

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

MANUAL PRÁTICO



Créditos

Trabalho elaborado no âmbito do contrato realizado entre a ELETROBRÁS/PROCEL e o consórcio EFFICIENTIA/FUPAI

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

Esplanada dos Ministérios Bloco "U" - CEP. 70.065-900 – Brasília – DF
www.mme.gov.br

Ministra

Dilma Rousseff

ELETROBRÁS/PROCEL

Av. Rio Branco, 53 - 20º andar - Centro - CEP 20090-004 - Rio de Janeiro – RJ
www.eletronbras.com/procel - procel@eletronbras.com

Presidente

Silas Rondeau Cavalcante Silva

Diretor de Projetos Especiais e Desenvolvimento Tecnológico e Industrial e Secretário Executivo do PROCEL

Aloísio Marcos Vasconcelos Novais

Chefe de Departamento de Planejamento e Estudos de Conservação de Energia e Coordenador Geral do Projeto de Disseminação de Informações de Eficiência Energética

Renato Pereira Mahler

Chefe da Divisão de Suporte Técnico de Conservação de Energia e Coordenador Técnico do Projeto de Disseminação de Informações de Eficiência Energética

Luiz Eduardo Menandro Vasconcellos

Chefe da Divisão de Planejamento e Conservação de Energia

Marcos de Queiroz Lima

Chefe de Departamento de Projetos Especiais

George Alves Soares

Chefe da Divisão de Desenvolvimento de Projetos Setoriais de Eficiência Energética

Fernando Pinto Dias Perrone

Chefe da Divisão de Desenvolvimento de Projetos Especiais

Solange Nogueira Puente Santos

EQUIPE TÉCNICA

Coordenador Geral

Marcos Luiz Rodrigues Cordeiro

Apoio Técnico

Bráulio Romano Motta / Marco Aurélio R. G. Moreira / Michel Gonçalves Pinheiro

CONSÓRCIO EFFICIENTIA/FUPAI

EFFICIENTIA

Av. Afonso Pena, 1964 – 7º andar – Funcionários – CEP 30130-005 – Belo Horizonte – MG
www.efficientia.com.br - efficientia@efficientia.com.br

Diretor Presidente da Efficientia

Elmar de Oliveira Santana

Coordenador Geral do Projeto

Jaime A. Burgoa / Túlio Marcus Machado Alves

Coordenador Operacional do Projeto

Ricardo Cerqueira Moura

Coordenador do Núcleo Gestor dos Guias Técnicos

Marco Aurélio Guimarães Monteiro

Coordenador do Núcleo Gestor Administrativo-Financeiro

Cid dos Santos Scala

FUPAI – Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria

Rua Xavier Lisboa, 27 – Centro – CEP 37501-042 – Itajubá – MG
www.fupai.com.br – fupai@fupai.com.br

Presidente da FUPAI

Djalma Brighenti

Coordenador Operacional do Projeto

Jamil Haddad *

Luiz Augusto Horta Nogueira *

Coordenadora do Núcleo Gestor Administrativo-Financeiro

Heloisa Sonja Nogueira

EQUIPE TÉCNICA

Apoio Técnico

Adriano Jack Machado Miranda

Maria Aparecida Morangon de Figueiredo

Micael Duarte França

Fotografia

Eugênio Paccelli

AUTORES

Marcelo Gaio Monachesi

Marco Aurélio Guimarães Monteiro

Co-autor: **Carlos Roberto Rocha**

* Professores da Universidade Federal de Itajubá

Apresentação

Criado em 1985, pelo Governo Federal, o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) é coordenado pelo Ministério de Minas e Energia e implementado pela ELETROBRÁS. O objetivo principal do PROCEL é contribuir para a redução do consumo e da demanda de energia elétrica no país, por meio do combate ao desperdício deste valioso insumo.

A ELETROBRÁS/PROCEL mantém estreito relacionamento com diversas organizações nacionais e internacionais cujos propósitos estejam alinhados com o citado objetivo. Dentre elas, cabe ressaltar o Banco Mundial (BIRD) e o Global Environment Facility (GEF), os quais têm se constituído em importantes agentes financiadores de projetos na área da eficiência energética.

Nesse contexto, o GEF, que concede suporte financeiro a atividades relacionadas com a mitigação de impactos ambientais, como o uso racional e eficiente da energia, doou recursos à ELETROBRÁS/PROCEL, por intermédio do BIRD, para o desenvolvimento de vários projetos. Dentre eles, destaca-se o projeto “Disseminação de Informações em Eficiência Energética”, concebido e coordenado pela ELETROBRÁS/PROCEL e realizado pelo Consórcio Efficientia/Fupai, com o apoio do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), que objetiva divulgar informações sobre tecnologias de uso eficiente de energia para os profissionais dos setores industrial, comercial, prédios públicos e saneamento, difundindo aspectos tecnológicos e operacionais que permitam reduzir o desperdício de energia elétrica.

O objetivo deste manual é instrumentalizar os interessados com informações úteis e práticas, capacitando-os para identificar oportunidades de redução de custos e de consumo de energia em seu sistema.

Sumário

INTRODUÇÃO	9
Parte I - PLANO DE AÇÃO	13
1 - CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA E DA INSTALAÇÃO ONDE ESTÁ INSERIDO	13
1.1 - Conhecimento de um sistema de bombeamento genérico	13
1.2 - Conhecimento do sistema de bombeamento específico da sua empresa	15
2 - IDENTIFICAÇÃO E SELEÇÃO DAS OPORTUNIDADES DE MELHORIAS	17
2.1 - Oportunidades para melhorar um sistema de bombeamento genérico	17
2.2 - Oportunidades para melhorar um sistema específico da sua empresa	20
3 - IMPLEMENTAÇÃO DAS AÇÕES DEFINIDAS	21
3.1 - Implementação de melhorias em um sistema de bombeamento genérico	21
3.2 - Implementação das ações definidas no sistema específico da sua empresa	21
4 - AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS E REINÍCIO DO CICLO DO PLANO DE AÇÕES	22
Parte II - OPORTUNIDADES PARA MELHORAR A EFICIÊNCIA	27
1 - IDENTIFICAÇÃO DAS OPORTUNIDADES NO USO FINAL DA ÁGUA	27
1.1 - Identificação dos fatores que afetam a eficiência no bombeamento	27
1.2 - Áreas de oportunidade para melhorar a eficiência no uso final da água	28
1.2.1 - Redução de perdas por vazamento	28
1.2.2 - Redução do desperdício de água	29
1.3 - Exemplos	30
2 - IDENTIFICAÇÃO DAS OPORTUNIDADES NA DISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA	31
2.1 - Identificação dos fatores que afetam a eficiência na distribuição da água	31
2.2 - Áreas de oportunidade para melhorar a eficiência na distribuição da água	31
2.2.1 - Redução da altura manométrica	31
2.2.2 - Redução de perda de carga pelo aumento do diâmetro da tubulação	32
2.2.3 - Melhoria da rugosidade e redução na perda de carga	36
2.2.4 - Aumento da capacidade dos reservatórios	42
2.2.5 - Uso de reservatórios de jusante e abastecimento em marcha	46

2.2.6 - Uso de mais de um reservatório	46
2.2.7 - Outras medidas	47
3 - IDENTIFICAÇÃO DAS OPORTUNIDADES NO BOMBEAMENTO DA ÁGUA	51
3.1 - Identificação dos fatores que afetam a eficiência no bombeamento da água	51
3.2 - Áreas de oportunidade para melhorar a eficiência no bombeamento da água ...	51
3.2.1 - Melhoria do rendimento da bomba	51
3.2.2 - Melhoria do rendimento do motor	59
3.2.3 - Redução do peso específico	60
3.2.4 - Redução da vazão recalçada	61
3.2.5 - Redução pela variação da velocidade (rotação da bomba)	62
3.2.6 - Associação adequada de bombas	64
3.2.7 - Eliminando os problemas de cavitação	73
3.2.8 - Evitando a recirculação	83
3.3 - Sugestões para identificação de oportunidades	83
4 - IDENTIFICAÇÃO DAS OPORTUNIDADES NO SISTEMA EM GERAL	84
4.1 - Automação	84
4.2 - Outras medidas	85
Parte III - FONTES DE CONSULTA	89
1 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
2 - LINKS ÚTEIS	90
3 - ÓRGÃOS E INSTITUIÇÕES	91
ANEXOS	93

Introdução

O uso de bombas de água é indispensável e, em consequência, o da energia elétrica utilizada para o acionamento dos motores que as fazem funcionar. Assim, se é difícil evitar a degradação ambiental pela exploração irracional dos recursos hídricos, uma importante contribuição nesse contexto consiste em reduzir ao máximo o uso irracional da energia, se não pela conscientização ambiental da necessidade de deixar para as futuras gerações um planeta em melhores condições de habitabilidade, ao menos para reduzir os custos dos serviços, que, em última análise, serão sempre pagos pela sociedade, não importando se o arranjo para a prestação desse benefício venha a ser patrocinado pelo Poder Público ou pelo setor privado.

Objetivo

Fornecer aos profissionais de empresas que possuem sistemas de bombeamento de água informações úteis e práticas, capacitando-os para identificar oportunidades de redução de custos e de consumo de energia em seu sistema.

Público alvo

Técnicos, engenheiros e participantes de Comissões Internas de Energia (CICE) em cujas empresas existam sistemas de bombeamento de água, consultores de engenharia e demais profissionais que trabalhem com esses sistemas.

Orientações gerais

Este Manual faz parte de um conjunto de publicações editadas pela Eletrobrás/Procel. Apresenta, de forma sucinta, dicas para reduzir custos e o consumo de energia. Simultaneamente, a Eletrobrás/Procel publica o livro "EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO", com conteúdo mais abrangente sobre este tema, para servir de material de consulta e suporte para aqueles profissionais que desejarem se aprofundar mais no assunto.

As oportunidades de eficiência energética apontadas neste Manual constituem um extrato dos conceitos e fundamentos apresentados na referida publicação. Assim, ao apresentar as informações neste Manual, procuraremos referenciar o texto original, caso o usuário queira obter mais informações sobre o assunto.

Procurando oferecer uma ferramenta de uso prático e útil, incluímos um CD contendo uma versão eletrônica deste Manual.

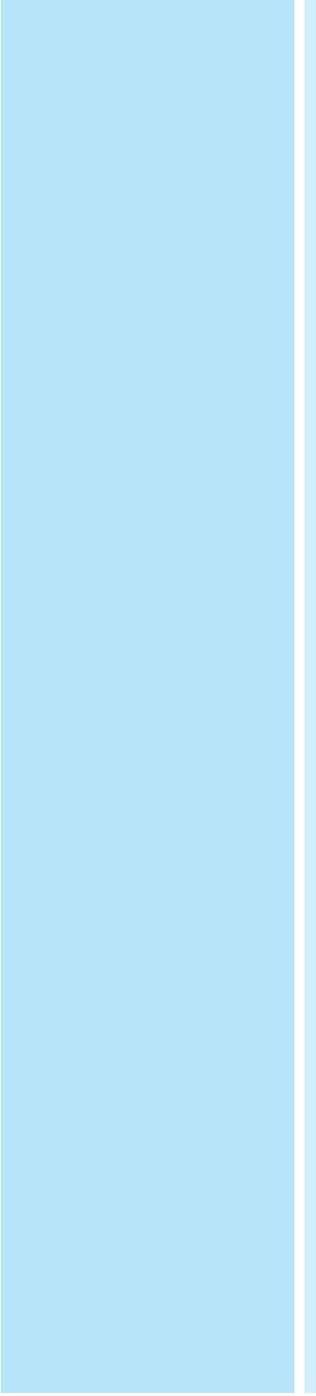
O CD contém, ainda, programas, textos, planilhas e tabelas de auxílio, que servem para complementar as informações e auxiliar no desenvolvimento de um programa de eficiência.

O Manual está dividido em quatro partes:

1. PLANO DE AÇÃO
2. OPORTUNIDADES PARA MELHORAR A EFICIÊNCIA
3. FONTES DE CONSULTA
4. ANEXO

Naturalmente, o foco do Manual será a parte 2, "Oportunidades para melhorar a eficiência".

Para facilitar e agilizar a consulta a este Manual, no anexo constam as grandezas e unidades de medida, os fatores de conversão e as fórmulas aqui utilizadas e no texto base ("EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO").



PARTE I
PLANO DE AÇÃO

PARTE I - PLANO DE AÇÃO

Para as empresas interessadas em melhorar a eficiência energética e o desempenho econômico de seu sistema de bombeamento, as etapas a seguir devem ser obedecidas.

1

CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA E DA INSTALAÇÃO ONDE ESTÁ INSERIDO

Os componentes de um sistema de bombeamento são: captação/bombeamento; tratamento; armazenagem; distribuição; e uso final. Esses componentes seguem o trajeto do fluido (água), desde a captação até os pontos de uso final.

1.1- Conhecimento de um sistema de bombeamento genérico

O conhecimento de um sistema de bombeamento genérico característico, com seus componentes básicos e as respectivas condições operacionais, pode facilitar a caracterização de um sistema de bombeamento em particular (por exemplo, o sistema da sua empresa).

A Figura I.1 apresenta um croqui de um sistema típico de bombeamento de água, com seus principais componentes.

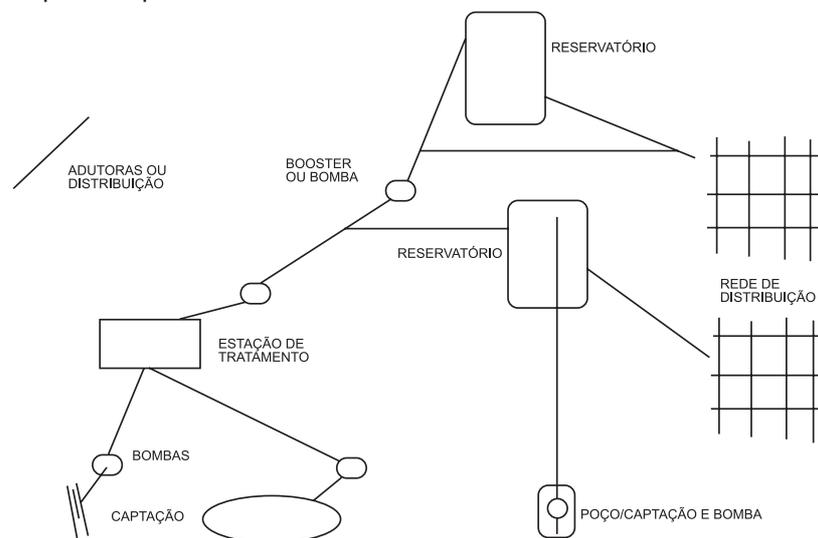


Figura I.1 - Sistema de abastecimento de água e seus componentes

Sistema de captação – Pode ser o leito de um rio, um reservatório, artificial ou não, ou um poço artesiano. Consiste de obras civis que direcionam a água para o sistema de bombeamento. Não consome energia após sua conclusão, mas, devido à sua posição (elevação) e características, pode afetar o consumo do sistema.

Sistema de bombeamento – Pode ser uma bomba ou um conjunto de bombas. É o sistema responsável pela maior parte do consumo de energia de todo o sistema de abastecimento de água. Pode localizar-se ao longo de todo o sistema, com o fim de bombear água bruta ou água tratada. No caso de “boosters” (bombeamento intermediário), serve como estação de transferência de energia potencial para a água, dando-lhe condição de atingir pressões ou alturas mais elevadas.

Sistema de tratamento – Local onde a água bruta é tratada, tornando-a adequada para o consumo. Nele estão localizados sistemas de mistura, limpeza, laboratórios e instalações administrativas que possuem equipamentos, de consumo de energia. Além desses equipamentos as bombas de água tratada podem estar localizadas nesse sistema.

Sistema de armazenagem – Consiste em reservatórios usados para regularizar o abastecimento. Conforme seu dimensionamento, auxilia na redução do consumo de energia em horários cujo consumo seja mais caro (horário de ponta); isto é, reduz o custo total da energia.

Sistema de distribuição – Formado por adutoras, que interligam os sistemas de captação e de tratamento com os reservatórios ou boosters. Enfim, interliga unidades da empresa, sem incluir as redes que abastecem os consumidores finais. Estas compõem o sistema de distribuição juntamente com as adutoras. Como consiste de tubos, válvulas, conexões e outros acessórios, não envolve consumo de energia, mas seu acabamento interno, posicionamento, comprimento, diâmetro e obstruções presentes influem decisivamente no dimensionamento dos sistemas de bombeamento.

Uso final – Representa o conjunto de equipamentos consumidores de água: torneiras, tanques, chuveiros, bacias sanitárias, lavadores, etc. É o ponto final do sistema de abastecimento, sobre o qual a empresa de abastecimento não tem controle. É exatamente sua demanda por água que determina o dimensionamento de todo o sistema de abastecimento e o consumo de energia.

• Balanço típico de energia

O conhecimento do balanço energético característico deste sistema contribui para a identificação das perdas que reduzem a eficiência do sistema. Também, fornece um ponto

de partida para reconhecer as oportunidades e selecionar e implementar ações de melhorias da eficiência. A Figura I.2 mostra um balanço de energia característico, com as perdas de um sistema de bombeamento e distribuição.

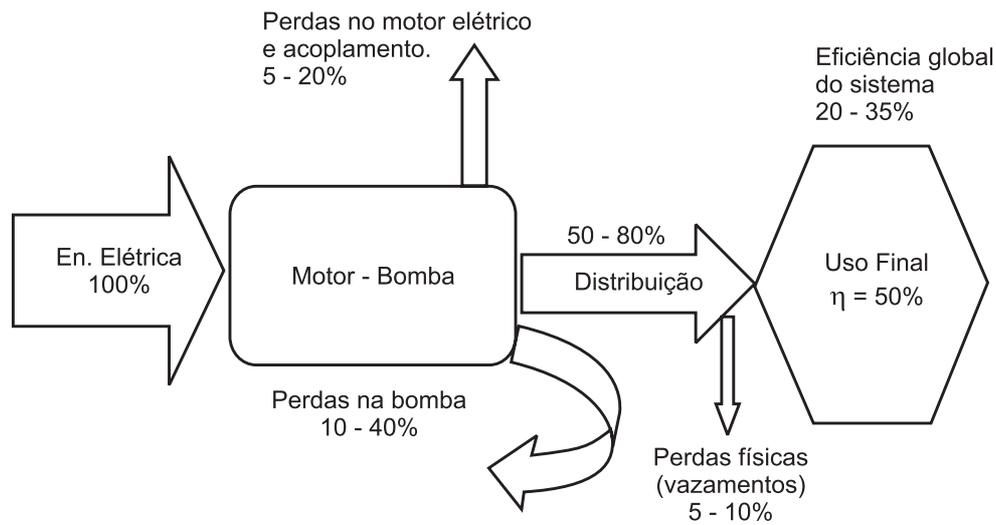


Figura I.2 - Diagrama de balanço de energia com as perdas do sistema

A Figura I.2 apresenta um balanço simplificado e considera apenas uma bomba no sistema. As eficiências das bombas são multiplicadas quando colocadas em série no sistema. Não foram consideradas as perdas comerciais provenientes de erros de medição, fraudes, etc.

1.2 - Conhecimento do sistema de bombeamento específico da sua empresa

Para caracterizar um sistema de bombeamento específico, sugerem-se os seguintes passos:

- Elaborar um diagrama de blocos das instalações da planta ou dos processos industriais, indicando o fluxo da água.
- Baseado no leiaute do sistema, indicar a localização de seus componentes e as condições operacionais nominais ou de projeto (elevações/alturas, pressões, vazões).
- Criar um perfil dos “parâmetros operacionais” (demanda de água, consumo de energia elétrica, vazões na captação/bombeamento e distribuição) do sistema ao longo do dia, semana, mês e ano, o que for necessário para entender o funcionamento do sistema e verificar sazonalidades ou não.

