmax2.m* e o algoritmo *Levergerg-Marquardt* disponível no *toolbox* de Norgaard.

A rede neural implementada para identificar a relação entre a referência de torque e a vazão ou a pressão do sistema de bombeamento tem as seguintes características: 12 entradas, onde 6 delas são termos auto-regressivos do sinal de excitação e os outros são termos regressivos do sinal de saída (pressão); 7 nós

não-lineares na camada oculta com função de ativação tangente hiperbólica e 1 nó linear na camada de saída. Além disso, foi utilizado 40 épocas para ajustar os pesos da rede.

A rede neural utilizada para identificar a vazão de bombeamento do sistema tem as seguintes características: 14 entradas, onde 7 delas são termos auto-regressivos do sinal de excitação e as outras são termos regressivos dos sinais de saída (vazão); 6 nós não-lineares na camada oculta com função de ativação tangente hiperbólica e um nó linear na camada de saída. 40 épocas foram utilizadas para ajustar os pesos da rede.

Os modelos identificados foram simulados utilizando apenas sinais de entrada de referência de torque; ex. as previsões de vazão passadas da rede neural foram continuamente realimentadas nas entradas da rede trabalho neural (simulação livre). Os resultados foram avaliados utilizando dados dinâmicos e estáticos do processo. As Fig. 4a e 4b mostram a resposta dinâmica do modelo de pressão neural NARMAX assim como os dados adquiridos. As Fig. 4c e 4b mostram a resposta dinâmica do modelo de vazão neural NARMAX junto com os dados adquiridos.

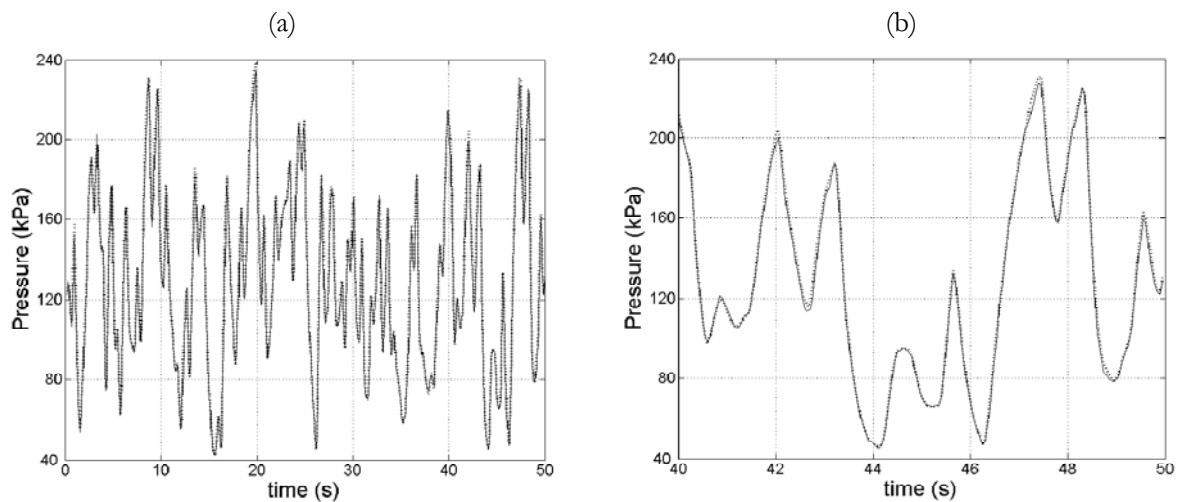
Como pode ser observado pelas Fig. 4 e 5, os modelos identificados alcançaram uma resposta dinâmica e estática aceitável. Todavia, é necessário quantificar o desempenho dos modelos. Com o intuito de cumprir isto, o MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) foi utilizado, podendo ser matematicamente expressado como:

$$\text{MAPE}_d = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left| \frac{y^*(k) - y(k)}{y^*(k)} \right|, \quad (1)$$

onde  $N$  é o número de amostras previstas,  $y^*$  é a medição e  $y$  é a vazão modelo. O índice MAPE utilizado para avaliar o comportamento em estado-estacionário do modelo identificado pode ser obtido prontamente como

$$\text{MAPE}_s = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left| \frac{\bar{y}_t^* - \bar{y}_t}{\bar{y}_t^*} \right|, \quad (2)$$

onde  $N$  é o número de pontos adquiridos em estado-estacionário,  $\bar{y}_n^*$  é a medição estado-estacionário correspondente à entrada de referência de torque específica; e  $\bar{y}_t$  é vazão em estado-estacionário do modelo.



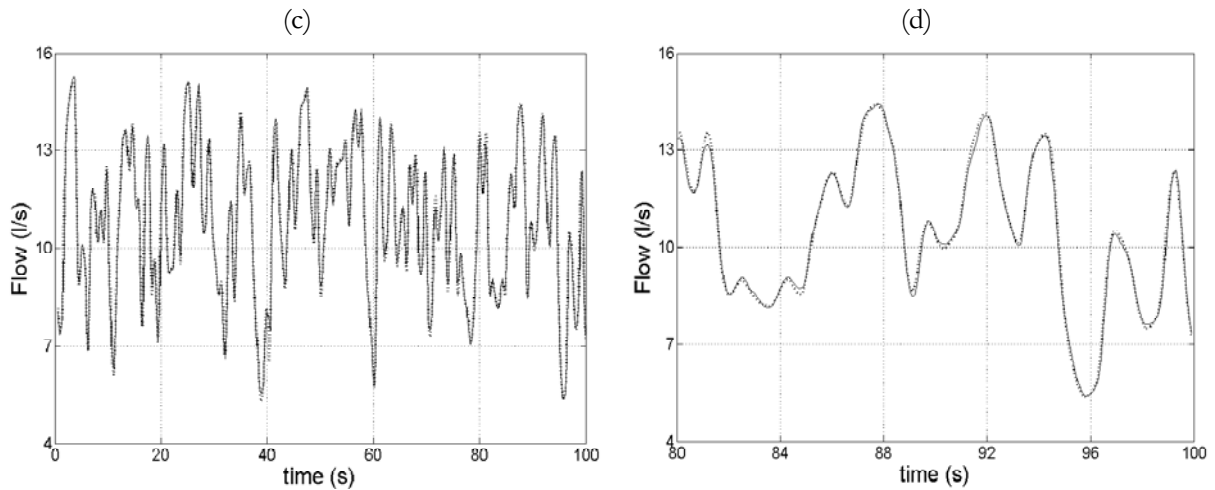


Figura 4. Validação de modelo caixa-preta. (a) validação de modelo de pressão neural NARMAX, e (b) detalhe de validação de modelo de pressão neural NARMAX. (c) validação de modelo de vazão neural NARMAX, e (d) detalhe de validação de modelo de vazão neural NARMAX. Linhas sólidas representam a medição e as pontilhadas representam a resposta do modelo.

Utilizando os índices mencionados anteriormente para quantificar a qualidade dos modelos identificados, o modelo para pressão neural NARMAX atingiu 1,22% e 7,67% para as respostas dinâmicas e estáticas, respectivamente, e o modelo de vazão neural NARMAX alcançou 1,10% e 2,60% para as respostas dinâmicas e estáticas, respectivamente.

O índice MAPE correspondente à resposta em estado-estacionário do modelo de pressão neural NARMAX foi severamente afetado pelo erro no primeiro ponto da curva característica estática (Fig. 5a), devido ao baixo valor de pressão juntamente com seu uso no denominador na expressão da equação 2. Dessa forma, se esse ponto não é considerado, o índice  $MAPE_s$  torna-se 1,38%. Ambos os modelos produziram o pior  $MAPE_s$  na situação de baixa referência de torque de entrada devido à ausência de informação correspondente aos baixos níveis de torque no sinal de excitação usado durante o processo de treinamento da rede neural.

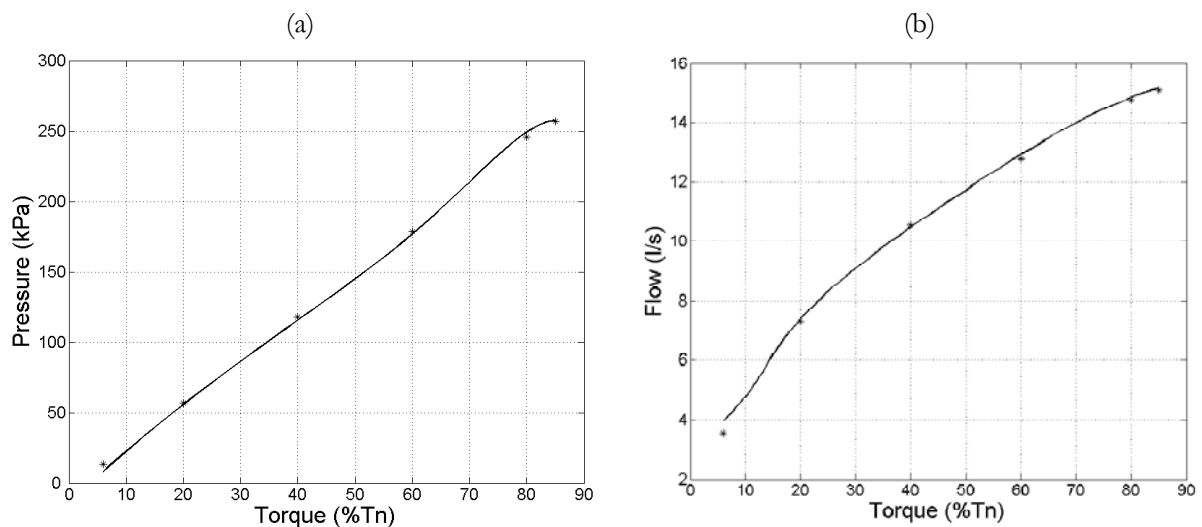


Figura 5. Validação de modelo caixa-preta em estado-estacionário. (a) Comportamento estático de modelo de pressão, (b) comportamento estático de modelo de vazão. O asterisco denota o dado estático real e a linha sólida representa a resposta estática do modelo.

## Modelo Caixa-branca

A bancada de testes hidráulicos pode ser subdividida em quatro subsistemas: (i) Motor de indução e inversor de frequência; (ii) bomba centrífuga; (iii) subsistema hidráulico fixo, e (iv) carga hidráulica variável opcional. Estes subsistemas são interconectados como demonstrado na Fig. 6.

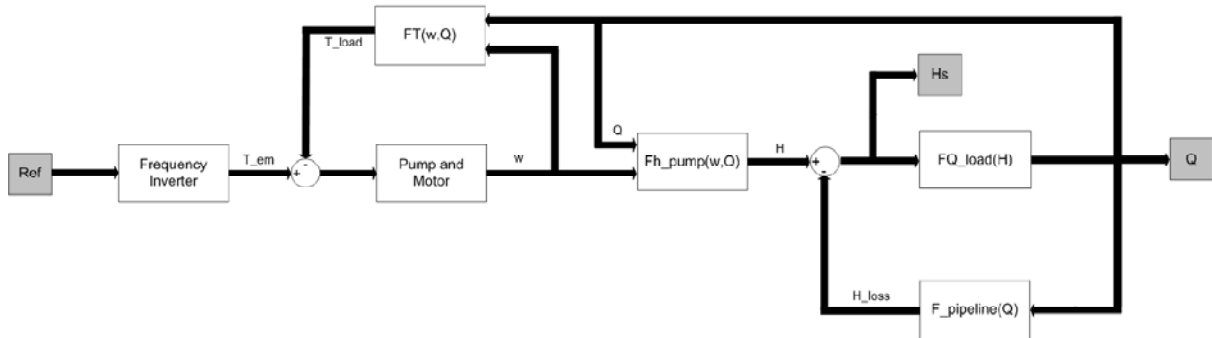


Figura 6. Diagrama de fluxo de sinal do modelo caixa-branca.  $Q$  é a vazão e  $H_S$  é a pressão na saída da bancada de testes hidráulicos. As funções  $F_{H\text{pump}}$ ,  $F_T$ ,  $F_{\text{pipeline}}$  e  $F_{Q\text{load}}$  são relações estáticas obtidas em condições de estado-estacionário.

## Motor de indução e inversor de frequência

Técnicas de controle vetorial modernas permitem o controle direto do torque produzido pelo motor de indução, mesmo sem medição de velocidade (NASH, 1997). Utilizando estas técnicas, a partir do ponto de vista do controle de pressão e/ou vazão, a resposta dinâmica do VFD a mudanças no torque de referência pode ser desconsiderada, uma vez que é muito mais rápida que as variações de pressão e de vazão da água no sistema. Todavia, a combinação do VFD com o motor de indução se torna, de fato, um subsistema atuador de torque efetivo, o qual é utilizado para conduzir diretamente a bomba no sistema hidráulico. O comportamento como um todo é similar ao observado se um motor DC, com controle de corrente elétrica (controle de torque), fosse utilizado no lugar da máquina de indução.

Consequentemente, apenas as dinâmicas associadas às partes mecânicas do motor e bomba precisam ser levadas em consideração quando da construção do modelo caixa-branca. Podemos escrever a equação dinâmica que representa o sistema mecânico do motor e da bomba como demonstrado a seguir:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - b\omega - T_{c\text{sgn}}(\omega) - F_{\text{load}}(\omega, Q), \quad (3)$$

onde  $\omega$  é a velocidade angular;  $Q$  é a vazão produzida pela bomba;  $J$  é o momento de inércia equivalente do motor e da bomba centrífuga;  $T_e$  é o torque eletromagnético imposto pelo VFD, e cujo valor nominal é 39,9 Nm;  $T_{c\text{sgn}}(\omega)$  é a força de atrito de Coulomb;  $b$  é o coeficiente de atrito viscoso; e  $F_{\text{load}}(\omega, Q)$  é o contratorque hidráulico. Os parâmetros da equação 3 foram determinados a partir de dados de fabricantes, e de testes de aceleração e desaceleração específicos:  $T_e = (0,43 \pm 0,02)$  Nm,  $b = (0,0121 \pm 0,0005)$  Nm/rad/s, e  $J = 0,08872$  kg m<sup>2</sup>.

A ausência de dinâmica relativa relevante na produção dos valores de torque desejados, que é feito pelo VFD, foi confirmada experimentalmente. Apesar disso, foi observada uma relação estática não-linear entre o torque desejado e o torque efetivamente produzido a partir de dados experimentais, como:

$$T_e(u) = \gamma_1 u^5 + \gamma_2 u^4 + \gamma_3 u^3 + \gamma_4 u^2 + \gamma_5 u + \gamma_6, \quad (4)$$

onde  $u$  é torque de entrada para o VFD, e  $T_c$  é o torque efetivamente produzido. Os coeficientes  $\gamma_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 6$ , são tais que a não-linearidade observada é muito pequena:  $\gamma_1 = -1,506 \times 10^{-8}$ ,  $\gamma_2 = 3,843 \times 10^{-6}$ ,  $\gamma_3 = -3,319 \times 10^{-4}$ ,  $\gamma_4 = 1,263 \times 10^{-2}$ ,  $\gamma_5 = 0,707$  e  $\gamma_6 = 2,244$ .

### Bomba centrífuga

A bomba centrífuga é utilizada para criar uma diferença de pressão que induz a circulação de água (DRIEDGER, 1995). Essa diferença de pressão pode ser modelada como uma relação estática entre a velocidade  $\omega$  da bomba e a vazão  $Q$  resultante, da forma:

$$F_{H_{\text{pump}}}(\omega, Q) = \alpha_1 Q^3 + \alpha_2 \omega^3 + \alpha_3 Q^2 \omega + \alpha_4 Q \omega^2 + \alpha_5 Q^2 + \alpha_6 \omega^2 + \alpha_7 Q \omega + \alpha_8 Q + \alpha_9 \omega + \alpha_{10} \quad (5)$$

onde os coeficientes  $\alpha_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, 10$ , podem ser estimados utilizando ajuste de curva por mínimos quadrados aplicado a valores em estado-estacionário medidos durante a operação da bancada de testes hidráulicos:  $\alpha_1 = -1,3631 \times 10^{-3}$ ,  $\alpha_2 = 1,3620 \times 10^{-9}$ ,  $\alpha_3 = 1,7304 \times 10^{-5}$ ,  $\alpha_4 = -7,3548 \times 10^{-8}$ ,  $\alpha_5 = -2,5497 \times 10^{-2}$ ,  $\alpha_6 = 5,7314 \times 10^{-6}$ ,  $\alpha_7 = 1,0691 \times 10^{-4}$ ,  $\alpha_8 = -9,6703 \times 10^{-2}$ ,  $\alpha_9 = 4,4057 \times 10^{-3}$  e  $\alpha_{10} = -2,5259 \times 10^{-1}$ .

De forma similar, o contratorque hidráulico, o qual é necessário para conduzir a bomba durante operação normal, pode também ser modelada como uma relação estática entre a velocidade  $\omega$  da bomba e a vazão  $Q$  resultante. Limitando a ordem polinomial desta relação a 3, e aplicando uma curva de ajuste utilizando mínimos quadrados aos dados em estado-estacionário da bancada de testes hidráulicos, a seguinte relação foi obtida:

$$F_T(\omega, Q) = \beta_1 Q^3 + \beta_2 \omega^3 + \beta_3 Q^2 \omega + \beta_4 Q \omega^2 + \beta_5 Q^2 + \beta_6 \omega^2 + \beta_7 Q \omega + \beta_8 Q + \beta_9 \omega + \beta_{10} \quad (6)$$

onde  $\beta_1 = -2,5186 \times 10^{-3}$ ,  $\beta_2 = -9,1168 \times 10^{-10}$ ,  $\beta_3 = 6,9103 \times 10^{-5}$ ,  $\beta_4 = 2,5492 \times 10^{-7}$ ,  $\beta_5 = -5,6126 \times 10^{-2}$ ,  $\beta_6 = 1,0972 \times 10^{-5}$ ,  $\beta_7 = 6,8286 \times 10^{-4}$ ,  $\beta_8 = 6,5038 \times 10^{-1}$ ,  $\beta_9 = 3,6776 \times 10^{-3}$  e  $\beta_{10} = 4,3067 \times 10^{-1}$ . É importante notar que os valores em estado-estacionário de  $F_{T_{\text{mT}}}$  foram avaliados através de valores de torque estimados indicados pelo VFD. Todavia, As forças de atrito viscoso e de Coulomb são também consideradas na expressão 6, tal que, combinando as expressões 3 e 6, obtem-se  $F_T(\omega, Q) = b\omega + T_c + F_{\text{load}}(\omega, Q)$  e, conseqüentemente,  $\beta_{10} = T_c$ .

Embora em Kallesoe e outros (2006) e Wolfram e outros (2001), ordens polinomiais menores tenham sido ajustadas aos dados em estado-estacionário, foi observado que o desempenho do modelo caixa-branca é bastante sensível à exatidão das relações estáticas 5 e 6, particularmente quando os limites possíveis de velocidade e valores de vazão são aumentadas. No presente caso, os erros de MAPE foram  $\text{MAPE}_{F_T} = 2,30\%$  e  $\text{MAPE}_{F_{H_{\text{pump}}}} = 17,01\%$ , e as curvas foram ajustadas utilizando dados adquiridos nos limites  $11,7 \pi \text{ rad/s} \leq \omega \leq 58,3 \pi \text{ rad/s}$ , e  $0 \text{ l/s} \leq Q \leq 27,8 \text{ l/s}$ .

### Subsistema hidráulico fixo

O tubo principal, as junções e joelhos associados a tubulação na bancada de testes hidráulicos constituem o subsistema hidráulico fixo. Baseando-se na expressão geral Darcy-Weisbach para perda de pressão nas tubulações, que depende do diâmetro, do comprimento e do coeficiente de atrito equivalente da tubulação (NEVES, 1982), foi possível aproximar a perda de pressão no subsistema hidráulico fixo como:

$$F_{\text{pipeline}}(Q) \approx k_1 Q^2, \quad (7)$$



onde  $k_1 = 2,5 \times 10^{-2}$ .

### Carga hidráulica variável opcional

Uma vez que o propósito principal da bancada de testes hidráulicos é testar sistemas hidráulicos conectados ao final da tubulação principal, a carga hidráulica variável opcional é, de fato, uma carga incerta que terá que ser considerada num plano de controle futuro. No presente estudo, esta carga incerta foi simulada abrindo parcialmente uma válvula de fluxo motorizada ao final da tubulação principal na bancada de testes hidráulicos, de forma que  $Q = 19,21/s$  quando  $\omega = 58,3 \pi \text{ rad/s}$  (velocidade nominal da bomba).

De forma similar ao que foi feito no subsistema hidráulico fixo, seguindo a abordagem Darcy-Weisbach, a carga hidráulica incerta pode ser modelada produzindo uma perda de pressão proporcional ao quadrado da taxa de fluxo. A constante  $c$  adicionada é devido à diferença de nível entre o transmissor e o tanque. Desta forma:

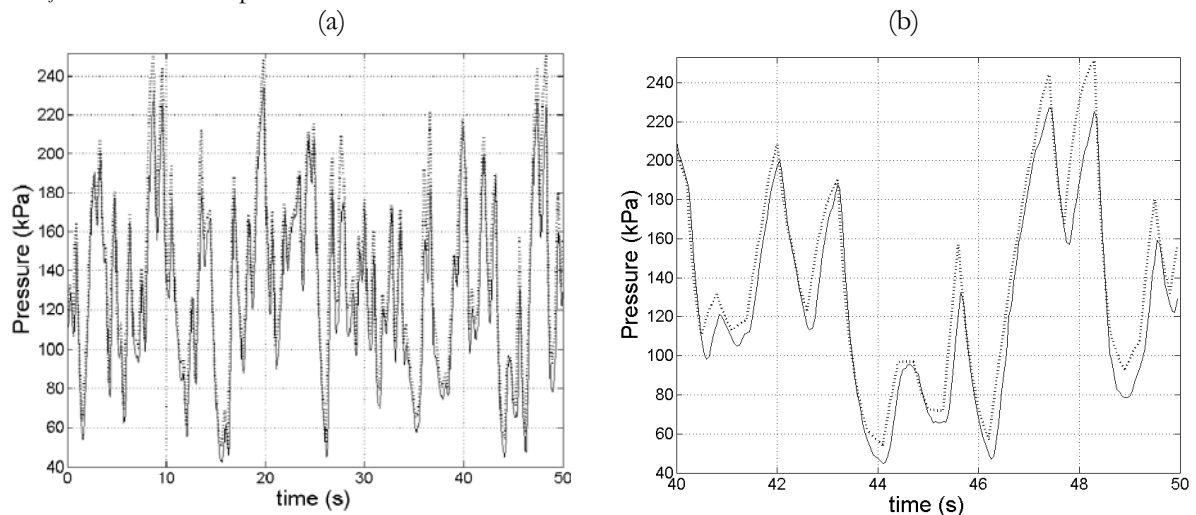
$$FQ_{\text{load}}(H_s) = \frac{\sqrt{H_s + c}}{k_2} \quad (8)$$

onde  $FQ_{\text{load}}$  é a vazão através da carga hidráulica variável;  $H_s$  é a diferença de pressão correspondente;  $c$  e  $k_2$  foram identificadas como:  $c = 0,252$  e  $k_2 = 1,082 \times 10^{-1}$  nas condições operacionais descritas acima.

Na Fig. 7 a resposta dinâmica do modelo caixa-branca é representada, considerando a aplicação da mesma referência de torque de entrada usado para identificar o modelo caixa-branca. O erro MAPE identificado foi 10,47% para o sinal de pressão e 3,5% para o sinal de vazão. A relação estática correspondente obtida do modelo caixa-branca é mostrada na Fig. 8 para ambos, sinais de pressão e de vazão, com erros MAPE de 4,5% e 4,75%, respectivamente.

### COMPARAÇÃO DOS MODELOS E CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados apresentados nas seções anteriores, pode-se concluir que o desempenho do modelo caixa-preta foi superior à alternativa caixa-branca, com respeito à capacidade de predição aos sinais de pressão e de vazão. A Tabela 1 resume os erros MAPE encontrados.



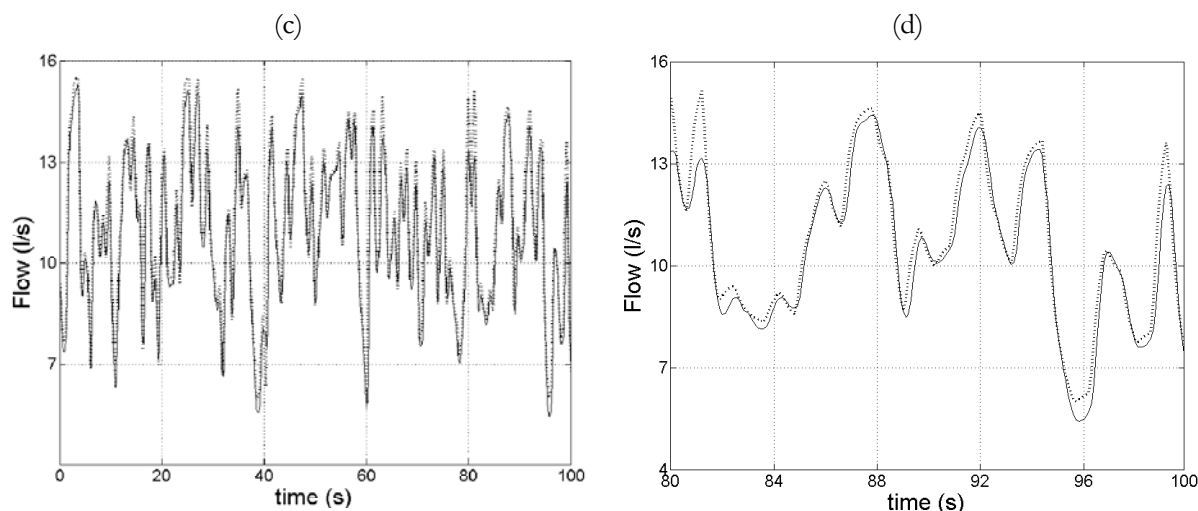


Figura 7. Validação do modelo caixa-branca. (a) Validação do modelo de pressão, e (b) detalhe da validação do modelo de pressão. (c) validação do modelo de vazão, e (d) detalhe da validação do modelo de vazão. As linhas sólidas representam a medição e as linhas pontilhadas a resposta do modelo.