- d)** Levantar os dados reais (medições). A partir da instrumentação existente ou de medições instantâneas, verificar os valores reais dos parâmetros operacionais. Levantar o regime de funcionamento, os picos de carga, o consumo e as capacidades total e por período. Simultaneamente, deve-se contabilizar a população ou as unidades atendidas no período de medição. Documentar, por meio de impressos e fotos, a situação do momento.
- e)** Analisar os dados e estabelecer os valores de referência. Com as informações obtidas, estabelecer a linha de base ou condição de referência da situação presente da instalação. Criar índices relativos à produção ou consumo (por exemplo, m^3/kW por 100 m de elevação ou kWh/m^3), índices monetários (valor da produção / kWh, faturamento / kWh). Esses valores e índices serão usados no futuro para comprovar, ou não, o acerto nas medidas de eficiência implantadas.

Os **indicadores de eficiência energética** usuais nos serviços de abastecimento público são os de custo unitário da energia adquirida da concessionária (custo específico) e os que relacionam a energia consumida com o volume de água bombeado (consumo específico).

O primeiro, normalmente formulado como $\text{R}\$/\text{MWh}$, tem por finalidade aferir com que eficiência a empresa/serviço está adquirindo energia, levando em conta que para elevatórias a partir de um certo porte (potência instalada) as concessionárias de energia elétrica oferecem vantagens no preço para compromissos de desligamento ou redução de consumo em determinadas horas do dia e/ou do ano.

O segundo costuma ser expresso em kWh/m^3 (quilowatt hora por metro cúbico bombeado, ou metro cúbico produzido, ou, em alguns casos, por metro cúbico faturado). Este parâmetro mede o desempenho dos equipamentos de bombeamento do sistema em termos de rendimento, além da concepção do próprio sistema, uma vez que valores elevados deste indicador podem significar perdas de carga excessivas nas linhas de recalque ou má concepção de zonas de pressão (excesso de bombeamentos), dentre outras possibilidades. **Embora muito útil no acompanhamento em séries temporais de uma determinada elevatória ou de um determinado sistema, presta-se pouco à comparação entre sistemas de características físicas diferentes.** No caso de grandes alturas de recalque por insuficiência de mananciais em cotas favoráveis (situação cada vez mais comum no nosso país, infelizmente) não há como o indicador apresentar valor inferior a outro sistema em que as alturas sejam menores.

Outros indicadores importantes são o custo da energia / m^3 vendido e $\text{R}\$$ faturados / m^3 bombeado. Para este último índice, quanto maior o valor melhor o desempenho global.

Índices de referência (benchmarks) em sistemas de bombeamento devem ser cuidadosamente analisados, pois a localização, o porte da instalação, o sistema tarifário de

energia e a densidade do consumo os influenciam. Assim, o estabelecimento de um valor de, por exemplo, 0,6 kWh/m³, como um valor de referência, deve ser acompanhado de todas as condições que envolveram o seu cálculo.

Poderíamos definir uma eficiência energética do sistema se relacionássemos a somatória das energias necessárias para abastecer cada consumidor de um sistema com a energia efetivamente gasta, isto é:

$$\text{Eficiência do Sistema} = \frac{\gamma \cdot \sum (V_i \cdot H_i)}{E_T}$$

Em que:

γ é o peso específico da água transportada;

V_i é o volume de água abastecido ao consumidor i ;

H_i é a elevação ou altura onde é entregue a água do consumidor i ; e

E_T é a energia total consumida pelo sistema de abastecimento para atender o conjunto de consumidores.

Mas esse é um valor de difícil obtenção, devido à quantidade de consumidores e à necessidade de cadastrar a elevação de cada um deles.

2

IDENTIFICAÇÃO E SELEÇÃO DAS OPORTUNIDADES DE MELHORIAS

Quando se busca a melhoria da eficiência de um sistema de bombeamento específico, a principal etapa é a identificação das oportunidades.

2.1 - Oportunidades para melhorar um sistema de bombeamento genérico

Muitas oportunidades para melhorar a eficiência de sistema de bombeamento são comuns em muitos sistemas de abastecimento de água. Estas oportunidades podem ser classificadas de acordo com a parte do sistema na qual são implementadas. Oportunidades comuns de melhoria da eficiência para as áreas de bombeamento, distribuição e uso final de um sistema de abastecimento de água serão descritas na parte II deste Manual. As tabelas I.1 a I.3 apresentam um resumo delas.

Tabela I.1 - Oportunidades para melhorar a eficiência no uso final

OPORTUNIDADE	DESCRIÇÃO
Reduzir as perdas por vazamento.	Uso de válvulas redutoras de pressão. Setorização da rede de distribuição. Detecção mais rápida das perdas, mediante a automação e o controle da rede e a atuação para sua correção. Pesquisa de vazamentos planejada e freqüente.
Reduzir o desperdício de água.	Uso de equipamentos de baixo consumo de água. Campanhas educativas. Cadastro, capacitação e certificação de profissionais. Incentivo à reciclagem ou reaproveitamento. Campanhas de caça aos vazamentos.

Tabela I.2 - Oportunidades de melhoria da eficiência na distribuição

OPORTUNIDADE	DESCRIÇÃO
Reduzir a altura manométrica.	Reposicionamento ou divisão de reservatórios para atender por zona de pressão. Uso de mais de um reservatório.
Reduzir a perda de carga pelo aumento do diâmetro da tubulação.	Seleção econômica do diâmetro baseado no custo total (investimento inicial + custo operacional).
Melhorar a rugosidade e reduzir a perda de carga.	Uso de materiais adequados. Limpeza do interior dos tubos com "pig".
Deslocar o consumo de energia do horário de ponta.	Aumento da capacidade dos reservatórios.
Usar reservatórios de jusante e abastecimento em marcha.	Uso de variadores de velocidade nos motores das bombas. Adequação do fornecimento com o uso do reservatório, evitando o uso no horário de ponta.
Reduzir vazamentos.	Uso de válvulas e controladores de nível. Programas de inspeção, operação e manutenção.

Tabela I.3 - Oportunidades de melhoria da eficiência no bombeamento

OPORTUNIDADE	DESCRIÇÃO
Melhorar o rendimento da bomba.	Seleção adequada da bomba. Verificação do ponto de funcionamento e ajuste para a faixa de maior rendimento.
Melhorar o rendimento do motor.	Adequação do motor à carga da bomba. Uso de motores de alto rendimento.
Reduzir a vazão recalçada.	Construção de reservatórios por zona de pressão.
Reduzir pela variação da velocidade.	Uso de variadores de velocidade para acionamento de bombas que trabalham com variação de carga ao longo do dia.
Fazer a associação adequada de bombas.	Associação em série, paralela ou individual, procurando otimizar o ponto de funcionamento do sistema.
Eliminar os problemas de cavitação.	O NPSH disponível calculado deve ser superior em 20% e no mínimo em 0,50 m ao NPSH requerido pela bomba em todos os pontos de operação.
Evitar a recirculação.	Uso de anéis de desgaste ou outros dispositivos de vedação com as folgas corretas.

Tabela I.4 - Oportunidades de melhoria da eficiência no sistema em geral

OPORTUNIDADE	DESCRIÇÃO
Promover a automação.	Uso de controladores programáveis, pressostatos, timers, chave-boia, programas de gerenciamento da rede.
Fazer a adequação do contrato de energia.	Contratação de energia com base no sistema tarifário mais adequado ao regime de funcionamento e porte da empresa.
Reduzir o consumo próprio de água.	Eficientização dos sistemas de iluminação, climatização, equipamentos de tratamento e limpeza.

Tabela I.5 - Oportunidades de economia em sistema de bombeamento

ÁREAS PARA MELHORIA	ENERGIA ECONOMIZADA
Uso final da água	Até 70%
Redução de vazamentos	15%
Melhoria da rugosidade	15%
Melhoria do rendimento do motor	5%
Melhoria do rendimento da bomba	5%
Variadores de velocidade	27%

2.2 - Oportunidades para melhorar um sistema específico da sua empresa

Com o objetivo de identificar oportunidades de melhorar o sistema de bombeamento e de economizar energia, sugerem-se os seguintes passos:

- a)** Obter valores de referências (*benchmark*). Esses valores podem ser históricos ou de outras empresas com sistema semelhante. Cuidado com as condições de contorno, como alturas envolvidas, porte do sistema, tipo de tecnologia empregada e condições ambientais, que determinaram o consumo de referência. Isto é, não compare laranja com banana.

Apesar de o índice de perda no Brasil ser superior a 30%, considera-se que 15% seja aceitável, incluindo-se neste índice as perdas físicas e comerciais.

- b)** Estabelecer metas de redução. Não estabeleça metas para valores absolutos. Isto é, não se deve procurar reduzir kWh ou m³, mas, sim, índices específicos, como: kWh/m³ produzido (consumido) e custo da energia/m³.
- c)** Identificar as oportunidades de melhoria. (Para obter mais detalhes, consulte a parte II deste Manual).
- d)** Estabelecer as ações necessárias para converter uma oportunidade identificada em melhoria concreta ou realizada.
- e)** Levantar a relação custo/benefício para cada ação. Considerar os custos de investimento, manutenção e operacionais, e o ciclo de vida da medida. Compare com os benefícios tangíveis (redução de custos de energia, insumos e mão-de-obra) e qualitativos (impacto ambiental, melhoria da imagem, maior conforto e mais segurança). (Ver anexo B do

livro “EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO”)

- f)** Selecionar as ações a serem priorizadas. Inicialmente, estabeleça critérios e pré-requisitos compatíveis com a realidade da empresa, tais como: disponibilidade de recursos, prazo de implantação, influência sobre a produção ou serviço prestado e “patrocinadores”. Classifique as ações em: de pouco, médio ou alto investimento; com ou sem parada de produção; curto, médio ou longo prazo; abrangência (no uso final, na distribuição, recuperação e/ou na geração); aquelas que podem ser desenvolvidas por equipe própria ou por terceiros; complexas ou não; e de baixo ou alto impacto. A partir dos critérios e classificações, priorize e escolha as ações/medidas que serão implementadas, primeiramente.

3

IMPLEMENTAÇÃO DAS AÇÕES DEFINIDAS

3.1 - Implementação de melhorias em um sistema de bombeamento genérico

Como referência de implementação de melhorias, podem ser estudados casos publicados na literatura ou consultar os fornecedores de equipamentos e/ou componentes a serem utilizados sobre as melhores práticas a serem adotadas.

3.2 - Implementação das ações definidas no sistema específico da sua empresa

- a)** Planejar todas as atividades necessárias.
- b)** Confirmar a disponibilidade de recursos (materiais, financeiros, humanos e de tempo).
- c)** Implementar a medida.
- d)** Documentar as atividades e custos.
- e)** Medir as melhorias obtidas (medir o sucesso da implantação). Do mesmo modo que no início (1.c), faça o levantamento dos dados da nova situação, estabeleça novos índices e rendimentos, e ajuste os índices para as condições atuais, caso elas tenham se modificado ao longo da implantação da medida (aumento de produção, novos consumidores, época do ano, etc.).
- f)** Comparar com a meta estabelecida, justifique ou ajuste o que não estiver em conformidade.
- g)** Corrigir as dificuldades que surgiram.

4 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS E REINÍCIO DO CICLO DO PLANO DE AÇÕES

O resultado de qualquer ação implementada deve ser avaliado, e seu impacto no sistema deve ser analisado, determinando se a ação já pode ser considerada concluída. Depois reiniciar o ciclo do plano de ação para outras oportunidades identificadas.

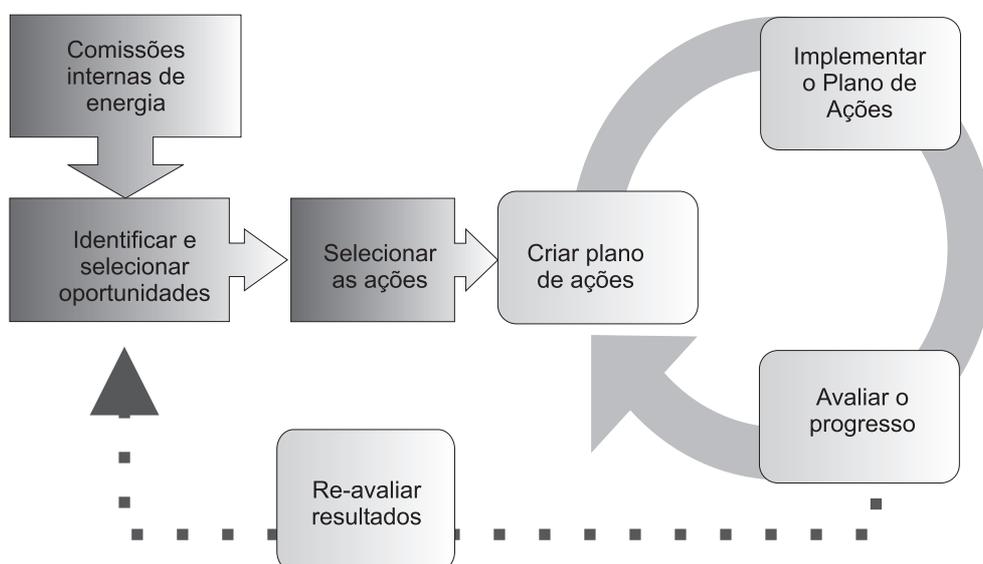


Figura I.3 - Ciclo de implementação do plano de ação

A Figura I.3 exemplifica o processo. Primeiramente, uma comissão deve ser criada para responsabilizar-se pelo gerenciamento do Programa de Eficiência Energética. Seu primeiro passo será identificar e selecionar as oportunidades.

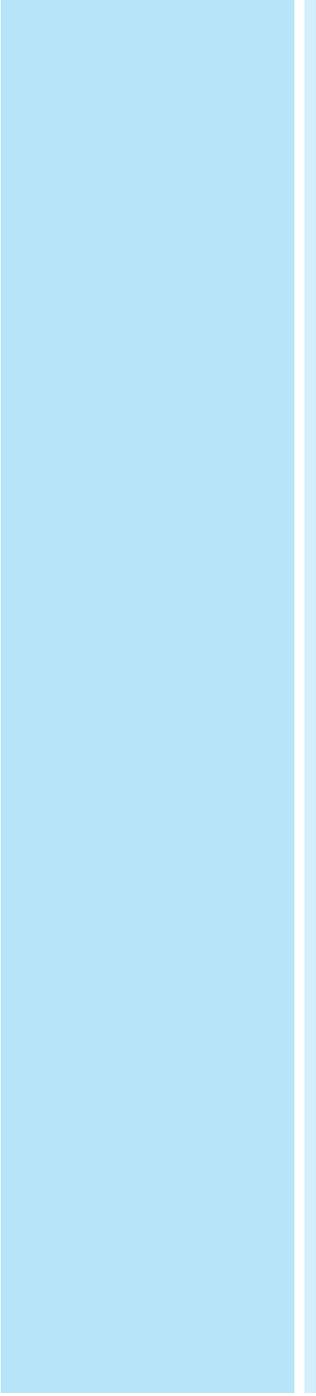
Identificadas as oportunidades a serem desenvolvidas, selecionam-se quais ações serão tomadas, criando-se um plano de ação para cada uma. O plano é implementado, e seus resultados são avaliados. Caso os resultados obtidos ainda não tenham atingido o esperado ou novas ações sejam identificadas, novo plano é criado, e o ciclo permanece até que todas as ações tenham sido executadas.

Então, recomeça-se a tarefa maior de identificar e selecionar oportunidades ainda não exploradas anteriormente.

• A abordagem sistêmica

A abordagem sistêmica analisa todos os lados do sistema, da demanda ao fornecimento, e como se interagem, essencialmente, transferindo o foco dos componentes individuais para a atenção no desempenho global do sistema. Muitas vezes, os operadores estão tão focados nas demandas imediatas dos equipamentos que não têm conhecimento de como os parâmetros do sistema afetam o equipamento. Similarmente, a abordagem comum da engenharia consiste em explodir (subdividir) o sistema em seus componentes básicos, ou módulos; otimizar a escolha (seleção) do projeto ou de seus componentes; e montar estes componentes para formar o sistema. Uma vantagem desta abordagem é que ela simplifica os problemas. Entretanto, uma desvantagem é que, freqüentemente, negligencia a interação entre os componentes. Por outro lado, a abordagem sistêmica avalia o sistema de forma global para determinar como as necessidades de uso final podem ser mais efetiva e eficientemente servidas.

O aperfeiçoamento e a manutenção do sistema de bombeamento no seu melhor desempenho requerem não somente a atenção nos componentes individuais, mas também a análise de ambos os lados do sistema, do suprimento e da demanda, e do modo como eles interagem. A aplicação da abordagem sistêmica, usualmente, envolve os tipos de ações relacionadas neste Manual.



PARTE II
**OPORTUNIDADES PARA
MELHORAR A EFICIÊNCIA**

PARTE II - OPORTUNIDADES PARA MELHORAR A EFICIÊNCIA

O foco deste Manual é a eficiência energética. Porém, ao se estudar ou planejar uma medida de efficientização em uma parte do sistema, os impactos nas demais partes devem ser avaliados, bem como as conseqüências sobre outros parâmetros, como mão de obra, outros insumos (químicos, por exemplo) e manutenção. Esses impactos devem ser quantificados e considerados nas avaliações econômicas.

Assim, o planejamento das ações deve ser sistêmico, tanto na abordagem de todo os componentes do sistema como na composição do grupo que irá estudar a oportunidade. Isto é, as áreas de engenharia, manutenção, produção, comercial e financeira devem estar representadas ou ser consultadas a respeito de qualquer intervenção no sistema.

Para a identificação de oportunidades de melhorar a eficiência energética e o desempenho econômico de sistema de bombeamento, este Manual sugere a metodologia descrita a seguir.

1

IDENTIFICAÇÃO DAS OPORTUNIDADES NO USO FINAL DA ÁGUA

Sugere-se 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, corre-se o risco de o bombeamento ficar sobredimensionado.

1.1 - Identificação dos fatores que afetam a eficiência no bombeamento

Ao se procurar identificar as oportunidades de eficiência energética, a atenção deve estar focada nas equações de potência e consumo de energia:

$$P = \frac{\gamma \cdot Q \cdot HMT}{\eta_b \cdot \eta_M} \quad \text{e} \quad C = P \cdot t$$

em que:

P - potência absorvida da rede elétrica;

γ - peso específico;

Q - vazão bombeada;
HMT - altura manométrica total;
 η_b - rendimento da bomba;
 η_M - rendimento do motor elétrico;
C - consumo de energia; e
t - tempo.

Verifica-se que são cinco os elementos interferentes no cálculo da potência elétrica, sendo que dois - o rendimento da bomba e o rendimento do motor -, influem de forma inversamente proporcional e os outros três - peso específico, vazão bombeada e altura manométrica total - afetam diretamente no resultado da potência necessária para realizar tal trabalho.

As ações empreendidas devem focar na redução de P, γ , Q, HMT e t, e no aumento de η_b e η_M . Isso implicará, ao menos a redução do consumo de energia e, espera-se, dos custos.

Como salientado na parte I, a eficiência deve ser medida por indicadores específicos; por exemplo, kWh/m³ faturado. Logo, as medidas a serem adotadas devem, nesse caso, ou reduzir o numerador dessa relação (kWh) ou aumentar o denominador (m³ faturado), semelhantemente para os demais indicadores.

Sem perder a visão sistêmica, e de acordo com as áreas relacionadas acima, descrevem-se, a seguir as principais oportunidades de melhorias no uso final da água.

1.2 - Áreas de oportunidade para melhorar a eficiência no uso final da água

1.2.1 - Redução de perdas por vazamento

Sendo a maioria dos sistemas de abastecimento de água bombeados, é óbvio que a redução da perda de água se traduz em reduzir o consumo de energia elétrica. O cruzamento das informações do volume disponibilizado para a rede de distribuição com a somatória dos volumes apurados nos medidores dos clientes permite, de forma sistemática, conhecer o valor dessa perda. No entanto, deve ser observado o seguinte ponto: nem toda perda é física, isto é, pode ser traduzida como vazamento ou consumo próprio. Uma parte importante deve-se à imprecisão dos próprios medidores taquimétricos (as normas NBR 8194 e 8009 da ABNT regulam esse tipo de medidor); outra parte deve-se aos consumidores clandestinos; e outra parte deve-se àqueles que "violam" o medidor, de várias formas. Assim, parte da perda, se corrigida ou minimizada, não representará redução de consumo de energia elétrica, mas redução ou aumento de faturamento do serviço de água considerado.