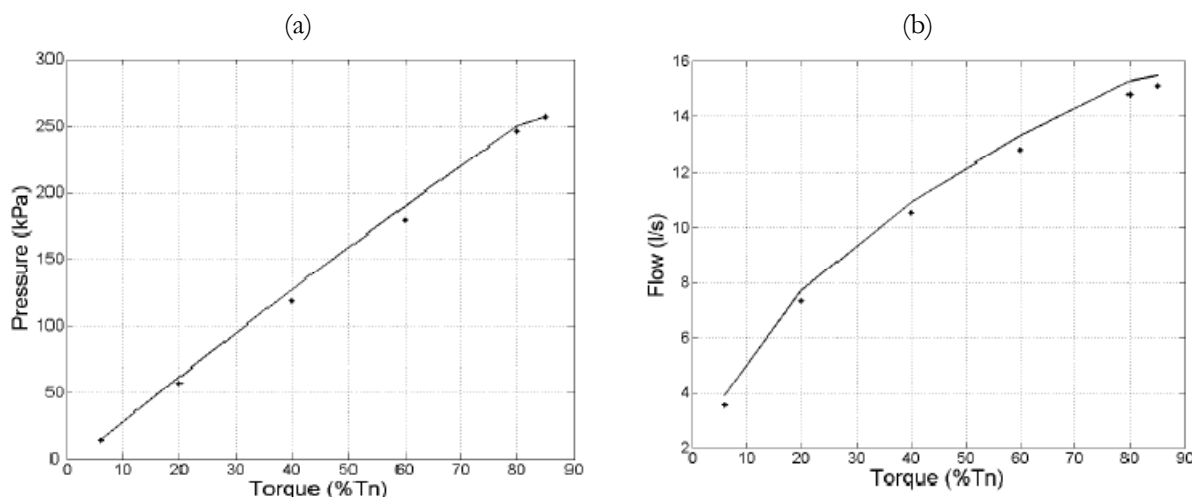


Figura 8. Validação do modelo caixa-branca em estado-estacionário. (a) Comportamento estático obtido do modelo de pressão, e (b) comportamento estático obtido de modelo de vazão. O asterisco denota o dado real em estado-estacionário, e a linha sólida representada o estado-estacionário correspondente.

Tabela 1 – Comparação dos modelos caixa-branca e caixa-preta de acordo com índices MAPE

	Pressão		Fluxo	
	Curva estática	Resposta dinâmica	Curva estática	Resposta dinâmica
Modelo caixa-branca	7,67/1,38%	1,22%	2,60%	1,10%
Modelo caixa-preta	4,50%	10,47%	4,75%	3,5%

Uma importante observação é que a dificuldade em obter o modelo caixa-preta foi consideravelmente menor que a registrada no processo de identificação do modelo caixa-branca. Isso foi observado principalmente porque, neste último caso, uma grande quantidade de conhecimento físico foi necessário de forma a representar adequadamente a bancada de testes hidráulicos e muitos testes adicionais foram necessários para estimar os parâmetros físicos.

Por outro lado, também é importante notar que o modelo caixa-preta é válido apenas para a condição operacional correspondente à válvula motorizada meio aberta como carga hidráulica variável opcional. O mesmo se aplica ao modelo caixa-branca, com a vantagem de que aqui se torna e claro como

e quando o modelo tem que ser modificado de forma a aproximar condições operacionais diferentes, ou seja, ajustando o coeficiente  $k_2$  representado na equação 8.

Outra vantagem do modelo caixa-branca é a disponibilidade de vários outros sinais no sistema, como pressão de vazão da bomba, perda de pressão da tubulação e velocidade do motor, através da integração de uma simples equação diferencial de primeira ordem. Mesmo se a dinâmica associada à aceleração inercial da água, causada pela diferença de pressão aplicada, fosse incluída no modelo, como foi feito por Eker and Kara (2003), o sistema inteiro poderia ainda ser descrito por uma simples equação diferencial de segunda ordem.

Como uma última informação, é importante destacar que a escolha de cada modelo depende da aplicação. No presente caso, uma vez que o objetivo futuro é o desenvolvimento de algoritmos de controle para rastrear sinais de referência de vazão ou de pressão desejados, apesar da ausência de conhecimento acerca da carga hidráulica incerta conectada ao final da bancada de testes hidráulicos, o modelo caixa-branca será muito útil para prever comportamentos diferentes em outras condições operacionais correspondendo a cargas hidráulicas diversas.

## REFERÊNCIAS

- AGUIRRE, L.A. Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2004.
- BARBOSA, B.H. Instrumentação, modelagem, controle e supervisão de um sistema de bombeamento de água e módulo turbina-gerador. 2006. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- BARBOSA, B.H.; Aguirre, L.A.; Martinez, C.B. Modelos NARMAX neurais na identificação de um sistema de bombeamento de água. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, XVI, 2006, Salvador. Anais... Salvador: UFBA, 2006. p. 875–880.2006
- CARLSON, R. Correct method of calculating energy savings to justify adjustable-frequency drives on pumps. IEEE: Transactions on Industry Applications, [S.l.]; vol. 36, n. 6, p. 1725-1733, 2000.
- DRIEDGER, W. Controlling centrifugal pumps. Hydrocarbon Processing, [S.l.]; vol. 74, n. 7, p. 43, 1995.
- EKER, I.; Kara, T. Operation and control of a water supply system. ISA Transactions, [S.l.]; vol. 42, n. 3, pp. 461-473, 2003.
- GUEVARA, Y.; CARMONA, R. Unsteady and steady flow control on pumping systems. IEEE: Transactions on Industry Applications, [S.l.]; vol. 26, n. 5, p. 954-960, 1990.
- IRVINE, G.; GIBSON, I.H. V<sub>f</sub> drives: as final control elements in the petroleum industry. IEEE: Industry Applications Magazine, [S.l.], vol. 8, n. 4, p. 51-60, 2002.
- KALLESOE, C.S.; COCQUEMPOT, V.; IZADI-ZAMANABADI, R. Model based fault detection in a centrifugal pump application. IEEE: Transactions on Control Systems Technology, [S.l.]; vol. 14, n. 2, p. 204-215, 2006.
- NASH, J.N. Direct torque control, induction motor vector control without an encoder. IEEE: Transactions on Industry Applications, [S.l.]; vol. 33, n. 2, p. 333-341, 1997.
- NEVES, E.T. Curso de hidráulica. 7. ed. São Paulo: Globo, 1982.
- NORGAARD, M. Neural network based system identification: toolbox: technical report 97-E-851. [S.l.]: Technical University of Denmark, 1997.
- PEMBERTON, M. Variable speed pumping: myths and legends. World Pumps, [S.l.]; n. 460, p. 22-24, 2005.
- SJÖBERG, J. et al. Non-linear black-box modeling in system identification: a unified overview. Automática, [S.l.]; p. 31–1961, 1995.
- WOLFRAM, A. et al. Component-based multi-model approach for fault detection and diagnosis of a centrifugal pump. Proceedings of the American Control Conference, [S.l.]; vol. 6, pp. 4443 – 4448, 2001.

---

## 21 Avaliação técnica do potencial de eficiência energética em sistemas de ar comprimido

---

Jamil Haddad, Roberto Akira Yamachita e Eduardo Crestana Guardia

Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil

### INTRODUÇÃO

A utilização de energia elétrica na indústria representa cerca de 43% do consumo anual. Sendo a utilização de energia em acionamentos responsável por 55% deste consumo, a produção de ar comprimido torna-se uma parcela significativa desta energia. Considerando o potencial de eficiência energética encontrado experimentalmente nos diversos usos finais, o sistema de ar comprimido representa um foco muito importante para redução de custos com energia elétrica.

O ar comprimido como o vapor, a energia elétrica, o fluido térmico, é uma utilidade industrial que permite transportar a energia até o ponto de utilização. Sua produção ocorre numa sala de compressores, que muitas vezes é formada por mais de um compressor e mais de uma linha de distribuição. A expansão do uso torna necessário um aumento de capacidade de produção, do tratamento e adequação de componentes para a distribuição do ar. No entanto, ainda é muito comum encontrar nestas salas de compressores grupos de componentes com idades diferentes e capacidades superadas que poderiam ser substituídos individualmente ou aos grupos, o que demandaria um investimento maior.

Embora esses grandes investimentos possam se justificar, até que isto ocorra, medidas relacionadas com a manutenção do sistema e redução do desperdício de energia têm que ocorrer primeiro.

Este estudo apresenta a aplicação de uma metodologia difundida para avaliação do potencial de eficiência energética em sistemas de ar comprimido. A abordagem da redução dos desperdícios ocorre na geração, distribuição e utilização final do ar. Partindo do princípio que é desejado melhorar a eficiência dos sistemas já existentes, serão apresentados inicialmente os resultados das oportunidades de menor custo que a substituição tecnológica com novos equipamentos.

Entre essas oportunidades serão apresentadas experiências práticas para quantificar e localizar os pontos das perdas por vazamentos nas linhas, medidas para economizar na produção e distribuição do ar.

### SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO

A utilização do ar comprimido ocorre em ferramentas pneumáticas, acionamentos, controles de equipamentos, transporte de materiais etc.

Entre os usos finais consumidores de energia elétrica na indústria, os compressores são os equipamentos que mais consomem energia.

O rendimento dos compressores é muito baixo, e as perdas ocorrem principalmente no aquecimento das partes mecânicas.

Um sistema de ar comprimido está dividido em três partes:

- Geração do ar comprimido: captação, compressão, tratamento e armazenamento;
- Distribuição do ar: transporte até o consumo através de tubulações;
- Consumo do ar: transformação da energia contida no ar em trabalho.

As perdas de energia ocorrem principalmente em:

- Vazamentos existentes nas linhas de distribuição;
- Pressão de trabalho inadequado para as atividades.

## Descrição do Sistema Existente

A utilização do ar comprimido na indústria ocorre principalmente para o acionamento de máquinas-ferramenta em atividades de fresa, tornearia e retífica dos anéis.

São cinco linhas de ar comprimido responsáveis pela distribuição do ar nas mini-fábricas. A geração e distribuição do ar é feita em linhas de 6" e 3", já o suprimento para as máquinas é feito através de tubos de 1,5", de onde são alimentadas as mangueiras.

Os compressores utilizados são rotativos do tipo parafuso do fabricante Atlas Copco nos modelos para pressões de trabalho de 7 bar e 10 bar, refrigeradas a ar ou a água. A especificação dos compressores para cada uma das linhas de produção está mostrada na tabela abaixo.

Os parâmetros de operação dos compressores, como as pressões de carga e alívio com as temperaturas de admissão do ar e do ar no ambiente externo estão mostrados nas tabelas abaixo.

Como para efeito de cálculo do potencial de economia de energia existente na redução da temperatura de admissão do ar é proporcional à sua variação, serão consideradas as temperaturas observadas durante o levantamento de dados.

Os principais fatores de ineficiência dos sistemas de ar comprimido são a sobrecarga, as perdas nas linhas, mal uso de componentes da linha de ar e o dimensionamento incorreto gerando perda de carga. A análise dos tempos de operação dos ciclos de compressão juntamente com as medições de potência permitirá avaliar o dimensionamento dos sistemas de ar comprimido.

A metodologia utilizada para avaliar os vazamentos será a da medição do tempo de carga nos ciclos de compressão. Este teste é conhecido como teste de estanqueidade das linhas dos sistemas de distribuição do ar comprimido. Considerando que numa ação corretiva não sejam encontrados ou corrigidos todos os vazamentos será tomado como referência uma condição mínima de 10% de perda.

O mal uso de componentes na linha incorporam a parametrização de secadores de ar, ajustes dos filtros de ar e principalmente das pressões de operação dos próprios compressores.

## Características dos Equipamentos

A mini-fábrica da usinagem apresenta duas linhas de fornecimento de ar comprimido, sendo uma para os equipamentos da usinagem em 7 bar e outra para os equipamentos do processo de metalizado em 10 bar.

Tabela 1: Compressores da linha de usinagem

Usinagem									
Compressor	Operação normal	Fabricante	Modelo	Pressão nominal (bar)	Descarga livre efetiva (m <sup>3</sup> /h)	Descarga livre efetiva (l/s)	Refrigeração	Potência (cv)	Consumo específico (kWh/m <sup>3</sup> )
# 1	ligado	Atlas Copco	GA1407	7	1.482	412	Água	250	0,124
# 3	ligado	Atlas Copco	GA1407WP	7	1.620	450	Água	250	0,113
# 4	stand by	Atlas Copco	GA1407W	7	1.608	447	Água	250	0,114
# 5	ligado	Atlas Copco	GA160	7	1.680	467	Ar	250	0,109
# 8	ligado	Atlas Copco	GA160	7	1.680	467	Ar	250	0,109
TOTAL	ligado	-	-	-	6.462	1.795	-	1.000	0,114

Mantendo um compressor de reserva esta linha tem capacidade total de fornecimento de ar de 6.462 m<sup>3</sup>/h com 1.000 cv o que apresenta um consumo específico médio de 0,114 kWh/m<sup>3</sup> de ar comprimido.

## Curva de carga típica diária

A curva de carga média de todos os compressores da usinagem tem uma demanda média de 628 kW e um fator de carga de 94%, operando com 68% da capacidade instalada.

O fator de potência médio dos motores é de 84% indutivo. O quadro de comando dos motores também aciona localmente os bancos de capacitores necessários para a correção do fator de potência.

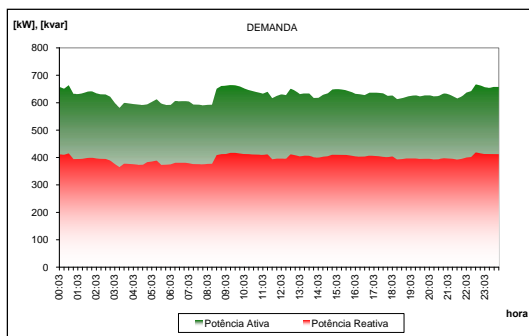


Figura 1: Curva de carga típica de potência

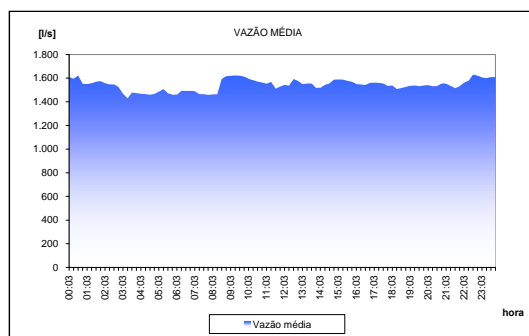


Figura 2: Curva de carga típica de vazão

### MEDIÇÕES DE ESTANQUEIDADE

Com o objetivo de verificar a quantidade de vazamento existente na linha de distribuição foi realizado uma medição de estanqueidade do sistema de ar comprimido. Os resultados estão apresentados a seguir:

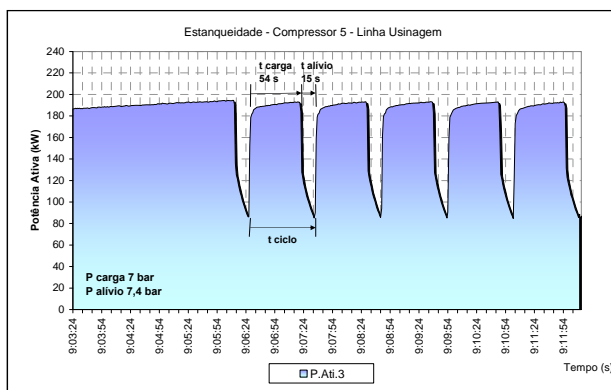


Figura 3: Teste de estanqueidade

- 54 Tempo de carga (s)
- 15 Tempo de alívio (s)
- 78% Tempo em carga (%)
- 467 Vazão nominal (l/s)
- 365 Caudal devazamento (l/s)
- 1684 Vazão total (l/s)
- 22% Perdas por vazamento
- 190 Potência do compressor (kW)
- 8000 Tempo de operação anual (h/ano)
- 10% Perdas permissíveis (%)
- 1038 Energia perdida (MWh/ano)
- 70 Custo da energia (R\$/MWh)
- 72630 Custo dos vazamentos (R\$/ano)

Após a realização do teste de estanqueidade foram mantidos os ciclos de carga e alívio da linha e então examinada a linha de distribuição e a área produtiva onde estão os equipamentos que demandam o ar comprimido.

Na tabela abaixo estão listados os vazamentos que foram percebidos, qualificados como pequenos, médios ou grandes, dependendo do diâmetro do furo ou vazão observada. Como a quantificação foi realizada pelo teste de estanqueidade, não houve preocupação em medir os furos.

### Redução da temperatura de admissão do ar

Se a temperatura do ar de admissão do compressor for mais baixa, maior será a massa de ar aspirado para sua capacidade volumétrica, aumentando o rendimento do compressor. Portanto, sempre que possível é importante fazer a admissão do ar fora da sala dos compressores, onde a temperatura é mais elevada.

A proposta de implementação para fazer o aproveitamento deste potencial de eficiência energética será então a modificação da tubulação de admissão e filtragem do ar de admissão do compressor.

Respeitando os limites de vazão de ar de cada compressor e a velocidade do ar na tubulação é possível determinar o novo diâmetro da tubulação, caso haja mais de um compressor alimentado com a mesma tubulação.

A tubulação de admissão dos compressores tem 6", para uma vazão total de 6.462 m<sup>3</sup>/h, mantendo a velocidade do ar na tubulação a admissão do conjunto deverá ter uma tubulação principal com diâmetro de 12" e um filtro adequado para garantir esta vazão. A tubulação de saída de cada compressor pode ser mantida em 6", juntando-se a esta tubulação principal através de mangotes flangeados.

O investimento em material para esta implementação será a rede de tubulação, mangotes e filtro. É importante verificar se o local externo onde será feita a admissão do ar é um local coberto, protegido de chuva, para garantir que a umidade absorvida não comprometa os equipamentos.

Tabela 2: Potencial de economia

Usinagem		Avaliação do sistema					
Compressor	Operação normal	Economia com redução da temperatura (%)	Diâmetro da tubulação (m)	Velocidade do ar (m/s)	Demanda média (kW)	Energia economizada (MWh/ano)	Economia (R\$/ano)
# 1	ligado	2%	0,15	23	224	37	2.588
# 3	ligado	2%	0,15	25	216	36	2.495
# 4	stand by	2%	0,15	24	83	14	959
# 5	ligado	2%	0,15	26	241	40	2.784
# 8	ligado	0%	0,15	26	242	0	0
TOTAL	ligado	2%	0,30	25	923	112	7.867

### CONCLUSÃO

As ações de eficiência energética propostas para o sistema de ar comprimido estão na geração do ar, na distribuição e uso final.

O aumento do reservatório permitirá que os compressores tenham um ciclo de operação com tempo de carga menor. Com o novo reservatório também serão ajustados os parâmetros de pressão dos compressores. A captação de ar fora da sala de compressores também proporcionará uma economia devido ao aumento do rendimento dos compressores.

No uso final, a substituição e manutenção de válvulas, tubulações, mangueiras e componentes serão responsáveis pela maior parte da economia.

## REFERÊNCIAS

- RODRIGUES, Paulo Sérgio B. “Compressores Industriais”. Rio de Janeiro, Editora Didática e Científica Ltda., 1991.
- FLÔRES, Luiz Fernando Valadão. “Máquinas e Aparelhos Térmicos”. Universidade Federal de Itajubá, MG, Notas de Aula, 2002.
- PROCEL, Manual Prático: Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido, Eletrobrás/PROCEL, Rio de Janeiro, 2004.
- TALBOTT E.M., Compressed air systems, A guidebook on energy and cost savings, SBN 0-13-175852-7.
- HAHN, A, Programa de Eficientização Industrial - Compressores. Rio de Janeiro: Eletrobrás / PROCEL, 2003. 1 volume, 88 páginas.
- HADDAD, J.; YAMACHITA, R. A.; et alli.; “Eficiência Energética: Teoria e Prática”, coordenação Jamil Haddad, Milton César Silva Marques e Eduardo Crestana Guardia, ISBN 978-85-60369-01-0, Itajubá – MG, 2007, MME – MCT – Eletrobrás – PROCEL – Unifei – Excen - Fupai.
- HADDAD, J.; YAMACHITA, R. A.; et alli.; “Conservação de Energia: Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações”, coordenação Jamil Haddad, André Ramon Silva Martins e Milton Marques, ISBN 85-60369-00-7, Itajubá – MG, 2006.





---

## 22 Estudo de racionalização do consumo de energia elétrica em sistemas de tratamento e abastecimento de água

---

Jamil Haddad, Augusto Nelson Carvalho Viana, Afonso Henriques Moreira Santos, Edson da Costa Bortoni, Roberto Akira Yamachita e André Ramon Silva Martins  
Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil

### INTRODUÇÃO

No ambiente altamente competitivo em que se encontram as empresas, a busca pelo uso racional de energia assume um caráter estratégico. A eliminação dos desperdícios, a redução de perdas e a racionalização técnico econômica dos fatores de produção tornaram-se elementos de grande relevância. Tanto usuários como concessionárias de energia elétrica tem consciência deste novo cenário e buscam alternativas para alcançar estes objetivos. Segundo esta perspectiva um dos mais promissores campos para estudo é o de sistema de bombeamento, fundamental nos sistemas de tratamento e abastecimento de água potável. Normalmente o controle de um conjunto moto-bomba é do tipo “liga-desliga”: quando a água atinge o nível denominado mínimo, a bomba é ligada automaticamente, sendo desligada quando atinge o nível denominado máximo, que, dependendo das condições do local e de operação, poderá ser substituído por um sistema de acionamento com inversor de frequência.

### CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UMA INSTALAÇÃO

O levantamento do campo básico de funcionamento, também chamado diagrama de colinas de uma bomba centrífuga indica seu melhor ponto de operação. Este é obtido de ensaio, e apresenta para uma determinada rotação, o rendimento total. O ideal seria a bomba funcionar no ponto máximo, chamado de ponto de projeto, que proporcionaria, além de um melhor desempenho, um menor desgaste. Isto torna-se inviável na maioria das aplicações, pois as instalações solicitam das bombas operarem fora do ponto de máximo rendimento.

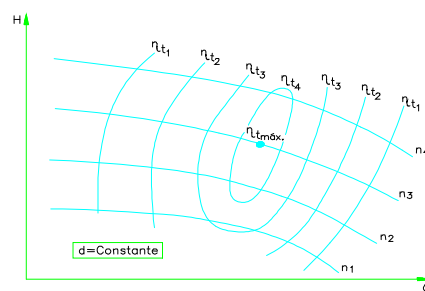


Figura 1 - Diagrama de colinas de uma bomba centrífuga

A preocupação dos usuários é selecionar conjuntos motor-bomba com uma eficiência energética melhor possível, operando com rotação variável, principalmente na diminuição da vazão. Esta é uma alternativa que consome menos energia se comparada à do funcionamento com rotação constante e variação da vazão através de válvula ou by-pass. Trabalhos como de Johnson (Johnson,1984) e Pottebaum (Pottebaum,1984) apresentam tipos de acionamentos de velocidade variável, como soluções para diminuir os custos de energia. Entretanto não fazem menções aos limites aceitáveis de operação, principalmente no que se refere ao abaixamento de vazão. Há necessidade de analisar os fenômenos hidráulicos e pneumáticos na operação de bombas fora do seu ponto de máximo rendimento.

Analisando a situação graficamente (Figura 2) percebe-se, ao acionar o conjunto diretamente da rede, o ponto de operação P1 (intersecção entre as curvas da bomba e do Sistema). Visto que as perdas de carga são função da vazão ao quadrado, é desejável controlar a vazão de modo que o tempo de trabalho não exceda o permitido em cada situação; na forma usual há uma válvula de controle para alterar a curva do sistema, porém com desperdício, pois traz junto um aumento indesejável na altura de bombeamento (P2). Alterando o ponto de operação movimentando a curva da bomba (P3) através do acionamento a partir de um inversor de frequência tem-se que a área hachurada indica uma redução nas perdas de carga, ou seja, economia de energia. Dentre as condições de contorno deste problema encontram-se a vazão mínima para vencer a altura de bombeamento e o rendimento do conjunto em função da vazão.

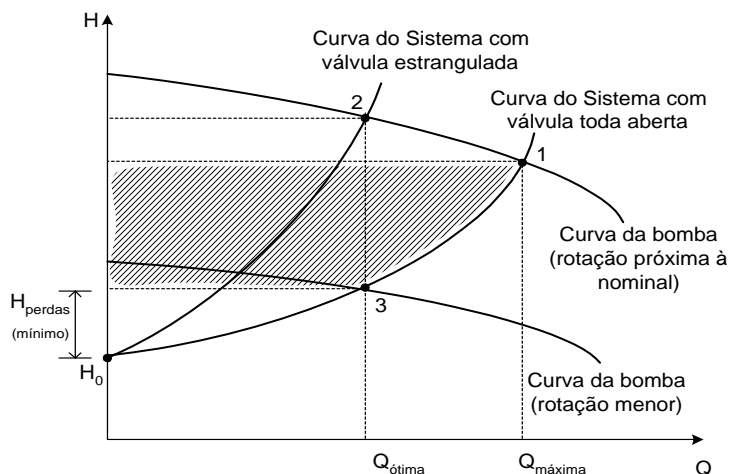


Figura 2 – Pontos de operação da bomba centrífuga

Um dos pontos que mais contribuem para o aumento de consumo de energia é a seleção de um equipamento sobredimensionado, como cita Karassik (Karassik,1984). Muitas vezes o técnico ou usuário destina um tempo razoável para selecionar uma diferença pequena de rendimento entre duas bombas, enquanto que ao mesmo tempo economias em potencial de até 15% da energia são ignoradas através de uma atitude muito conservadora na seleção das condições requeridas de serviço. O autor refere-se à margem de segurança imposta pelos técnicos, de uma forma conservadora e muito usual, prevendo os desgastes futuros de folgas internas, que com o tempo reduzirão a sua capacidade efetiva.

Doolin (Doolin,1984) chama a atenção sobre a frequência de muitas instalações que são projetadas para operarem no futuro com uma vazão maior, mas que inicialmente trabalham com vazões reduzidas, operando longe dos pontos de melhor rendimento. Mesmo que este período seja de apenas dois ou três anos, poderia ser mais econômico, instalar uma bomba de menor capacidade e substituí-la depois por um de capacidade total.

Outro ponto que Karassik (Karassik,1984) e Doolin (Doolin,1984) chamam a atenção em termos de consumo excessivo de energia, é o fato de usuários selecionarem apenas um gerador operando com rotação constante em uma instalação que solicita grandes variações de vazão, conseguidas com o estrangulamento de uma válvula. A solução seria escolher dois ou três geradores de menor capacidade, operando em paralelo, para atender as variações da instalação. Os três operariam para suprir a maior capacidade do sistema, e quando fosse solicitada uma vazão menor, apenas um operaria, consumindo bem menos que no primeiro caso.

Outro ponto importante na seleção é analisar o tipo de rotor, onde os fechados proporcionam melhores rendimentos se comparados com os abertos, que possuem muitas perdas por fugas. Além disso, desgastam-se menos, sendo suas quedas de rendimentos, menores que os de rotores abertos. Doolin (Doolin,1984) através de um trabalho experimental de desgaste acelerado entre rotores aberto e fechado, analisou o aumento da folga de ambos, o rendimento do rotor aberto caiu 28%, enquanto o fechado 14%.

## SELEÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

A Tabela 1 apresenta os sistemas com potência instalada superior a 10 cv e seus tipos de distribuição na cidade de Itajubá – MG. O tipo de instalação nos fornece a maneira como a água é transportada do reservatório principal para a caixa d'água que abastecerá as casas: Elevatória - a água chega, normalmente através da diferença de altura, a um reservatório localizado na subestação para depois ser bombeada numa caixa d'água localizada em um ponto suficientemente alto para abastecer todos os consumidores desta região; Booster - a água é bombeada a partir de um ponto localizado abaixo do reservatório principal para aumentar a pressão da água para que ela consiga atingir a caixa d'água. Após a análise das características de cada estação foi selecionada a estação JA.

Tabela 1 – Estações de Bombeamento

Estações	Potência	Instalação	Distribuição
J C	50 [cv]	Elevatória	Virgem
S A	40 [cv]	Elevatória	Virgem
N H	20 [cv]	Elevatória	Virgem
V V	15 [cv]	Elevatória	Em marcha
R	15 [cv]	Elevatória	Virgem
J A	10 [cv]	Booster	Virgem

Dentre os motivos para a escolha da estação JA encontram-se:

- Distribuição virgem – permite uma aquisição dos dados sobre o consumo de água mais simples, visto ser necessário ter apenas a leitura do volume de água que sai da caixa d'água para poder obter o volume total consumido;
- Baixa altura manométrica – a implantação da metodologia de efficientização energética na pesquisa “Eficientização Energética de Sistemas de Saneamento”, realizada anteriormente em uma estação que apresentava uma altura manométrica muito alta não resultou em valores satisfatórios;
- Menor potência – para viabilizar a pesquisa era necessário buscar recursos para adquirir equipamentos; como o conjunto possui uma potência de 10 cv, os custos seriam menores;
- Consumo de água – o número de consumidores atendidos por esta estação é menor, causando menos transtornos quando das medições em campo.

A instalação escolhida possui duas bombas de potência de 10 cv (Figura 3). A companhia de saneamento adota um sistema de rodízio semanal entre as bombas. Na linha de sucção de cada bomba, de diâmetro 4”, está instalada uma válvula gaveta, que permanece aberta no conjunto operante e fechada no conjunto reserva. No caso da linha de recalque, de diâmetro 3”, cada bomba possui em sua saída outra válvula gaveta, que permanece sempre aberta, com exceção no caso de manutenção. A instalação se situa numa cota de 881,63 m e abastece a linha principal do bairro no sentido de sua caixa d'água na cota de 953,93 m (sendo que o reservatório principal da cidade se encontra na cota de altitude de 899 m). A bomba é controlada por um conjunto de sensores do tipo bóia instalados na caixa d'água. Após atingir a capacidade máxima da caixa d'água, que é de 15.000 litros, a bomba é desligada, sendo novamente acionada quando o nível de água na caixa baixar a 50% da capacidade.



Figura 3 – Conjunto Moto-Bomba da Estação JA

Tabela 2 – Características da Bomba e do Motor de Acionamento da Estação JA

Motor		Bomba	
Tipo	Indução	Tipo	Centrífuga
Carcaça	Monobloco	Carcaça	Ferro Fundido
Quantidade	2	Quantidade	2
Tensão	220 [V]	Altura	71,50 m
Corrente	24,8 [A]	Vazão	14,40 [m <sup>3</sup> / h]
Proteção / Isolamento	IP – 55 / B	Número de Estágios	1
Rotação	3510 [rpm]	Rotação	3530 [rpm]
Potência	10 [cv]	Potência	10 [cv]

## RESULTADOS DE ENSAIOS

Com o objetivo de levantar o diagrama de colina do conjunto moto-bomba do booster JA foram realizados no Laboratório Hidromecânico para Pequenas Centrais Hidrelétricas do Instituto de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Itajubá – LHPCH / IEM / UNIFEI. A bancada de ensaio foi montada conforme o esquema mostrado na Figura 4.

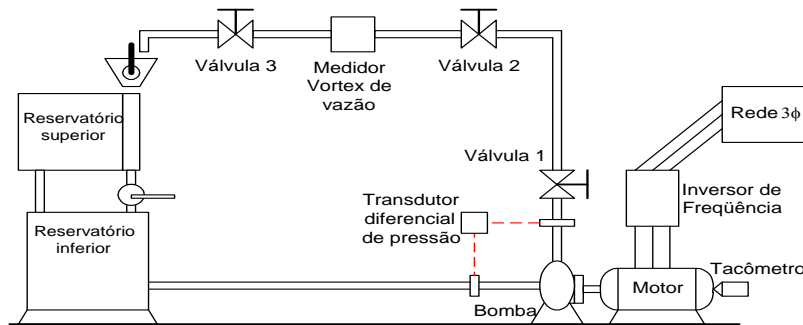


Figura 4 – Esquema da bancada para os ensaios

As grandezas monitoradas foram: vazão, diferença de pressão na entrada e saída da bomba, rotação do motor e potência elétrica do motor para cada abertura da válvula 3 e variação de velocidade dada pelo inversor. A partir destas informações foram calculadas a altura de bombeamento para cada situação, lembrando que:

$$H = \left( \frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g} \right) + \left( \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot g} \right) + (z_2 - z_1)$$

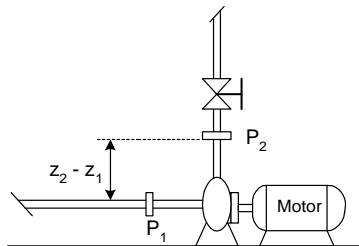


Figura 5 – Desenho de referência para determinação da altura de bombeamento

E ainda, a velocidade média vem da equação:  $v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2}$

onde: Q – vazão medida em m<sup>3</sup>/s; D – diâmetro da tubulação em metros: o diâmetro de entrada da bomba ( $\phi_1$ ) é de 0,053 m e o diâmetro de saída ( $\phi_2$ ), de 0,045 m; a diferença entre as cotas ( $z_2 - z_1$ ) tem medida 0,6 m; a aceleração da gravidade (g) foi considerada 9,81 m/s<sup>2</sup>.

Tem-se o cálculo da potência hidráulica (em kW) :  $Ph = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot 10^{-3}$   
 $Ph = 9,81 \cdot Q \cdot H$

e do rendimento do conjunto:  $\eta = \frac{Ph}{Pe}$

A Tabela 3 apresenta um exemplo da planilha de ensaio.

Tabela 3 – Planilha de Ensaio (para cada abertura)

Rotação de referência (rpm)	Rotação lida (rpm)	Potência Elétrica (kW)	Corrente Transdutor (mA)	Altura de elevação (m)	Vazão (l/s)	Potência Hidráulica (kW)	Rendimento (%)
3000	3005	6,560	9,00	33,75	4,38	1,478121	23
3200	3202	7,630	9,50	37,01	4,56	1,687508	22
3400	3397	8,800	10,00	40,28	4,75	1,913331	22
3500	3508	9,510	10,40	42,87	4,86	2,083382	22

Abertura 4

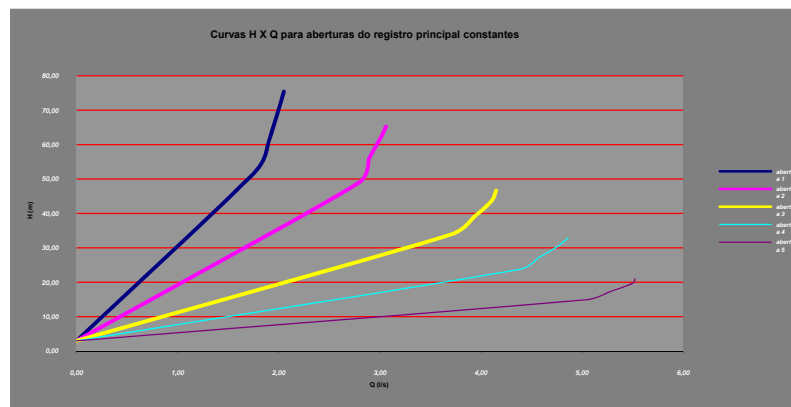


Figura 6 – Curvas H X Q para aberturas do registro principal constantes

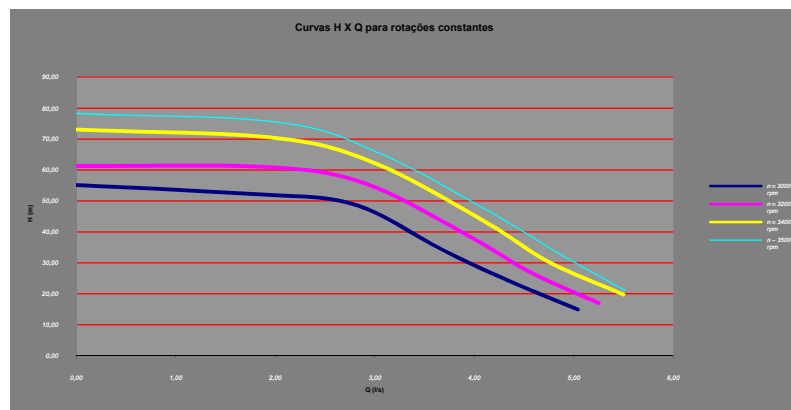


Figura 7 – Curvas H X Q para velocidades constantes

O rendimento máximo do Conjunto encontra-se na vazão de 2,5 litros por segundo em 3500 rpm, para a altura de bombeamento exigida pelo Sistema.

## DADOS DE CONSUMO

A companhia de saneamento disponibilizou informações sobre o consumo de água em um período maior que 1 ano para dar início aos estudos. O aumento considerável do consumo deveu-se à uma estratégia da empresa, que deslocou vários consumidores atendidos por outra estação para esta (Figura 8). Visando acompanhar a demanda, foi instalado um analisador de redes na estação, a fim de obter dados elétricos da instalação. O período de medição foi de uma semana, de 15h 30min do primeiro dia às 15h 30min do último. O consumo diário veio em seguida, após verificação dos dados obtidos (Figura 9). O consumo de energia elétrica ao final deste período foi de 226,4 kWh; em 7 dias (168 h) resultando numa potência média em torno de 1,3 kW. Se comparado à capacidade da instalação, 10 cv (aproximadamente 7,36 kW), comprova-se o baixo fator de carga. Com isso, deve-se analisar a maior utilização do conjunto moto-bomba, procurando otimizar o sistema de bombeamento.

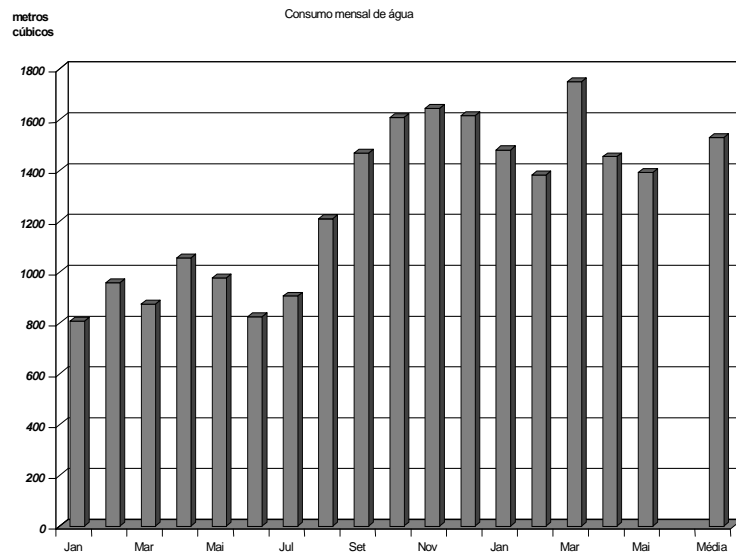


Figura 8 – Consumo mensal de água

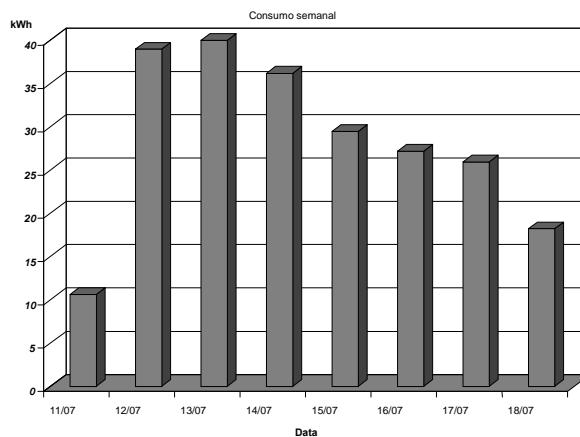


Figura 9 – Consumo de energia elétrica durante uma semana

## RESULTADOS DE CAMPO

Como apresentado nos gráficos H x Q, para cada valor de vazão tem-se uma correspondente rotação no eixo da bomba. Isto se torna claro nas pequenas variações de velocidade registradas na Tabela 4, valores estes obtidos na estação JA.

Tabela 4 – Valores de vazão obtidos em campo

Rotação do eixo (rpm)	Vazão (l/s)
3530	2,8
3524	2,7
3516	2,6

No período de medição, que foi limitado segundo o consumo de água solicitado, foram bombeados 4.050 litros. A energia elétrica consumida foi de 0,345 kWh.

Com o uso do inversor de frequência, para bombear o mesmo volume de água numa rotação de 3500 rpm, na vazão ótima de 2,5 l/s, o consumo foi de 0,234 kWh, resultando em uma economia de 32%.

Considerando que a média mensal do consumo do sistema está em torno de 270 kWh, a previsão é de uma economia de 86 kWh, que resulta em aproximadamente R\$ 25,00/mês.

## VIABILIDADE ECONÔMICA

Pesquisando no mercado regional os preços básicos do conjunto moto-bomba de 10cv e de um inversor de frequência capaz de acioná-lo, foram encontrados os seguintes valores:

Tabela 5 – Custo de referência dos equipamentos para o Sistema de Bombeamento

Descrição	Quantidade	Preço Total (R\$)
Moto – Bomba, 10cv	2	2.600,00
Inversor de Frequência, 10 cv	1	3.500,00

Pela Tabela 5 observa-se que o inversor tem um custo 35% maior que dois conjuntos moto-bomba, o que de antemão causa desânimo ao se pensar no valor do investimento. No entanto, considerando que os equipamentos essenciais já existem, torna-se importante levar a proposta em consideração ao efetuar um planejamento.

Segundo os valores obtidos em campo, o tempo de retorno para o investimento passaria dos 10 anos, inviabilizando qualquer esforço de aplicação imediata da proposta. No entanto, deve-se ressaltar que as medições envolvendo o inversor de frequência foram realizadas num período de menor consumo.

O estímulo para a aplicação da proposta vem da comprovada redução do consumo de energia de 32%, porém, sob o ponto de vista absoluto, apresentou valores pequenos.

## CONCLUSÃO

A água é reconhecidamente um recurso natural indispensável à vida, estratégico, vulnerável, finito e já escasso em quantidade e qualidade. Portanto, nessa condição, trata-se de um bem econômico, que deverá ser explorado de modo racional buscando reduzir o desperdício, mesmo em locais onde há abundância do produto. No caso do consumo de energia elétrica em sistemas de bombeamento, o inversor de frequência, além de contribuir para minimizar as perdas, apresenta outras vantagens:

- Colabora com a vida útil do motor, pois as partidas são suaves;
- Em sistemas maiores evita, na partida, quedas de tensão prejudiciais a outros consumidores locados no mesmo barramento;
- Facilidade no ajuste, fixação e manutenção da velocidade do motor;
- Dependendo da importância do sistema, pode ser monitorado à distância;



- Por ser um equipamento estático, é de fácil instalação, não precisando de uma base específica.

Na verificação in loco foi observada uma economia de energia elétrica pequena em valores absolutos, mas suficiente para estimular novos estudos. Além da redução no consumo de energia, evidencia-se neste arranjo a possibilidade da atuação na curva de demanda, operando para suprir o nível mínimo durante o horário da ponta, buscando trabalhar mais tempo nos horários fora da ponta.

Finalmente, em uma visão macroscópica, o uso racional é uma prática que liga questões técnicas e econômicas a temas educacionais, ambientais, e sociais. Por um lado ela é implementada com a utilização de novas tecnologias mais eficientes; por outro, esta prática é fruto de uma mudança de postura do ser humano, que se conscientiza do seu comportamento perdulário e evita desperdícios, preservando assim recursos naturais.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ABNT, PMB-778 – Ensaio de Bombas Hidráulicas de Fluxo.

DOOLIN, J.H.: Select pumps to cut energy cost. In the Chemical Engineering Guide of Pumps, Ed. KENNETH Mc Naughton, N. Y., USA, 1984, p. 24-26.

JOHNSON, J.D.: Variable - speed drives can cut pumping costs, In the Chemical Engineering Guide of Pumps, Ed. Kenneth Mc Naughton, N. Y., USA, 1984, p. 57-58.

KARASSIK, I. J.: Centrifugal pumps and system hydraulics. In the chemical Engineering Guide of Pumps, Ed. Kenneth Mc Naughton, N. Y., USA, 1984, p. 60-82.

MACINTYRE, A. J. – Bombas e Instalações de Bombeamento, Editora LTC, 1997.

M M A, Política Nacional de Recursos Hídricos – M M A, Recursos Hídricos e da Amazônia Legal, 1997

POTTEBAUM, J.R.: Optimal characteristics of a variable - frequency centrifugal pump motor drive. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-20, n° 1, February, 1984, p. 23-31.

PROCEL, “Eficientização em Sistemas de Bombeamento”, 1998.

---

## 23 Capacitação laboratorial para eficiência energética em sistemas de bombeamento

---

**Mateus Ricardo Nogueira Vilanova e Augusto Nelson Carvalho Viana**  
Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil

### INTRODUÇÃO

O presente trabalho apresenta os esforços conjuntos do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL/ELETROBRÁS) e da Universidade Federal de Itajubá no que se refere à criação e aperfeiçoamento de uma estrutura laboratorial para a análise de equipamentos e sistemas hidráulicos de bombeamento, no tocante à eficiência energética.

No trabalho são apresentados os circuitos hidráulicos do Laboratório de Etiquetagem de Bombas, bem como os tipos de ensaios que podem ser realizados. Para os levantamentos de campo está mostrado o Laboratório Móvel de Hidráulica, que tem a finalidade de avaliar as condições operativas e rendimentos de sistemas de bombeamento baseados em conjuntos moto-bombas, visando identificar potenciais de conservação de energia em indústrias, companhias de saneamento básico, meio rural e prédios que se utilizam tais equipamentos.

### METODOLOGIA

Segunda a Aliança para Conservação de Energia (ALLIANCE, 2002), de 2% a 3% de toda energia elétrica consumida mundialmente é utilizada em sistemas de bombeamento para abastecimento urbano e industrial, sendo estimado em 25% o potencial médio de efficientização de tais sistemas. Dentre as principais fontes de desperdício de energia, tem-se (ELETROBRÁS, 2005; ALLIANCE, 2002): utilização de conjuntos moto-bomba ineficientes ou deteriorados, tubulações mal-dimensionadas ou com alta rugosidade, dimensionamento e operação inadequados dos sistemas, vazamentos e fraudes no faturamento de água, dentre outras. As medidas efficientizadoras, por sua vez, baseiam-se, inevitavelmente, no diagnóstico dos circuitos hidráulicos e seleção de equipamentos/acessórios eficientes. A análise técnica e econômica dos projetos de efficientização energética consiste na determinação das condições atuais do sistema considerado (baseline) e nas economias geradas pelo retrofit, sendo estas dependentes dos níveis de eficiência obtidos com os equipamentos e melhorias propostas. Diante deste cenário, o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL/ELETROBRÁS) vem apoiando a capacitação laboratorial em universidades e centros de pesquisa nacionais, para uso multidisciplinar, focados no uso eficiente integrado de água e energia elétrica. Tais laboratórios (no âmbito da conservação de energia em sistemas de bombeamento) podem ser agrupados em três tipos:

- Laboratórios de apoio ao Selo Procel e ao Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE): são laboratórios credenciados junto ao Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) para a realização de ensaios em determinada categoria de equipamento, tendo como resultado a emissão da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) e posteriormente, do Selo Procel, dado aos produtos de melhor desempenho em suas categorias. Para bombas centrífugas, o laboratório responsável pelos ensaios é o Laboratório de Etiquetagem de Bombas da Universidade Federal de Itajubá (LEB/UNIFEI);
- Laboratórios móveis para diagnósticos hidroenergéticos in situ: constituídos de veículos adaptados e equipados com equipamentos e instrumentação de última geração para análise de eficiência em sistemas de bombeamento. Há, no momento, 2 unidades móveis no Brasil, sendo uma integrante da estrutura do LEB/UNIFEI e outra sob os cuidados da CAGECE;

- Laboratórios de eficiência energética e hidráulica em saneamento (LEHNS): implantação de centros de referência regionais para atividades de ensino, pesquisa aplicada e extensão, destinadas ao uso eficiente e integrado de água e energia elétrica, visando se tornarem centros de excelência.

## LABORATÓRIO DE ETIQUETAGEM DE BOMBAS (LEB/UNIFEI)

O Laboratório de Etiquetagem de Bombas foi construído e equipado através do Projeto de Capacitação Laboratorial, coordenado pela ELETROBRÁS/PROCEL, com recursos doados pelo Global Environment Facility (GEF), repassados à ELETROBRÁS pelo Banco Mundial (BIRD), e tem apoio do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD). Este projeto objetiva capacitar laboratórios, para emissão da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) e concessão do Selo PROCEL, dando suporte à Lei de Eficiência Energética.

O LEB faz parte do programa de etiquetagem de bombas centrífugas, contando com oito fabricantes nacionais, cujos equipamentos são testados, conforme regulamento específico, para concessão da etiqueta nacional de conservação de energia. A área física ocupada pelo LEB é cerca de 300 metros quadrados, no Instituto de Recursos Naturais da Universidade Federal de Itajubá. O montante investido pela ELETROBRÁS foi da ordem de R\$ 1.700.000,00, além da contrapartida da própria UNIFEI para a adequação do espaço físico do laboratório.

A figura 1 apresenta os circuitos do Laboratório de Etiquetagem de Bombas.

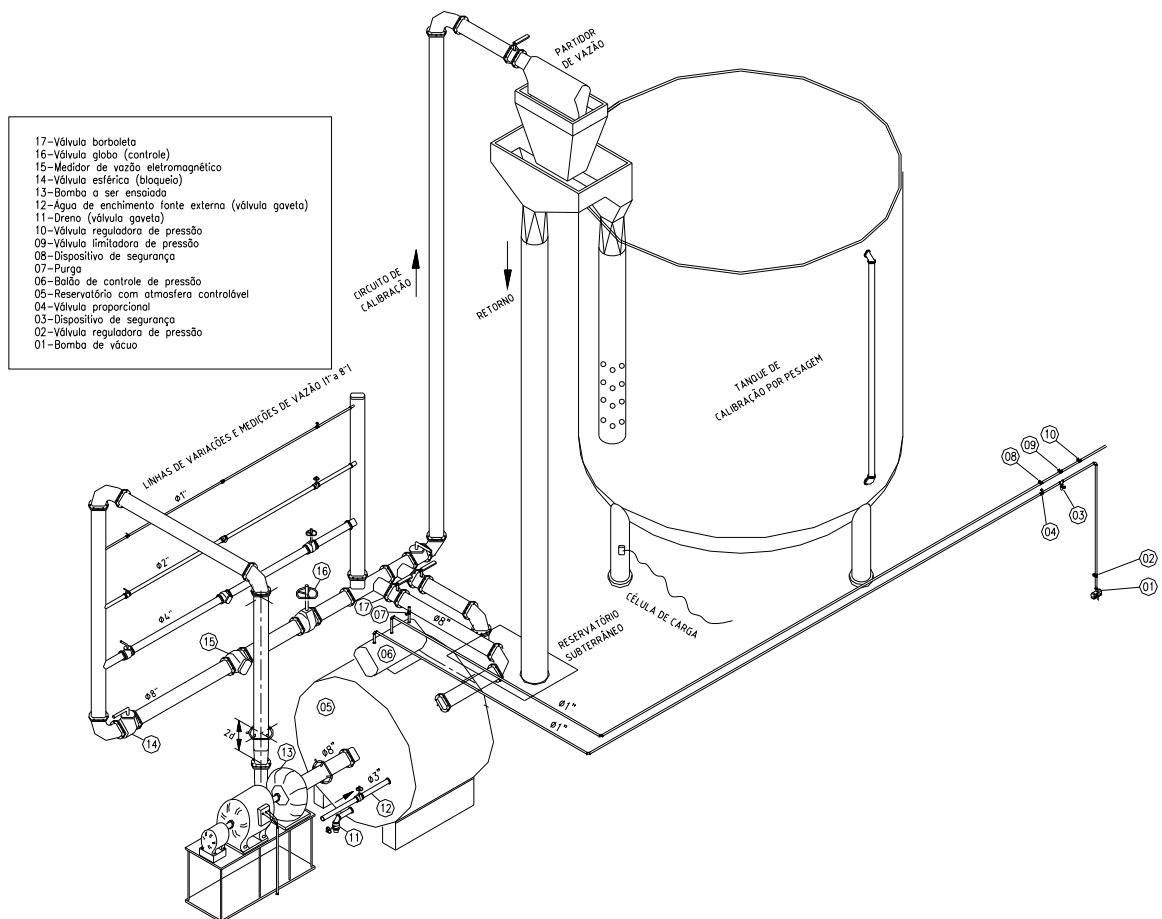


Figura 1 – Circuitos do Laboratório de Etiquetagem de Bombas da UNIFEI

O laboratório conta com três circuitos de ensaios, dotados de instrumentação de última geração (medidores de vazão eletromagnéticos, transmissores de pressão, manômetros, tacômetros digitais, medidores de grandezas elétricas, etc) e um sistema de aquisição de dados (LabView). Nos circuitos

existentes podem ser realizados testes de rendimento nos conjuntos moto-bomba e em válvulas hidráulicas, bem como testes de cavitação em bombas.

O laboratório ainda dispõe de circuitos de calibração em medidores de vazão e de pressão.

O circuito de ensaio de bombas pode utilizar um reservatório subterrâneo de sucção ou um reservatório de atmosfera controlada. Uma linha principal alimenta quatro linhas com diâmetros de 1" a 8", onde encontram-se válvulas de bloqueio, válvulas de controle de vazão e medidores eletromagnéticos de vazão com diferentes faixas de medição. A escolha da linha utilizada ocorre em função da vazão da bomba a ser ensaiada, garantindo maior acurácia ao ensaio (VIANA et al., 2006), como mostra a figura 2.



Figura 2 – Linhas de medidas de vazão, válvulas de bloqueio e de controle e medidores de vazão eletromagnéticos

As pressões na entrada e saída da bomba são medidas através de transdutores, onde o laboratório possui medidores para várias faixas de pressões. A figura 3 ilustra alguns transdutores de pressão sendo utilizados.



Figura 3 – Transmissores de pressão para medidas na entrada e saída da bomba

A potência elétrica é medida através de um transdutor de Watt instalado no painel de controle e a voltagem durante os testes são controladas pelo regulador de tensão, como mostra a figura 4.

As pressões de entrada e saída da bomba, a vazão e a potência elétrica consumida pelo motor, necessárias para a determinação das potências hidráulicas e rendimento do grupo moto-bomba são adquiridas através do software LabView.