Para a reduzir as perdas físicas, sugerem-se as seguintes medidas:

- Reduzir a pressão da rede pelo uso de válvulas redutoras de pressão.
- Promover a setorização da rede de distribuição conforme faixa de HMT.
- Fazer a automação e o controle da rede, visando detectar mais rapidamente as perdas e providenciar sua correção.
- Realizar pesquisas de vazamentos de forma planejada e freqüente.

Para a reduzir as perdas não físicas, sugerem-se as seguintes medidas:

- Promover campanha de aferição de medidores.
- Realizar instalação de macromedição para setorizar as perdas e identificar áreas críticas.
- Fazer o monitoramento e cadastramento de consumidores em regiões de maiores perdas (favelas) e de consumidores desativados.

1.2.2 - Redução do desperdício de água

A água é usada para diversos fins (limpeza, alimentação, diluição). O questionamento da real necessidade daquela utilização ou daquele montante deve ser a fonte de inspiração para promover seu uso adequado e eficiente.

Empresas éticas e com responsabilidade social e ambiental devem apoiar e incentivar o uso racional desse recurso natural precioso, a água, principalmente se ela tiver sido tratada ou beneficiada, mesmo que isso signifique uma perda momentânea e de curto prazo de receita.

As empresas de saneamento devem se conscientizar de que a redução do desperdício, apesar de significar menos faturamento também implica redução do custo operacional, do investimento (ao custo marginal de expansão) em sistemas de abastecimento e de esgoto, e aumento do custo unitário da energia por consumidor, uma vez que, devido ao mecanismo tarifário, a água economizada é a última a ser consumida e a que tem a tarifa mais baixa.

Do ponto de vista do consumidor, toda água economizada representa mais poupança ou lucro, a despeito do benefício ambiental.

As principais medidas sugeridas são:

- Incentivar o uso de equipamentos de baixo consumo de água (bacias, duchas e válvulas com restritores ou reguladores de vazão).
- Promover campanhas educativas com orientações sobre procedimentos adequados, processos ou equipamentos alternativos, para reduzir o tempo de uso e/ou a quantidade usada.
- Indicar aos usuários bons profissionais para executarem projetos eficientes ou manutenção adequada, por meio de cadastros, capacitação e certificação desses profissionais.
- Promover a compatibilização do uso com a qualidade da água (água bruta, industrial, tratada), incentivando a reciclagem ou reaproveitamento.
- Realizar campanhas de caça aos vazamentos.
- Incentivar a captação de água pluvial e seu uso em substituição à água beneficiada.
- Estabelecer políticas tarifárias que penalizem o uso abusivo da água.
- Criar códigos ou leis de incentivo ao uso eficiente e restritivas a projetos e instalações ineficientes.
- Participar da criação ou alteração dos códigos de ocupação do solo com vistas ao uso adequado da água e da disposição da rede de distribuição.
- Realizar programas e projetos que visem a redução do consumo próprio de água, gerando menos esgoto.

1.3 - Exemplos

A redução do consumo final de água implica também a redução do tratamento de esgotos. Assim, considerando uma perda média de 20% nos sistemas de abastecimento do Brasil (valor conservador), a economia de 1 litro de água no consumo final evita a captação, bombeamento e tratamento de 1,25 litro, bem como reduz um litro de tratamento de esgoto.

Atualmente, existem bacias sanitárias com volume de descarga reduzido (6 l/descarga) que economizam de 40% a 50% da água tratada que as bacias usuais gastam (10 a 12 l/descarga).

Do mesmo modo, o uso de restritores ou reguladores de vazão em duchas e torneiras pode levar a reduções de até 70% do consumo de uma torneira/ducha normal, principalmente se há uma elevada pressão de carga (altura manométrica).

2

IDENTIFICAÇÃO DAS OPORTUNIDADES NA DISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA

Considerando o enfoque nos parâmetros que atuam na redução do consumo e potência, as oportunidades de efficientização nas instalações de distribuição de água são relacionadas a seguir.

2.1 - Identificação dos fatores que afetam a eficiência na distribuição da água

Os fatores que afetam a eficiência energética na distribuição da água são os mesmos apresentados no capítulo 1, isto é a equação de potência e consumo, particularmente as variáveis **vazão** e **altura manométrica**.

No anexo, apresentam-se as principais equações que relacionam essas variáveis, sendo as principais a equação da HMT ($= H_g + h + h_L$) e seus componentes (altura geométrica, perda de carga distribuída e perda de carga localizada).

Vê-se pelas equações que a perda de carga é proporcional ao estado de conservação da tubulação (rugosidade), ao comprimento e ao quadrado da vazão que flui por ela, e é inversamente proporcional ao diâmetro da tubulação elevado à quinta potência.

São essas variáveis que devem ser observadas no sistema de distribuição, procurando identificar quais ações podem ser empreendidas para que, otimizando seus valores, menos energia seja necessária no sistema de bombeamento.

2.2 - Áreas de oportunidade para melhorar a eficiência na distribuição da água

2.2.1 - Redução da altura manométrica

A altura manométrica total é composta de duas parcelas: a altura geométrica e a perda de carga. Pode-se atuar nas duas de forma diferenciada.

O exemplo mostrado na Figura II.1 ilustra a possibilidade de dividir-se a altura geométrica em duas partes, em que se procura racionalizar o porte da estação elevatória, restringindo-a à região alta e reduzindo-se a potência total do sistema. Esta solução implica uma elevatória de porte menor, com menor custo de implantação e menor custo operacional, em função

do custo com a energia elétrica. É uma atuação na parcela da altura manométrica total, denominada “altura geométrica”.

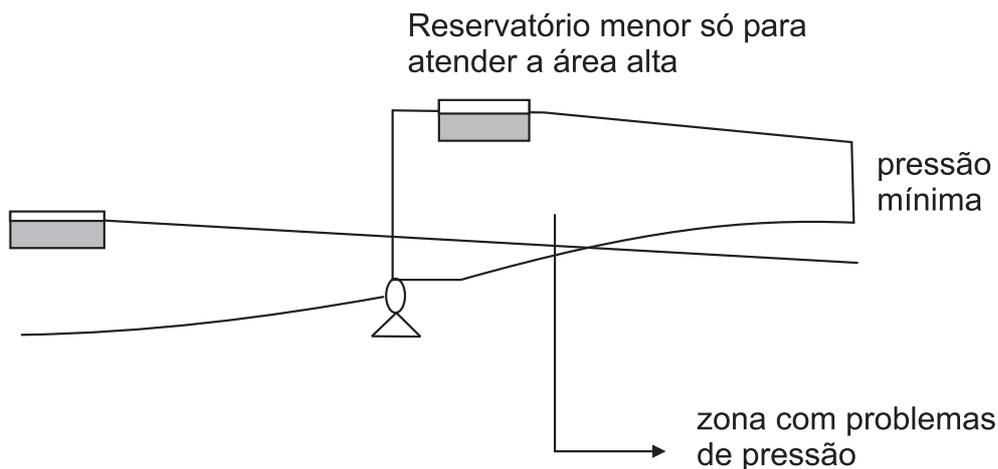


Figura II.1: Proposta de solução para abastecimento de uma zona alta

Para o estudo das outras oportunidades de atuação na altura manométrica total relacionadas com a parcela da altura manométrica, denominada “perda de carga”, é preciso “abrir” a expressão da perda de carga para o estudo de cada uma de suas componentes (ver fórmula no anexo).

2.2.2 - Redução de perda de carga pelo aumento do diâmetro da tubulação

É enorme a influência do diâmetro no valor da perda de carga, seja a distribuída, seja a localizada. Dessa forma, nos sistemas de bombeamento, em geral, cabe sempre estudar o arranjo mais econômico, pois para um diâmetro menor (de menor custo) corresponderá uma perda de carga maior, uma bomba “maior” (de maior custo) e um custo operacional maior, em função da maior potência necessária para vencer essa perda de carga.

Ao contrário, adotando-se um diâmetro maior têm-se menor perda, custos de aquisição dos conjuntos moto-bomba menores (menor potência, em função da menor perda de carga a ser “vencida”) e, igualmente, menor consumo de energia ao longo do alcance do projeto, tudo isso deverá compensar o maior custo da tubulação de maior diâmetro.

É preciso sempre, tendo o conhecimento de todos os fatores intervenientes, ter uma visão de conjunto do sistema de abastecimento de água para se chegar ao arranjo mais econômico, seja do ponto de vista da eficiência energética, seja do ponto de vista geral,

em que o custo com mão-de-obra ou eventuais automações também deverão ser considerados.

Exemplo: Estudo do diâmetro mais econômico para a substituição de uma adutora existente

Neste exemplo prático, procura-se mostrar o efeito do custo operacional com energia elétrica no estudo para definir o diâmetro mais econômico para uma determinada obra de reforço de uma adutora.

Este caso aborda uma pequena localidade, com cerca de 3000 habitantes, situada a uma distância de aproximadamente 12 km da fonte de produção. Embora o desnível geométrico seja praticamente nulo (a diferença de cota entre o nível da água no ponto de tomada e na chegada à Estação de Tratamento é de apenas 3 metros), esta carga não é suficiente para a vazão necessária, mesmo se utilizados diâmetros consideravelmente grandes. Em resumo, é necessário bombeamento.

A questão está em escolher um “par” de conjunto moto-bomba e o diâmetro da adutora que será substituída de modo a produzir o menor custo econômico durante a vida útil do sistema projetado - no caso, de 30 anos.

A escolha do conjunto moto-bomba e do diâmetro é feita por meio da sobreposição das curvas de sistema e de bomba. Esta seleção não será aqui apresentada, por constar no livro texto.

O que interessa, no caso, é que os conjuntos selecionados têm potências diferentes para trabalhar nos pontos de operação correspondentes às curvas de sistema para as tubulações de 100 mm, 150 mm e 200 mm, que foram as alternativas escolhidas a princípio.

De acordo com a projeção populacional (pop), o número de habitantes (hab), o consumo per capita (cpc), em l/hab.dia, e o coeficiente do dia de máximo consumo (k1), calcula-se a demanda máxima diária para o final de plano (Dmax), em m³/dia. Foram selecionados os conjuntos possíveis.

$$D_{max} = pop \cdot k1 \cdot cpc / 1000$$

Para cada conjunto selecionado capaz de atender à produção no último ano do projeto (final de plano) do dia de maior consumo, verifica-se o ponto de funcionamento em relação à curva de sistema para cada um dos diâmetros inicialmente selecionados, tomando-se como vazão de funcionamento a correspondente à demanda média diária. Com esse ponto, lê-se, na própria curva fornecida pelo fabricante, o valor do consumo de energia elétrica, função do rendimento da bomba e do motor a ela associado.

Tendo-se a capacidade de produção (ponto de funcionamento) diária para cada situação, basta calcular o tempo de funcionamento médio para cada ano (função da demanda média diária e da capacidade de produção).

Com esse valor, e de acordo com a forma de tarifação selecionada para a elevatória, calcula-se o custo da energia elétrica para cada ano do projeto. Neste caso, tratando-se de um consumo baixo, a única forma de tarifação possível é a da classe B-3.

Para essa série de valores, calcula-se o Valor Presente Líquido (VPL) desse “fluxo de caixa”, que, somado ao custo dos investimentos iniciais (material da adutora, obra de assentamento e custo do conjunto moto-bomba), dará a opção mais econômica do projeto.

A Tabela II.1 mostra a metodologia para a determinação do custo médio anual com energia elétrica e o fluxo para o cálculo do valor presente líquido:

Tabela II.1: Determinação do custo médio anual com energia elétrica e o fluxo para o cálculo do VPL

VARIÁVEL	PERÍODO					
	2005	2006	2007	2008	....	2034
Ano	2005	2006	2007	2008	....	2034
População	2.622	2.687	2.755	2.823	....
Consumo percapita (l/habxdia)	125	125	125	125	....
Demanda média diária (m ³ /dia)	327,75	335,875	344,375	352,875	....
K1	1,2	1,2	1,2	1,2	....
Demanda máxima diária (dia de máximo consumo – m ³ /dia)	393,3	403,05	413,25	423,45	....
Cap. Nominal bomba alt 1 (m ³ /dia)	636,77	636,77	636,77	636,77	....
Cap. Nominal bomba alt 2 (m ³ /dia)	640,22	640,22	640,22	640,22	....
Cap. Nominal bomba alt 3 (m ³ /dia)	691,2	691,2	691,2	691,2	....
Func. Média (horas/dia) alt. 1	12,35	12,66	12,98	13,30	....
Func. Média (horas/dia) alt. 2	12,29	12,59	12,91	13,23	....
Func. Média (horas/dia) alt. 3	11,38	11,66	11,96	12,25	....
Consumo (Kwh/ano) alt 1	75.703	77.580	79.543	81.507	....
Consumo (Kwh/ano) alt 2	9.014	9.237	9.471	9.705	....
Consumo (Kwh/ano) alt 3	1.080	1.107	1.135	1.163	....
Custo (R\$/ano) alt. 1	29.137,00	29.859,32	30.614,97	31.370,62	....
Custo (R\$/ano) alt. 2	3.469,31	3.555,32	3.645,29	3.735,27	....
Custo (R\$/ano) alt. 3	415,67	425,97	436,75	447,53	....

Repetindo-se os cálculos para os anos subseqüentes, calcula-se o VPL para cada alternativa (seqüência de valores em cada linha). Adicionando-se ao VPL do custo de energia elétrica o custo do material, obra e bombas (investimento inicial), pode-se, enfim, comparar as alternativas e fazer a opção pela mais econômica.

A Tabela II.2 mostra os valores desse caso específico, indicando como a opção mais econômica do ponto de vista da eficiência energética a tubulação de 150 mm para essa linha adutora.

Tabela II.2: Escolha da opção mais econômica do ponto de vista da eficiência energética

Alternativa	Alt. 1 (100 mm)	Alt. 2 (150 mm)	Alt. 3 (200 mm)
VPL - Energia	R\$ 272.682,25	R\$ 32.467,70	R\$ 3.890,07
Custo Obra	R\$ 153.500,00	R\$ 185.300,00	R\$ 207.800,00
Custo Material	R\$ 230.000,00	R\$ 394.000,00	R\$ 638.280,00
Custo Bomba	R\$ 10.000,00	R\$ 3.000,00	R\$ 1.200,00
Total	R\$ 666.182,25	R\$ 614.767,70	R\$ 851.170,07

O que se observa é que, a princípio, poder-se-ia optar pela tubulação de menor diâmetro, em função do seu custo mais baixo. No entanto, quando se leva em conta o custo operacional (neste caso, o custo da energia elétrica), a situação muda, e a opção mais econômica passa a ser uma tubulação com custo inicial mais elevado.

Na planilha apresentada, estão mostrados apenas os principais custos interferentes nessa decisão. Considerando o porte pequeno da elevatória, os custos com a construção foram os mesmos para as três alternativas.

2.2.3 - Melhoria da rugosidade e redução na perda de carga

A rugosidade interna, ou o estado de conservação da tubulação de recalque, influencia a perda de carga distribuída na altura manométrica total e, conseqüentemente, na potência elétrica que compõe o consumo de energia. Quanto maior a rugosidade, maiores as perdas e o consumo de energia para o transporte da água. Os materiais que constituem a tubulação influenciam a rugosidade.

Em linhas gerais, podem-se separar os tubos em: metálicos e não-metálicos. Os primeiros (aço, aço galvanizado e ferro fundido), em geral, são utilizados quando se trabalha com pressões maiores ou quando se trabalha com diâmetros de maior dimensão (caso do aço). Caso contrário, eles não concorrem em preço com os não-metálicos. Enquanto os tubos de aço não têm revestimento interno, as tubulações de ferro fundido são, normalmente, cimentadas internamente. Encontram-se muitas linhas antigas de tubulações de ferro fundido sem cimentação, o que lhes confere uma rugosidade maior.

As tubulações não-metálicas, normalmente, não têm qualquer revestimento, uma vez que a característica do material (bastante liso) já lhes confere um valor de "C" significativamente

alto (da ordem de 140 – PVC ou 150 PEAD e outros). Apareceram no mercado, mais recentemente, tubulações de PVC revestidas com fibra de vidro cuja característica hidráulica assemelha-se à do PVC comum.

Exemplo: Redução da rugosidade interna de uma adutora, pela utilização de PIG

No caso ora relatado, as características geométricas da adutora para o traçado das curvas do sistema estão na Tabela II.3

Tabela II.3: Características geométricas da adutora para traçado das curvas do sistema

NÍVEL DA ÁGUA (NA) NA SUCÇÃO		NA – RESERVATÓRIO	ALTURA GEOMÉTRICA - HG	
Mínimo	Máximo		Máximo	Mínimo
232,70	234,46	327,90	95,20	93,44

Essa linha adutora era formada por uma tubulação de 400 mm, com 3.425 metros de extensão. As perdas localizadas na vazão de projeto não passavam de 1,5 m.c.a., razão por que não estão explicitadas aqui, considerando a altura geométrica de quase 100 metros.

Após alguns anos de uso, em função da característica química da água no local, o coeficiente de rugosidade foi diminuindo, chegando a um valor extremo de "C" igual a 78, quando a operação de limpeza foi executada. Com esse valor de "C", a curva do sistema está apresentada na Figura II.2.

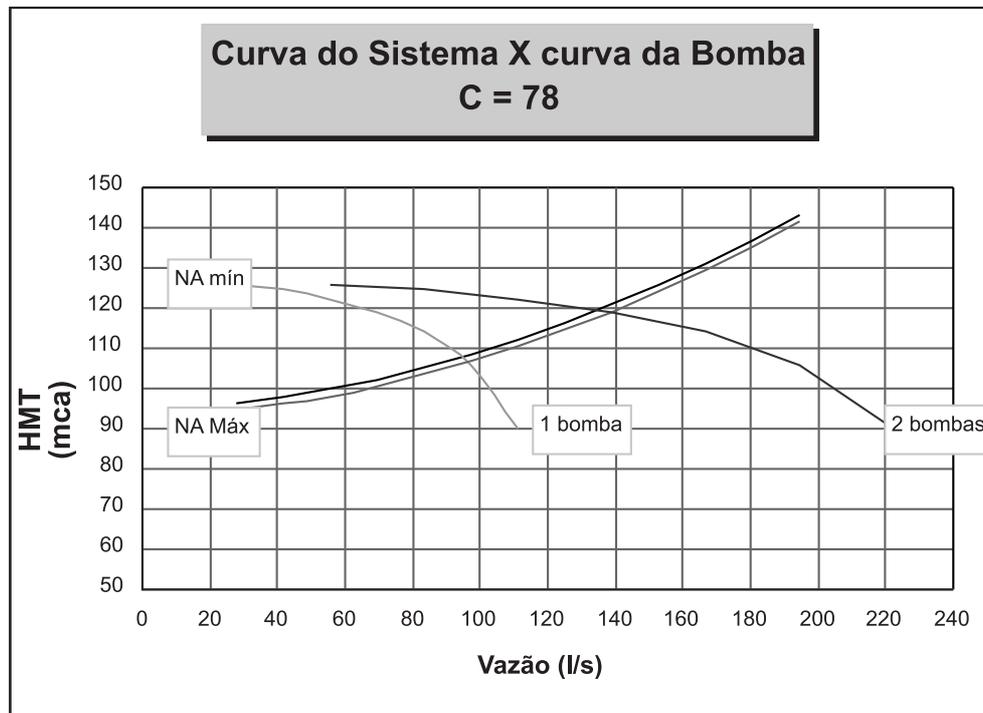


Figura II.2: Curva do sistema x curva da bomba (c=78)

A estação elevatória funcionava com dois conjuntos Worthington 6-L13, operando simultaneamente, com um de reserva. A curva dessa bomba está na Figura II.3.

As curvas de sistema e a curva da associação das duas bombas em paralelo para este valor de C (78) estão mostradas na Figura II.2.

Pelo diagrama, observa-se que a vazão do sistema para esse valor de C não passava de cerca de 140 l/s, correspondendo a aproximadamente 70 l/s por bomba, trabalhando cada uma na faixa de rendimento bastante baixo da ordem de 68%.

Após a limpeza da tubulação, através da passagem do PIG, o coeficiente "C" medido em campo passou para o valor de 126, passando a vazão média do sistema para cerca de 175 l/s, como mostrado na Figura II.4.

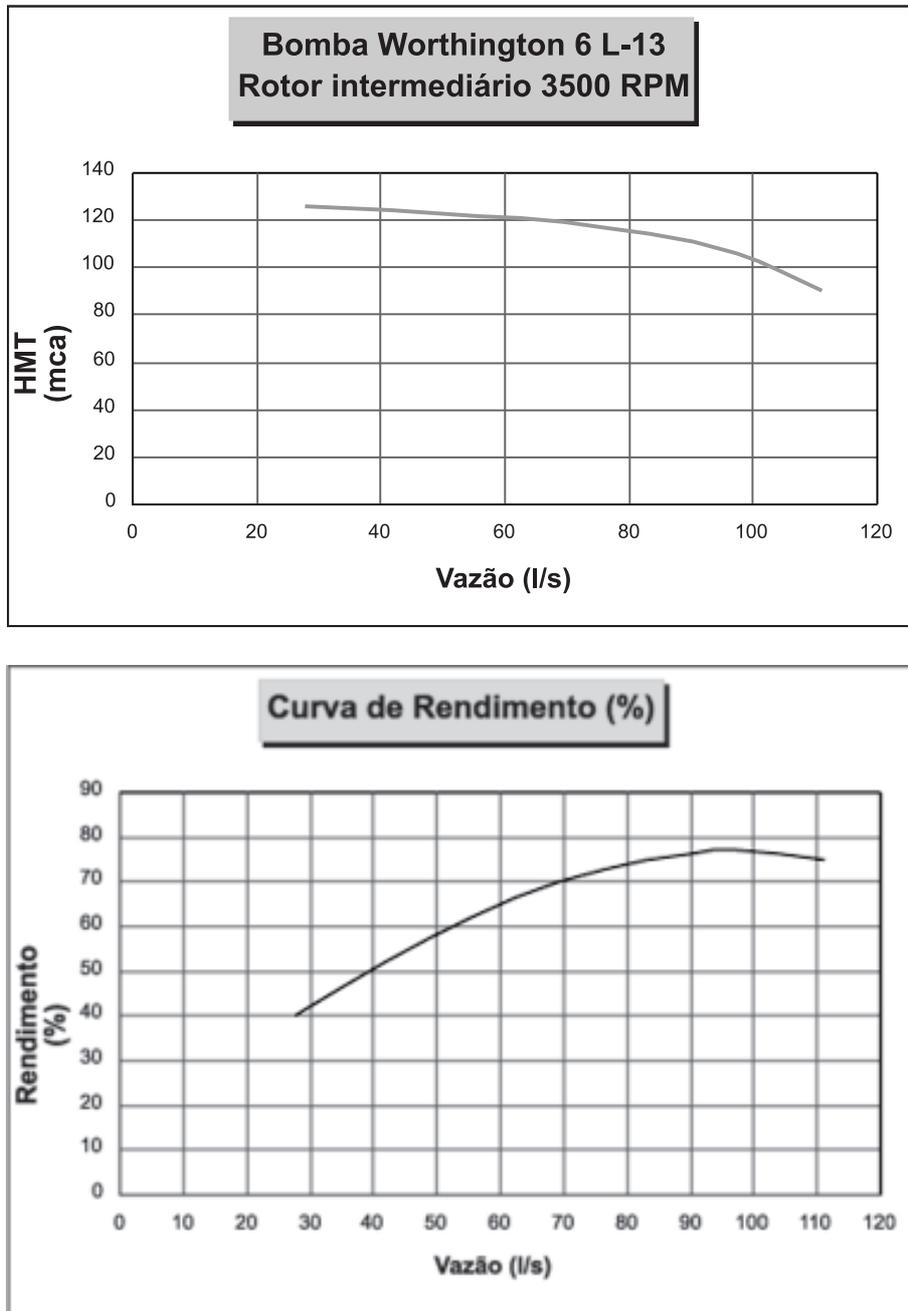


Figura II.3: Curvas de dois conjuntos operando simultaneamente, com um de reserva

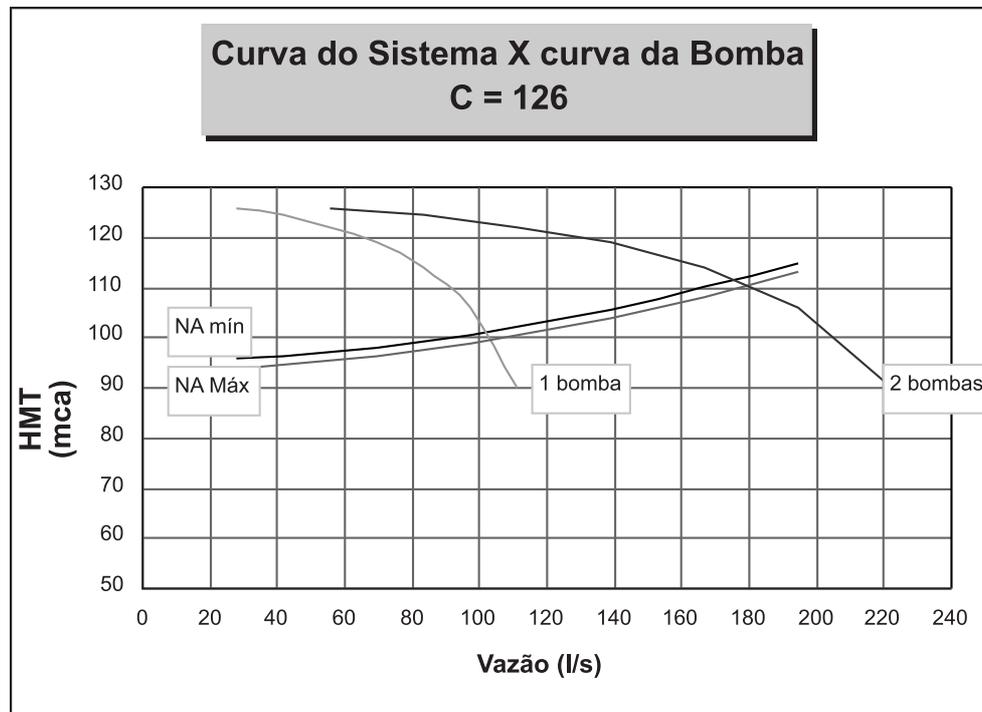


Figura II.4: Curva do sistema x curva da bomba (c=126)

Para esse ponto de operação (cada bomba contribuindo com cerca de 87,5 l/s), o rendimento de cada bomba passou a ser de aproximadamente 75%, valor lido no gráfico de rendimento da bomba deste sistema.

Em termos de economia energética, como depois de limpa a tubulação a bomba passou a trabalhar num ponto mais “à direita” na curva isso significa uma potência requerida maior.

Seja P1 a potência para o valor de “C” igual a 78 e P2 a potência requerida após a limpeza (C = 126), consideremos as duas situações, antes e depois da passagem do PIG.

Tabela II.4: Simulação do rendimento de cada bomba

Grandeza	C = 78 situação (1)	C = 126 situação (2)	Varição (2)/(1)
Vazão	70	120	1,25
Altura	120	112	0,93
Rendimento da Bomba	68	75	1,10
Rendimento do Motor	-	-	-

Admitindo que a variação no rendimento do motor não é significativa, a potência requerida na situação de adutora limpa (P_2) pode ser expressa em função da potência requerida na situação de adutora com rugosidade alta, da seguinte forma:

$$P_2 = \rho \times \frac{1,25 \times Q_1 \times 0,93 \times H_1}{1,10 \times \eta_{b1} \times \eta_m} = \frac{1,25 \times 0,93}{1,10} \times P_1 = 1,057 \times P_1$$

Isto é, a bomba passou a trabalhar em um ponto que requer uma potência ligeiramente superior (5,7%). Em compensação passou a bombear uma vazão 25% superior, fazendo com que o consumo específico (kWh/m³) reduzisse em quase 15%, para um mesmo tempo de funcionamento.

$$\frac{P_2}{Q_2} = \frac{1,057 \times P_1}{1,25 \times Q_1} = 0,85 \times \frac{P_1}{Q_1}$$

Resumindo: A operação de limpeza, que durou aproximadamente 12 horas, consumindo apenas equipamento e pessoal do próprio sistema, propiciou uma **economia de energia** para os meses que se seguiram de **15%**.

É importante ressaltar que no caso de bombeamento de água para abastecimento público a paralisação de algumas horas para a realização de um determinado serviço não implica perda de faturamento na mesma proporção, pois os clientes, quando avisados, procuram acumular água para uso imediato em vasilhas, postergando outros usos para quando o sistema voltar à normalidade. Os próprios clientes fazem um deslocamento do consumo do dia paralisado para as horas imediatamente anteriores à paralisação e para o dia posterior, não representando assim uma perda de faturamento que devesse ser considerada no custo da operação, que se resume, basicamente, no custo do PIG.

Se do ponto de vista hidráulico é vantajoso obter maior vazão em função de uma menor perda de carga, do ponto de vista energético devem-se observar as características do equipamento, que pode não estar mais nas proximidades do ponto de melhor rendimento.

2.2.4 – Aumento da capacidade dos reservatórios

O dimensionamento dos reservatórios é um dos fatores cruciais para uma boa economia energética, pois é com base na sua operação que se podem modular cargas ou utilizar a estação de bombeamento nos horários mais favoráveis, evitando as horas de pico. Não se trata de uma redução do consumo de energia, mas, apenas, de seu deslocamento para horários em que o custo da energia é mais barato.

Considerando a variação diária da demanda (variação no ciclo de 24 horas), os reservatórios devem ser capazes de armazenar um volume suficiente para fazer face aos horários em que a demanda é maior do que a capacidade de bombeamento.

Com o auxílio dos simuladores hidráulicos, podem-se “ensaiar” paralisações do bombeamento e verificar como o sistema se comporta analisando a conveniência da realização de investimentos em aumento de capacidade de reserva ou aumento de capacidade de bombeamento, de modo a otimizar o sistema. Em tese, um reservatório pequeno implica uma estação de bombeamento para uma vazão grande. Ao contrário, a um bombeamento de vazão menor deve corresponder um reservatório de maior capacidade, de modo que este não esvazie enquanto a demanda está maior que a oferta.

Exemplo: Uso de reservatório para a retirada de carga do horário de ponta

O objetivo desta operação é racionalizar a utilização de demanda de potência no horário de ponta na unidade do sistema de produção de água tratada EEAB / EEAT I (Estação Elevatória de Água Bruta / Estação Elevatória de Água Tratada) e Booster (Unidade de pressurização) de uma cidade. Consiste em implementar a capacidade adicional de reserva de água tratada, fazendo uso da ociosidade das instalações de bombeamento durante as horas fora de ponta do sistema elétrico e armazenando, nestes horários, volumes de água a serem distribuídos durante o horário de ponta, sem a utilização do bombeamento de modo a reduzir o custo de energia elétrica.

O projeto compreende, basicamente:

- implantação de reservatório de 300 m³; e
- redução da demanda de potência no horário de ponta na unidade consumidora

denominada EEAB/EEAT 1 e no Booster, atendidos em 13,8 kV.

Situação anterior

- EEAB - dois motores de 8,54 kW, sendo uma de reserva, funcionando em sistema de rodízio;
- EEAT-1 - dois motores de 106,72 kW, sendo uma de reserva, funcionando em sistema de rodízio;
- EEAB/EEAT-1 – funcionamento, em média, de 0,91 hora/dia no horário de ponta e 13,9 horas/dia no horário fora de ponta;
- a capacidade de reservação à montante do booster era de 600 m³, insuficiente para atender simultaneamente à região e ao booster, sem que o sistema funcionasse no horário de ponta;
- as elevatórias funcionam automatizadas com o reservatório;
- Booster - dois motores de 51,23 kW, sendo um de reserva, funcionando em sistema de rodízio, vazão de 33 l/s;
- funcionamento, em média, de 1,53 hora/dia no horário de ponta;
- funcionamento, em média, de 13,20 horas/dia no horário fora de ponta;
- a reservação atual na área atendida pelo booster é de 366,5 m³, insuficientes para suprir a demanda nos horários de ponta; e
- o booster está automatizado com os reservatórios.

Situação posterior

- As EEAB e EEAT-1 e o booster não funcionam no horário de ponta.
- Com o booster deixando de funcionar no horário de ponta, automaticamente, a água do reservatório de 600 m³ não é recalçada e, conseqüentemente, não são ligados os conjuntos de moto-bombas das EEAB e EEAT-1.
- O sistema continua automatizado.

Cálculo do volume de reservação

- volume = 1,53 hora x 3.600 segundos x 33 l/s = 181.764 litros. Foi projetado o crescimento vegetativo, para 10 anos, de 22,78%;
- volume necessário = 1,2278 x 181.764 litros = 223.169 litros; e
- como se trata de uma região com grandes possibilidades de crescimento, optou-se pela implantação de um reservatório de 300.000 litros ou 300m³; e o booster mantém-se automatizado com os reservatórios.

Os principais resultados são listados a seguir:

Para o sistema elétrico:

- redução de 163 kW de potência no horário de ponta;
- transferência de 47,4 MWh/ano de consumo de energia elétrica do horário de ponta para o horário fora de ponta; e
- redução de 1 MWh/ano, em função de melhoria do rendimento dos conjuntos motobombas.

Cálculo dos resultados

Para o cálculo comparativo do consumo de energia nas duas situações foi feito um levantamento de cargas, que permitiu as seguintes conclusões:

a) Redução de demanda no horário de ponta

Para chegar a esse valor de demanda, tomou-se por base a média dos valores de demanda registrada dos últimos seis meses.

- demanda atual da EEAB/EEAT 1: 112 kW;
- demanda atual do Booster: 51 kW;
- demanda atual total: 163 kW; e
- demanda futura: 0 kW.

⇒ Redução de demanda na ponta: 163,0 kW

Economia de energia projetada com a melhoria da eficiência dos conjuntos moto-bombas, em função do melhor carregamento dos mesmos: 1 MWh/ano (estimativa)

Modulação do consumo mensal

Considerando que o projeto, por meio da implantação de uma capacidade de reservação adicional de 300 m³, usando a ociosidade das instalações de bombeamento durante as horas fora de ponta do sistema elétrico, armazena neste horário a água tratada a ser distribuída durante o horário de ponta, sem a utilização do bombeamento. Isso acarreta uma transferência de parte do consumo de energia elétrica do período de ponta para o período de fora da ponta.

b) Consumo na ponta

Booster

- Número de horas de operação por ano no horário de ponta: 403,9 h/ano.
- Demanda dos conjuntos moto-bombas: 51 kW = 0,051 MW.
- Consumo anterior no horário de ponta: $403,9 \times 0,051 = 20,59$ MWh/ano.
- Consumo posterior no horário de ponta: 0 MWh/ano.

EEAB/EEAT I

- Número de horas de operação por ano, no horário de ponta: 240,24 h/ano.
- Demanda dos conjuntos moto-bombas: 112 kW = 0,112 MW.
- Consumo anterior no horário de ponta: 26,9 MWh/ano ($240,24 \times 0,112 = 26,9$ MWh/ano).
- Consumo posterior no horário de ponta: 0 MWh/ano.

Consumo total no horário de ponta: 47,4 MWh/ano (20,59MWh/ano + 26,9MWh/ano)

⇒ Redução de consumo na ponta: 47,4 MWh/ano

c) Consumo fora da ponta

Booster

- Número de horas de operação por ano no horário fora de ponta: 4.752 h/ano.
- Demanda dos conjuntos moto-bombas: 51 kW.
- Consumo fora do horário de ponta: $4.752 \times 0,051 = 242,35$ MWh/ano.

EEAB/EEAT I

- Número de horas de operação por ano no horário de ponta: 4924 h/ano.
- Demanda dos conjuntos moto-bombas: 112 kW = 0,112 MW.
- Consumo anterior no horário de ponta: $4.924 \times 0,112 = 551,49$ MWh/ano.

Consumo total no horário fora de ponta: 793,84 MWh/ano (242,35 + 551,49)

Economia de energia com a melhoria da eficiência dos conjuntos moto-bombas, em função do melhor carregamento dos mesmos: 1 MWh/ano.

Consumo posterior fora do horário de ponta: 840,24 MWh/ano (793,84 + 47,4 -1)

Transferência de consumo do horário de ponta para o horário fora de ponta = 840,24MWh/ano - 793,84 = 46,4 MWh/ano

⇒ Transferência de consumo: 46,4 MWh/ano

Observação: É importante ressaltar que o grande ganho do projeto está na retirada total de demanda no horário de ponta e na transferência de parte do consumo de energia do horário de ponta para fora de ponta.

d) Custos e benefícios

- Custo total = R\$ 150.000,00.
- Diferença tarifária (ponta - fora de ponta) = 110 R\$/MWh.
- Tarifa de ponta = 36 R\$/kW.
- Benefício anual = 46,4 x 110 + 163 x 36 x 12 = R\$ 75.520,00.
- Retorno simples = 2 anos.
- VPL (taxa = 12%, 10 anos) = 247.057,896.
- TIR = 49%.

2.2.5 - Uso de reservatórios de jusante e abastecimento em marcha

Um arranjo muito comum em projetos com vistas à obtenção de economia consiste na utilização de reservatórios de jusante ou de sobra. São reservatórios dimensionados para receber o excedente de consumo durante o período em que a produção o supera e para abastecer quando o consumo supera a produção. A diferença básica para o reservatório de montante, mais comum entre nós no Brasil, é que o consumo se dá entre o bombeamento e a reservação. Isto é, a bomba trabalha com o ponto de funcionamento móvel, percorrendo sua curva característica conforme a demanda aumenta ou diminui.

O cálculo das perdas de carga ao longo da tubulação que distribui em marcha é feito considerando que quando o consumo é igual ao máximo a perda de carga se aproxima de 1/3 da perda que existiria para a mesma vazão se não houvesse consumo em marcha.

2.2.6 - Uso de mais de um reservatório

Um reservatório apoiado ao lado de um reservatório elevado é um arranjo em que se procura promover maior eficiência energética, bombeando para o reservatório elevado

somente a vazão necessária para a parte superior da região a ser abastecida, isto é, utilizando os conceitos de zonas de pressão.

A opção por um dos dois tipos se faz de acordo com a concepção de projeto, procurando, sempre que possível, utilizar os reservatórios apoiados, pois são de custo estrutural mais baixo.

Do ponto de vista da economia de energia, o arranjo correto das zonas de pressão, seja com reservatórios elevados ou com reservatórios enterrados, é que fará com que o sistema apresente maior ou menor eficiência energética em função do volume de reservação e da capacidade das bombas, e não propriamente do tipo de reservatório.

Além disso, o reservatório deve oscilar entre seus níveis máximo e mínimo, de modo a otimizar a potência instalada das elevatórias. Eventualmente, quando se trata de elevatórias acima de uma certa potência instalada, em que se torna possível optar pela tarifação horosazonal, vale a pena sempre estudar um possível aumento da capacidade de reservação, de modo a poder fazer uso dessa alternativa dada pelas concessionárias.

Convém lembrar que a curva de demanda horária para o consumo de água, embora seja mais ou menos constante ao longo do tempo, varia nos feriados, bem como nos dias chuvosos, e é função dos clientes e seus hábitos de vida. Cidades com apelo turístico, por exemplo, têm suas curvas de demanda horária fortemente influenciadas pelos finais de semana, não só na magnitude das vazões como na forma de distribuição ao longo do dia. Assim também as cidades-dormitório têm curvas de demanda diária com formato diferente das demais, não havendo um padrão a adotar. Deve sempre ser obtida de medição de campo.

2.2.7 - Outras medidas

Uso de válvulas

- Redutoras de pressão. Estas são de grande utilidade no campo do abastecimento de água. Têm como utilidade principal reduzir a pressão a jusante do ponto de instalação, evitando as pressões excessivas indutoras de maiores perdas físicas nas redes de distribuição, indústrias, prédios altos, etc.
- Controladoras de nível. Têm seu campo de atuação preferido na prevenção de extravasamentos. Quando associadas a um controlador programável, podem comandar a operação das bombas da elevatória ou de outra válvula que limite a vazão, por exemplo, ou atuar no variador de velocidade, se este for o caso.