Figura 4 – Quadro de comando e proteção

O circuito para ensaios de cavitação é do tipo pressurizado, no qual o NPSH disponível é variado até que o fenômeno ocorra, através da mudança pressão na entrada da bomba, nível ou temperatura (VIANA *et al.*, 2006). Os testes são realizados com altura e vazão constantes. A determinação do NPSH requerido pela bomba, ou coeficiente de cavitação admissível, ocorre quando a altura total de elevação cai 3%, (ISO, 1999), figura 5.



Figura 5 – Tanque fechado e bomba a vácuo para controle da pressão

No circuito de calibração dos medidores de vazão a água é succionada do reservatório subterrâneo e recalçada para a linha onde o medidor será calibrado. Quando a água, instantaneamente, alimenta o tanque de calibração, inicia-se a marcação do tempo de enchimento do mesmo, que continua até o nível atingir o partidor de vazão, que faz o retorno para o reservatório submerso. O tanque de calibração de 33 m<sup>3</sup> está apoiado sobre 6 células de carga para 10 toneladas cada, que registram o peso do tanque vazio e, posteriormente, cheio. Através do peso e massa específica da água, aceleração da gravidade e tempo de enchimento obtém-se a vazão volumétrica, a partir da qual o medidor é calibrado (VIANA *et al.*, 2006), mostrado na figura 6.

Para as equações dos ensaios de rendimento no laboratório utilizou-se a norma internacional (ISO-9966, 1999). A figura 7 mostra a entrada e saída da bomba para as medidas das pressões através de transdutores,  $p_1/\rho.g$  [m] e  $p_2/\rho.g$  [m]; cotas de posição  $z_1$  [m] e  $z_2$  [m]; diâmetros  $D_1$ [m] e  $D_2$ [m]; potência elétrica  $P_{el}$ [kW] através do transdutor de Watt. A vazão  $Q$  [m<sup>3</sup>/s] é medida no medidor eletromagnético. Com as medidas citadas é possível determinar a altura total de elevação  $H$  [m], as velocidades médias de escoamento  $v_1$ [m/s] e  $v_2$ [m/s], a potência hidráulica  $P_h$  [kW], o rendimento do grupo moto-bomba  $\eta_G$ , a potência  $P_e$  de eixo da bomba através dos resultados fornecidos pelo fabricante do motor e o rendimento total da bomba  $\eta_t$ . A massa específica  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] é determinada através da medida da temperatura da água através de um termômetro PT-100.

As equações de 1 a 7 retratam a determinação das variáveis em questão e através do software LabView são aquisitados os parâmetros.



Figura 6 – Tanque de calibração de vazão por pesagem, célula de carga e partidor de vazão

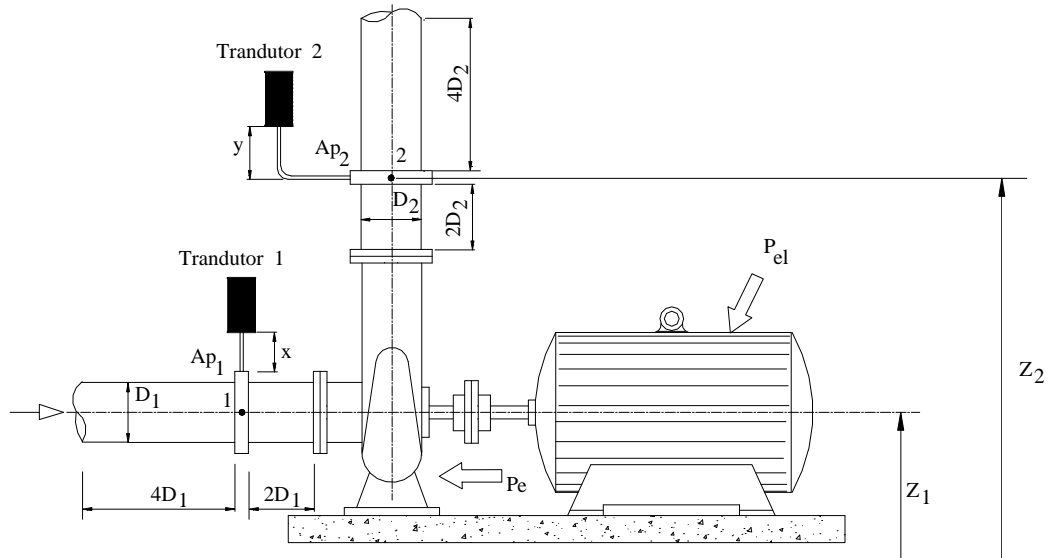


Figura 7 – Entrada e saída da bomba para medidas e determinação do rendimento do grupo moto-bomba

$$H = \left( \frac{p_2}{\rho \cdot g} - \frac{p_1}{\rho \cdot g} \right) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + z_2 - z_1 \quad (1)$$

$$v_1 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_1^2}; \quad v_2 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_2^2} \quad (2)$$

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

$$\rho = 1000,14 + 0,0094 \cdot t - 0,0053 \cdot t^2 \quad (4)$$

$$\eta_c = \frac{P_h}{P_{el}} \quad (5)$$

$$P_e = P_{el} \cdot \eta_{el} \quad (6)$$

$$\eta_t = \frac{P_h}{P_e} \quad (7)$$

## LABORATÓRIO MÓVEL DE HIDRÁULICA (LM)

O Laboratório Móvel foi concebido através de parceria entre a ELETROBRÁS e a Universidade Federal de Itajubá, com recursos do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), sendo uma importante ferramenta para o diagnóstico in situ dos mais variados tipos de sistemas hidráulicos/elétricos, no tocante à eficiência e uso racional de eletricidade e água, (Viana et al, 2006) .

A unidade consiste num furgão totalmente adaptado e equipado com os mais modernos instrumentos para ensaios e aquisição de parâmetros hidráulicos e elétricos em sistemas de saneamento (abastecimento de água e esgotamento sanitário), estações de bombeamento, indústrias, centrais hidrelétricas e instalações comerciais.

Conceitualmente, o Laboratório Móvel deve primar pela versatilidade, de forma que a unidade possa atuar nos mais variados arranjos e situações encontradas em sistemas hidráulicos de saneamento, industriais, rurais, prediais e hidrelétricos. Para tanto, o LM dispõe de uma série de equipamentos:

medidores de vazão (ultra-sônicos, molinetes, tubos de Pitot), medidores de pressão (transdutores, manômetros de coluna e Bourdon), medidores de grandezas elétricas, alicates wattímetros e amperímetros, tacômetros, termômetros, laptop, e equipamentos topográficos (estação total e DGPS). O veículo dispõe ainda de mini-oficina com ferramental, mesa para laptop, gerador elétrico e EPIs. A aquisição de dados é feita pelo sistema LabView. Em função de sua interface amigável e grande quantidade de recursos, o software pode ser configurado facilmente aos mais variados sistemas, garantindo rapidez e qualidade na aquisição de dados.

## RESULTADOS

No momento, o LEB/UNIFEI vem analisando, paralelamente às atividades previstas no cronograma anual de ensaios, os dados ensaiados de aproximadamente 600 conjuntos moto-bombas monoblocos. Esse estudo tem por objetivo definir as classes de eficiência energética típicas dos produtos nacionais, de forma a permitir a análise e visualização dos consumidores finais através da ENCE (no momento, a ENCE para bombas centrífugas informa, apenas, o consumo e os dados dos equipamentos, sem, porém, classifica-los). Conforme já foi mencionado, os produtos que obtiverem os melhores rendimentos serão contemplados com o Selo PROCEL. Tais medidas resultarão em uma ampliação dos resultados do subprograma Procel Selo, responsável, em 2007, por 94% dos resultados energéticos do Programa (ELETROBRÁS, 2008).

Quanto ao LM, estão em andamento dois projetos para avaliação de eficiência energética in situ: Projeto Conservação Hidroenergética (avaliação e geração de metodologias para efficientização hidroenergética na indústria, saneamento e setor de serviços) e o Programa Piloto de Conservação de Energia no Meio Rural, que pretende estender ao setor agroindustrial as práticas do PROCEL.

## CONCLUSÕES

O Laboratório de Etiquetagem de Bombas é uma ferramenta para avaliação de eficiência energética em conjunto moto-bombas, enquanto o Laboratório Móvel de Hidráulica com equipamentos e instrumentos modernos, aliados a uma equipe experiente visa identificar potenciais de conservação de energia em indústrias, companhias de saneamento básico, meio rural e prédios que se utilizam tais equipamentos.

Conforme comprova a avaliação anual dos Projetos do PROCEL (ELETROBRÁS, 2008) as medidas de efficientização advindas direta e indiretamente dos programas de capacitação laboratorial têm atingido excelentes resultados no âmbito da conservação energética em sistemas de bombeamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLIANCE TO SAVE ENERGY. **Água e energia**. Washington: ALLIANCE, 2002.
- CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. **Eficiência energética em sistemas de bombeamento**. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS, 2005.
- CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. **Resultados do PROCEL 2007**. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS, 2008.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9906**: Rotodynamic pumps-hydraulic performance acceptance tests - Grades 1 and 2. Geneva: ISO, 1999.
- VIANA, A. N. C.; BORTONI, E. C., CAMPINHO, C. B., Unidade Móvel de hidráulica para avaliação de eficiência em instalações de bombeamento. In: SEMINÁRIO IBEROAMERICANO SOBRE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO URBANO DE ÁGUA, 6., 2006, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: UFPB, 2006.
- VIANA, A. N. C. et al. **Conservação de energia**: eficiência energética de equipamentos e instalações. Itajubá: FUPAI, 2006.





---

## **24 Caso prático de eficiência energética em uma edificação pública: projeto, implementação e análise do resultado**

---

**Jamil Haddad<sup>1</sup>, Roberto Akira Yamachita<sup>1</sup>, Eduardo Crestana Guardia<sup>1</sup>  
Laura Porto<sup>2</sup>, Paulo Leonelli<sup>2</sup> e Paulo T. A. Cruz<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil

<sup>2</sup>Ministério de Minas e Energia, Brasília, Brasil

### **INTRODUÇÃO**

A vida hoje seria praticamente impossível sem o conforto e o bem-estar proporcionado pela energia elétrica. A sua produção necessita cada vez mais de investimentos em infra-estrutura para a construção de novas unidades geradoras e linhas de transmissão, pois no Brasil, o consumo de energia elétrica vem aumentando a cada ano. Isso acontece porque o Brasil precisa crescer, mas parte é caracterizada pelo desperdício de energia. No final dos anos 80, o impacto das emissões de poluentes, principalmente as oriundas da queima de combustíveis, na variação climática global, tornou-se uma preocupação mundial. Esta preocupação e alternativas de solução foram amplamente discutidas no encontro internacional realizado em 1992, na cidade do Rio de Janeiro; posteriormente, na cidade japonesa de Kyoto, firmou-se um acordo internacional, através do qual os países signatários estabeleceram metas de redução de emissões de CO<sub>2</sub>. Para se atingir estas metas sem comprometer o nível de produção industrial e o atual nível de conforto propiciado à sociedade pelo uso da energia, tornou-se imprescindível uma maior eficiência em toda a cadeia energética, isto é, desde a produção de energia até seu uso final, bem como uma maior participação de fontes renováveis de energia na matriz energética. Este artigo apresenta um projeto que buscou obter ganhos energéticos em um Mercado Municipal típico de Minas Gerais através da implementação de um diagnóstico energético, que resultou numa redução no consumo de energia elétrica. Este projeto foi realizado pelo Centro de Excelência em Eficiência Energética – EXCEN, da Universidade Federal de Itajubá – Unifei, com apoio da Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão de Itajubá – Fapepe e do Ministério de Minas e Energia - MME.

### **O MERCADO MUNICIPAL**

O Mercado Municipal foi inaugurado em 20 de Janeiro de 1953 e sua edificação arquitetônica é dotada de corpo central retangular. As áreas de circulação possuem vãos envidraçados que permitem o aproveitamento de luz natural em quase toda a área interna. Nas duas extremidades internas existem clarabóias, sendo que uma delas está coberta por telhas de amianto e a outra está aberta. A edificação ocupa uma quadra inteira da praça, tendo quatro acessos nas duas ruas principais, paralelas entre si. É um dos principais marcos urbanos do município, ponto de encontro das pessoas que ali realizam compras e param para conversar. O sistema elétrico da edificação encontrava-se fora das normas e padrões atuais de instalações elétricas de baixa tensão, o que apresentava um risco significativo de acidentes. No que diz respeito à integridade técnico-construtiva, o mercado apresenta problemas de infiltração que progressivamente podem comprometer os elementos estruturais.

### **DESCRIÇÃO DO PROJETO**

O projeto foi realizado durante o período de janeiro de 2007 a fevereiro de 2008 e contou com as seguintes etapas: Realização de um diagnóstico energético; Elaboração do projeto de modernização energética; Execução do projeto de modernização energética; Realização de medição e verificação dos

resultados do projeto de modernização. A seguir são apresentadas as atividades desenvolvidas em cada etapa descrita anteriormente.

## **Diagnóstico Energético**

O diagnóstico energético é uma metodologia aplicada em unidades comerciais e industriais, para o levantamento do perfil de consumo por uso final. Para isso é necessário a realização de um levantamento de dados em campo, que deverão ser analisados, permitindo a identificação qualitativa dos pontos críticos e a indicação das necessidades de atuação nos equipamentos específicos para a obtenção da otimização energética. As atividades de levantamento de dados em campo e medições do consumo de energia das instalações do Mercado Municipal foram realizadas em janeiro de 2007. Para a elaboração do diagnóstico energético foram realizadas as seguintes atividades: Levantamento das características das instalações elétricas e de iluminação existentes; Levantamento da demanda energética atual; Avaliação dos requisitos de luminosidade em função das atividades desenvolvidas nos estabelecimentos e da arquitetura da edificação; Realização de medição antes da implementação das medidas de eficiência energética; Levantamento sócio-econômico da comunidade, com determinação do consumo atual e previsão futura. Avaliação das instalações civis, com vistas à análise de possíveis adequações que possam tornar a edificação mais eficiente e a Avaliação da necessidade de revisão do contrato de suprimento de energia elétrica em função do levantamento da demanda energética atual.

## **Metodologia Adotada**

O desenvolvimento desse projeto seguiu uma metodologia que prima pelo levantamento in loco, com o objetivo de colher com máximo grau de confiabilidade os dados a serem processados. De uma forma resumida, a metodologia de trabalho abrange as seguintes etapas: Visita técnica para conhecimento geral do funcionamento das instalações; Levantamento do histórico das últimas 12 contas de energia elétrica das unidades consumidoras; Levantamento da documentação técnica e de dados referentes às instalações existentes (diagrama unifilar, planta baixa, especificações de equipamentos, etc.); Entrevistas com pessoal de operação e manutenção sobre aspectos operacionais e hábitos de uso dos equipamentos; Análise dos diversos dados históricos de consumo; Levantamento de todos os equipamentos instalados, bem como do seu ciclo de funcionamento (motores, bombas, sistemas de iluminação, de ar condicionado, de refrigeração e outros usos de energia significativos); Identificação de equipamentos prioritários para a execução de ações e medidas para aumento da eficiência energética, Identificação de pontos onde possam ser feitas modificações civis para aumento da eficiência; Execução de medições de grandezas elétricas; Medição do nível de iluminamento dos ambientes e a Medição da área ocupada pelos diversos ambientes.

## **Equipamentos Utilizados**

Para aplicação da metodologia descrita foram utilizados os seguintes equipamentos existentes no EXCEN:

- 5 Medidores de grandezas elétricas MUG ELO 631;
- 2 Analisadores de grandezas elétricas Embrassul
- 1 Analizador de grandezas elétricas SAGA 4000;
- 1 Multímetro digital alicate;
- 2 Luxímetros digitais;
- 1 Trena eletrônica;
- 1 Trena de fita de 10 m;
- 1 Máquina fotográfica digital;
- 2 Notebooks.

### Características Elétricas

Fazem parte da carga elétrica 50 unidades consumidoras distribuídas em boxes de comércio de carnes, legumes e verduras, pastelaria, bar e restaurante entre outros. Os boxes que apresentam consumo maior que 1000 kWh/mês são os açougues (Box 85, 52, 62, 63, 66 e 72) que têm câmaras frias e os mercados (Box 11 e 17). O gráfico a seguir ilustra o consumo médio mensal dos boxes.

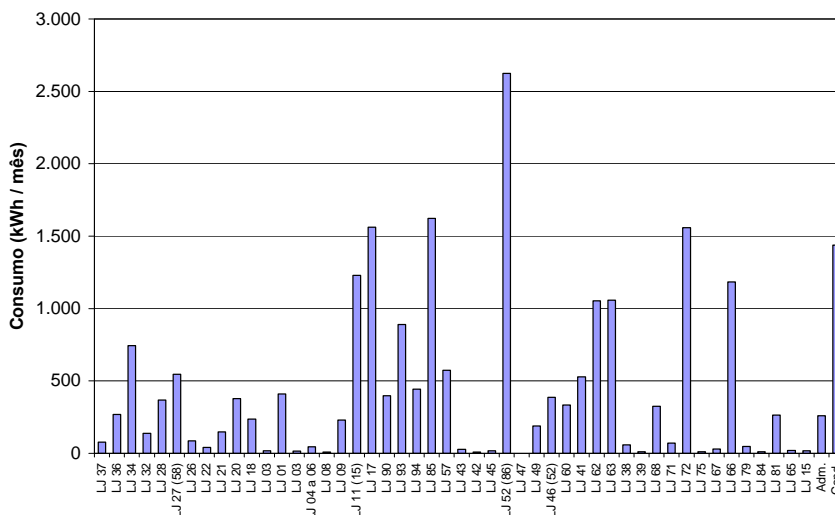


Figura 1 - Consumo médio mensal das unidades consumidoras

O fornecimento de energia ocorre através de 9 ramais alimentadores localizados em sua maioria próximos às portas de acesso, onde estão instalados os medidores. Os três ramais com um único consumidor estão localizados na parede desses boxes. O atual padrão de fornecimento de energia não permite o atendimento de edificações coletivas com mais de um ramal de alimentação. Desta forma, a modernização das instalações elétricas deverá atender a Norma de fornecimento de energia elétrica em tensão secundária da concessionária local. Os circuitos de alimentação dos boxes não estão dentro dos padrões. A fixação dos fios era inadequada e havia fios desencapados com emendas, com risco de choque elétrico e perdas por fuga. O consumo médio mensal do mercado no último ano foi de 22.000 kWh, o que corresponde a aproximadamente 43 kW de demanda média, o que será comprovado com as medições realizadas. O gráfico a seguir apresenta o consumo médio mensal.

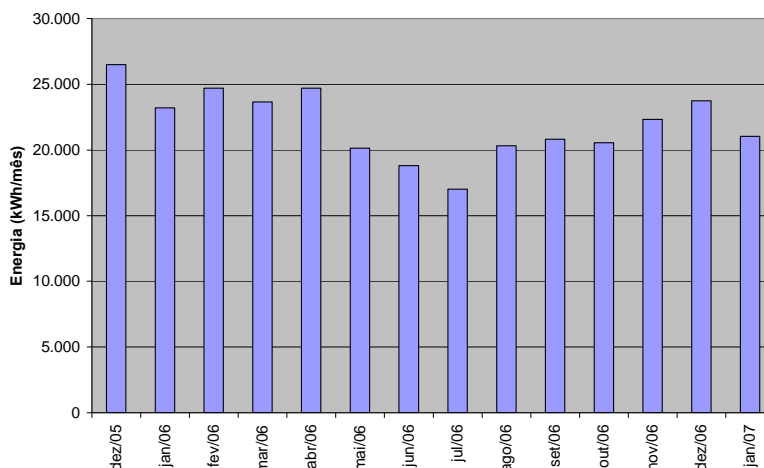


Figura 2 - Histórico de consumo

Aparentemente a sazonalidade no consumo anual apresenta uma redução no período de inverno, quando há, provavelmente, uma menor solicitação do sistema de refrigeração.

### Cargas Existentes

Após a realização do levantamento observa-se no gráfico abaixo, que a maior carga instalada é composta de motores elétricos com potência de até 1 cv, encontrada nos moedores, serras de fita etc. Em seguida o sistema de refrigeração das câmaras frias (compressores e evaporadores), balcões de resfriados, freezers e geladeiras são o segundo uso mais importante da energia. O sistema de iluminação responde por cerca de 13% da potência instalada. O aparelho de ar condicionado de janela e os ventiladores respondem por 3%, fornos de microondas e estufas somam mais 2%. Os outros equipamentos encontrados são TVs, rádios, balanças, ventiladores, etc.

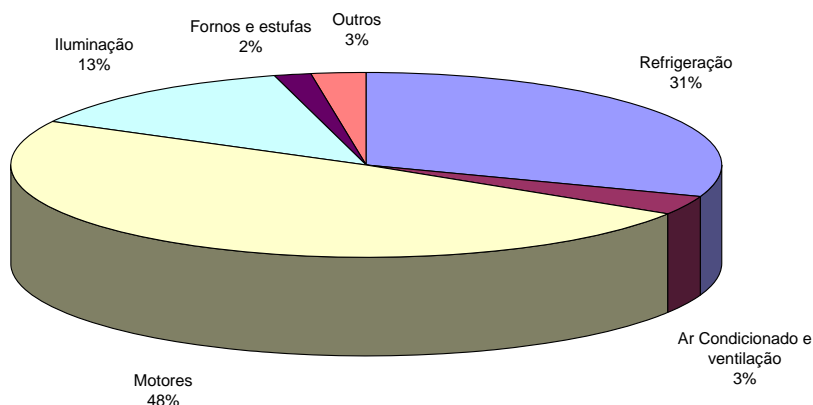


Figura 3 - Distribuição da potência instalada por uso final

### Medições antes das obras

Com o objetivo de conhecer o comportamento real do consumo de energia elétrica foram instalados medidores de grandezas elétricas nos ramais de entrega de energia para registrar as curvas de carga. As medições foram realizadas entre os dias 29 de janeiro e 1 de fevereiro de 2007, considerando o tempo de amostragem igual a 15 minutos. A curva de carga total apresenta demanda de 50 kW e fator de carga diário igual a 0,70.

Foram realizadas também, medições do nível de iluminância e as características que influenciam este valor, como por exemplo, a cor das paredes e do teto, a medição indicou que os valores, estão em geral, menores que os recomendados pela NBR5413.

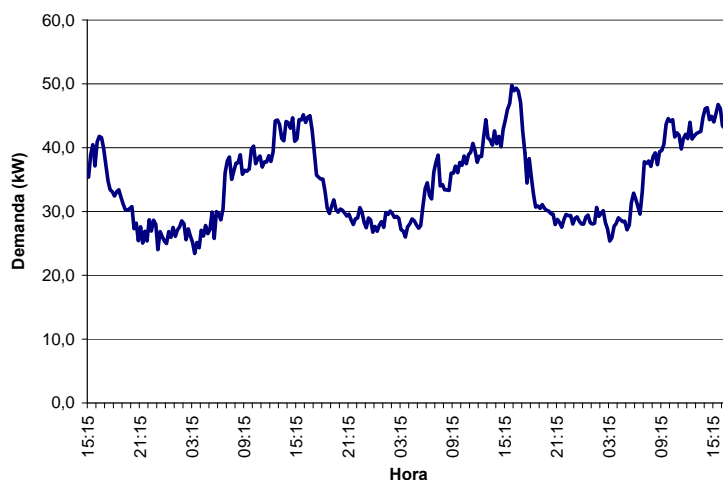


Figura 4 - Curva de carga antes das obras

## Projeto de Modernização Energética

Nesta etapa foram realizados os estudos e análise dos dados com o objetivo de proporcionar uma otimização energética das instalações. As atividades realizadas foram: dimensionamento das instalações elétricas para o suprimento das instalações existentes e a efficientização do sistema de iluminação interna.

### Sistema de iluminação

Este projeto analisou a substituição de lâmpadas com baixa e média eficiência na relação lúmens por Watt (lâmpada incandescente, mista e fluorescente tubular) por lâmpadas de alta eficiência luminosa (fluorescente compacta e fluorescente tubular de alto rendimento), visando obter uma redução no consumo mensal de energia elétrica da instalação. Para verificar a situação existente do sistema de iluminação foi realizado um levantamento das características das lâmpadas, reatores, luminárias; onde foram observados os seguintes tipos: Fluorescentes tubulares, fluorescentes compactas, mistas e incandescentes. Foram levantadas 277 lâmpadas de diversas potências que representa uma potência instalada de 14,19 kW, somando com as perdas dos reatores, representam uma potência instalada de 16,74 kW. A tabela e o gráfico a seguir apresentam as quantidades e potências de lâmpadas existentes.

Tabela 1 – Quantidade de luminárias / lâmpadas existentes por tipo e potência

Tipo	Quantidade	Potência Instalada [W]
Fluorescente Tubular 20 W	58	1.160
Fluorescente Tubular 40 W	145	5.800
Fluorescente Tubular 110 W	4	440
Mista 160 W	20	3.200
Fluorescente Compacta 15 W	3	45
Incandescente 60 W	29	1.740
Incandescente 100 W	18	1.800
Total	277	14.185

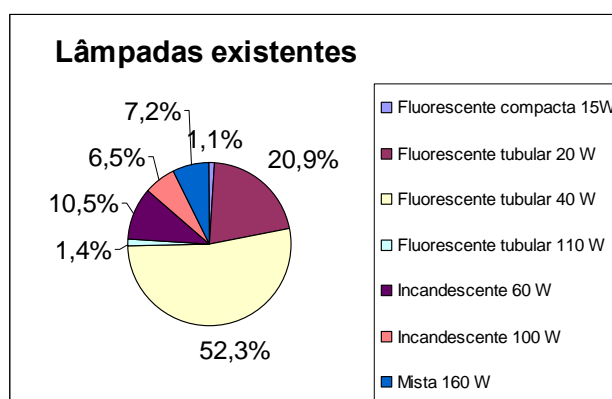


Figura 5 - Porcentagem de lâmpadas existentes por tipo e potência

As lâmpadas foram substituídas por fluorescentes tubulares com potências de 16 W e 32 W e fluorescentes compactas de 15 W, 23 W e 85 W. As luminárias também foram substituídas, pois estavam envelhecidas e o nível de iluminação medido apresentou valores, em alguns ambientes, abaixo dos limites mínimos recomendados pela Norma ABNT 5413 (Iluminância de Interiores). As luminárias a serem instaladas são do tipo refletoras espelhadas de alto rendimento. Os reatores eletromagnéticos das lâmpadas fluorescentes foram substituídos por eletrônicos de alto rendimento, baixa perda e baixo índice de distorção harmônico (THS).