Programas de inspeção, operação e manutenção

Não existem nos sistemas de água no Brasil inspeções de tubulações para a prevenção de rompimentos, a não ser uma inspeção visual nas linhas de maior responsabilidade, muito mais para prevenir problemas estruturais (taludes com ameaça de deslizamento, pilares de sustentação trincados ou com recalques diferenciais, etc.) do que para prevenir fadiga do material, o que seria, de certa forma, praticamente inexequível. É mediante o controle de pressões que se pode atuar não preventivamente mas correlativamente de modo mais ágil quando da ocorrência de vazamentos. A queda de pressão é o fator indicador de vazamento, embora o dano causado por ele, quando se trata de vazamento de grande porte, alagamento de ruas, buracos no pavimento, etc. não sejam evitáveis. Existem, sim, programas de manutenção preditiva (preferencialmente, quanto aos programas de manutenção preventivas) para as unidades de bombeamento, sendo realizadas inspeções elétricas e mecânicas para acompanhar as grandezas indicativas de exaustão (basicamente, no caso das grandezas elétricas a temperatura; e, no caso de grandezas mecânicas, a vibração).

O uso de equipamentos de detecção de vazamentos deve estar inserido em uma estratégia de controle de perdas. Segue uma estratégia adaptada de Tsutiya (2001).

- A) Implantar modelo de gerenciamento da rotina do trabalho da operação.
- B) Democratizar as informações para criação de consciência.
- C) Bloquear as causas predominantes.**

A estratégia **C** deve englobar obrigatoriamente as seguintes ações:

- C1) Controle das perdas físicas.**
- C2) Controle das perdas não físicas.
- C3) Plano de ação para controle das perdas.

A ação **C1**, por sua vez, pode ser desdobrada em:

- C1.1) Controle das pressões.
- C1.2) Pesquisa de vazamentos.**
- C1.3) Redução no tempo de reparo dos vazamentos.
- C1.4) Gerenciamento da rede.

A ação **C1.2**, ainda, deve ser subdividida em:

- C1.2.1) Pesquisa de vazamentos visíveis.
- C1.2.2) Pesquisa de vazamentos não visíveis.**

É somente nesse último caso que se faz uso dos equipamentos de detecção de vazamentos. Dentre os mais utilizados, a “haste de escuta” destaca-se, pelo seu preço mais acessível e pela facilidade de uso. Também são usados o “geofone eletrônico” e o “correlacionador de ruídos”. Deve-se observar que todos esses equipamentos baseiam-se nas vibrações acústicas causadas pelos vazamentos e que seu uso costuma sofrer as interferências dos ruídos urbanos. É costume trabalhar-se com a haste de escuta nos períodos noturnos para evitar essas interferências.

Exemplo: Eliminação do funcionamento de um booster

Este caso é de uma pequena localidade (cerca de 20.000 habitantes), em que, ao assumir a operação do sistema de água, o operador se deparou com um problema crônico de intermitência de abastecimento numa região da cidade, como mostrado na Figura II.5, que é um dos relatórios de saída do EPANET.

A solução para a pequena região com problema de falta d’ água foi a instalação de um booster.

Após o modelamento do sistema distribuidor dessa localidade, verificou-se que as pressões esperadas para a área do booster eram bastante superiores às medidas em campo, como mostra a Figura II.6.



Figura II.5: Problema crônico de intermitência de abastecimento de energia elétrica



Figura II.6: Apuração das pressões para a área do booster após o modelamento do sistema distribuidor

Iniciou-se, assim, a análise do que poderia estar causando a queda de pressão na região. Checaram-se as cotas e mediram-se as pressões durante a noite (consumo teoricamente nulo) para checar a possibilidade de entupimento. Chegou-se à conclusão que somente um consumo significativamente maior do que o esperado poderia estar causando tamanha queda de pressão. Por meio da rotina de pesquisa de vazamentos, foi encontrada uma perda da ordem de 2 l/s, que, quando reparada, fez o sistema voltar à normalidade, eliminando a necessidade do booster.

Neste caso, embora o consumo de energia seja muito pequeno, pois tratava-se de um booster de apenas 5 cv, é interessante notar como as grandezas hidráulicas são inter-relacionadas.

A análise das causas da queda de pressão, embora aparentemente simples, é, na verdade, um quebra-cabeça, pois pode variar desde um vazamento, como foi o caso, até um erro de cadastramento de unidades ou, mesmo, um erro de levantamento de cotas topográficas. A utilização do simulador hidráulico, nesses casos, é de extrema utilidade, principalmente em sistemas maiores.

3

IDENTIFICAÇÃO DAS OPORTUNIDADES NO BOMBEAMENTO DA ÁGUA

Nessa parte do sistema, encontramos várias oportunidades, pois é aqui que se dá o consumo de energia.

3.1 - Identificação dos fatores que afetam a eficiência no bombeamento da água

Considerando o enfoque nos parâmetros que atuam para a redução do consumo e potência, conforme as equações:

$$P = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_{TM}}{\eta_b \cdot \eta_M} \quad \text{e} \quad C = P \cdot t$$

As oportunidades de eficiência nas instalações de bombeamento de água são relatadas a seguir.

3.2 - Áreas de oportunidade para melhorar a eficiência no bombeamento da água

3.2.1 - Melhoria do rendimento da bomba

Os catálogos dos fabricantes de bombas apresentam os seus diversos produtos com as respectivas curvas de rendimento associadas às curvas de performance, facilitando a escolha do equipamento com melhor rendimento total da bomba em função da curva do sistema.

A Figura II.7 mostra a seleção de uma determinada bomba para trabalhar no ponto de vazão igual a 100 m³/h contra uma altura de cerca de 42 m.c.a. A bomba selecionada trabalhará nesse ponto com um rendimento de aproximadamente 70%.

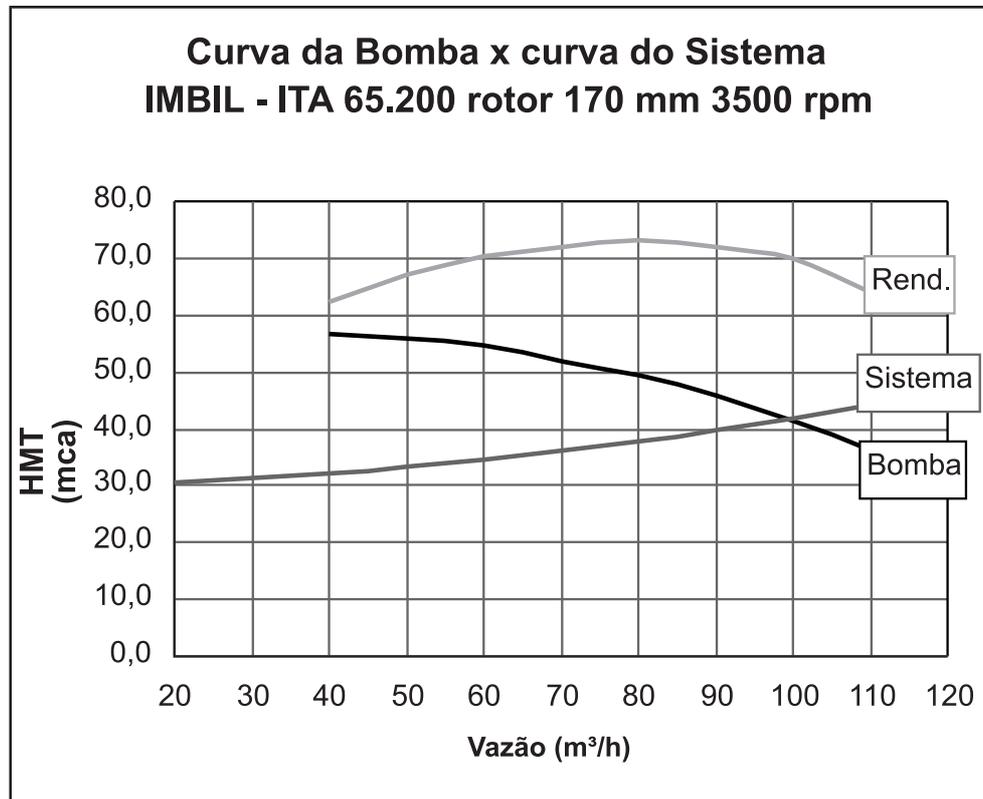


Figura II.7: Curva da bomba x curva do sistema

Na Figura II.8, tem-se a seleção de uma outra bomba do mesmo fabricante, porém de outro modelo, que, trabalhando no mesmo ponto de operação, apresenta um rendimento um pouco melhor, de cerca de 75%.

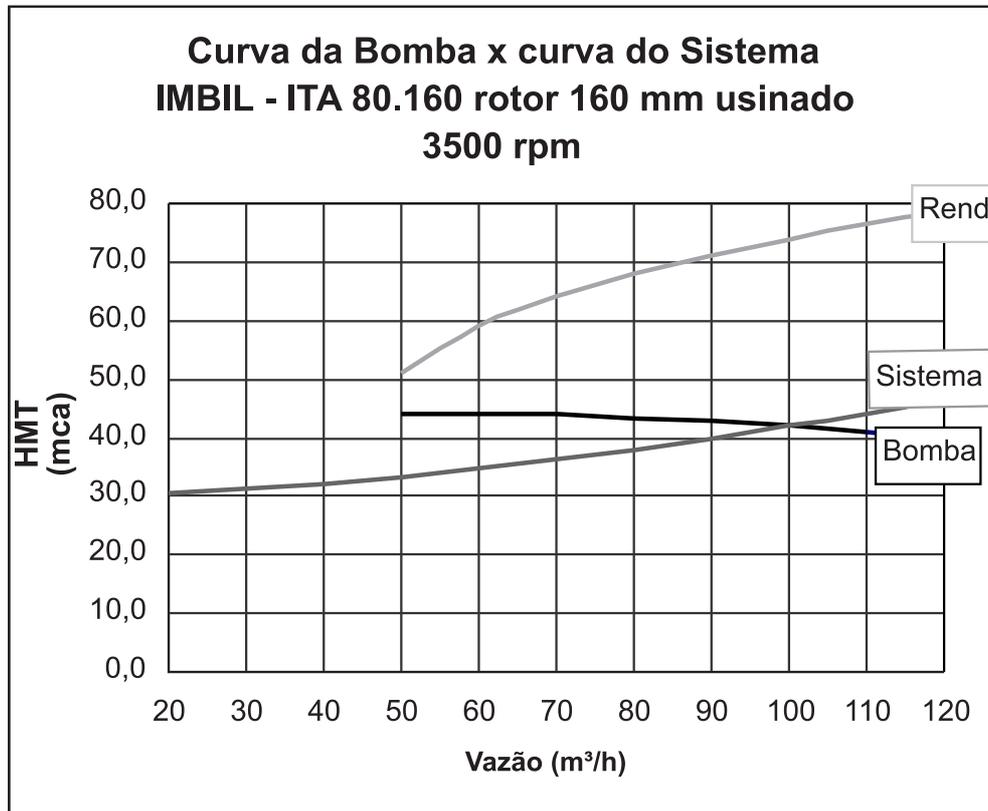


Figura II.8: Curva da bomba x curva do sistema – IMBIL – ITA 80.160 rotor 160 mm usinado 3500 rpm

Seleção adequada da bomba

Em geral, motores de baixa rotação apresentam menor custo de manutenção (menor desgaste das peças móveis em função da menor rotação) e menor ruído. Em áreas urbanizadas, costumam ser a melhor solução, embora tenham um custo geralmente superior às bombas de alta rotação (3500 rpm) que ofereçam as mesmas características.

A Figura II.9 ilustra o campo de aplicação das bombas, segundo Macintyre (Bombas e Instalações de Bombeamento):

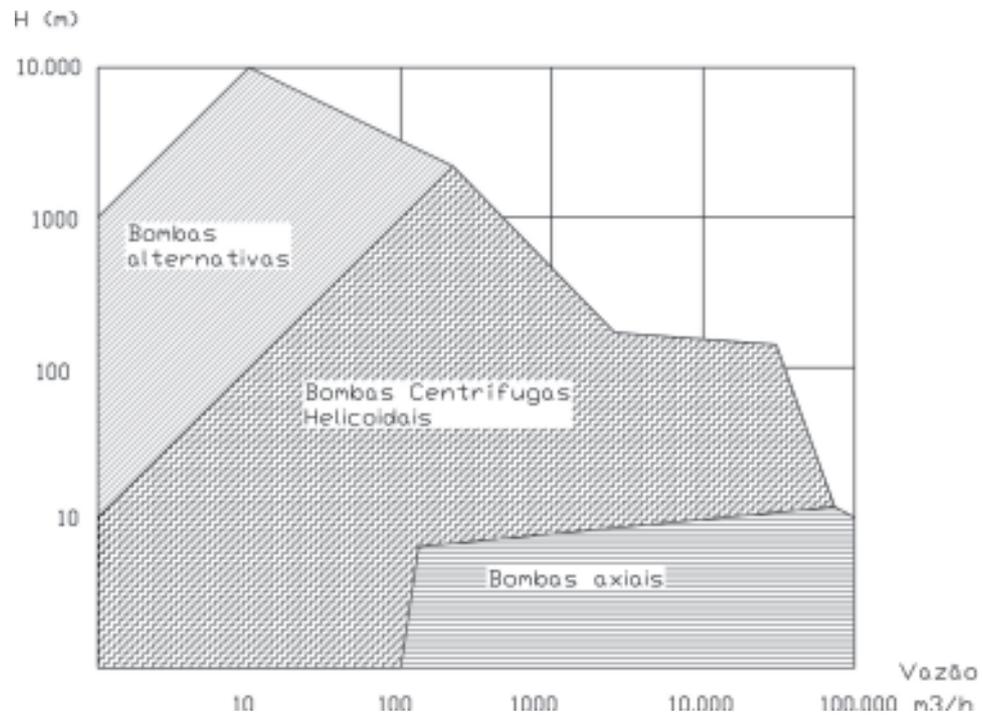


Figura II.9 - Campo de aplicação das bombas

Tipos de bombas e suas aplicações

O livro texto “EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO” descreve os diversos tipos de bombas e suas aplicações. A tabela II.5 apresenta uma síntese.

Tabela II.5 Bombas e suas aplicações

TIPO DE BOMBA	APLICAÇÕES
Bomba centrífuga radial monobloco e monoestágio	De baixa potência para pequenas vazões.
Bomba centrífuga radial com acoplamento e único estágio	A mais comum nos sistemas de abastecimento de água. Vazões da ordem de 5 a 100 l/s (18 a 360 m ³ /h) a alturas manométricas totais que variam de 40 a quase 200 m.c.a. Em casos extremos, atendem a alturas manométricas maiores, da ordem de 100 m.c.a.
Bomba centrífuga radial de múltiplos estágios	É como bomba em série, propiciando grandes pressões, porém separadas em faixas (estágios). Evita problemas de desgaste das peças de vedação (anéis, buchas, gaxetas, etc...).
Bomba submersa (poços)	É construída de modo a ter dimensões externas reduzidas, para que possa ser utilizada nos poços profundos, cujo diâmetro é da ordem de 150 mm, sendo esse valor excedido quando se trata de poços com vazões maiores.
Bombas submersas com fonte de energia alternativa	Para regiões remotas, pequenos vilarejos onde a energia elétrica ainda não está disponível pela rede de distribuição da concessionária. Tem custo inicial superior às soluções convencionais.
Bomba centrífuga radial de coluna	Aplicada em áreas inundáveis, onde seria necessária uma obra de grande porte para a proteção da elevatória, ou uma altura de sucção muito grande. De eixo vertical, o motor está protegido acima da cota de inundação, e a bomba não está obrigada a trabalhar com alturas de aspiração elevadas, em que o NPSH disponível seria baixo.
Bomba submersível – destinam	Primordialmente, utilizada para águas mais abrasivas, com maior quantidade de sólidos em suspensão, como esgotos, lamas de fundos de vala. Portanto, sua aplicação principal ocorre nas obras de drenagem e esgotamento de fundos de vala, caixas coletoras de esgoto em cota abaixo da rede pública, etc.
Bomba bipartida	De maior porte, destinada a bombeamentos de maiores vazões. Tem a vantagem de equilibrar melhor os empuxos, sendo esta uma característica que interessa mais à equipe de manutenção.

Critérios para a escolha do melhor equipamento

Em primeiro lugar, deve-se estar atento à finalidade do bombeamento. É necessário observar a qualidade da água que se quer recalcar. A altura e as vazões a bombear vão indicar o tipo de bomba a procurar nos catálogos dos diversos fabricantes. Por fim, as curvas características, observando os pontos de trabalho o mais próximo possível daqueles de melhor rendimento, levarão à escolha do equipamento de maior eficiência energética disponível no mercado.

Outros fatores também precisam ser analisados pelo projetista, como dimensões do equipamento, tipo de entrada e saída para escolher o melhor arranjo da elevatória (construção civil), o NPSH requerido pela bomba, o NPSH disponível na instalação e o histórico de manutenção de equipamento semelhante.

Devem-se sempre procurar informações de outros usuários dos equipamentos em análise para obter dados de custo de manutenção. A composição de um quadro levando em conta o custo da aquisição do equipamento, seu rendimento hidráulico e, conseqüentemente, o custo com energia elétrica ao longo da sua vida útil naquele projeto, além dos custos de manutenção durante o período de estudo, é que levarão à escolha do equipamento mais econômico.

Seleção de bombas usando softwares

Cada vez mais o uso de softwares de modelamento hidráulico de sistemas de abastecimento de água se torna a ferramenta indispensável do engenheiro ligado ao assunto. Nesses softwares, pode-se fazer o ensaio de várias alternativas e verificar aquela de melhor rendimento energético.

As Figuras II.10 e II.11 ilustram a comparação entre duas bombas do mesmo fabricante usando um software específico.

A Figura II.10 mostra as definições das características hidráulicas do sistema (tubulações, peças, vazão necessária e altura geométrica) para o qual se deseja escolher uma bomba.

F10: Dsnho sist. de tubos

Perdas de carga

Caudal total: l/s

Altura Geodésica: m

Nº de perdas de carga	Altura total [m]
1	3,6
	23,6

Colebrook-White

Única
 Multi

OK
Cancelar
Imprimir
Exportar
Ajuda

Individual 1 | Individual 2 | Comum 1 | Comum 2 | Comum 3

Especificação tubo

Comprimento m

Tubos standard

Material:

Classe de pres.:

Dimensão:

Tubos novos:

Rugosidade: mm

Diâm. interior: mm

Velocidade água: m/s

Pontos de perdas

	Nº de
Base assentam.	0,6 <input type="text" value="1"/>
Ângulo 90°	0,3 <input type="text" value="1"/>
Válvula	0,4 <input type="text" value="1"/>
Ligação-T	0,5 <input type="text" value="1"/>
Válv. retenção	0,7 <input type="text" value="1"/>
Saída	1 <input type="text" value="1"/>
Próprio	0,00 <input type="text" value="0,00"/>
Total:	1,8

Perda na secção do m

Figura II.10: Definição das características hidráulicas do sistema

A Figura II.11 mostra as opções oferecidas pelo software, naturalmente dentre aquelas da sua linha de fabricação. Observa-se, também, a análise comparativa da energia consumida em função do rendimento da bomba e do motor, conforme as especificações do fabricante, além do cálculo da energia específica para cada modelo, operando-se no sistema imaginado no exemplo.



Figura II.11: Opções de bombas oferecidas pelo software

As Figuras II.12 e II.13 mostram as curvas características dos dois modelos selecionados.