## Execução do Projeto de Modernização Energética

As obras de modernização incluíram a unificação do Centro de Medição e Distribuição de energia elétrica para atender às normas da concessionária local, a substituição do sistema de iluminação de baixa eficiência por outras mais eficientes e a padronização dos quadros de distribuição dentro dos boxes, incluindo nova fiação e disjuntores que reduzirão os riscos de curto-circuito na instalação. O serviço de modernização foi realizado por meio de licitação pública, e a empresa vencedora iniciou as obras em outubro de 2007 e terminou em janeiro de 2008. As figuras a seguir apresentam os serviços realizados.



Figuras 6 e 7 - Quadros de distribuição e medição antigo e novo

## Medição e Verificação dos Resultados

Após a realização das obras foi instalado um medidor de grandezas elétricas no ramal de fornecimento unificado. As medições foram realizadas entre 12/02/2008 e 4/03/2008.

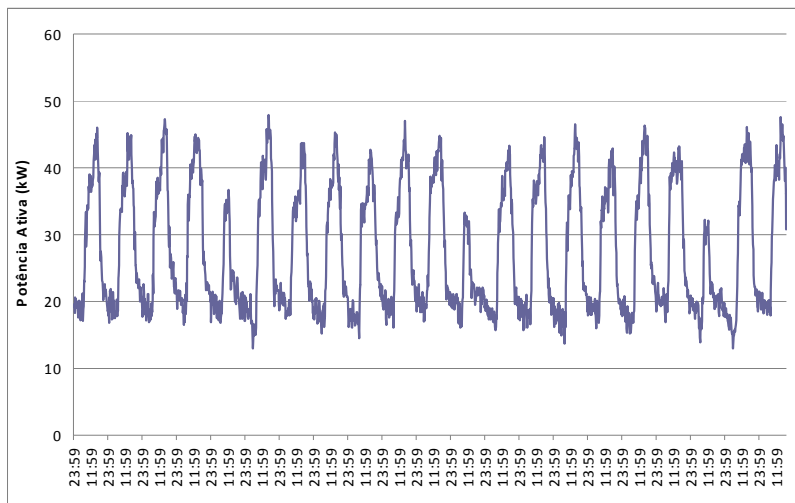


Figura 8 - Curva de carga após a realização das obras

Observa-se que após a implementação das obras de eficiência energética no Mercado Municipal o fator de carga diário diminuiu, isto significa que para aproximadamente a mesma potência máxima, os períodos com menor consumo tiveram redução mais significativa da demanda, ou seja, a demanda média ficou menor. Esta análise pode ser visualizada na curva de carga média comparativa dos dias da semana, excluindo os finais de semana.

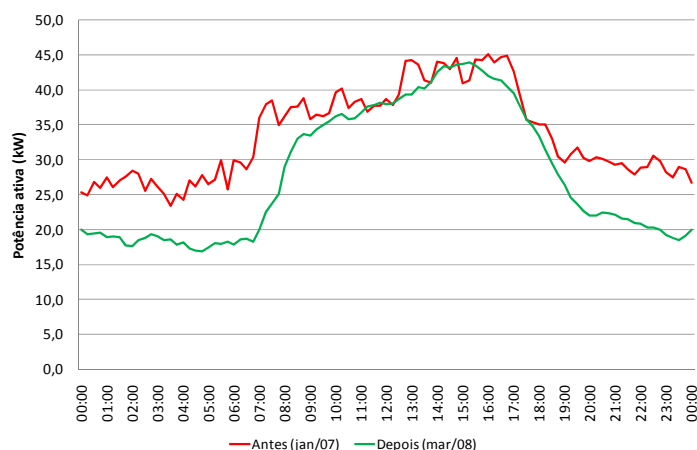


Figura 9 - Comparação das curvas de carga

Considerando o perfil de carga como típico comercial, pode-se dizer que há dois vales e um pico que ocorre antes do horário de ponta. Assim, houve redução de 5 kW nos períodos de menor consumo, incluindo o horário de ponta e não houve redução de demanda no período de maior consumo. A diferença de consumo de energia corresponde à economia de 137 kWh por dia, ou aproximadamente 17% do consumo.

Se aplicado este índice de economia percentual ao consumo anual de 243 MWh em 2007, pode-se estimar a economia de energia do projeto em 41,3 MWh/ano. Considerando a atual tarifa de energia da modalidade convencional B3 – comercial igual a 564,84 R\$/MWh, com 18% de ICMS, calcula-se uma economia de R\$23.300,00 por ano. A iluminância média verificada antes da realização das obras foi de 120 lux. Após a implementação do projeto de eficiência energética observa-se que os níveis de iluminância aumentaram para a média de 193 lux, proporcionando melhores condições para a realização das atividades no Mercado Municipal.

## CONCLUSÃO

Este projeto foi desenvolvido com o apoio do MME, sendo o primeiro projeto realizado após a inauguração do EXCEN, onde foi realizado um projeto de diagnóstico energético e com a sua implementação. Conforme as medições realizadas antes e após a execução das obras, verifica-se que ocorreu uma redução no consumo de energia e uma melhoria no nível de iluminância dos ambientes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 5413 – Iluminância de Interiores, Rio de Janeiro, 1992.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 5382 – Verificação de Iluminância de Interiores, Rio de Janeiro, 1985.
- GUARDIA, E. C.; HADDAD, J.; SANTOS, A. H. M.; e outros. Eficiência Energética: Teoria & Prática. MME, PROCEL/Eletróbrás, Fupai, Unifei, Itajubá, 2007.
- HADDAD, J.; GUARDIA, E. C.; SANTOS, A. H. M. e outros. Conservação de Energia: Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações. MME, PROCEL/Eletróbrás, Fupai, Unifei, Itajubá, 2006.
- \_\_\_\_\_ Catálogos de fabricantes de lâmpadas, luminárias e reatores.





---

## 25 Concepção e desenvolvimento do Projeto Piloto de Conservação de Energia no Meio Rural: estudo de caso nas Terras Altas da Mantiqueira

---

Mateus Ricardo Nogueira Vilanova<sup>1</sup>, Roberto de Mattos<sup>1</sup>, Augusto Nelson Carvalho Viana<sup>1</sup>, Emerson Salvador<sup>2</sup> e Moises Antônio Dos Santos<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil

<sup>2</sup>Centrais Elétricas Brasileiras S.A., Rio de Janeiro, Brasil

### INTRODUÇÃO

O Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), instituído em 30 de dezembro de 1985, destina-se a promover o uso eficiente da energia elétrica e combater o seu desperdício, sendo coordenado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), e executado pelas Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELETROBRAS), da qual também provém grande parte dos seus recursos. A figura 1 apresenta os resultados do PROCEL no ano de 2008:

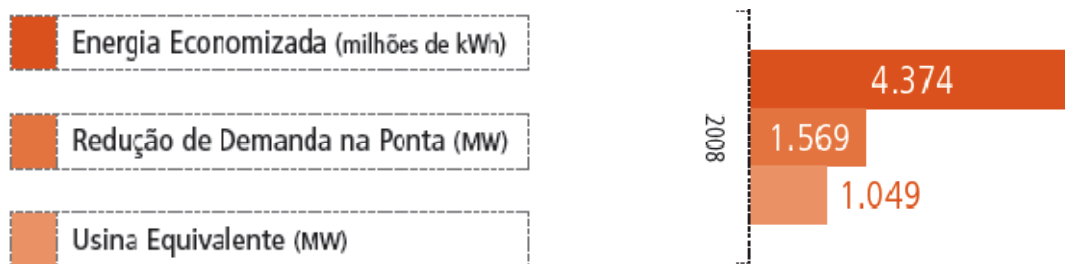


Figura 1 - Resultados do PROCEL no ano de 2008 (adaptado de ELETROBRÁS, 2009).

O PROCEL é composto por subprogramas voltados a segmentos específicos dos setores público e privado, dentre eles o PROCEL Edifica (eficiência energética em edificações), PROCEL EPP (eficiência energética em prédios públicos), PROCEL GEM (gestão energética municipal), PROCEL Indústria (eficiência energética em sistemas industriais), PROCEL RELUZ (iluminação pública e semafórica), PROCEL Sanear (eficiência energética no saneamento ambiental) e o PROCEL Selo, responsável pela concessão anual do Selo PROCEL premiação aos melhores produtos participantes do Programa Brasileiro de Etiquetagem).

O setor agropecuário foi responsável por 4,3% do consumo de energia elétrica no Brasil em 2008, correspondente a 18.397 GWh (EPE, 2009), o que o classifica como o quinto maior consumidor do país. Apesar da representatividade dos números apresentados, pouco se sabe sobre os hábitos de consumo e as formas de utilização de energia elétrica no meio rural, principalmente quando consideradas as diferentes atividades produtivas realizadas no setor, como pecuária, agricultura e avicultura, cada vez mais dependentes de maquinário e processos específicos. Esse contexto motivou o PROCEL a expandir seus esforços para o setor agropecuário, dando origem ao “Projeto Piloto de Conservação de Energia no Meio Rural: Estudo de caso nas Terras Altas da Mantiqueira”. O Projeto vem sendo desenvolvido através de convênio entre a ELETROBRAS/PROCEL e a Fundação ROGE, de Delfim Moreira-MG, através do seu Núcleo de Capacitação Técnica Integrada (NICATEC), contando com apoio do Grupo de Energia (GEN) da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Tem-se como objetivo diagnosticar as formas de uso da energia elétrica associadas à produção de gêneros agrícolas, em especial na pecuária leiteira,

agricultura irrigada e avicultura de postura, para posterior identificação das fontes de desperdício, o que permitirá elaborar materiais educativos contendo as boas práticas para conservação de energia elétrica no meio rural. O diagnóstico se divide em uma etapa quantitativa, onde uma amostra representativa das propriedades da área de estudo é avaliada através de vistoria e aplicação de um questionário de caracterização de uso de energia elétrica para posterior análise estatística de dados, e uma etapa qualitativa, onde um número reduzido de propriedades é submetido a auditorias energéticas, com medição e monitoramento detalhado de parâmetros energéticos dos sistemas.

## MATERIAL E MÉTODOS

As Terras Altas da Mantiqueira localizam-se no sul do Estado de Minas Gerais, na divisa com os Estados de SP e RJ, com uma população residente estimada em 74.304 (2009) habitantes em uma área aproximada de 2.047 km<sup>2</sup>, segundo o servidor Cidades do IBGE. Fazem parte das Terras Altas oito municípios, sendo eles: Delfim Moreira, Itamonte, Itanhandu, Marmelópolis, Passa Quatro, Pouso Alto, São Sebastião do Rio Verde e Virgínia.



Figura 2 - Mapa das Terras Altas da Mantiqueira (fonte: <http://www.explorevale.com.br>)

As Terras Altas da Mantiqueira foram escolhidas como área de estudo do projeto em função da grande presença de propriedades rurais e agroindústrias, sobretudo de avicultura de postura e pecuária leiteira, sendo que a atividade agropecuária representa cerca de 30% do PIB local (IBGE, 2010). Destaca-se nesse cenário a produção de ovos, sendo as Terras Altas consideradas o maior pólo de avicultura de postura do Brasil. Já a pecuária leiteira é realizada de forma menos intensiva, com produções variando de 10 a 3.400 litros/dia por propriedade, de acordo com os dados coletados até o momento. Apesar de o Censo Agropecuário do IBGE apresentar em suas tabelas a existência de propriedades onde ocorre agricultura irrigada, durante os trabalhos de campo do projeto, não foram identificadas/localizadas tais propriedades. Em entrevistas com proprietários e instituições do setor, foi confirmada, de forma verbal, a inexistência desse tipo de atividade nas Terras Altas.

## ENERGIA NA AGROPECUÁRIA

Considerando-se a produção de ovos, o consumo energético recai principalmente sobre a iluminação, devido à necessidade de exposição da poedeira à luz no comprimento de cor amarela (JORDAN; TAVARES, 2005). Um dos grandes problemas nessa aplicação é a utilização de lâmpadas incandescentes, com alto consumo energético e quase sempre em más condições de manutenção (presença de poeira e outros detritos, que reduzem sua eficiência luminosa). Jordan e Tavares (2005) constataram em seus experimentos que sistemas de iluminação para aviários equipados com lâmpadas vapor de sódio 70 W, dimensionados através de cálculos luminotécnicos, apresentaram um consumo de energia elétrica quatro vezes menor que o sistema de referência, equipado com lâmpadas incandescentes, reduzindo o consumo médio diário de um galpão típico de postura de 70 para 17 kWh.

A produção de ovos férteis exige a exposição das poedeiras a 17 horas diárias de iluminação com comprimentos de onda entre 664 a 740 nm, sendo geralmente utilizada uma iluminância na faixa de 40

luxes (BUYSE; SIMONS, 1996). Nesse regime, a iluminação complementar atinge o horário de ponta do sistema elétrico nacional. Segundo Jordan e Tavares (2009), chega-se a utilizar 1 lâmpada de 100 W para cada 10 m<sup>2</sup> de galpões, compondo sistemas de baixa intensidade luminosa, pequena durabilidade e pouca uniformidade, o que reflete diretamente no preço dos produtos. Os mesmos autores afirmam que a produção de um único ovo fértil consome 33,4 Wh em iluminação.

Cotta (2002) afirma que a substituição de lâmpadas incandescentes por outras de vapor de sódio traria uma economia de cerca de 70% de energia elétrica.

Freitas et al. (2005) apresenta vários programas de iluminação estudados por pesquisadores da área, e suas conseqüentes repercussões energéticas. Um dos programas é citado por Ernst et al. (1984), cuja aplicação consiste no fornecimento de apenas 15 minutos de luz artificial em galpões abertos, complementados por iluminação natural. Esse programa foi avaliado em aves com 36 semanas e, apesar de diminuir em 75% o consumo de energia elétrica e também o consumo de ração, gerou uma redução na 0,5 a 1% na produção de ovos.

Pesquisas como essa constataram que o uso da iluminação artificial em aves reprodutoras e de postura comercial é uma das mais poderosas ferramentas de manejo disponíveis para o produtor avícola (FREITAS et al., 2005). Dentre as possibilidades que esse artifício tecnológico provê ao produtor, Freitas et al. (2005) destaca, citando Etches (1996): antecipação ou retardo da postura, com possibilidade de manipulação de sua taxa e intervalos; alterações na qualidade da casca e tamanho do ovo; aumento da eficiência alimentar dos animais.

Os trabalhos de Freitas et al. (2005) ocorrerão em quatro períodos de 28 dias, em galpão aberto com dimensões de 16 x 8 m, avaliando 96 gaiolas com 3 poedeiras da linhagem Leghorn em cada uma. Foram produzidos três ambientes distintos, separados por plástico opaco, de forma a se obter o isolamento luminoso entre eles. O galpão foi iluminado por lâmpadas incandescentes de 40 W e a intensidade luminosa medida com luxímetro, com a finalidade de observar se a luminosidade de um ambiente estava influenciando os outros.

O experimento contou com 3 programas distintos de iluminação:

- Programa contínuo: iluminação contínua com fotoperíodo de 15 horas (iluminação artificial das 4:00 h até o amanhecer e das 18:00 h às 19:00 h, além da iluminação natural);
- Programa intermitente: fotoperíodo de 15 horas. A iluminação artificial foi fornecida na forma de *flashes* de 15 segundos de duração, aplicados às 4:00 h e 15 segundos antes das 19:00 h, utilizando-se o conceito de dia subjetivo proposto por Sauveur (1996);
- Programa luz natural: fornecimento exclusivo de iluminação natural.

A conclusão de Freitas et al. é que o fornecimento de programas de iluminação intermitente e natural mantiveram os níveis de desempenho das poedeiras. Essa informação é relevante em termos de busca por eficiência energética no setor avícola, uma vez que tais programas, sabidamente menos intensivos energeticamente, não comprometeram o desempenho da produção.

Representativa parcela do consumo de eletricidade no meio rural recai sobre a necessidade de utilização de um outro importante recurso, a água, através da agricultura irrigada. A área irrigada no Brasil corresponde à 5,89% da área plantada, quando considerados os 62 principais cultivos temporários e permanentes, representando 16% da produção (MMA, 2006). O país detém ainda um potencial superior a 13% da capacidade mundial de incorporação de novas áreas à agricultura irrigada (MMA, 2006). O projeto otimizado de um sistema de irrigação, visando à conservação de água e energia elétrica, apresenta-se como um objetivo complexo, que envolve não somente um correto dimensionamento e especificação das instalações, mas também um estudo das necessidades da cultura, das características hidrometeorológicas locais e de uma análise de custos envolvidos. No tocante aos equipamentos empregados na irrigação, atenção especial deve ser dada às bombas hidráulicas. Bombas são máquinas geradoras, ou sejam, convertem energia mecânica fornecida por um motor, transformando-a em energia cinética e posteriormente em energia de pressão, devido à ação do rotor. Apresentam vários tipos e configurações, em função dos seus aspectos construtivos e aplicações. O desperdício energético a partir de bombas hidráulicas ocorre de várias maneiras, seja pela especificação incorreta, operação fora de condições nominais ou falta de manutenção adequada (VIANA e RICARDO, 2007).

Várias são as situações que levam produtores a optar pela instalação de um sistema de irrigação: a indisponibilidade hídrica do local, que torna o sistema indispensável, a valorização econômica dos produtos em períodos de entressafra, além da melhoria da qualidade destes, uma vez que a água é tida como fator limitante no desenvolvimento vegetal. Estudos desenvolvidos pela Agência Nacional de Águas (ANA) (CONEJO, 2005), revelam que 40% da vazão de retirada no país é destinada à irrigação. Já em termos efetivos, “[...] a irrigação é responsável por quase 70% da água consumida no país” (CONEJO, 2005).

A energia elétrica consumida na produção de leite pode ser atribuída, principalmente, às seguintes atividades: produção da alimentação dos animais, ordenha, aquecimento de água, resfriamento e armazenamento de leite. Segundo Stout (2004, apud BALDASSIN JUNIOR, 2006, o consumo médio de energia, no setor produtivo de leite, por animal em lactação nos Estados Unidos é de cerca de 550 kWh/animal, sendo sua distribuição apresentada na Tabela 1:

Tabela 1 - Percentual de consumo de energia elétrica por animal em lactação nos EUA

<b>USO DA ENERGIA</b>	<b>CONSUMO PERCENTUAL</b>
Aquecimento de água	16%
Refrigeração do leite	12%
Ordenhadeira	10%
Iluminação	3%
Ventilação e Aquecimento adicional	4%
Processamento de Alimento e Distribuição	8%
Remoção de resíduos (Limpeza)	26%
Transporte e afins	21%

Fonte: Stout, 2004

Pereira (2002) apresenta em seu trabalho o consumo médio de equipamentos voltados ao preparo do trato dos animais:

Tabela 2 - Consumo médio de equipamentos utilizados na pecuária leiteira

<b>EQUIPAMENTOS ELETORURIAIS</b>	<b>POTÊNCIA (KW)</b>	<b>PRODUTO</b>	<b>HORAS (MÊS)</b>	<b>CONSUMO (KWH/MÊS)</b>
DPM	3,68	Milho(espiga)	90	331,2
Desintegrador	3,68	Milho (grão)	26	95,7
Picadora Forragem	2,21	Capim/cana	60	132,5
Ensiladora	7,36	Capim/cana	60	441,6
Misturador de ração	3,68	Ração	60	220,8

Fonte: Pereira, 2002

Existe uma grande variação da faixa de operação de maquinário rural, ficando ao critério do usuário escolher a rotação e a potência do motor a ser acoplado. Pereira (2002) demonstra em seu trabalho que a potência dos motores de picadoras de capim oferecida por vendedores de máquinas agrícolas geralmente é de 25% a 300% superior à requerida, demonstrando o índice de desperdício desse setor.

## **ETAPAS METODOLÓGICAS**

Descrevem-se a seguir as principais etapas a serem desenvolvidas no projeto.

Planejamento dos Estudos: foi necessário inicialmente definir, identificar e localizar as propriedades agropecuárias das Terras Altas da Mantiqueira, para posterior realização de trabalhos de campo. Tentou-se, num primeiro momento, a obtenção de dados cadastrais junto a instituições ligadas ao meio rural, como IMA e EMATER. Essa tentativa não obteve sucesso, em função da não colaboração das instituições. Partiu-se então para uma análise do Censo Agropecuário do IBGE, que permitiu a determinação do Universo de propriedades existentes a serem avaliadas em cada município. Foram identificadas 1.109 aviculturas e 1.903 pecuárias. Considerando que serão avaliados no trabalho valores

médios de consumo, demanda, fator de carga e principais problemas/fontes de desperdícios de energia, é importante considerar estimativas com nível de confiança de 5% e erros amostrais de mesma ordem. Como os desvios-padrão esperados para os parâmetros são distintos e não conhecidos, devem-se estimar amostras de tamanho superior a 30 para que o estudo das mesmas seja baseado no uso de uma distribuição normal. Desta forma, utilizou-se como amostra 5% da população total, isto é, de 59 granjas e 99 pecuárias, distribuídas nos estratos considerados. A seleção de cada propriedade da amostra deveria ser aleatória, de forma a gerar resultados não tendenciosos na análise estatística. Tais propriedades foram obtidas com ajuda de imagens de satélite, que após georreferenciadas e transferidas para GPS de navegação, permitiu a realização da primeira etapa dos trabalhos de campo.

Elaboração do “Questionário de caracterização do uso e consumo de energia elétrica no meio rural”: o questionário foi desenvolvido para coleta de dados nas propriedades selecionadas, visando agregar o maior número de informações relevantes sobre o uso e desperdício de energia no meio rural. O questionário se originou da revisão bibliográfica realizada, onde foram considerados inúmeros métodos de auditoria e diagnóstico energético. Após algumas campanhas teste, e reuniões da equipe do projeto com a ELETROBRÁS, chegou-se a versão aperfeiçoada do mesmo, que engloba, dentre outros, os seguintes parâmetros: identificação e localização da propriedade, características da produção (quantidade de animais, área cultivada, produtividade diárias e específica, etc), fornecimento de energia (classe tarifária, tensão de alimentação, cargas instaladas, consumos de energia dos últimos 12 meses, problemas no fornecimento), posse de equipamentos residenciais, posse de equipamentos agrícolas (conjuntos moto-bomba, picadeiras, tanques de expansão, DPMs, ordenhadeiras, etc), iluminação, condições de uso e manutenção de equipamentos, e questionário sobre percepção do proprietário rural sobre eficiência energética.

Primeira campanha de campo: a primeira campanha de campo teve por objetivo a coleta de dados amostrais, através da aplicação do questionário de caracterização nas propriedades anteriormente visitadas. Além disso, foram realizadas auditorias energéticas preliminares, com documentação fotográfica das condições de uso e fontes de desperdício, medição de galpões para análise de iluminação e avaliação de condições de instalação. Foram analisadas até o momento 65 propriedades, e os dados estão sendo analisados por meio de métodos estatísticos.



Figura 3 - Primeira etapa dos trabalhos de campo



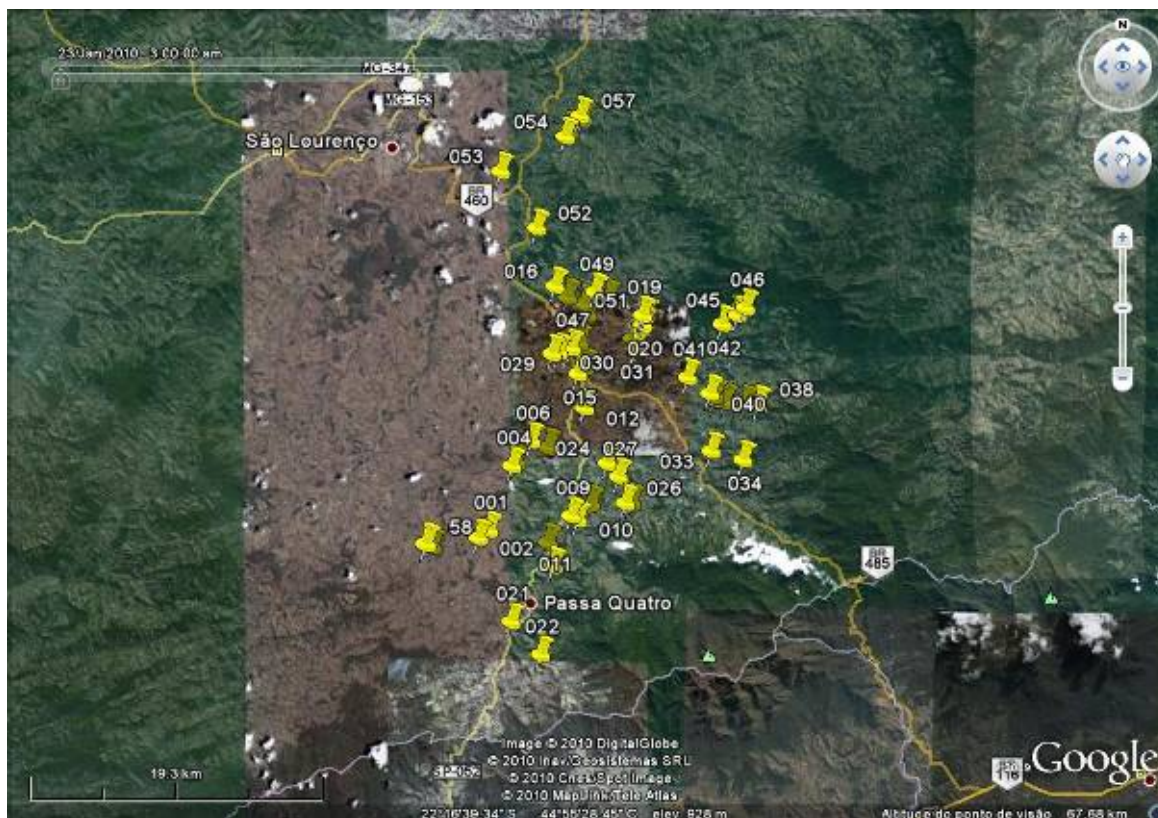


Figura 4 - Mapeamento das propriedades já visitadas

Auditorias energéticas detalhadas: após concluída a etapa 1 dos trabalhos de campo, com aplicação dos questionários em toda a amostra, serão selecionadas propriedades representativas da região para a realização de auditorias energéticas detalhadas. Tais auditorias contemplarão a medição, monitoramento e cálculo de parâmetros energéticos (demanda, consumo, fator de carga, vazões, temperaturas, etc) que permitirão definir uma curva de carga típica mais apurada para cada uma das atividades consideradas, além de uma quantificação das economias energéticas possíveis em cada sistema, a partir da implantação de medidas de eficiência energética.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação da metodologia apresentada permitirá caracterizar de forma consistente os padrões de uso, consumo e desperdício da energia elétrica no meio rural, considerando a área de estudo. Os resultados dessa caracterização permitirão identificar as principais fontes de desperdício de energia no meio rural e, principalmente, propor soluções, sendo este o foco do PROCEL.

Em termos qualitativos, o projeto resultará na elaboração de material didático contendo as boas práticas de conservação e eficiência energética no meio rural. Essa etapa é um tanto quanto peculiar, uma vez que as cartilhas e livretos criados deverão ser redigidos em linguagem simples, voltada para aplicações práticas, de forma que os conhecimentos a serem disseminados atinjam os produtores rurais, independente do seu nível de instrução.