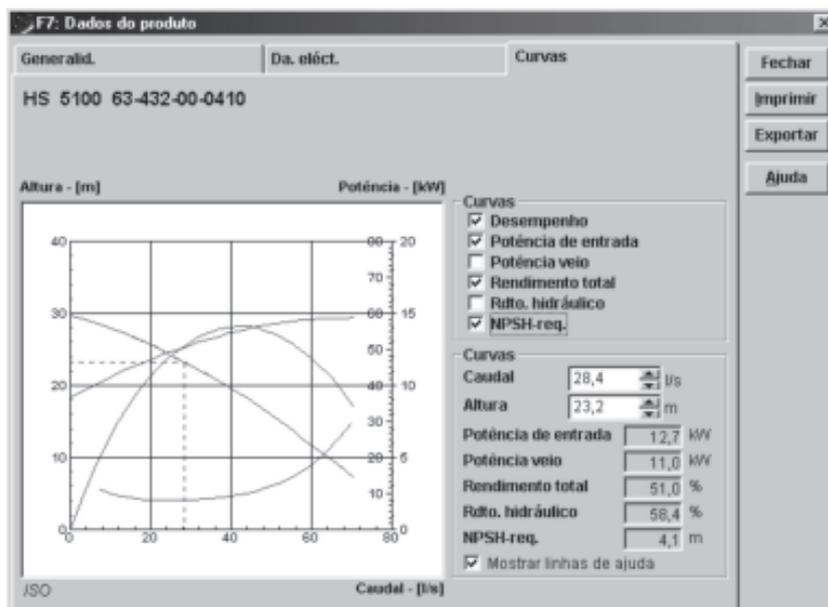


Figura II.12: Curva do modelo 1

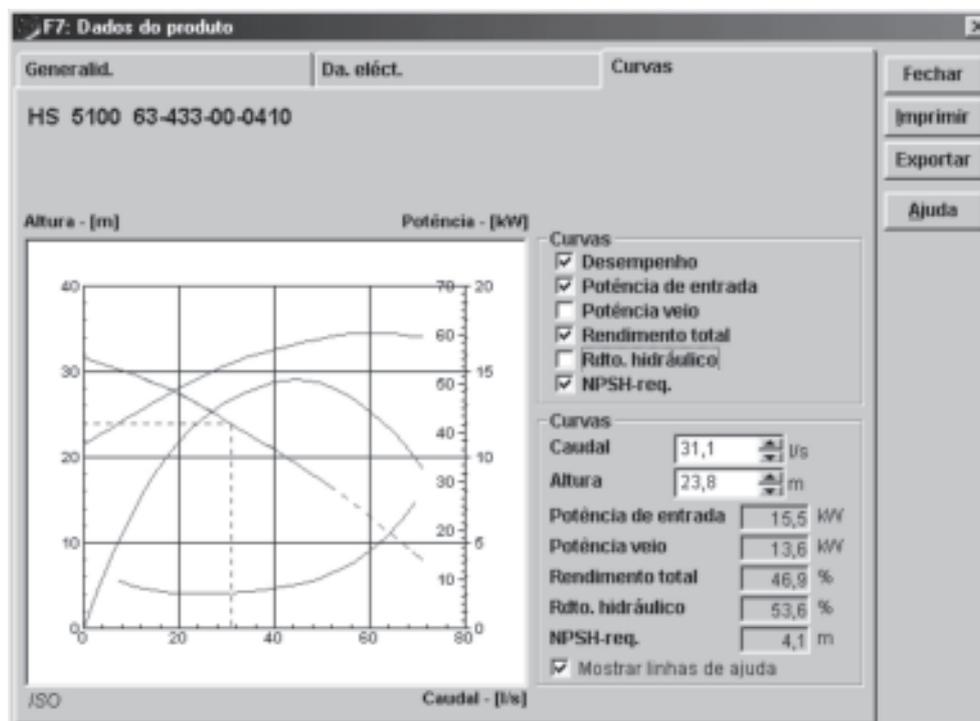


Figura II.13: Curva do modelo 2

É claro que o software em questão limita-se ao fabricante que o disponibiliza. É, no entanto, uma ferramenta muito útil na escolha da bomba com melhores características de eficiência energética.

O mesmo tipo de procedimento pode ser adotado utilizando os modelos hidráulicos. A vantagem nesse caso está em não ficar preso a um determinado fabricante. No entanto, há o trabalho adicional de editar os dados das curvas características da bomba pré-selecionada que se quer comparar.

3.2.2 - Melhoria do rendimento do motor

Incide na expressão para o cálculo da potência da mesma forma que o rendimento da bomba; ou seja, é inversamente proporcional.

Caso o motor esteja *sub* ou *sobredimensionado* para a bomba que aciona, deve-se estudar sua substituição por motores mais adequados. Motores trabalhando com cargas inferiores a 50% são os principais candidatos a esse estudo.

Outra opção é a utilização de motores de alto rendimento, que, embora mais caros, eventualmente podem compensar o investimento incremental inicial com um menor custo operacional. Dependerá do tempo de funcionamento diário previsto ao longo da vida útil do equipamento ou do alcance do projeto - o que ocorrer primeiro.

A economia anual de energia por causa do uso do motor de alto rendimento é dada por:

$$e = 0,735 \times H \times P \times (1/\eta - 1/\eta')$$

em que:

P = Potência nominal do motor, em cv;

H = horas de funcionamento por ano;

η = rendimento do motor padrão à potência nominal; e

η' = rendimento do motor de alto rendimento à potência nominal.

Motores, ao serem rebobinados, perdem rendimento. Logo, compare a eficiência entre motores (novo padrão, novo de alto rendimento ou rebobinado) para verificar se a economia obtida no investimento para rebobiná-lo não será compensada pelo maior custo operacional.

A Eletrobrás / PROCEL dispõe de guia específico sobre motor de alto rendimento, o qual deve ser consultado para mais detalhes.

3.2.3 - Redução do peso específico

No numerador da expressão da potência, o primeiro fator é o peso específico do líquido bombeado. No caso em análise neste guia, a água. A chance de atuação para reduzir a potência necessária seria optar, quando da concepção do sistema, por bombeamentos de menor potência na água bruta, deixando as maiores elevações para a água tratada.

No entanto, a variação do peso específico da água tratada em relação à água bruta é irrelevante, sendo o estudo dessa opção de projeto mais voltado para os custos operacionais com a manutenção da bomba do que com o consumo energético propriamente.

Basicamente, não existem diferenças significativas do ponto de vista da economia de energia, já que a densidade da água bruta não difere de maneira apreciável da densidade da água tratada. O que ocorre são desgastes nos rotores quando do bombeamento de água bruta, principalmente quando contém muita quantidade de areia. Neste caso, deve-se optar por bombas especiais ou limitar a altura manométrica, bombeando água bruta somente para um ponto próximo à captação, uma caixa de areia, da qual a vazão total será recalçada para a estação de tratamento, na altura manométrica total. Assim, se o desgaste

não for evitável, escolha outro ponto para a captação, trabalhando-se com bombas menores, para reduzir o custo de manutenção.

São particularmente comuns as captações do tipo balsa, seguidas de uma caixa de areia na margem ou, até mesmo, da própria estação de tratamento.

3.2.4 - Redução da vazão recalçada

Quando se reduz a vazão bombeada, reduz-se diretamente a potência requerida e, conseqüentemente, o consumo de energia.

No entanto, a vazão a ser bombeada é função da população a ser abastecida e de seus hábitos de consumo. O que pode ser feito pelo operador do sistema é, quando do projeto, procurar a melhor setorização possível, de modo a evitar bombeamentos desnecessários, além de procurar minimizar as perdas reais, que são inerentes ao tipo de material utilizado nas redes, à qualidade construtiva e ao comportamento piezométrico do sistema ao longo do ciclo diário de consumo.

Na Figura II.9, representa-se um problema de abastecimento de uma zona alta. Uma possível solução seria elevar toda a vazão necessária para a região.

Eventualmente, além de o bombeamento de toda a vazão implicar um custo maior, em função da maior potência necessária, pode haver problema de pressões excessivas na região mais próxima à estação de bombeamento.

O exemplo da Figura II.14 sintetiza a oportunidade de aumentar a eficiência energética de um sistema de abastecimento de água atuando na otimização das zonas de pressão para reduzir a vazão a ser bombeada.

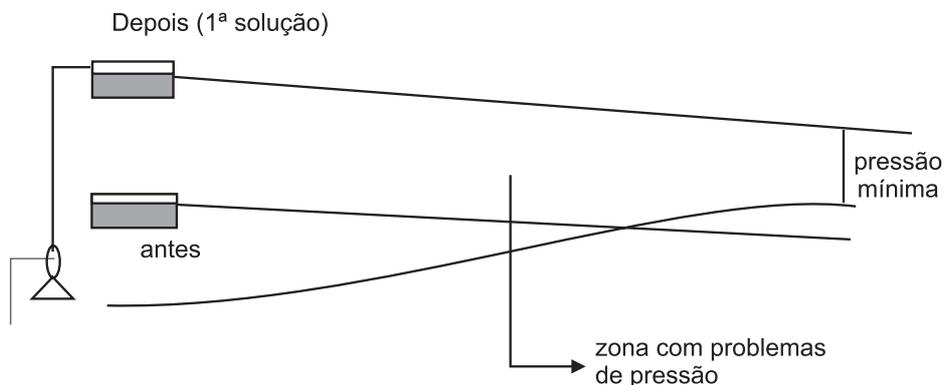


Figura II.14: Representação de um problema de abastecimento de uma zona alta

A Figura II.15 ilustra outra possível solução, em que se procura racionalizar o porte da estação elevatória, restringindo-a à região onde havia problemas no abastecimento. Esta solução implica uma elevatória de porte menor, com menor custo de implantação e menor custo operacional em função do custo com a energia elétrica.

Embora esta segunda solução possa parecer óbvia, outros fatores de ordem local, como interferências com a urbanização, podem dificultá-la, sendo sempre necessária a realização de estudos de viabilidade de modo a fazer a melhor opção pelo arranjo no projeto.

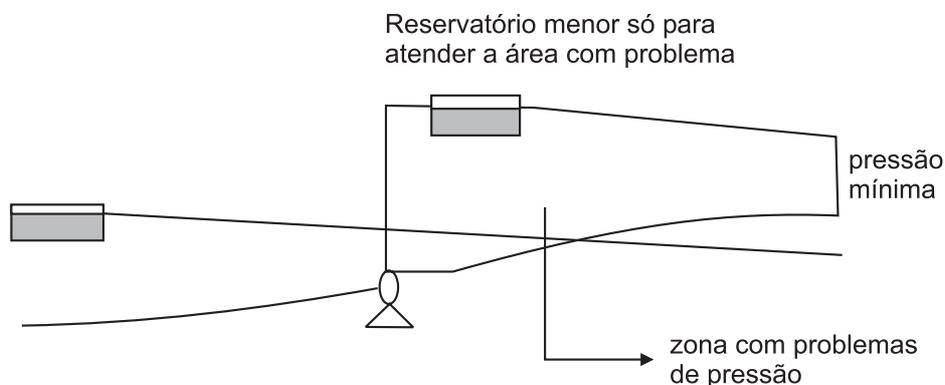


Figura II.15: Proposta de solução para um problema de abastecimento de uma zona alta

3.2.5 – Redução pela variação da velocidade (rotação da bomba)

Nos bombeamentos em marcha, o ponto de funcionamento da bomba varia ao longo da sua curva, de acordo com a variação da curva do sistema, cuja perda de carga aumenta ou diminui conforme a demanda se reduz ou tende ao máximo, respectivamente (Figura II.16).

Conseqüentemente, o rendimento da bomba estará variando também, ora para melhor, ora para pior, dependendo do ponto de funcionamento do sistema.

A eficiência energética, neste caso, pode ser buscada procurando-se manter o rendimento o mais próximo possível do PMR (Ponto de Máximo Rendimento), variando a curva de performance da bomba por meio da variação da sua rotação (velocidade) para compensar a variação da curva do sistema.

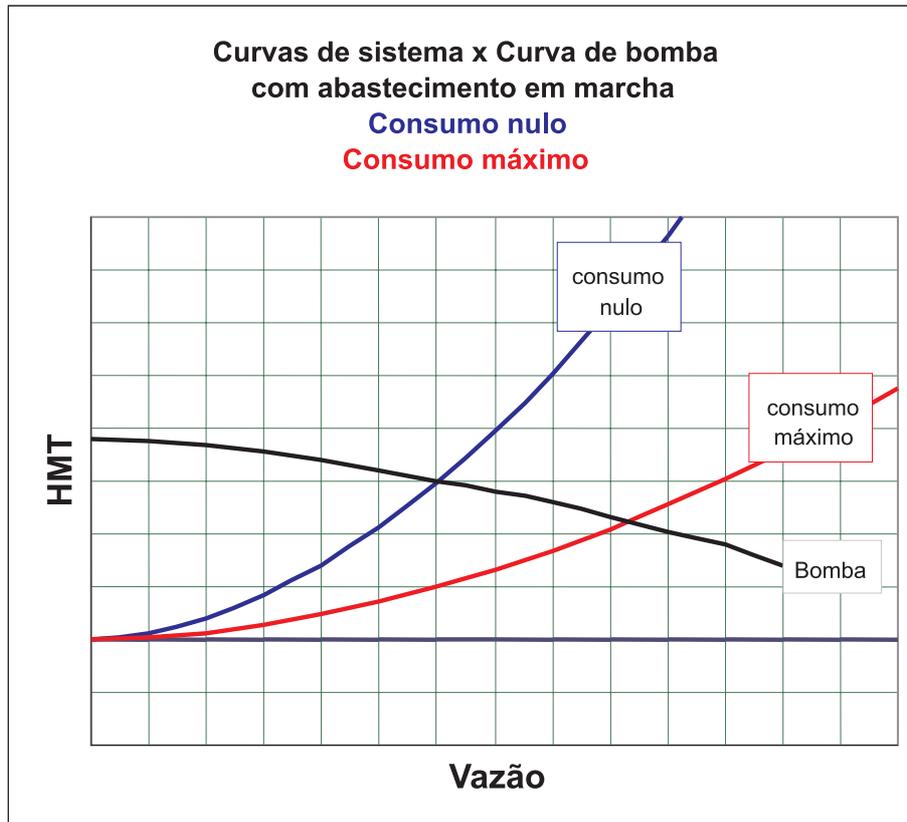


Figura II.16: Curvas de sistema x curva de bomba com abastecimento em marcha

O equacionamento se faz utilizando as leis de similaridade (ver anexo) que relacionam a rotação com a vazão, com a altura manométrica e com a potência.

$$Q_1 = (n_1/n) \times Q \quad H_1 = (n_1/n)^2 \times H \quad \text{e} \quad P_1 = (n_1/n)^3 \times P$$

Assim, quando se varia a rotação de uma bomba centrífuga varia-se também sua curva característica (curva de performance $Q \times H$), conforme a Figura II.17.

Das fórmulas acima, verifica-se que, reduzindo a rotação e, conseqüentemente, a vazão em 10%, a nova potência será 27% menor.

$$P_1 = P \times (n_1/n)^3 = P_1 \times (0,9 \times n/n)^3 = 0,73 P$$

Conseqüentemente, ao se utilizar uma bomba de rotação variável num abastecimento com curva de sistema variável, procura-se compensar a variação do ponto de funcionamento

com a variação da curva da bomba (variando sua rotação), de modo a que este ponto esteja sempre o mais próximo possível do PMR da bomba.

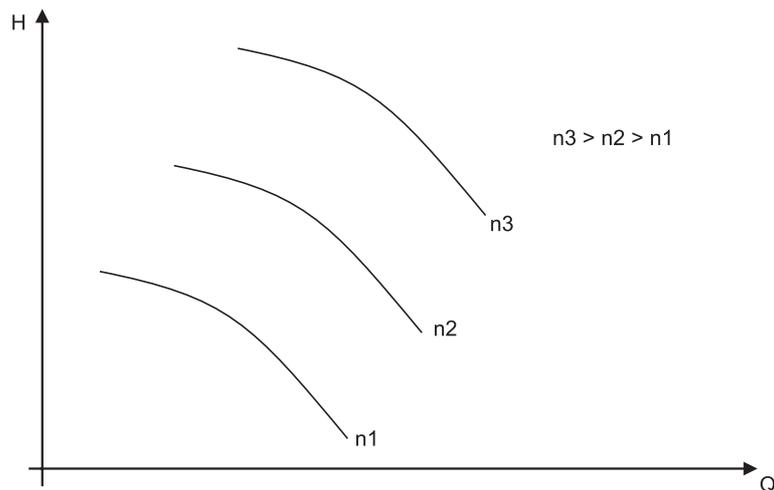


Figura II.17: Variação da rotação de uma bomba centrífuga com a variação de sua curva característica

Deve-se observar que pequenas variações na rotação da bomba não interferem significativamente na curva de rendimento. Entretanto, grandes variações podem fazer cair o rendimento.

Embora esta seja uma situação frequentemente encontrada nos sistemas de abastecimento de água, o uso dos variadores de velocidade ainda não é uma prática corriqueira, principalmente em função do seu custo, que nem sempre é compensado pela redução de custo conseguido em decorrência da economia de energia. Mas essa situação vem se modificando com o desenvolvimento das tecnologias de variadores de velocidade ou conversores de frequência e o aumento da competitividade dos fabricantes dessa tecnologia.

3.2.6 - Associação adequada de bombas

a) Associações em série

Diz-se que uma bomba está associada em série com outra quando o recalque da primeira coincide com a sucção da seguinte (como se a bomba de jusante fosse um booster). Assim, para cada vazão, as alturas manométricas serão a soma das alturas individuais de cada bomba.

A Figura II.18 ilustra como fica a curva da associação de duas bombas em série. A curva da associação de várias bombas em série é obtida da mesma maneira, somando-se, para cada vazão, as alturas manométricas de cada bomba individualmente, sejam elas iguais ou diferentes. É claro que não é usual fazer a associação de bombas de características diferentes. No entanto, se este for o caso, a curva é obtida da forma como está mostrado na Figura II.18 para duas bombas.

Se for colocada a curva do sistema juntamente com a curva da associação, torna-se possível verificar os pontos de funcionamento de cada bomba quando trabalhando na associação. A Figura II.18, relativa à associação das duas bombas em série, ilustra o ponto de funcionamento da associação:

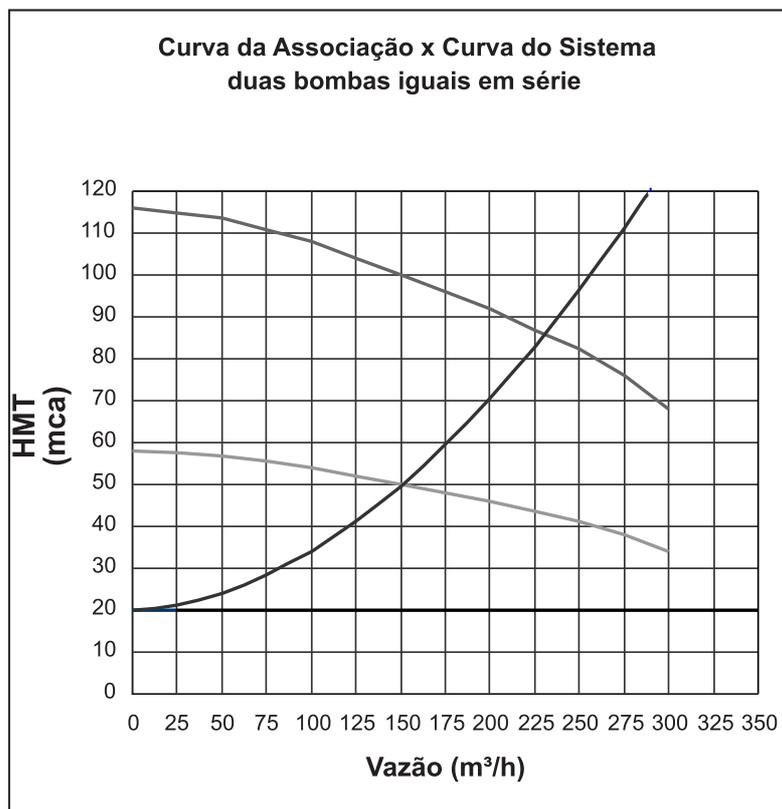


Figura II.18: Curva da associação x curva do sistema – duas bombas iguais em série

Neste diagrama, observa-se que as bombas, quando trabalhando associadas, funcionam, cada uma, fornecendo uma altura manométrica de cerca de 43 metros de coluna de água, na vazão de pouco mais de 225 m³/h (em torno de 230).

Se apenas uma bomba estivesse instalada no sistema mostrado na Figura II.18, ela estaria fornecendo uma vazão de 150 m³/h contra uma altura manométrica de 50 m.c.a.

Um diagrama como este permite analisar se as bombas associadas dessa forma trabalham em um ponto de melhor rendimento ou não.

b) Associações em paralelo

Diz-se que duas ou mais bombas estão associadas em paralelo quando bombeiam em uma única tubulação simultaneamente.

A curva desse tipo de associação (no caso em que a distância entre as bombas e o ponto de junção é pequena - menos de 10 metros) é obtida somando-se, para cada altura manométrica, as vazões indicadas nas curvas individuais de cada bomba.

A Figura II.19 ilustra a associação em paralelo de duas bombas iguais.

Exemplo: Associação em paralelo

Imagine um sistema com tubulação de recalque de 200 mm, na extensão de 1000 metros, com coeficiente "C" de Hazen-Williams igual a 130, uma tubulação de sucção de 10 metros de extensão com diâmetro de 250 mm e o mesmo coeficiente "C", consideradas as peças normais de uma montagem de uma elevatória (tês, curvas, registros e válvulas), bombeando contra uma altura geométrica de 40 metros. A curva deste sistema está mostrada na Figura II.19, juntamente com a associação de duas bombas iguais.

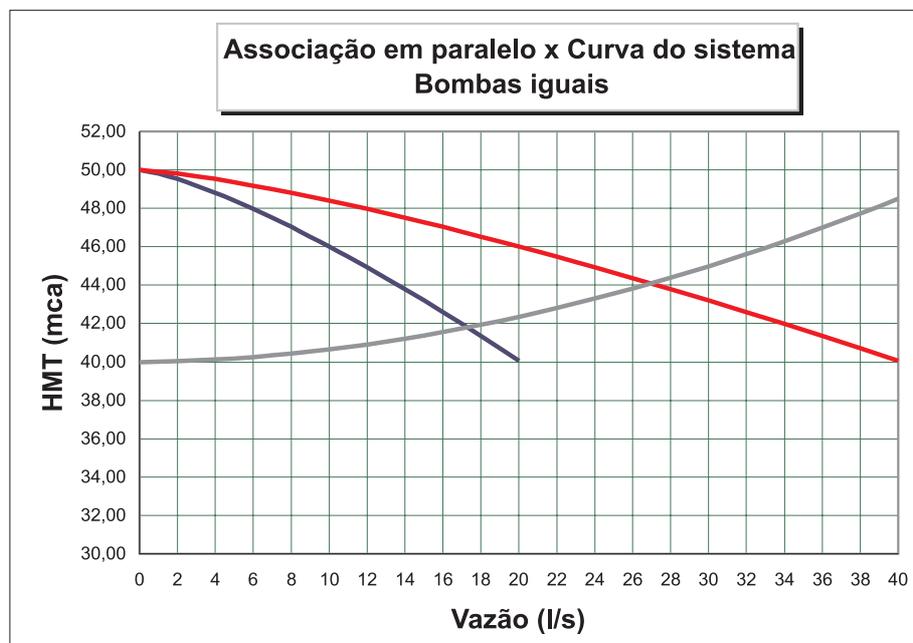


Figura II.19: Associação em paralelo x curva do sistema (bombas iguais)

Nesta Figura, os pontos de interseção das linhas mostram o funcionamento deste sistema em diversas situações:

O cruzamento da curva do sistema com a curva de associação das bombas em paralelo mostra o ponto de funcionamento deste sistema quando se opera com as duas bombas em paralelo ligadas. Isto é, a vazão recalçada será igual a cerca de 27,0 l/s, com cada bomba contribuindo com a metade desse valor, cerca de 13,5 l/s.

O cruzamento da curva do sistema com a curva de uma bomba mostra o ponto de funcionamento deste sistema quando somente uma das bombas estiver em operação, com a outra desligada, com vazão de aproximadamente 17 l/s, maior que quando funcionando em paralelo.

Essa Figura é capaz por si só de mostrar as diversas opções de funcionamento de uma elevatória, mostrando ainda com qual rendimento cada bomba trabalhará em cada situação, uma vez que o rendimento varia com a vazão recalçada.

É de suma importância que o profissional de engenharia fique atento para o fato de que quando associadas cada bomba produz uma vazão menor do que produziria se não estivesse associada. No caso em questão, uma única bomba trabalhando sozinha produziria neste sistema a vazão de aproximadamente 17,5 l/s, enquanto que associada estaria produzindo apenas 13,5 l/s. Como estavam associadas duas bombas neste caso, a vazão total produzida seria o dobro, isto é, cerca de 27 l/s, e não 35 l/s, como muitos acreditam que seria.

Com diversos tipos de arranjo de bombas em paralelo, operando uma, duas três ou mais, em cada situação, e analisando as diversas opções de bombas no mercado, o profissional de engenharia pode fazer a seleção do arranjo que melhor atenda do ponto de vista da economia de energia (melhor rendimento nas diversas situações de funcionamento).

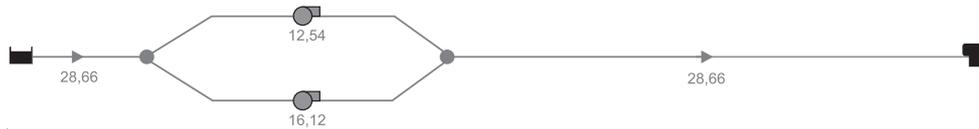
O exemplo mostrado refere-se a um caso simples de duas bombas iguais, que é um dos mais comuns também. Quando se têm mais de dois conjuntos e, eventualmente, bombas diferentes, começa a ficar um pouco confuso compreender o diagrama assim traçado. A visualização fica ruim, além do que a precisão gráfica pode não ser suficientemente boa. Nesses casos, passa a ser fundamental utilizar softwares de modelamento hidráulico.

Quando as duas bombas são diferentes, não há o menor problema para o traçado da curva da associação. Basta seguir o conceito. As vazões se somam para cada altura manométrica.

Da mesma forma que no caso anterior, é possível estudar o funcionamento das bombas nesse sistema mediante a sobreposição da curva do sistema. O uso dos simuladores, além de oferecer uma precisão muito melhor, permite realizar ensaios de uma grande quantidade de bombas no mesmo sistema, rapidamente. Basta editar os pontos da bomba no entorno da solução procurada, e assim fazer a escolha do conjunto que melhor atenda do ponto de vista da eficiência energética.

Exemplo: Estudo do uso de bombas em paralelo usando simuladores

A Figura II.20 ilustra o diagrama traçado no EPANET. A Tabela II.6 mostra o relatório de energia obtido da curva de rendimento editada no EPANET. Para este exemplo, as curvas das bombas utilizadas e seus respectivos rendimentos estão mostrados na Tabela II.7.



Esquema - sem escala

Figura II.20: Diagrama traçado no EPANET**Tabela II.6:** Consumo de energia obtido da curva de rendimento editado no EPANET

RELATÓRIO DE ENERGIA						
BOMBA	UTILIZAÇÃO	EFICIÊNCIA MÉDIA	kWh/m ³	kW MÉDIO	kW MÁXIMO	CUSTO/DIA
B-1	100.00	50.00	0.24	10.97	10.97	0.00
B-2	100.00	63.78	0.19	11.05	11.05	0.00

Observa-se que neste exemplo a bomba 2 trabalha com melhor eficiência (Figura II.21) que a bomba 1, apresentando, conseqüentemente, um consumo específico (kWh/m³) menor. A Figura II.22 mostra o consumo específico (kWh/m³) do bombeamento para cada uma das bombas quando opera em paralelo neste sistema.

É preciso editar as curvas de rendimento de cada bomba (curvas essas tiradas dos catálogos dos fabricantes), para que o software possa efetuar os cálculos. No entanto, é possível formar um banco de dados com as bombas mais usuais e editá-las rapidamente por meio da ferramenta de “carregar” curvas de bomba.

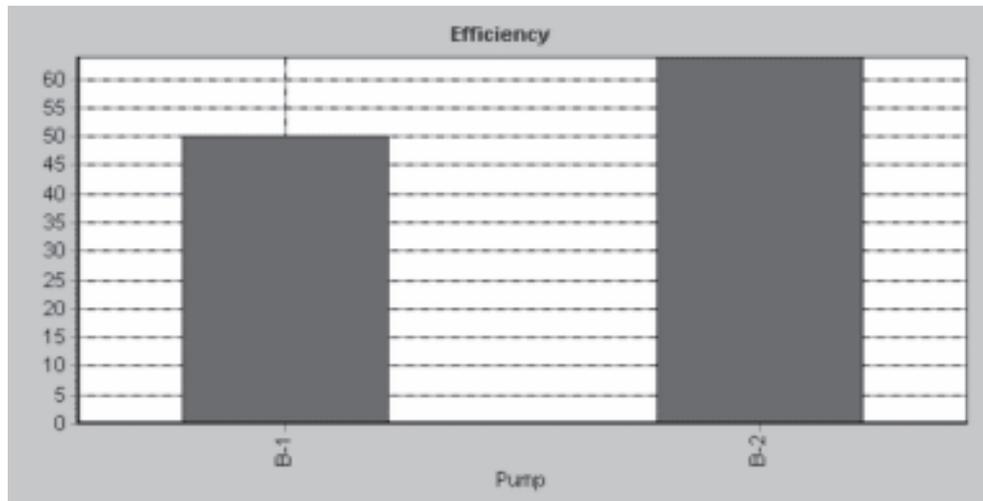


Figura II.21: Rendimentos no ponto de trabalho com associação em paralelo

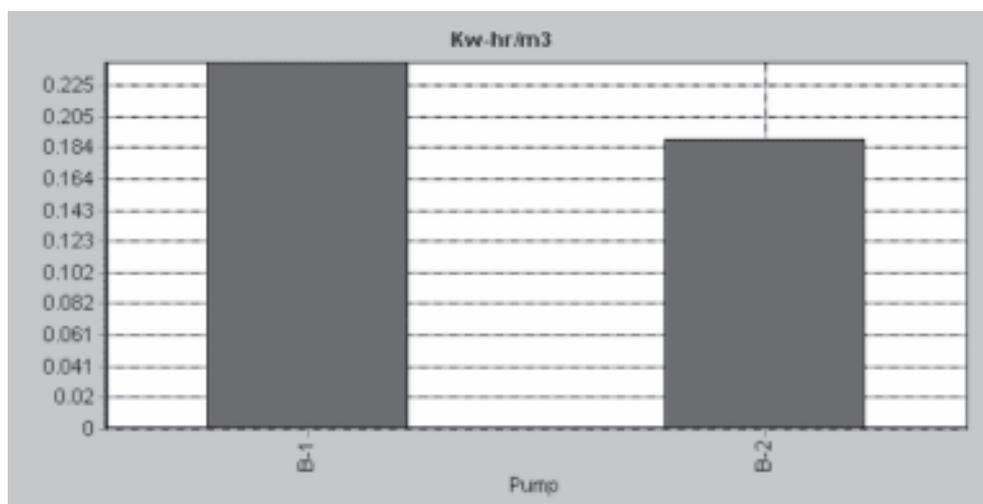
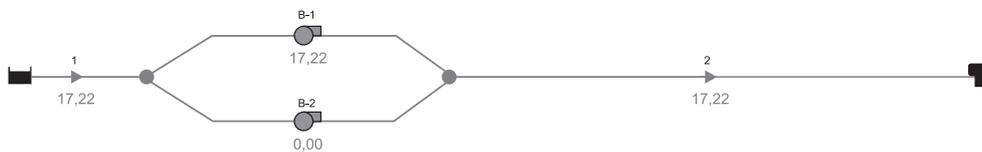


Figura II.22: Energia específica do bombeamento para cada uma das bombas

Tabela II.7: Dados das curvas das bombas

BOMBA				
	1	1	2	2
Q (l/s)	H	Eff (%)	H	Eff (%)
0	50	50	60	60
10	46	55	53	65
20	40	48	38	63

Quando se opera isoladamente, isto é, sem o paralelismo, o diagrama mostra que o sistema produzirá apenas cerca de 17l/s com a bomba 1 ou 17,5 l/s com a bomba 2. Para se obter o valor do rendimento com o qual as bombas funcionariam nessa situação, seria necessário recorrer à curva dos catálogos e verificar o consumo específico nesses pontos. No EPANET, basta "rodar" o cálculo com a condição de cada bomba "desligada" separadamente e verificar o relatório de energia.



Esquema - sem escala

Figura II.23: Bomba 2 desligada

Nesta condição de não paralelismo, a energia específica consumida pela bomba 1 está mostrada na Figura II.24.

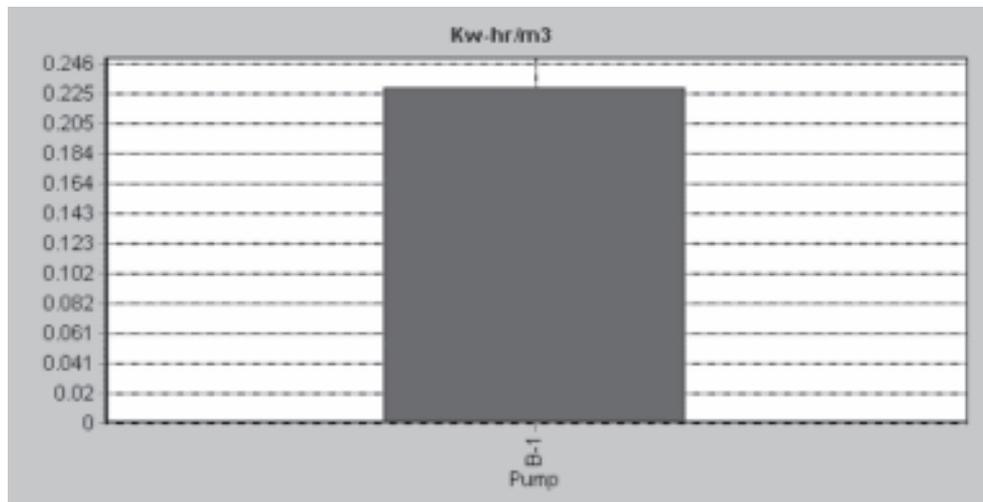


Figura II.24: Energia específica consumida pela bomba 1

Se em vez de desligar a bomba 2 fosse desligada a bomba 1, operando somente com a de número 2, a vazão do sistema seria ligeiramente superior, como mostrado no esquema do EPANET na Figura II.25.

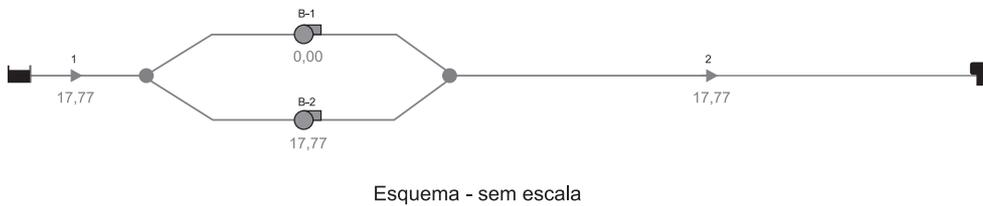


Figura II.25: Energia específica consumida pela bomba 2

A diferença no consumo específico seria ainda mais acentuada, como mostra a Figura II.26.

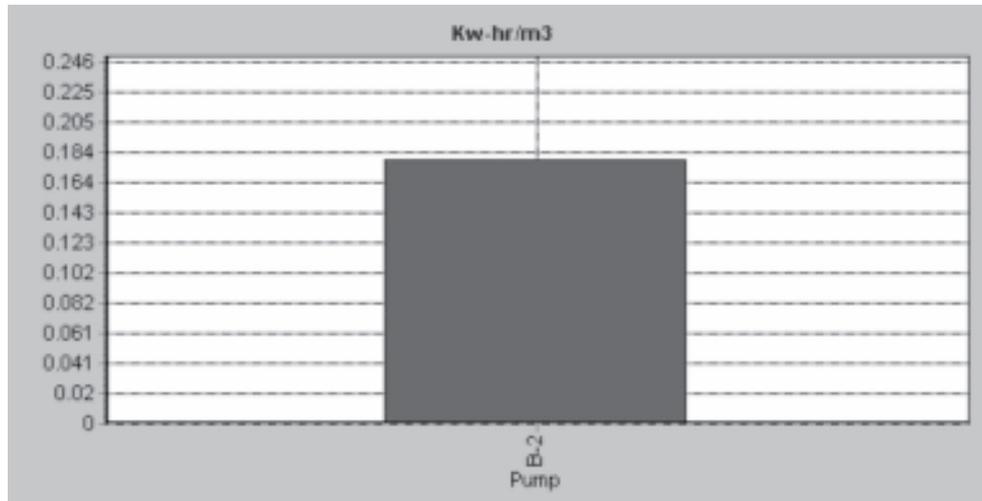


Figura II.26: Diferença no consumo específico com a bomba 2 ligada

O esquema de operação para um caso como esse deveria sempre priorizar a bomba 2 como preferencial quando o sistema tiver de funcionar com uma vazão menor (ainda que quando trabalhando sozinha esta bomba produza uma vazão ligeiramente superior que a bomba 1), em função da maior economia de energia que ela propicia.

O exemplo mostrado, embora simples, revela a grande utilidade dos simuladores hidráulicos, principalmente se forem considerados os sistemas mais complexos, em que se torna necessário consultar diversos catálogos de fabricantes, para a escolha de diversas possibilidades de bombas, e o desenho dos diagramas das associações de bombas e curvas de sistema, para diversas combinações.

Com a utilização de softwares como esse, torna-se possível a otimização energética dos sistemas de bombeamento, mesmo na fase de operação, permitindo a escolha da combinação de bombas de maior eficiência energética.

3.2.7 - Eliminando os problemas de cavitação

A cavitação é um dos principais problemas que ocorrem na instalação de bombeamento de água para abastecimento público, por afetar diretamente a eficiência energética do bombeamento.

As principais conseqüências da ocorrência da cavitação são: barulho, vibração excessiva do conjunto motobomba, alteração das curvas características (vazão x altura, vazão x rendimento) e danificação do material.

À exceção do barulho, que pode ser considerado mais um problema estético, e da vibração em excesso, cujas conseqüências são mais sérias do ponto de vista dos custos de manutenção, as demais conseqüências da cavitação têm relação direta com a eficiência energética.

Simplificadamente, basta que o NPSH disponível pela instalação seja superior ao NPSH requerido pela bomba para que o problema da cavitação não ocorra.

A norma brasileira NBR 12.214 (Projeto de sistema de bombeamento de água para abastecimento público) recomenda que o NPSH disponível calculado “deve ser superior em 20% e no mínimo em 0,50 m ao NPSH requerido pela bomba em todos os pontos de operação”.

É preciso ainda estar atento para o fato de que nos poços de sucção o nível da água normalmente não se mantém constante ao longo do ciclo diário de consumo (o mesmo ocorrendo com as estações booster, em que a pressão na sucção também varia ao longo do ciclo de consumo diário). Por isso, a norma é bastante explícita quando se refere a “todos os pontos de operação”.

O exemplo de uma condição real, a seguir, ilustra o procedimento de verificação da cavitação.

Exemplo: Cavitação

Seja uma estação elevatória com dois conjuntos iguais funcionando em paralelo e um terceiro de reserva. Verifique se as bombas estarão sujeitas ao fenômeno da cavitação nas diversas condições de operação.