Os resultados serão difundidos também através de um seminário, para o qual serão convidados pesquisadores com grande expressão na área de energia no meio rural, além de apresentações em associações rurais e outros órgãos de classe do setor agropecuário, nas cidades avaliadas pelo projeto.

## CONCLUSÕES

O Projeto Piloto de Conservação de Energia no Meio Rural: Estudo de caso nas Terras Altas da Mantiqueira é uma iniciativa pioneira da ELTROBRAS/PROCEL, juntamente à Fundação ROGE e

Grupo de Energia da Universidade Federal de Itajubá. Os resultados do projeto irão subsidiar o desenvolvimento de ações de eficiência energética e conservação de energia, sejam elas públicas ou privadas, no setor agropecuário, um dos mais importantes da economia brasileira. Vislumbra-se que tais ações trarão benefícios não somente para o sistema elétrico nacional como um todo, mas, principalmente, para os produtores rurais, independente do porte, que poderão aumentar a competitividade de seus produtos através da redução das despesas com energia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALDASSIN JÚNIOR, R. **Uso racional de energia em fazendas leiteiras com bombas de calor**. 2006. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas, 2006.
- BUYSE, J.; SIMONS, P.C.M. Effect of intermittent lighting, light intensity and source on the performance and welfare of broilers. **World's Poultry Science Journal**, Washington, v.52, p.121-130, 1996.
- CENTRAIS ELÉTRICA BRASILEIRAS S.A./PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resultados do PROCEL 2008**. Rio de Janeiro: ELETROBRAS/PROCEL, 2009.
- CONEJO, J. G. L.; **Disponibilidade e demandas de Recursos Hídricos no Brasil**. Brasília: ANA/MMA, 2005.
- COTTA, J. T. B. **Galinha: produção de ovos**. Viçosa: Aprenda Fácil, 2002. 260 p.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2009**: Ano base 2008. Rio de Janeiro : EPE, 2009.
- ERNST, R. A.; MILLAM, J. R.; MATTHER, F. B. Review of life-history lighting program for commercial laying fowls. **World's Poultry Science Journal**, Ithaca, v. 43, n. 1, p. 44-55, fev. 1984.
- ETCHES, R. J. **Reproducción aviar**. Zaragoza: Acribia, 1996. 339 p.
- FREITAS, H. J.; COTTA, J. T. B.; OLIVEIRA, A. I. G. Avaliação de programas de iluminação sobre o desempenho zootécnico de poedeiras leves. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 29, n. 2, p. 424-428, mar. 2005.
- IBGE Cidades@. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010. Apresenta informações estatísticas e econômicas das cidades brasileiras. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em: 24 abr. 2010.
- JORDAN, R. A.; TAVARES, M. H. F. Análise de diferentes sistemas de iluminação para aviários de produção de ovos férteis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n.3, p.420-423, 2005.
- JORDAN, R. A.; TAVARES, M. H. F. Desenvolvimento de um sistema de iluminação eficiente para aviários de produção de ovos férteis. **AviSite**, Campinas, Seção Ciência e Tecnologia – Trabalhos e Artigos. Disponível em: < <http://www.avisite.com.br/cet/trabalhos.asp?codigo=39>>. Acesso em: 19 ago. 2009.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Caderno setorial de recursos hídricos: agropecuária**. Brasília: MMA, 2006.
- PEREIRA, S. et al. Eficiência energética em equipamentos eletrorurais. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. **Anais...** Campinas: NIPE, 2002.
- VIANA, A. N. C., RICARDO, M.; Utilização de bombas com rotação variável para a conservação de energia em sistemas de irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 36., 2007, Bonito. **Anais...** Bonito: SBEA, 2007.





---

## 26 Ensaios em instalações de bombeamento *in situ* através de um Laboratório Móvel

---

Augusto Nelson Carvalho Viana e Mateus Ricardo Nogueira Vilanova  
Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil

### INTRODUÇÃO

Não obstante o grande parque instalado de moto-bombas no Brasil, é com grande frequência são encontrados sistemas mal dimensionados, mal instalados, mal operados e com manutenção ineficiente, acarretando baixos rendimentos, perda de vida útil, aumento de custos de operação e manutenção e, principalmente, um consumo de energia muito além do que se observaria em condições adequadas.

Neste sentido, apresenta-se neste trabalho uma unidade móvel com equipamentos portáteis para avaliação e ensaios de conjuntos moto-bombas *in-situ*. Este sistema permite avaliar e identificar potenciais de economia de energia na indústria, nas companhias de saneamento básico, no meio rural e em prédios, no que se refere às instalações de bombeamento, acionadas por motores elétricos, fornecendo subsídios para análises mais acuradas de viabilidade de substituição ou de modernização das tecnologias empregadas nestes sistemas, visando conservar energia.

O objetivo do trabalho é apresentar o Laboratório Móvel de Hidráulica (LM), adaptado a partir de um furgão, dotado de instrumentação portátil para medidas hidráulicas e elétricas de alta precisão, fornecendo incertezas compatíveis com esse tipo de ensaio.

### O LABORATÓRIO MÓVEL

#### A Adaptação

Baseado no trabalho de Viana, Bortoni e Campinho (2006), o veículo para o transporte dos equipamentos e da instrumentação é um furgão, com espaço para uma mini-oficina equipada para solução de problemas em campo, um pequeno gerador, armários adaptados que alojam ferramentas, materiais de consumo, equipamentos de medidas como transdutores de pressão, manômetros de Bourdon, medidores de vazão, registradores de grandezas elétricas, computadores e um sistema de aquisição de dados.

As adaptações no veículo contemplaram: banco para três passageiros, atrás da cabine do motorista, com todos os requisitos de segurança exigidos à legalização do veículo junto ao DETRAN; caixa de distribuição do ar condicionado, incluindo tubos, válvulas e acessórios; divisória atrás do banco instalado; janela de vidro na porta lateral; revestimento térmico lavável em MDF; piso de compensado naval de 15 mm, revestido com lamina de PVC de 2 mm; bancada com tampo de madeira revestida com material resistente, área de 1,2 m x 0,6 m x 0,7 m; luminária com duas lâmpadas fluorescentes tubulares de 15 W e dimensões reduzidas; remoção da divisória original atrás da cabine.

A unidade móvel está equipada com instrumentação para medidas hidráulicas, como manômetros, transdutores de pressão, tubos de Pitot e ultra-som para medidas de vazão; medidas elétricas, como Wattímetro, amperímetro e voltímetro; sensor de temperatura e sensor de rotação; módulos de aquisição de dados para notebooks e sistemas portáteis de condicionamento de sinais. Todos esses instrumentos e equipamentos são acondicionados em malas de proteção para resistências a impactos.

Além disso, estão disponíveis instrumentos topográficos – estação total e DGPS, câmera fotográfica e filmadora digitais e GPS de navegação. Todas EPIs são acondicionadas nos armários abaixo da bancada da mini-oficina. Um toldo lateral, iluminação externa, bem como tomadas externas para alimentação de energia estão instalados na unidade móvel, permitindo seu uso sob condições diversas. A figura 1 mostra o exterior do furgão adaptado.



Figura 1 – Exterior do furgão adaptado



Figura 2 – Interior do veículo

A figura 3 ilustra o interior do compartimento para alojamento dos equipamentos, da instrumentação, do ferramental, dos EPIs e do sistema de aquisição de dados. Este compartimento está munido de mesa, cadeira, iluminação interna, tomadas, ar condicionado, mini-oficina, gerador de 1000 W a gasolina, prateleiras e as caixas que alojam os instrumentos.

Na figura 4 estão ilustradas as prateleiras com seus engates rápidos para fixação das caixas que alojam os instrumentos. Ainda na figura 4 tem-se o balcão da mini-oficina com as tomadas de alimentação

127(V) e 220(V), as gavetas e o armário que alojam as ferramentas, acessórios e os EPIs. Na parte inferior direita fica alojado o gerador a gasolina.



Figura 3 – Mesa de trabalho e compartimentos para transporte de equipamentos



Figura 4 – Interior do compartimento dos equipamentos e da instrumentação

## A Instrumentação

### Medidas de pressão

As medidas de pressão nos ensaios de grupos moto-bombas são necessárias para a determinação da altura total de elevação e conseqüentemente da sua potência hidráulica. Além disso são necessárias, dependendo do tipo de medidor de vazão, medições da diferença de pressão no escoamento na tubulação de recalque.

O Laboratório Móvel está munido de medidores analógicos de pressão do tipo Bourdon ou de mola, transdutores de pressão pontuais e diferenciais, medidores de colunas de líquido como manômetros em U (de duas colunas).

A vantagem do transdutor de pressão é sua facilidade para a aquisição dos dados em função do mesmo, normalmente, trabalhar com sinal de corrente de 4 mA a 20 mA, tendo como desvantagem o custo e a necessidade de associação de sistemas de aquisição de dados.

A calibração de pressão dos medidores é realizada por modernos calibradores, no Laboratório de Etiquetagem de Bombas da UNIFEI.

### Medidas de vazão

O Laboratório Móvel está preparado para medir vazão em tubulações e canais, dependendo do arranjo da instalação de bombeamento.

O primeiro método para tubulações, bastante conhecido, é o tubo de Pitot. As formas mais tradicionais de medida de velocidades através do tubo de Pitot são as de tomada de pressão simples e as duplas (DELMÉE, 1983). O LM possui vários medidores Pitot-Cole, com diversos comprimentos.

A figura 5 ilustra um tubo de Pitot-Cole, mostrando os detalhes das tomadas de pressão estática e total. O medidor é recomendado para tubulações de até 3,0 m de diâmetro, sendo que aqueles acima de 1,5 m devem possuir estrutura reforçada, uma vez que a inserção na tubulação produz forças na direção do escoamento, que poderão fletir a haste da sonda.

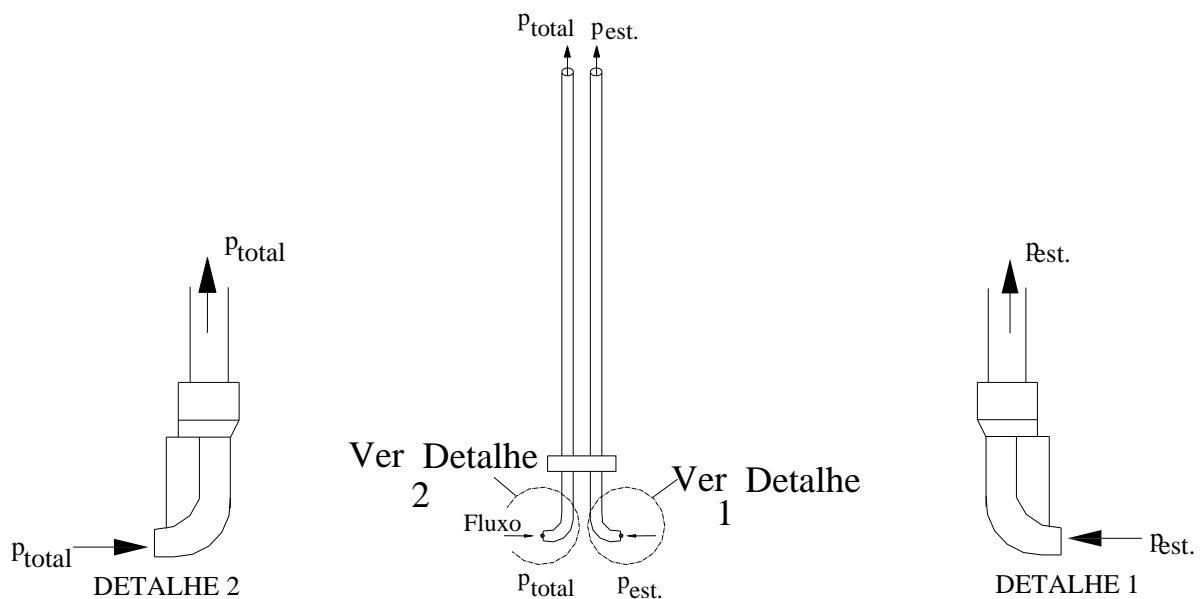


Figura 5 – Pitot-Cole e os detalhes das pressões estática e dinâmica

A velocidade de escoamento do líquido em m/s para esse tipo de medidor é determinada pela equação 1, onde  $g$  [m/s<sup>2</sup>] e  $\Delta h$  [mca].

$$v = k_p \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} \quad (1)$$

O coeficiente adimensional de correção  $k_p$  dos tubos de Pitot-Cole são obtidos em laboratório através de sua calibração.

Para a medição da pressão diferencial  $\Delta h$  pode-se utilizar manômetros de colunas em U com líquido manométrico mercúrio ou água. No caso do líquido manométrico ser água e o líquido em escoamento ser também água o manômetro de colunas deverá ser instalado invertido. Para aquisição da pressão diferencial utilizar-se-á um transdutor de pressão.

As medidas das velocidades de escoamento são realizadas no diâmetro interno da tubulação, em posições padronizadas, apresentadas por Viana, Bortoni e Campinho (2006), gerando um perfil de velocidades.

A vazão de escoamento da água é determinada pela equação 2 para cada raio  $R$ .

$$Q = \int_A v \cdot dA = \pi \cdot \int_0^R v \cdot r \cdot dr \quad (2)$$

A equação 2 é resolvida pela integração gráfica utilizando softwares conhecidos, como está apresentado no trabalho de Viana, Bortoni e Campinho (2006).

Para a introdução e fixação do Pitot-Cole no conduto o Laboratório Móvel possui uma ferramenta que é uma máquina mecânica de furar, rosquear e instalar o *tap* (peça que fixa o Pitot). Essa máquina permite que todo o trabalho possa ser realizado em marcha, ou seja, sem necessidade de parar a instalação.

O segundo método de medida de vazão em tubulações disponível no LM é o ultra-sônico. É uma medição de vazão eficaz, de simples instalação e de rápida resposta. Além disso, é adequada para a maioria dos casos onde existam trechos retos de tubulação, apresentando uma incerteza razoável, apesar de não constar nas normas de ensaios de bombas. A sua utilização está prevista, desde que as partes interessadas, em comum acordo, a aceitem (IEC, 2001).

O Laboratório Móvel possui dois medidores de vazão do tipo ultra-som por tempo de trânsito, com sensores não intrusivos. Esse tipo de medidor se baseia na medição dos tempos de ondas acústicas emitidas simultaneamente no sentido do escoamento e contra o mesmo (SOUZA; BORTONI, 2006). A figura 6 ilustra o medidor de vazão por tempo de trânsito com sensores não intrusivos, realizando medidas em uma tubulação de uma estação de recalque de água tratada, com diâmetro 0,550 m.

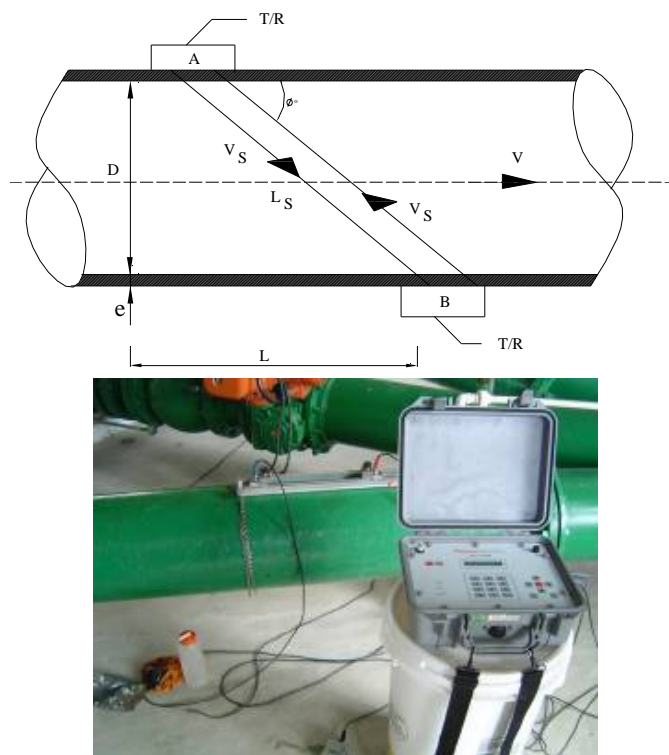


Figura 6 – Medidor de vazão ultra-som tempo de trânsito

O medidor exibe a taxa de fluxo e o volume totalizado é apresentado em vários sistemas de unidades. Além disso, pode ser configurado no modo remoto e monitorado por meio de uma interface RS232, usando-se o utilitário de interface Polylink. Eles ainda, como alternativa, podem ser configurados e os sinais analisados em ambiente Microsoft Windows.

Das duas medidas em condutos apresentadas anteriormente, a determinação da vazão, utilizando um Pitot-Cole, se comparado com o ultra-som, torna-se mais trabalhosa em função de sua instalação e dos cálculos necessários. O Pitot-Cole apresenta a vantagem de realizar sua instalação em posições próximas às curvas e válvulas, enquanto o ultra-som isto não é permitido.

Apesar da praticidade mostrada no medidor ultra-som, em relação ao Pitot-Cole, tem-se a desvantagem de apresentar um alto custo de aquisição.

Algumas instalações de bombeamento possuem arranjos com canais. Um dos medidores mais utilizados na prática de medição de canais e rios é o molinete hidrométrico. A medição com molinete

hidrométrico consiste em determinar a área da seção e a velocidade média do fluxo que passa nesta seção. A área é determinada por meio da medição da largura do canal e da profundidade em um número significativo de pontos ao longo da seção, chamados de verticais, nas quais também é realizada a medição da velocidade com molinete hidrométrico, que irá originar a velocidade média na vertical. O Laboratório Móvel possui dois molinetes hidrométricos de eixo horizontal, sendo um deles para canais maiores e o outro para canais menores.

A equação 4 representa a determinação da velocidade de escoamento pontual utilizando o molinete.

$$v = a.n + b \tag{4}$$

Na equação anterior,  $v$  é a velocidade de escoamento da água em m/s;  $n$  é o número de voltas da hélice pelo tempo entre dois sinais da campainha ou entre dois pulsos, em rps;  $a$  e  $b$  são constantes do molinete obtidas pela calibração do mesmo.

A figura 7 apresenta a batimetria para o levantamento da seção de um canal utilizando mostrando as posições de medidas em relação aos eixos ( $x$ ,  $y$ ) e os perfis de velocidades determinados com o molinete para cada posição vertical.

Por definição, a vazão de escoamento da água no canal é dada pela equação 5.

$$Q = \int_A v.dA = \int_0^x \int_0^y v.dy dx \tag{5}$$

A primeira integral da equação 5 pode ser resolvida pela determinação da área sob a curva dos perfis de velocidades, conforme figura 7. A segunda integral é resolvida através do gráfico  $x$  [m] versus área dos perfis [ $m^2/s$ ], com a determinação da área sob a curva, que representa a vazão do canal em [ $m^3/s$ ], como mostra a figura 8.

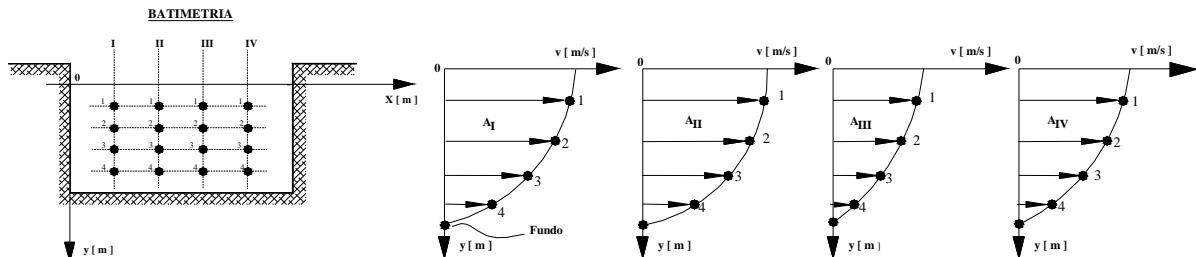


Figura 7 – Batimetria e perfis de velocidade das verticais de medição

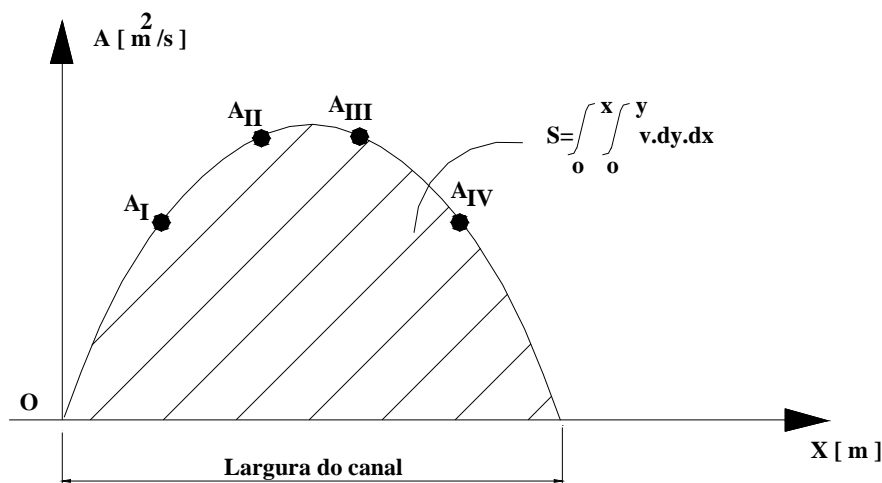


Figura 8 – Integração das vazões unitárias na largura da seção



O método de medição da vazão pelo molinete é bastante eficaz, porém trabalhoso, exigindo também trabalho de escritório.

O LM possui também um perfilador acústico Doppler de corrente para medição de vazão em canais, denominado Qliner. O equipamento mede simultaneamente a profundidade (batimetria) e velocidades do escoamento nas verticais, apresentando, de forma automática, a vazão total da seção.

O equipamento é bastante prático, com dimensões de 95 x 45 x 22,5 cm, peso 11 quilos, em fibra. O sensor é denominado “Nortek Aquadopp” de 2 MHz, com 4 feixes, sensores, sendo 3 para medição de vazão e um quarto para profundidades (ecobatímetro). A figura 9 apresenta a sua estrutura de fibra e no detalhe os sensores. O Qliner utiliza metodologia seção-por-seção, semelhante àquela empregada com molinetes, ou seja, o equipamento é estacionado nas verticais de medição, como mostra a figura 10. A vantagem desse tipo de medidor é determinar a vazão em cada vertical, que é transmitida em um sistema próprio de aquisição munido de um display. Esse sistema é sem fio e recebe a transmissão através de rádio com baterias. O rádio possui alcance de 70 metros.



Figura 9 – Perfilador acústico Doppler de corrente Qliner

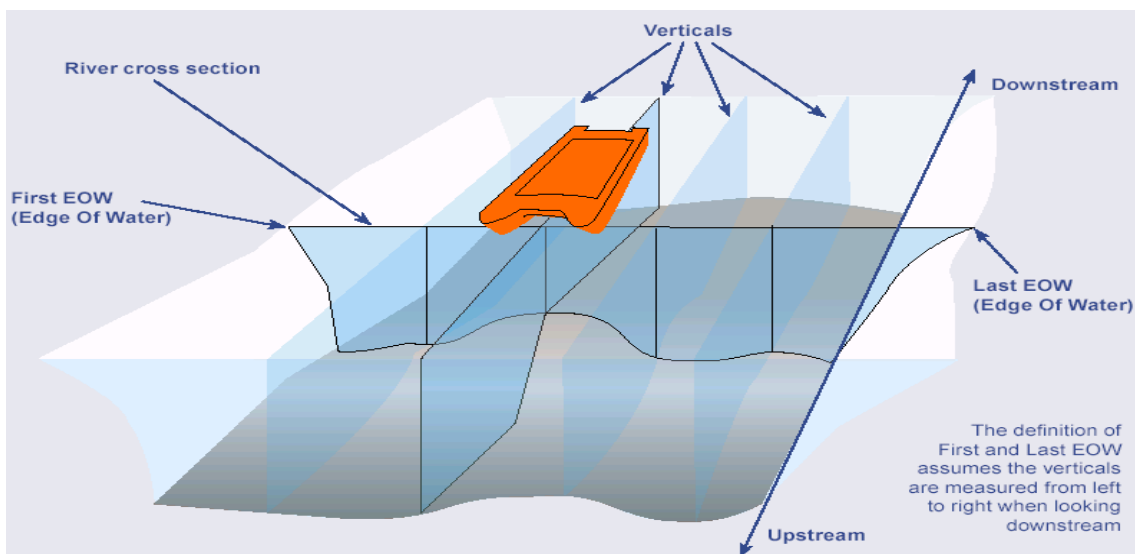


Figura 10 – Posicionamento do Qliner em seção hidrométrica



## O Software Utilizado

### Equacionamento

Existem vários arranjos de instalações de bombeamento, com suas bombas das mais variadas possíveis. A Figura 11 mostra croqui de um determinado arranjo, enquanto a equação 6 apresenta a altura total de elevação  $H$  da bomba.

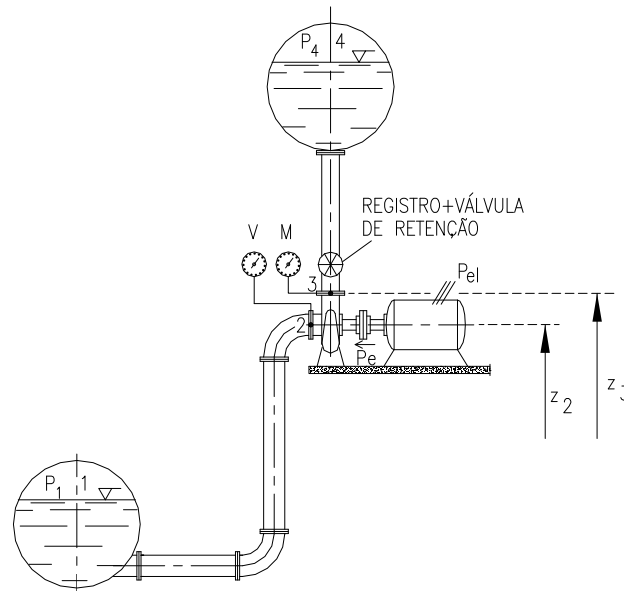


Figura 11- Esquema teórico de instalação de bombeamento

$$H = \frac{P_3}{\rho \cdot g} - \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_3^2 - v_2^2}{2g} + (z_3 - z_2) \quad (6)$$

As pressões na saída da bomba 3 e na entrada da bomba 2 serão medidas com manômetros tradicionais como os do tipo Bourdon ou com transdutores de pressão.

Conhecendo-se os diâmetros internos das tubulações na entrada  $D_2$  [m] e saída  $D_3$  [m] da bomba, pela equação da continuidade, determina-se as velocidades  $v_2$  [m/s] e  $v_3$  [m/s] apresentadas na equação 7:

$$v_2 = \frac{4 \cdot Q}{\pi D_2^2} \text{ e } v_3 = \frac{4 \cdot Q}{\pi D_3^2} \quad (7)$$

As cotas geométricas  $z_2$  [m] e  $z_3$  [m] são fixas e facilmente medidas.

A potência hidráulica  $P_h$  [kW] é determinada pela equação 8:

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot 10^{-3} \quad (8)$$

A massa específica do líquido  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] depende da temperatura  $t$  do líquido em graus Celsius, sendo determinada pela equação 9. A aceleração da gravidade  $g$  [m/s<sup>2</sup>] é função da altitude local [m] e da latitude [°], dada pela equação 10:

$$\rho = 1000,14 + 0,0094 \cdot t - 0,0053 \cdot t^2 \quad (9)$$

$$g = 9,7803 \cdot (1 + 0,0053 \cdot \text{sen}^2 \phi) - 3 \cdot 10^{-6} \cdot A \quad (10)$$

Para determinação da potência elétrica  $P_{el}$  [kW] consumida, utiliza-se um wattímetro digital trifásico ou medidor de grandezas elétricas que é conectado no secundário de TCs e TPs de medição quando houver, ou diretamente aos cabos de alimentação do motor no caso de inexistência de TCs e TPs.

O rendimento do conjunto moto-bomba [%] é dado pela equação 11:

$$\eta_c = \frac{P_h}{P_{el}} \cdot 100 \quad (11)$$

A potência de eixo da bomba  $P_e$  [kW] pode ser determinada em função do rendimento do motor elétrico, como mostra a equação 12. O rendimento elétrico ( $\eta_{el}$ ) pode ser obtido através do fabricante do motor. O rendimento elétrico para motores de indução trifásicos depende da sua potência. A equação 12 determina a potência de eixo da bomba e a equação 13 o rendimento total da bomba.

$$P_e = P_{el} \cdot \eta_{el} \quad (12)$$

$$\eta_t = \frac{P_h}{P_e} \quad (13)$$

### Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de medição é baseado em um sistema de aquisição de dados por computador. Sendo assim, tanto os resultados de testes como também as curvas características das unidades geradoras, estarão disponíveis no sistema, já considerando as incertezas.

Para a elaboração do software de controle e análise do sistema foi escolhida a plataforma LabView, já que a mesma tem se demonstrado como uma poderosa ferramenta de desenvolvimento. O sistema aquisita o sinal, transformando-o em unidade de engenharia, calcula os parâmetros do conjunto moto-bomba por meio dessas informações e disponibiliza para o usuário, que pode salvá-las.

A Figura 12 mostra a imagem da tela de supervisão de um conjunto moto-bomba submerso da Estação Elevatória Aldeota em Fortaleza, Ceará, Brasil.

Na parte superior da tela de aquisição, observa-se o título, bem como, os parceiros do projeto. Ainda nessa parte, observam-se alguns “tabs”, em que se pode configurar o fundo de escala dos sensores e equipamentos utilizados, alterar algumas constantes (gravidade, massa específica), além de mostrar as conexões a serem feitas no módulo de aquisição. Esta última parte surgiu dos erros ocorridos durante os ensaios. Na parte principal da tela, observa-se o desenho do conjunto moto-bomba que está sendo ensaiado. Isso facilita a visualização dos dados, bem como melhora a aparência da tela. Ao longo do desenho, observam-se os indicadores e controladores necessários para os cálculos, que são disponibilizados em uma tela, juntamente com as grandezas aquisitadas. Além disso, o usuário pode coletar as informações no momento em que desejar apertando o botão “coletar”. Essas informações ficarão visíveis na tabela e quando se desejar salvá-las, pressiona-se o botão “salvar”. Além disso, existem “tabs” que indicarão os pontos aquisitados em um gráfico, como por exemplo, o gráfico do rendimento em função da vazão. Por fim, um relógio com o horário do computador e um botão para parar a aquisição e resetar o programa também foram colocados, de modo a facilitar a operação do usuário.

Atualmente existe uma equipe de técnicos capacitada a serviço do Laboratório Móvel com conhecimento em instrumentação e equipamentos que permita avaliar as condições de instalação, operativas e de manutenção de um conjunto moto-bomba.

### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A unidade móvel apresentada neste trabalho, projetada pela UNIFEI e PROCEL e adquirida pelo Convênio ELETROBRÁS (PROCEL)/UNIFEI com recursos do Banco Mundial (PNUD) está equipada, instrumentada e possui uma equipe bem treinada para avaliação de instalações de bombeamento nos vários setores produtivos, visando a conservação de energia e água, além de centrais hidrelétricas.

O Laboratório Móvel está disponível para trabalhos de campo em vários setores da indústria, do saneamento e do meio rural, que através dos procedimentos apresentados poderá avaliar os grupos

geradores e as instalações de bombeamento, constituindo uma importante ferramenta para gestão hidroenergética.

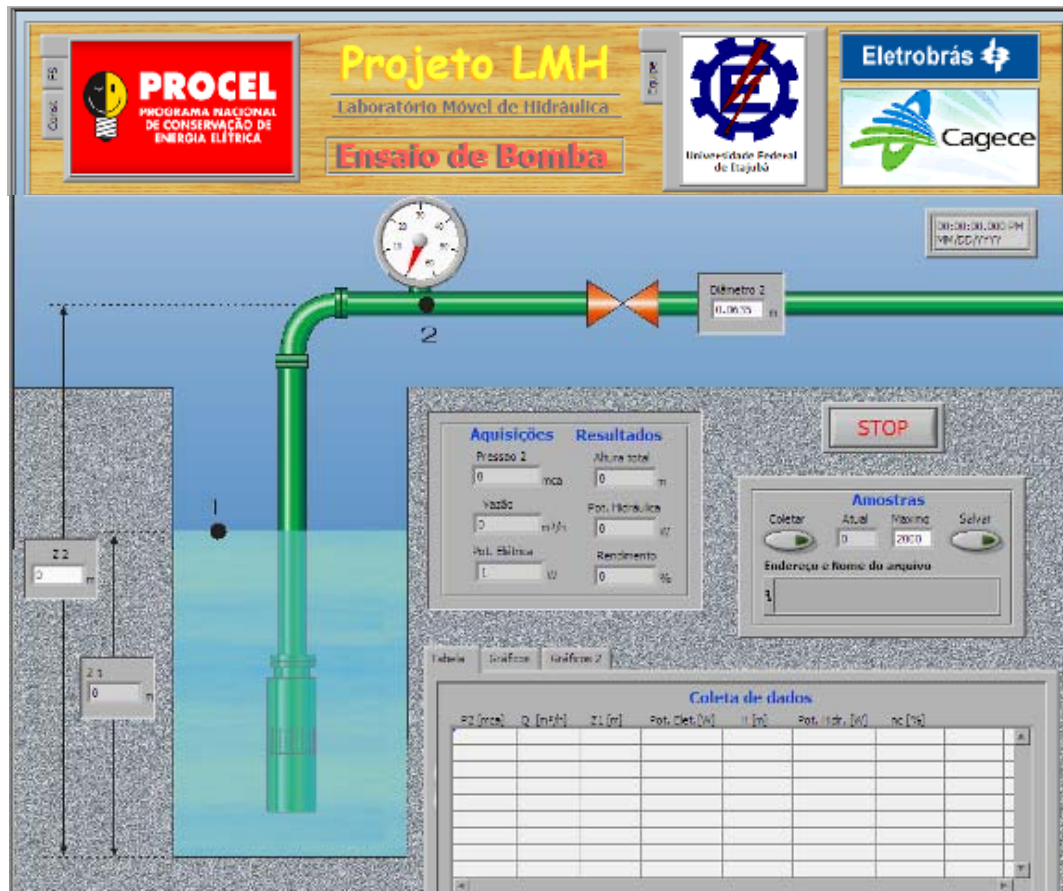


Figura 12 – Tela de supervisão do conjunto moto-bomba

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos a ELEOROBRÁS-PROCEL que com recursos do Banco Mundial /PNUD possibilitou a aquisição dos equipamentos, instrumentação, furgão e sua adaptação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DELMÉE, J. G. Manual de medição de vazão. São Paulo: Edgard Blucher, 1983.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. Essais de réception sur place des turbines hydrauliques, pompes d'accumulation et pompes-turbines, em vue de la détermination de sens performances hydrauliques. 3. ed. Geneva: IEC, 2001.

VIANA, A. N. C.; BORTONI, E. C., CAMPINHO, C. B., Unidade Móvel de hidráulica para avaliação de eficiência em instalações de bombeamento. In: SEMINÁRIO IBEROAMERICANO SOBRE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO URBANO DE ÁGUA, 6., 2006, João Pessoa. Anais... João Pessoa: UFPB, 2006.

SOUZA, Z.; BORTONI, E. C. Instrumentação para sistemas energéticos e industriais. Itajubá: Editora do Autor, 2006.

---

## 27 Possibilidades de conservação e efficientização hidroenergética em sistemas de irrigação

---

Augusto Nelson Carvalho Viana e Mateus Ricardo Nogueira Vilanova  
Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil

### INTRODUÇÃO

A preocupação do governo brasileiro com as questões relativas ao uso eficiente da energia elétrica vem de longa data. Em 1985 foi criado o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), carro chefe de todos os esforços nacionais visando o uso racional da eletricidade, sendo este conduzido com êxito pela ELETROBRÁS. O PROCEL vem obtendo excelentes resultados em diversos setores, dentre eles o industrial, comercial, saneamento e iluminação pública.

O setor agropecuário é o 5º maior consumidor de eletricidade no Brasil, com 4,2% do total, segundo o Balanço Energético Nacional em 2006 (MME, 2007). De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o crescimento do consumo de energia elétrica nos doze meses anteriores a outubro de 2007 atingiu o recorde da década, correspondente a uma taxa de 5,2% (EPE, 2007). Segundo o estudo, um dos principais fatores desse crescimento foi a recuperação das atividades agroindustriais (EPE, 2007). Percebe-se claramente que o setor agropecuário é um campo com enorme potencial para efficientização energética.

Representativa parcela do consumo de eletricidade no meio rural recai sobre a necessidade de utilização de um outro importante recurso, a água, através da agricultura irrigada. A área irrigada no Brasil corresponde à 5,89% da área plantada, quando considerados os 62 principais cultivos temporários e permanentes, representando 16% da produção (MMA, 2006). O país detém ainda um potencial superior a 13% da capacidade mundial de incorporação de novas áreas à agricultura irrigada (MMA, 2006).

O projeto otimizado de um sistema de irrigação, visando à conservação de água e energia elétrica, apresenta-se como um objetivo complexo, que envolve não somente um correto dimensionamento e especificação das instalações, mas também um estudo das necessidades da cultura, das características hidrometeorológicas locais e de uma análise de custos envolvidos.

No tocante aos equipamentos empregados na irrigação, atenção especial deve ser dada às bombas hidráulicas. Bombas são máquinas geradoras, ou sejam, convertem energia mecânica fornecida por um motor, transformando-a em energia cinética e posteriormente em energia de pressão, devido à ação do rotor. Apresentam vários tipos e configurações, em função dos seus aspectos construtivos e aplicações. O desperdício energético a partir de bombas hidráulicas ocorre de várias maneiras, seja pela especificação incorreta, operação fora de condições nominais ou falta de manutenção adequada (VIANA; RICARDO, 2007).

### EMBASAMENTO TEÓRICO

#### Sistemas de bombeamento

A figura 1 apresenta as curvas características de uma bomba com rotação constante (fornecida pelos fabricantes) e de uma instalação (definida de acordo com as características do sistema), sendo  $Q_n$  a vazão nominal [ $m^3/s$ ],  $H_n$  a altura total de elevação [m] (formada pela soma das alturas estática e dinâmica,  $H_{est}$  e  $H_{din}$ , respectivamente), e F o ponto de operação da bomba. A altura estática corresponde ao somatório do desnível topográfico entre os níveis de sucção e recalque ( $H_o$ ) somado à diferença de pressão entre esses dois pontos. Já a altura dinâmica é formada pela componente cinética do escoamento acrescida das perdas de carga do sistema, ambas funções do quadrado da velocidade de escoamento.

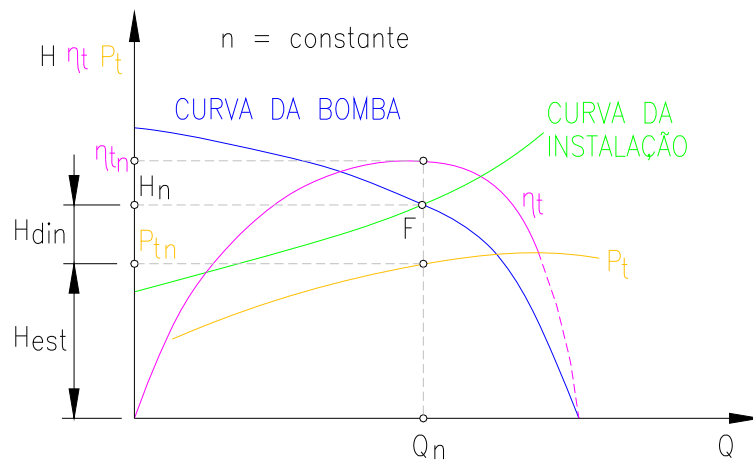


Figura 1 - Curvas características de uma bomba e de uma instalação (fonte: VIANA, 2001)

A altura total de elevação ( $H$ ) corresponde à quantidade de energia (por unidade de peso) que deve ser fornecida ao líquido para que esse atenda à vazão requerida pelo sistema, em uma determinada rotação, conforme equação 1 e esquema genérico apresentado na Figura 2:

$$H = H_o + \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + H_p \quad (1)$$

sendo  $H$  [m] a altura total de elevação,  $H_o$  [m] o desnível entre o nível de recalque e sucção,  $P_2$  e  $P_1$  [Pa] as pressões no nível de recalque e sucção, respectivamente,  $v_2$  e  $v_1$  [m/s] as velocidades na entrada e na saída do sistema,  $\rho$  é a massa específica do fluido [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $g$  [ $\text{m}/\text{s}^2$ ] a aceleração da gravidade e  $H_p$  [m] as perdas de carga no sistema.

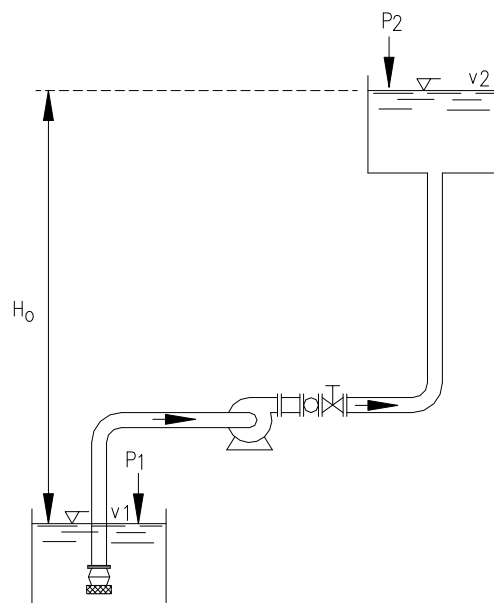


Figura 2 – Esquema genérico de bombeamento

Como exemplo, considerando-se um sistema de irrigação por aspersão, composto por uma linha principal e uma lateral, com aspersores instalados em nível, tem-se o seguinte modelo simplificado para determinação da altura total de elevação da bomba:

$$H_n = H_o + P_i + H_p \quad (2)$$

$H_o$  corresponde ao desnível entre o nível de sucção e o início da linha lateral e  $H_p$  às perdas de carga distribuídas e localizadas na linha principal. A pressão interna máxima no início da linha lateral ( $P_i$ ) é função do nível e da pressão de serviço dos aspersores, e das perdas de carga na linha lateral (TELLES et al, 1998). A potência elétrica consumida por um conjunto moto-bomba, para o caso apresentado, é dada pela seguinte equação:

$$P_{el} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q_n \cdot H_n}{\eta_{tm} \cdot \eta_m} \quad (3)$$

$\rho$  é a massa específica do fluido [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ], no caso água,  $g$  a aceleração da gravidade [ $\text{m}/\text{s}^2$ ],  $\eta_{tm}$  e  $\eta_m$  os rendimentos da bomba e do motor, respectivamente.

Em relação às perdas energéticas no sistema em si (tubulações, conexões, etc), essas podem ser de dois tipos: perdas de carga distribuídas ( $H_{pd}$ ) e localizadas ( $H_{pl}$ ). As perdas distribuídas ocorrem em função de atrito entre as partículas do líquido ao longo das linhas principais e laterais, onde ocorre uma distribuição em marcha (PORTO, 2003); já as perdas localizadas são originadas de singularidades, como curvas, válvulas, aspersores ou qualquer outro componente que interfira no escoamento. As perdas de carga no sistema podem ser calculadas pela equação 4:

$$H = H_{pd} + H_{pl} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} + \sum k \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

onde  $f$  é o fator de atrito (dependente do número de Reynolds e da rugosidade da tubulação),  $L$  [m] é o comprimento da tubulação,  $D$  [m] o diâmetro da tubulação,  $v$  [m/s] a velocidade do escoamento,  $g$  [ $\text{m}/\text{s}^2$ ] a aceleração da gravidade e  $k$  é o coeficiente de perdas localizadas (variável em função do tipo de singularidade).

## Irrigação

Várias são as situações que levam produtores a optar pela instalação de um sistema de irrigação: a indisponibilidade hídrica do local, que torna o sistema indispensável, a valorização econômica dos produtos em períodos de entressafra, além da melhoria da qualidade destes, uma vez que a água é tida como fator limitante no desenvolvimento vegetal. Estudos desenvolvidos pela Agência Nacional de Águas (ANA) (CONEJO, 2005), revelam que 40% da vazão de retirada no país é destinada à irrigação. Já em termos efetivos, “[...] a irrigação é responsável por quase 70% da água consumida no país” (CONEJO, 2005).

A quantidade de água retirada do solo por determinada cultura é denominada evapotranspiração real ( $ET_R$ ) [mm/dia], sendo que cerca de 98% desse valor retorna à atmosfera na forma de vapor (TELLES et al, 1998). Importante parâmetro relativo ao solo é seu teor de umidade ( $U_a$ ), correspondente à porcentagem de água em relação à de partículas secas, expressa em termos de massa ou volume. A capacidade de campo (CC) pode ser entendida como a quantidade máxima de água que um solo pode reter. Já o ponto de murchamento (PM) é um indicador de déficit hídrico, abaixo do qual ocorre murchamento permanente das plantas.

Telles et al. (1998) enumera os seguintes parâmetros fundamentais ao dimensionamento de sistemas de irrigação:

- Lâmina líquida ( $H_i$ ) [mm]: quantidade disponível de água no solo que pode efetivamente ser utilizada pelas plantas;
- Eficiência de irrigação ( $E_i$ ) [%]: quantifica as perdas durante a irrigação. Sistemas por gotejamento e microaspersão apresentam-se como os mais eficientes, enquanto sistemas por sulcos e alagamento são os de maior desperdício;

- Lâmina bruta (Hb) [mm]: quantidade total de água, englobando as perdas, que o sistema de irrigação deve fornecer à cultura;
- Turno de rega (Ti) [dias]: intervalo entre aplicações subseqüentes de água no mesmo local;
- Intensidade de aplicação (IA) [mm/h]: velocidade de aplicação de água pelo sistema;
- Tempo na posição (TP) [h ou min]: tempo que os aspersores devem atuar em determinada posição;
- Período de irrigação (Pi) [dias]: período necessário para se irrigar toda área plantada.

## EFICIENTIZAÇÃO HIDROENERGÉTICA DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO

São apresentadas, a seguir, algumas possibilidades e boas práticas que podem reduzir e tornar mais eficiente o uso de energia e água em sistemas de irrigação.

### Utilização de equipamentos eficientes

Em 1984, o INMETRO iniciou a discussão com a sociedade sobre a questão da eficiência energética, com objetivo de racionalizar o uso dos diversos tipos de energia no País, informando os consumidores sobre a eficiência energética de cada produto, estimulando-os a fazer uma compra consciente. Este projeto, no seu início ligado a área automotiva, foi crescendo e ganhou status de Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), atuando principalmente na área de produtos consumidores de energia elétrica.

Sempre desenvolvido através da adesão voluntária dos fabricantes, ganhou um importante parceiro, a ELETROBRÁS, através do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) (INMETRO, 2008).

Atualmente este Programa já tem desenvolvidos 22 sub-programas de etiquetagem, prevendo o desenvolvimento de outros 20 para os próximos anos. A etiquetagem de bombas centrífugas e motores elétricos, amplamente utilizados na irrigação, faz parte do cronograma anual do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) acordado com os fabricantes, permitindo alcançar o objetivo precípua de uma etiqueta informativa como a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), que é a comparabilidade entre todos os produtos comercializados de uma linha de produtos, anualmente, de forma a situar o consumidor sobre o desempenho dos produtos, nas diversas faixas de vazão, pressão (altura manométrica) e potência disponíveis, com os seus respectivos consumos de energia, segundo normas brasileiras específicas e/ou internacionais, e que a medição dessas grandezas está sendo feita pelo fabricante de forma contínua e segundo parâmetros e valores de ensaios de aferição e controle conforme as disposições do regulamento específico (INMETRO, 2006). De forma complementar, o Selo PROCEL de Economia de Energia (Selo PROCEL), instituído em 1993, é fornecido aos produtos caracterizados pela faixa "A" (mais eficiente) da ENCE.

Experiências práticas comprovam que grande parte das bombas e motores elétricos utilizados em sistemas de irrigação no Brasil, sobretudo em pequenas e médias propriedades, apresentam-se em más condições de conservação e manutenção, ocasionando uma operação com baixos rendimentos. A substituição desse maquinário por equipamentos bem classificados pela ENCE constitui uma primeira possibilidade de eficientização dos sistemas.

Os grandes empecilhos à substituição de equipamentos por outros mais eficientes residem na indisponibilidade de recursos e crédito para financiamento. Outro fator fundamental é a conscientização dos produtores, que são desencorajados a substituir equipamentos devido ao tempo de retorno do investimento. A amortização desse tipo de investimento a partir da economia gerada pela redução do consumo energético geralmente ocorre a médio e longo prazo. Culturalmente, o tempo de retorno esperado pelo produtor tem um horizonte muito menor.

Uma das iniciativas do PROCEL/ELETROBRÁS no sentido de se permitir a análise da eficiência e otimização de sistemas de bombeamento é o Laboratório Móvel de Hidráulica (LM), criado em parceria com o Grupo de Energia (GEN) da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). O LM consiste numa *van* adaptada e equipada com inúmeros equipamentos e instrumentos para ensaios de eficiência em sistemas hidroenergéticos: medidores de vazão (ultrasônicos, molinetes, perfilador acústico, tubos de Pitot), medidores de pressão (transdutores, manômetros de coluna e Bourdon), medidores de grandezas elétricas,

alicates wattímetros e amperímetros, tacômetros, termômetros, laptop, D-GPS, estação total, equipamentos para detecção de vazamentos.



Figura 3 – Laboratório Móvel de Hidráulica

### Utilização de sensores agrometeorológicos

A definição da quantidade de água a se aplicar e do momento de aplicação sobre determinada área irrigada é feita, tradicionalmente, no momento do projeto do sistema de irrigação, com base em necessidades típicas de cada cultura e do solo, bem como nas condições hidrometeorológicas predominantes da região. A utilização de valores médios desconsidera o fato de o clima ser um sistema dinâmico, sujeito à variações naturais ou influenciadas por ações antrópicas. Com isso, a irrigação tradicional pode levar a desperdícios de água e energia durante períodos hidrológicamente favoráveis, bem como ao fornecimento de quantidades insuficientes em épocas de estiagem anormal.

A utilização de estações agrometeorológicas automáticas, associadas à técnicas de automação agrícola, é um grande aliado na conservação hidroenergética na irrigação. Essas estações são equipadas com sensores ambientais de temperatura, precipitação, umidade, velocidade de vento, entre outros, que transmitem tais informações, em tempo real, para uma central de controle. Nestas, um operador ou um sistema automatizado analisam as informações e as comparam com as necessidades específicas da cultura considerada, decidindo pelo acionamento ou não do sistema de irrigação, que opera até as condições ideais serem atingidas. Exemplos desse tipo de sistema, citados por Klein (2001) e Libardi (1999), é o acionamento de bombas de acordo com a quantidade de água disponível no solo, determinada através de tensiômetros.

Segundo Carlesso et al. (2003), a redução nas lâminas d'água aplicadas e, proporcionalmente, do consumo de energia elétrica proporcionado pelo monitoramento agrometeorológico em tempo real e operação automatizada do sistema de irrigação pode chegar a 35%, além de aumentar a produtividade da área em função do atendimento exato às necessidades da cultura.

### Uso de bombas com rotação variável

Bombas hidráulicas possuem um ponto de funcionamento ótimo, no qual as perdas de energia mínimas. Entretanto, a maioria das instalações exige da bomba “[...] operação fora desse ponto de melhor funcionamento, em função da necessidade de variação de vazão.” (VIANA, 2001). Os processos tipicamente utilizados para a redução da vazão de bombas hidráulicas mantendo a rotação do equipamento constante (estrangulamento de válvulas, utilização de *by pass*) representam um desperdício de energia quando comparados à possibilidade de operação com rotação variável (VIANA, RICARDO, 2007).

Na figura 4a, tem-se a bomba funcionando com rotação constante, no ponto  $F_1$ . Estrangulando-se uma válvula na saída da bomba, aumenta-se a perda de carga no sistema ( $H_{p2}$ ), reduzindo-se a vazão até o



valor desejado ( $Q_2$ ), conforme a figura 4b. Caso a rotação da bomba fosse alterada, de acordo com a figura 4c, para a mesma vazão ( $Q_2$ ) o ponto de operação  $F_3$ , cuja parcela dinâmica da altura total de elevação é menor. Nesse caso, a potência elétrica economizada pela variação da rotação ao invés do estrangulamento da válvula é dada por:

$$P_{\text{eco}} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q_n \cdot (H_2 - H_3)}{\eta_{\text{lm}} \cdot \eta_{\text{m}}} \quad (5)$$

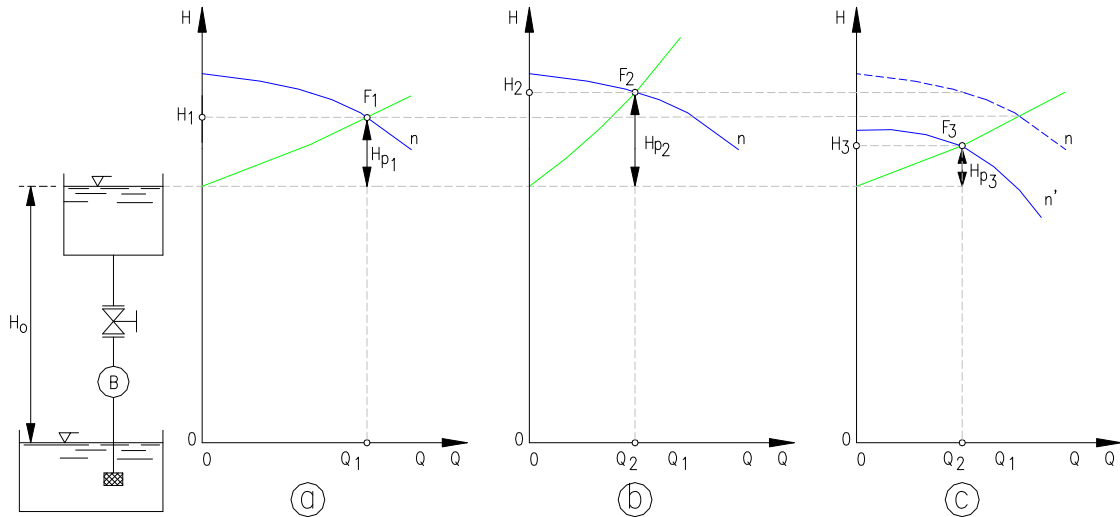


Figura 4 - Comparação entre estrangulamento de válvula e variação da rotação

No caso da redução da vazão se dar pela utilização de um *by-pass*, tem-se:

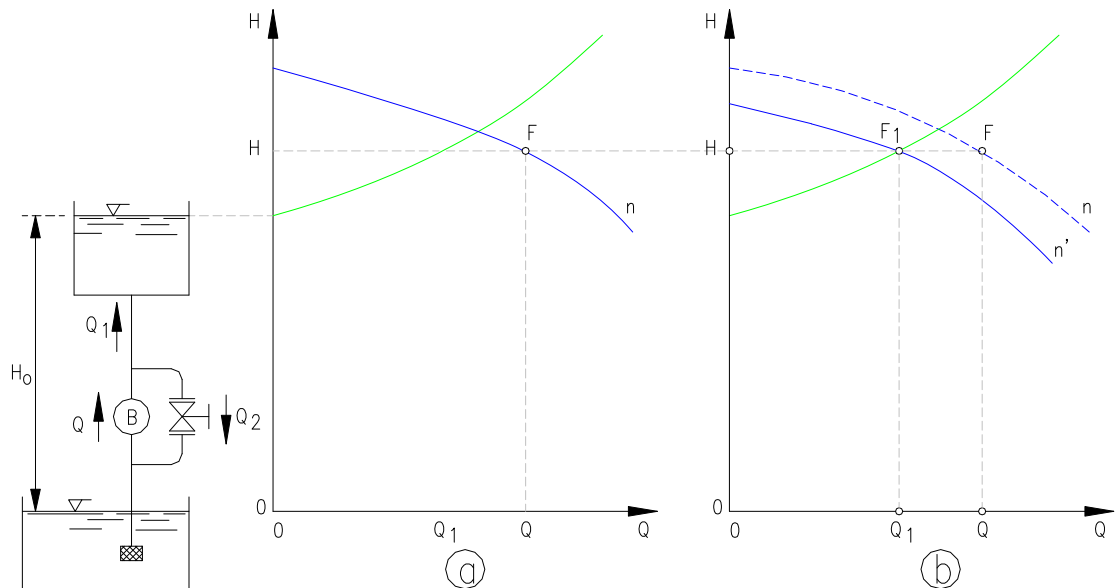


Figura 5 - Comparação entre utilização de *by-pass* e variação da rotação

Percebe-se na figura 5a que, apesar do sistema demandar uma vazão  $Q_1$ , a bomba recalca uma vazão superior,  $Q$ , sendo que parte da potência consumida é desperdiçada, em função recirculação da parcela  $Q_2$ . A figura 5b demonstra que a variação na rotação permite o perfeito ajuste da bomba às condições do sistema, sendo a potência economizada nesse caso expressa pela seguinte equação:

$$P_{\text{eco}} = \frac{\rho \cdot g \cdot (Q - Q_1) \cdot (H)}{\eta_{\text{tm}} \cdot \eta_{\text{m}}} \quad (6)$$

## CONCLUSÕES

O trabalho apresentou algumas das inúmeras possibilidades que podem propiciar a economia e o uso racional de energia elétrica e água em sistemas de irrigação. Além dos aspectos técnicos, a questão da sustentabilidade de tais sistemas deve ser introduzida de forma a se agregar à cultura dos produtores rurais, possibilitando a substituição, de forma gradual, de métodos e equipamentos tradicionais por outros mais eficientes.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à ELETROBRÁS/PROCEL pelo apoio e incentivo ao desenvolvimento de estudos e pesquisas no âmbito da conservação e uso racional de energia elétrica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CARLESSO, R. *et al.*; Controle total. Revista Máquinas, [S.l.], jan. 2003.
- CONEJO, J. G. L.; Disponibilidade e demandas de Recursos Hídricos no Brasil; Brasília: ANA/MMA, 2005.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Resenha mensal do mercado de energia elétrica: Número 2. Rio de Janeiro: EPE, 2007.
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. Rio de Janeiro: INMETRO, 2008. Página oficial do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br>>. Acesso em: 15 jun. 2008.
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. Regulamento específico para uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia: Linha de bombas centrífugas. Rio de Janeiro: INMETRO, 2006.
- KLEIN, V. A.; Uma proposta de irrigação automática controlada por tensiômetros. Revista Brasileira de Agrociência, [S.l.], v. 7; n. 3, p.231-234, set. 2001.
- LIBARDI, P.L.; Dinâmica da água no solo; 2ª edição; O autor; Piracicaba; 1999.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Balanço Energético Nacional 2007: Ano base 2006; EPE; Rio de Janeiro; 2007.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE; Caderno setorial de recursos hídricos: agropecuária; Brasília: MMA, 2006.
- PORTO, R. M.; Hidráulica básica. 2. ed. São Carlos: EESC-USP, 1999.
- VIANA, A. N. C., RICARDO, M.; Utilização de bombas com rotação variável para a conservação de energia em sistemas de irrigação. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 36., 2007, Bonito. Anais... Bonito: SBEA, 2007.

VIANA, A. N. C. *et al.*; Conservação de energia – Eficiência energética de instalações e equipamentos; PROCEL/ELETROBRÁS ; Itajubá; 2001.

TELLES, D. D. *et al.*; Manual de hidráulica Azevedo Netto. 8. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1998.

---

## 28 Redução do consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento através da redução das perdas de água: estudo de caso no município de Lavras-MG

---

Mateus Ricardo Nogueira Vilanova<sup>1</sup>, Augusto Nelson Carvalho Viana<sup>1</sup>, Emerson Salvador<sup>2</sup>, George Camargo dos Santos<sup>2</sup> e Josimar Cornélio da Pascoa<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil

<sup>2</sup>Centrais Elétricas Brasileiras S.A., Rio de Janeiro, Brasil

<sup>3</sup>Companhia de Saneamento de Minas Gerais, Lavras, Brasil

### INTRODUÇÃO

A relação linear entre as perdas de água e de energia elétrica em sistemas de abastecimento vem obrigando concessionárias e serviços autônomos de água a desenvolver ações visando à mitigação de tais problemas. Isso se justifica não somente pela necessidade de otimização operacional, mas também pela significativa participação da energia elétrica nos custos de exploração da água, gerando um grande ônus aos sistemas. A participação média da energia elétrica nas despesas de exploração das três maiores concessionárias de água de MG, SP e RJ (COPASA, SABESP e CEDAE) foi da ordem de 14% em 2007, ficando atrás apenas das despesas com pessoal, estimadas em 53% (MCIDADES, 2009). No mesmo ano, o índice médio de perdas de água nesses sistemas foi de 40%. Tais valores permitem concluir que o custo da energia elétrica desperdiçada em função das perdas de água nos sistemas considerados representa 5,6% das despesas totais de exploração.

Diante do exposto, o trabalho apresenta o estudo de eficiência energética do sistema de abastecimento de água do município de Lavras – MG – Brasil, cuja concessão pertence à COPASA.

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O processo de disponibilização de água tratada para abastecimento urbano envolve uma série de componentes hidromecânicos, distribuídos desde a captação de água bruta nos mananciais, passando pelo tratamento, reservação e distribuição. A figura 1 apresenta uma representação esquemática de um sistema de abastecimento urbano de água:

As perdas de água correspondem aos volumes não contabilizados, englobando perdas físicas (ou reais) e não físicas (ou aparentes) (PNCDA, 2007). As perdas físicas são aquelas originadas de vazamentos nas redes e adutoras, extravazamento de reservatórios e do processo de tratamento, quando esta última extrapola o volume estritamente necessário ao processo. As perdas aparentes, também conhecidas como perdas de faturamento, dizem respeito a ligações clandestinas, fraudes, problemas de micromedição, dentre outros. O balanço hídrico é a ferramenta tipicamente utilizada para a quantificação das perdas de água, sendo possível a partir da estrutura de medição apresentada na figura 1 que, após coleta e validação dos dados, origina uma série de indicadores de perda. A figura 2 apresenta os componentes do padrão internacional de balanço hídrico:

Existem várias metodologias para a quantificação e análise de perdas de água do setor de saneamento, sendo aquela proposta pela *International Water Association* (IWA) amplamente utilizada no mundo. A tabela 1 apresenta os indicadores de perda de água definidos pela IWA:

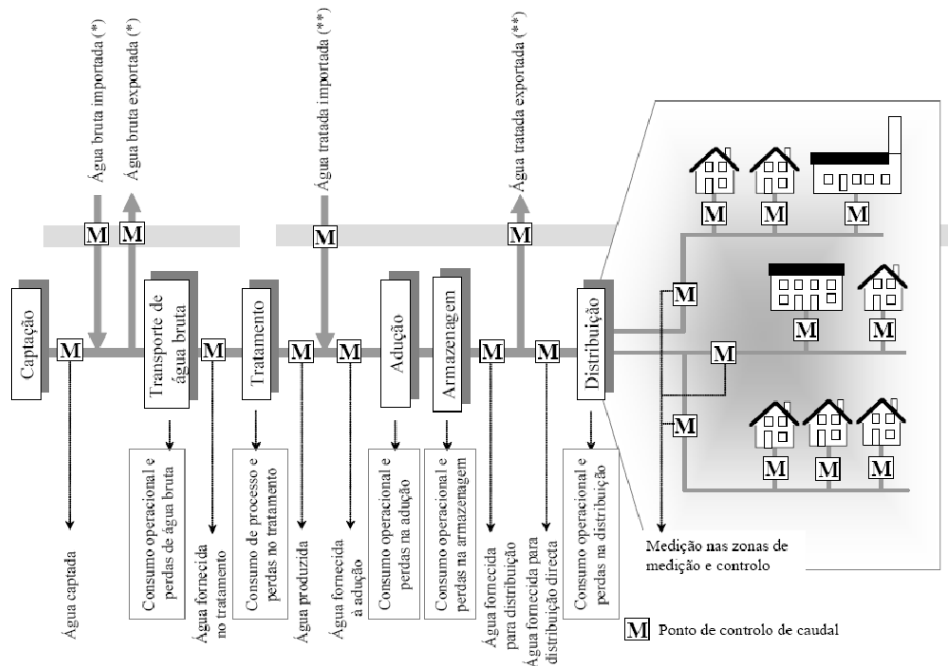


Figura 1 - Esquematisação de um sistema genérico de abastecimento de água com indicação dos pontos de medição (M) para balanço hídrico (fonte: IRAR, 2004)

Volume de fonte própria	Volume Fornecido ao Sistema	Água Exportada	Consumo Autorizado	Consumo Autorizado Faturado	Água Faturada	Água Exportada Faturada
		Água Distribuída		Perdas de Água		Consumo Autorizado Não Faturado
Perdas Reais	Água não Faturada		Consumo não Medido Faturado			
			Consumo Medido não Faturado			
			Consumo não Medido e não Faturado			
			Consumo não Autorizado			
Água Importada	Água Distribuída		Perdas de Água	Água não Faturada	Imprecisão nos Hidrometros	
		Vazamento nas Redes				
		Vazamentos e Extravasões em Reservatórios				
		Vazamentos em ligações até o Hidrometro				

Figura 2. Componentes do padrão internacional de balanço hídrico em sistemas de abastecimento de água (fonte: PNCDA, 2004)

Tabela 1 – Indicadores de perda de água, segundo a IWA

SIGLA	INDICADOR	UNIDADE
Op23	Perdas de água por ramal	m <sup>3</sup> /ramal.ano
Op24	Perdas de água por comprimento de tubulação	m <sup>3</sup> /km.dia
Op25	Perdas aparentes	%
Op26	Perdas aparentes por volume de água que entra no sistema	%
Op27	Perdas reais por ramal	l/ramal.dia
Op28	Perdas reais por comprimento de tubulação	l/km.dia

Fonte: adaptado de IRAR, 2004

O uso de bombas para adução de água tornou-se fundamental no mundo moderno, em função da expansão urbana para regiões onde a topografia não permite o escoamento por gravidade, trazendo consigo o consumo de energia elétrica pelos motores que acionam tais máquinas hidráulicas. Segundo a Aliança para Conservação de Energia (ALLIANCE, 2002), entre 2% a 3% da energia elétrica consumida no mundo refere-se ao bombeamento e tratamento de água para abastecimento público, havendo, segundo a mesma instituição, um potencial de economia de energia elétrica da ordem de 25%. Considerando os índices brasileiros de perdas de água, da ordem de 40%, percebe-se que tal potencial pode ser ainda maior.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Caracterização da área de estudo

O município de Lavras encontra-se no sul do Estado de Minas Gerais (figura 3), ocupando uma área de 565 km<sup>2</sup>. Sua população em 2007, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), era de 87.421 habitantes. A empresa responsável pelo abastecimento de água ao município é a Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA).



Figura 3 - Localização do município de Lavras (fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Lavras>)

O sistema de abastecimento de água de Lavras é constituído por 4 subsistemas de captação:

Tabela 2 – Captações de Lavras

SUBSISTEMA	SIGLA	VAZÃO MÉDIA [m <sup>3</sup> /h]
Ribeirão Água Limpa	EAB001	360
Ribeirão Santa Cruz	EAB002	252
Aeroporto	EAB003	
Rio Grande	EAB004	461

Tais sistemas recalcam uma vazão média de 1072,8 m<sup>3</sup>/h para uma ETA (Estação de Tratamento de Água), de concreto armado do tipo convencional localizada na parte alta da cidade. Esta ETA trata e distribui por gravidade parte da vazão, sendo outra parte bombeada para 03 reservatórios localizados também na parte mais alta da cidade. O tratamento é convencional (floculação, decantação, filtração e desinfecção), e sofre um rigoroso controle de qualidade. A capacidade de reservação é 7560 m<sup>3</sup>.

As tabelas 3, 4, 5 e 6 caracterizam os conjuntos moto-bomba dos subsistemas de captação:

Tabela 3 – Conjuntos moto-bomba do sistema Água Limpas

EQUIPAMENTO	QUANT.	VAZÃO [m <sup>3</sup> /h]	ALTURA MANOMÉTRICA [m]	POTÊNCIA [CV]	TENSÃO [V]	CORRENTE [A]
Bomba bipartida	2	288	110	-	-	-
Motor trifásico	2	-	-	250	440	304

Tabela 4 – Conjuntos moto-bomba do sistema Santa Cruz

EQUIPAMENTO	QUANT.	VAZÃO [m <sup>3</sup> /h]	ALTURA MANOMÉTRICA [m]	POTÊNCIA [CV]	TENSÃO [V]	CORRENTE [A]
Bomba bipartida	2	288	110	-	-	-
Motor trifásico	2	-	-	200	440	240

Tabela 5 – Conjuntos moto-bomba do sistema Aeroporto

EQUIPAMENTO	QUANT.	VAZÃO [m <sup>3</sup> /h]	ALTURA MANOMÉTRICA [m]	POTÊNCIA [CV]	TENSÃO [V]	CORRENTE [A]
Bomba bipartida	2	288	110	-	-	-
Motor trifásico	2	-	-	200	440	240

Tabela 6 – Conjuntos moto-bomba do sistema Rio Grande

EQUIPAMENTO	QUANT.	VAZÃO [m <sup>3</sup> /h]	ALTURA MANOMÉTRICA [m]	POTÊNCIA [CV]	TENSÃO [V]	CORRENTE [A]
Bomba multiestágio	3	381,6	265,25	-	-	-
Motor trifásico	3	-	-	550	4.160	63
Bomba	3	353,5	16,88	-	-	-
Motor trifásico	3	-	-	40	220/380	98/57

### Correlação entre produção de água e consumo energético no sistema estudado

A partir de faturas de energia fornecidas pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e da macromedição de cada um dos subsistemas, pôde-se obter o consumo específico de energia (kWh/m<sup>3</sup>), conforme tabelas a seguir:

Tabela 7 – Produção de água e consumo energético do sistema Água Limpa

<b>MÊS/ANO</b>	<b>CONSUMO ENERGÉTICO [kWh]</b>	<b>VOLUME BOMBEADO [m<sup>3</sup>]</b>	<b>CONSUMO ESPECÍFICO [kWh/m<sup>3</sup>]</b>
Set/07	108.480	138.550	0,78
Out/07	78.720	152.771	0,51
Nov/07	98.400	160.600	0,61
Dez/07	95.040	145.671	0,65
Jan/08	111.840	183.985	0,60
Fev/08	104.640	172.496	0,60
Mar/08	117.120	153.509	0,76
Abr/08	125.760	148.992	0,84
Mai/08	109.920	156.221	0,70
Jun/08	104.640	187.746	0,55
Jul/08	102.240	144.902	0,70
Ago/08	120.480	156.330	0,77
Total	1.277.280	1.901.773	-
Média	106.440	158.481	0,67

Tabela 8 – Produção de água e consumo energético dos sistemas Santa Cruz e Aeroporto

<b>MÊS/ANO</b>	<b>CONSUMO ENERGÉTICO [kWh]</b>	<b>VOLUME BOMBEADO [m<sup>3</sup>]</b>	<b>CONSUMO ESPECÍFICO [kWh/m<sup>3</sup>]</b>
Set/07	156.234	103.257	1,51
Out/07	117.952	102.832	1,14
Nov/07	110.704	81.389	1,36
Dez/07	122.446	77.098	1,58
Jan/08	119.258	63.122	1,88
Fev/08	105.036	73.663	1,42
Mar/08	99.034	84.700	1,16
Abr/08	100.088	89.456	1,11
Mai/08	111.840	91.280	1,22
Jun/08	115.960	92.022	1,26
Jul/08	110.320	105.315	1,04
Ago/08	115.920	88.093	1,31
Total	1.384.792	1.052.227	-
Média	115.399	87.686	1,31



Tabela 9 – Produção de água e consumo energético do sistema Rio Grande

<b>MÊS/ANO</b>	<b>CONSUMO ENERGÉTICO [kWh]</b>	<b>VOLUME BOMBEADO [m<sup>3</sup>]</b>	<b>CONSUMO ESPECÍFICO [kWh/m<sup>3</sup>]</b>
Set/07	308.160	293.875	1,04
Out/07	514.080	310.730	1,65
Nov/07	338.400	309.138	1,09
Dez/07	303.120	295.545	1,02
Jan/08	324.000	302.941	1,06
Fev/08	298.808	291.340	1,02
Mar/08	295.920	311.092	0,95
Abr/08	303.840	288.144	1,05
Mai/08	312.480	299.246	1,04
Jun/08	283.680	283.632	1,00
Jul/08	317.520	291.326	1,08
Ago/08	308.880	295.893	1,04
Total	3.908.888	3.572.902	-
Média	325.741	297.742	1,09

A partir das relações de consumo energético e produção de água dos subsistemas, originou-se a tabela 10, que representa tais relações integralizadas para o sistema de abastecimento de Lavras como um todo:

Tabela 10 – Produção de água e consumo energético do município de Lavras

<b>MÊS/ANO</b>	<b>CONSUMO ENERGÉTICO [kWh]</b>	<b>VOLUME BOMBEADO [m<sup>3</sup>]</b>	<b>CONSUMO ESPECÍFICO [kWh/m<sup>3</sup>]</b>
Nov/07	761.790	562.930	1,35
Dez/07	598.189	511.289	1,17
Jan/08	567.198	546.591	1,04
Fev/08	594.777	522.640	1,14
Mar/08	545.927	504.299	1,08
Abr/08	549.089	551.226	1,00
Mai/08	573.292	524.802	1,09
Jun/08	535.149	538.903	0,99
Jul/08	562.718	513.671	1,09
Ago/08	576.294	537.337	1,07
Set/08	604.806	557.201	1,08
Out/08	569.742	536.280	1,06
Total	7.038.971	6.407.169	-
Média (12 meses)	586.581	533.903	1,09

### Balanco hídrico e quantificação de perdas

Tendo como objetivo quantificar as perdas energéticas ( $P_E$ ) decorrentes das perdas de água no sistema de abastecimento de água, realizou-se um balanço hídrico simplificado, considerando o volume macromedido ( $V_{MACRO}$ ) nas captações e os volumes consumidos micromedidos ( $V_{MICRO}$ ). A subtração destes volumes fornece o volume de água perdido ( $V_P$ ), conforme método utilizado. Multiplicando-se o volume perdido pelo consumo específico ( $kWh/m^3$ ), obtém-se as perdas energéticas decorrentes das perdas de água. A figura 4 ilustra o balanço hidroenergético realizado.

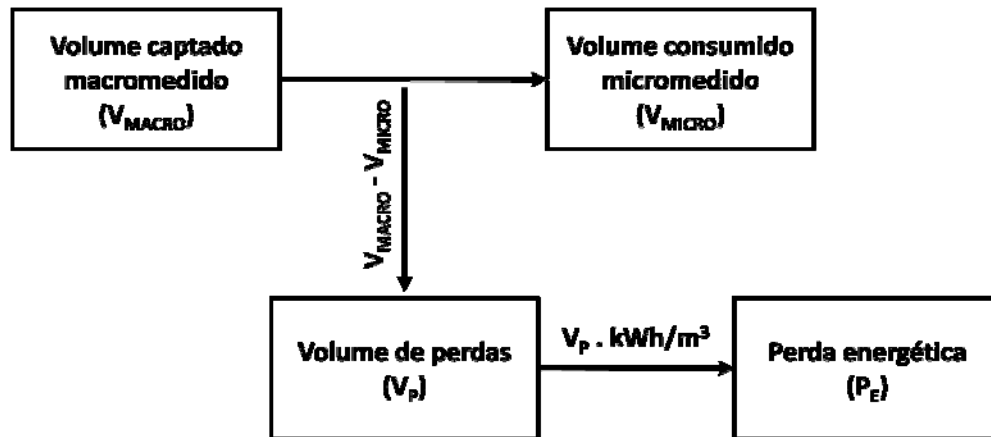


Figura 4 - Balanço hidroenergético simplificado do sistema de abastecimento de Lavras

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 11 apresenta os resultados do balanço hidroenergético realizado no sistema de Lavras:

Tabela 11 – Resultados do balanço hidroenergético do sistema de abastecimento de Lavras

MÊS ANO	VOLUME MACROMEDIDO ( $V_{MACRO}$ ) [m <sup>3</sup> ]	VOLUME MICROMEDIDO ( $V_{MICRO}$ ) [m <sup>3</sup> ]	VOLUME DE PERDAS [m <sup>3</sup> ]	PERCENTUAL DE PERDAS [%]	CONSUMO ESPECÍFICO [kWh/m <sup>3</sup> ]	PERDA ENERGÉTICA [kWh]
Nov/07	562.930,00	424.271,00	138.659,00	24,6%	1,35	187.189,65
Dez/07	511.289,00	398.245,00	113.044,00	22,1%	1,17	132.261,48
Jan/08	546.591,00	389.438,00	157.153,00	28,8%	1,04	163.439,12
Fev/08	522.640,00	404.196,00	118.444,00	22,7%	1,14	135.026,16
Mar/08	504.299,00	364.248,00	140.051,00	27,8%	1,08	151.255,08
Abr/08	551.226,00	366.126,00	185.100,00	33,6%	1,00	185.100,00
Mai/08	524.802,00	375.316,00	149.486,00	28,5%	1,09	162.939,74
Jun/08	538.903,00	372.735,00	166.168,00	30,8%	0,99	164.506,32
Jul/08	513.671,00	376.425,00	137.246,00	26,7%	1,09	149.598,14
Ago/08	537.337,00	355.713,00	181.624,00	33,8%	1,07	194.337,68
Set/08	557.201,00	385.380,00	171.821,00	30,8%	1,08	185.566,68
Out/08	536.280,00	397.070,00	139.210,00	26,0%	1,06	147.562,60
Total	6.407.169,00	4.609.163,00	1.798.006,00	-	-	1.958.782,00
Média	533.930,75	384.096,92	149.833,83	28,0%	1,10	163.231,89

Ainda que inferior ao índice médio de perdas de água da COPASA, SABESP E CEDAE, de 40% conforme apresentado no início do trabalho, o índice de Lavras, de 28,0%, demonstra o enorme potencial de economia de água no sistema. Em termos energéticos, o volume perdido corresponde a uma perda da ordem de 1.959 MWh. Avaliando a questão do ponto de vista monetário, pode-se estimar um custo energético anual de R\$ 722 mil reais decorrentes das perdas de água. Tal valor foi obtido considerando-se a tarifa B3 da CEMIG em novembro de 2009, de R\$ 0,36859 por kWh.

Deve-se destacar que tal montante financeiro poderia ser revertido na otimização do sistema, visando à redução das perdas de água. Além do ganho operacional e ambiental – uma vez que a redução de perdas de água representa uma diminuição da pressão sobre o manancial – os benefícios desta ação

trariam grandes vantagens financeiras à COPASA, reduzindo significativamente os custos de exploração e aumentando a margem de lucro da empresa.

## **CONCLUSÕES**

Os resultados obtidos no caso estudado ilustram o cenário típico dos sistemas de abastecimento de água no Brasil. Se por um lado, os altos índices de perda de água são preocupantes, por outro, percebe-se um enorme potencial de efficientização desses sistemas. As medidas de redução das perdas de água tem repercussões diretas no consumo de energia elétrica e, conseqüentemente, nas despesas de exploração das companhias/serviços autônomos, devendo ser priorizadas como ações estratégicas pelos gestores.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ALIANÇA PARA CONSERVAÇÃO DE ENERGIA. Água e energia: aproveitando as oportunidades de efficientização de água e energia não exploradas nos sistemas de água municipais. Washington: ALLIANCE, 2002.
- INSTITUTO REGULADOR DE ÁGUAS E RESÍDUOS. Indicadores de desempenho para serviços de abastecimento de água. Lisboa: IRAR, 2004.
- MINISTÉRIO DAS CIDADES. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: diagnóstico dos serviços de água e esgoto – 2007. Brasília: MCIDADES, 2009.
- PROGRAMA NACIONAL DE COMBATE AO DESPERDÍCIO DE ÁGUA. Guia prático para pesquisa e combate a vazamentos. Brasília: PNCDA, 2004.
- PROGRAMA NACIONAL DE COMBATE AO DESPERDÍCIO DE ÁGUA. Guias práticos: técnicas de operação em sistemas de abastecimento de água. Brasília: PNCDA, 2007.