As linhas de sucção têm 10 metros de comprimento, são de ferro fundido cimentado internamente em bom estado de conservação ($C = 130$), diâmetro de 250 mm, com as seguintes peças e seus respectivos valores do coeficiente “K” de perda de carga localizada:

Tabela II.8: Peças de uma linha de sucção e respectivos valores do coeficiente "K" de perda de carga localizada

PEÇA	QUANTIDADE	"K"	TOTAL
Válvula de pé com crivo	01	2,50	2,50
Curva de 90°	01	0,40	0,40
Redução excêntrica	01	0,15	0,15
Registro de gaveta aberto	01	0,20	0,20
Total	-	-	3,25

O esquema da Figura II.27 mostra a disposição dos conjuntos motobomba:

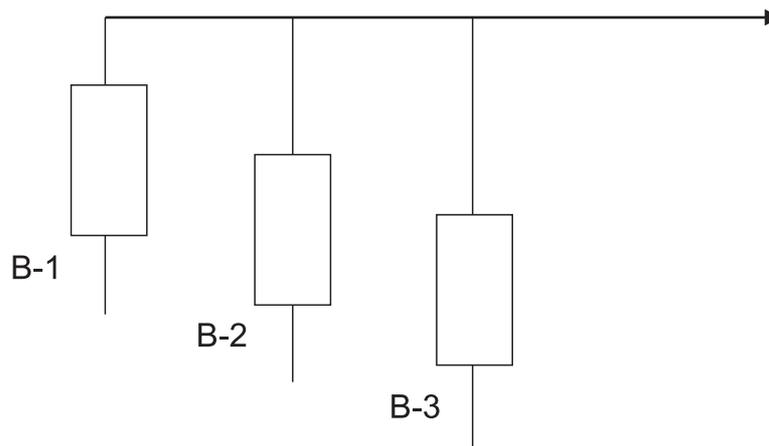


Figura II.27: Disposição dos conjuntos motobombas

O barrilete de recalque é formado por linhas de 4 metros de comprimento, do mesmo material ($C = 130$), porém com diâmetro de 200 mm. As peças para cada linha de cada bomba estão na Tabela II.9.

Tabela II.9: Peças de cada uma das linhas e respectivos valores do coeficiente “K” de perda de carga localizada

PEÇA	QUANTIDADE	“K”	TOTAL
Redução concêntrica	01	0,18	0,18
Registro de Gaveta aberto	01	0,20	0,20
Válvula de retenção	01	2,50	2,50
Te saída de lado	01	1,30	1,30
Total	-	-	4,18

Após o barrilete, a linha de adução tem 962 metros de comprimento, diâmetro de 250 mm e coeficiente “C” de Hazen-Williams igual a 130 (mesmo tubo de ferro fundido relativamente novo, cimentado internamente).

O desnível geométrico entre o eixo da bomba e a entrada do reservatório (montante) é igual a 14 metros. A altura de sucção (diferença de cota entre o eixo da bomba e o nível da água no poço de sucção) varia de um mínimo de 2 metros a um máximo de 4 metros.

As bombas instaladas nesta estação elevatória são da marca IMBIL, modelo ITA 80.160, alta rotação (3500 RPM) com rotor de 150 mm.

Os dados dessa bomba, retirados do catálogo do fabricante, estão apresentados na Tabela II.10.

Tabela II.10: Dados da bomba IMBIL, modelo ITA 80.160, alta rotação

VAZÃO (m ³ /h)	ALTURA MANOMÉTRICA TOTAL (m.c.a.)	ALTURA MÁXIMA DE SUCÇÃO (Hs)
50	40	6,52
100	38	6,43
150	33	5,90
200	24	4,25

Como foi dito no início da descrição da situação, trabalham normalmente duas bombas em paralelo, ficando uma terceira como reserva. Eventualmente, pode trabalhar uma única bomba, principalmente nos períodos de baixo consumo, quando o reservatório “perde” nível vagarosamente.

O objetivo deste exemplo numérico de uma situação de campo real é verificar qual é a expectativa de vazão para este sistema e avaliar as condições de funcionamento desses conjuntos motobomba, no que toca à possibilidade de existir o fenômeno da cavitação, considerando os dados apresentados.

Equacionamento do problema do modo tradicional (sem uso de simuladores hidráulicos)

O procedimento tradicional consiste em fazer o traçado da curva do sistema, sobrepondo-a à curva da bomba e da associação (duas bombas em paralelo), e, então, verificar os pontos notáveis do diagrama para, posteriormente, conferir na curva de catálogo o NPSH requerido.

Em seguida, deve-se calcular o NPSH disponível pela instalação para as situações previstas de funcionamento. A comparação desse ponto com o NPSH disponível pela instalação para as diversas possibilidades de funcionamento indicará a possibilidade ou não da ocorrência da cavitação.

Observação sobre a expressão “*altura máxima de sucção*”:

Alguns catálogos de fabricantes, como é o caso desta situação real, apresentam, em vez do NPSH requerido, a altura máxima de sucção para cada bomba de sua fabricação. Isso é obtido a partir da consideração de que a pressão atmosférica não varia tanto, para as nossas condições no Brasil, assim como a pressão do vapor, para as temperaturas usuais de bombeamento em sistemas de abastecimento de água (em torno de 20°C, $p_v/g = 0,24$ m.c.a.).

A Tabela II.11 mostra a variação da pressão atmosférica com a altitude.

Tabela II.11 Variação da pressão atmosférica com a altitude

ALTITUDE (metros)	PRESSÃO ATMOSFÉRICA (m.c.a.)
0	10,33
500	9,73
1000	9,17
1500	8,63

Fonte: Bombas Industriais (Edson Ezequiel de Mattos e Ronaldo de Falco)

Considerando que as linhas de sucção são geralmente curtas e que as peças existentes são praticamente as mesmas (aquelas que estão apresentadas no exemplo em estudo), é

possível estabelecer uma relação entre o NPSH requerido e a altura máxima de sucção a partir da comparação do NPSH requerido com a expressão do NPSH disponível, como mostrado abaixo:

Se a condição para não existir o fenômeno da cavitação é o NPSH disponível do sistema ser maior que o NPSH requerido pela bomba, pode-se escrever a seguinte inequação:

$$\text{NPSH}_d > \text{NPSH}_r$$

$$\text{Ou } \text{NPSH}_d = \frac{P_{atm} - P_v}{\gamma} - H_s - h_{ps} > \text{NPSH}_r$$

Escrevendo de outra maneira, fica:

$$H_{smáx} < \frac{P_{atm} - P_v}{\gamma} - h_{ps} - \text{NPSH}_r$$

Assumindo valores usuais para a diferença entre a pressão atmosférica e a pressão de vapor, levando-se em conta a restrição da norma NBR 12.214 para as velocidades nas linhas de sucção e, também, o coeficiente de segurança recomendado para a comparação entre os valores do NPSH disponível e requerido, é possível estabelecer, em função do NPSH requerido, obtido nos ensaios de laboratório do fabricante, o valor da altura máxima de sucção recomendada, visando, dessa forma, facilitar a escolha de bombas pelo pessoal leigo.

Alguns autores apresentam também fórmulas para a determinação do NPSH requerido, geralmente em função da velocidade específica. São, todavia, limitadas a determinadas condições de operação (geralmente para o ponto de máximo rendimento da bomba) e de precisão discutível. Por isso, não devem ser utilizadas para fins práticos na engenharia.

Feitas essas observações sobre a "altura máxima de sucção", a questão no exemplo numérico em estudo consiste em traçar as curvas de sistema para as diversas possibilidades de funcionamento (nível do tanque de sucção na posição de mínimo e na posição de máximo).

Perdas na sucção

- Distribuídas

$$h_p = \frac{10,7 \times Q^{1,852} \times 10}{130^{1,852} \times 0,25^{4,87}} = 11,127 \times Q^{1,852}$$

- Localizadas

$$h_l = 3,25 \times \left[\frac{4 \times Q}{\pi \times 0,25^2} \right]^2 \times \frac{1}{2 \times 9,8} = 68,886 \times Q^2, \text{ por tubulação.}$$

Perdas no recalque

- Distribuídas

$$h_p = \frac{10,7 \times Q^{1,852} \times 962}{130^{1,852} \times 0,25^{4,87}} + \frac{10,7 \times Q^{1,852} \times 4}{130^{1,852} \times 0,20^{4,87}} = 1070,454 \times Q^{1,852} + 13,195 \times Q^{1,852} = 1083,649 \times Q^{1,852}$$

- Localizadas

$$h_l = 4,18 \times \left[\frac{4 \times Q}{\pi \times 0,20^2} \right]^2 \times \frac{1}{2 \times 9,8} = 216,302 \times Q^2, \text{ para cada trecho do barrilete até a junção.}$$

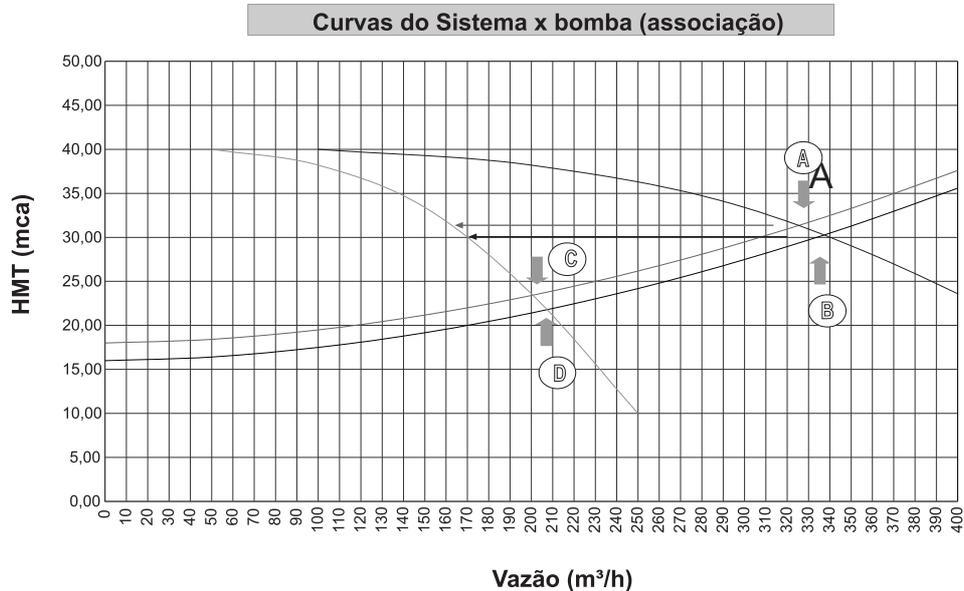
Na verdade, quando as bombas funcionam em paralelo, o trecho do barrilete de cada bomba (4 metros nessa instalação) não é uma linha comum às duas bombas, como o é o restante da linha adutora. Por cada trecho do barrilete circula apenas a metade da vazão total, o mesmo acontecendo com as tubulações de sucção. Quando, no entanto, uma das bombas trabalha só, a vazão que circula na tubulação de sucção, assim como no barrilete, é a mesma que circula pela adutora. É preciso, portanto, estar atento a esses detalhes na hora de optar pelo traçado da curva do sistema para as diversas situações. Dependendo do valor das perdas localizadas, alguma simplificação no traçado dessas curvas pode resultar em estimativas incorretas da vazão de funcionamento do sistema.

Quando se utilizam os simuladores hidráulicos, não há necessidade de se ficar atento a esses detalhes, que, na verdade, tomam tempo do engenheiro que estuda o problema. Basta inserir as perdas localizadas nos seus lugares (nos modelos, os coeficientes "k" são colocados como elementos dos tubos nos quais estão de fato instalados) e, simplesmente, "rodar" o modelo. Os cálculos são realizados pelo algoritmo matemático do simulador. Este mesmo exemplo está mostrado no livro texto, calculado com o auxílio de um simulador.

Tabela II.12: Resultado dos cálculos para o traçado da curva do sistema

VAZÃO (m ³ /h)	VAZÃO (l/s)	PERDA NA SUÇÃO (m)		PERDA NO RECALQUE (m)		PERDA DE CARGA (m)	ALTURA GEOMÉTRICA (m)		CURVA DO SISTEMA	
		DISTRIBUÍDA	LOCALIZADA	DISTRIBUÍDA	LOCALIZADA		NA mín	NA máx	NA mín	NA máx
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18	16	18,00	16,00
50	13,89	0,00	0,00	0,39	0,01	0,41	18	16	18,41	16,41
100	27,78	0,01	0,01	1,42	0,04	1,49	18	16	19,49	17,49
150	41,67	0,03	0,03	3,01	0,09	3,17	18	16	21,17	19,17
200	55,56	0,05	0,05	5,13	0,17	5,40	18	16	23,40	21,40
250	69,44	0,08	0,08	7,76	0,26	8,18	18	16	26,18	24,18
300	83,33	0,11	0,12	10,87	0,38	11,48	18	16	29,48	27,48
350	97,22	0,15	0,16	14,46	0,51	15,28	18	16	33,28	31,28
400	111,11	0,19	0,21	18,52	0,67	19,59	18	16	37,59	35,59

Sobrepondo a ela a curva da associação das bombas em paralelo, a interseção das linhas mostra os pontos de funcionamento para as diversas situações:

**Figura II.28:** Curvas do sistema x bomba (associação)

O diagrama mostra as diversas opções de funcionamento dessa elevatória, de modo que podem-se estudar as vazões em cada situação, verificar a condição do NPSH disponível para cada uma delas e comparar com o NPSH requerido pela bomba em cada um dos pontos de funcionamento possíveis. Isto está mostrado na seqüência.

Ponto A: Vazão esperada do sistema para a situação de **dois conjuntos** funcionando em paralelo, quando o **nível de água** no tanque de sucção estiver no **mínimo** (altura de sucção máxima). Da Figura II.28 extrai-se o valor de cerca de 325 m³/h, sendo que cada bomba estará contribuindo com a metade da vazão do sistema, ou seja, aproximadamente 163 m³/h, conforme a Figura mostra.

Ponto B: Vazão esperada do sistema para a situação de **dois conjuntos** funcionando em paralelo, quando o **nível de água** no tanque de sucção estiver no **máximo** (altura de sucção mínima). Da Figura II.28 extrai-se o valor de cerca de 340 m³/h, sendo que cada bomba estará contribuindo com a metade da vazão do sistema, ou seja, aproximadamente 170 m³/h, conforme a Figura mostra.

Ponto C: Vazão esperada do sistema para a situação de **apenas um conjunto** funcionando, quando o **nível de água** no tanque de sucção estiver no **mínimo** (altura de sucção máxima). Da Figura, extrai-se o valor de cerca de 200 m³/h.

Ponto D: Vazão esperada do sistema, para a situação de **apenas um conjunto** funcionando, quando o **nível de água** no tanque de sucção estiver no **máximo** (altura de sucção mínima). Da Figura II.28, extrai-se o valor de cerca de 208 m³/h.

Embora o sistema esteja projetado para o funcionamento de dois conjuntos em paralelo, deve-se sempre considerar a possibilidade do funcionamento de apenas um deles, o que ocorrerá sempre que o consumo for inferior à capacidade de bombeamento de um dos conjuntos.

Resumindo: A condição de sucção apresentada nos dados iniciais, tem-se que “[...] o desnível geométrico entre o eixo da bomba e a entrada do reservatório (montante) é igual a 14 metros. A altura de sucção (diferença de cota entre o eixo da bomba e o nível da água no poço de sucção) varia de um mínimo de 2 metros a um máximo de 4 metros”. As vazões esperadas para cada situação são:

Ponto A: 163 m³/h – altura máxima aproximadamente 5,7 metros, valor obtido interpolando-se essa vazão nos dados apresentados pelo fabricante. Esta situação refere-se ao extremo do nível mínimo no poço de sucção, o que corresponde à altura de sucção máxima (4 metros). Não há qualquer probabilidade da ocorrência de cavitação para essa situação de funcionamento.

Ponto B: 170 m³/h – altura máxima de aproximadamente 5,4 metros. Ainda que essa situação de funcionamento indique uma vazão esperada maior, o que corresponde a um NPSH requerido maior e, conseqüentemente, a uma altura máxima de sucção menor, o valor interpolado nos dados do fabricante também não mostra qualquer perigo com relação à cavitação, pois este extremo será alcançado quando o nível no poço de sucção estiver no máximo, indicando uma altura de sucção mínima (2 metros conforme os dados desta elevatória).

No entanto, para o ponto C, cuja vazão esperada é de 200 m³/h, a altura máxima de sucção indicada pelo fabricante será de cerca de 4,20 m. Esta situação corresponde à lâmina mínima no tanque de sucção, isto é, altura de sucção máxima igual a 4 metros, de acordo com os dados. É uma situação muito próxima do limite em que a prudência manda, no mínimo, verificar com mais precisão o NPSH requerido pela bomba, ao invés de utilizar o valor de altura máxima de sucção informada pelo fabricante.

Se for necessário fazer o sistema funcionar assim como está e se for detectado barulho anormal quando do funcionamento de um dos conjuntos, uma das soluções possíveis é instalar um indutor na entrada da bomba, o que reduz substancialmente o NPSH requerido, ou, em outras palavras, aumenta a altura máxima de sucção possível, eliminando a situação limite do início incipiente da cavitação. Esta seria, em princípio, a solução mais indicada do ponto de vista da eficiência energética.

Outra solução possível para evitar a cavitação, caso esteja ocorrendo a situação descrita, seria a instalação de automação por meio de válvulas próprias que impeça o funcionamento da bomba quando próxima da vazão de 200 m³/h e com nível no tanque de sucção abaixo, por exemplo, de 3 metros. Não seria, em princípio, a solução mais indicada, já que traz custos adicionais para a instalação, assim como maior consumo de energia, na medida em que o aumento da altura manométrica para a redução de vazão, que é como as válvulas reguladoras de pressão trabalham, traria uma perda de carga hidráulica adicional, que deveria ser compensada com um maior dispêndio de energia elétrica do motor.

De qualquer forma, essa é a análise que deve ser feita sempre quando se estuda o funcionamento de elevatórias, no que se refere ao cuidado com o problema da cavitação.

Como evitar a cavitação

Observe a expressão:

$$NPSH_d = \frac{p_{atm}}{\gamma} - \frac{p_v}{\gamma} - H_s - h_{ps} > NPSH_r$$

Nota-se que os elementos que nela interferem e que estão sob o domínio do engenheiro são a altura de sucção e a perda de carga na sucção. Partindo-se do pressuposto de que a instalação trabalharia numa determinada cota (o que define a pressão atmosférica) e com água a uma determinada temperatura (o que define a pressão de vapor), resta procurar, quando na fase de projeto, trabalhar, na medida do possível, com alturas de sucção pequenas e com perdas de carga na sucção minimizadas.

Quando a instalação já está em funcionamento e o problema é detectado, uma das possíveis e boas soluções antes de se pensar em trocar o conjunto motobomba consiste em utilizar indutores especialmente fabricados pelos próprios fornecedores dos conjuntos, embora a maioria não os fabrique.

3.2.8 - Evitando a recirculação

Ainda ligado aos problemas na instalação, vale a pena mencionar um mais diretamente ligado à manutenção dos equipamentos do que à instalação propriamente dita, uma vez que os efeitos sonoros por ele causados assemelham-se muito ao problema da cavitação, chegando a causar confusão e providências incorretas por parte dos responsáveis pela instalação quando não têm um bom conhecimento do problema. Trata-se da recirculação, fenômeno que ocorre quando os anéis de desgaste ou outros dispositivos de vedação não estão com as folgas corretas, fazendo com que a água da região de alta pressão da bomba recircule para a região de baixa pressão.

Ainda pode ser citada outra condição em que a recirculação ocorre: quando, em baixas vazões, a água não entra no rotor na totalidade, sendo parte recirculada ainda na tubulação de sucção.

Ambos são casos em que, certamente, o conjunto moto-bomba estará trabalhando numa região de baixo rendimento, devendo ser evitados quando se procura uma maior eficiência energética.

3.3 - Sugestões para a identificação de oportunidades

Benchmarking é a prática de determinar parâmetros chaves de operação de um sistema para fornecer pontos de comparação, constituindo-se em uma valiosa ferramenta de rastreamento do desempenho do sistema, de identificação de problemas e de determinação da eficácia de alterações implementadas no sistema. Alguns índices de referência práticos são: eficiência energética, custo unitário e consumo de água por habitante ou produto final.

Os índices de referência podem ser usados para comparar uma instalação com um sistema teórico para determinar o desempenho máximo atingível (eficiência clássica). Os índices de referência também são usados para comparar a operação atual com o histórico das operações passadas. Isto pode identificar as falhas potenciais em sistema, bem como as oportunidades de melhorias da eficiência. Outro uso comum dos índices de referência é na comparação de instalações similares.

Conforme a metodologia apresentada, a identificação de oportunidades passa pela avaliação de cada um dos parâmetros ou variáveis que afetam o consumo energético. Isto é:

- Buscar a otimização da vazão e da altura manométrica, verificando se o diâmetro das tubulação e acessórios, seu comprimento e acabamento interno estão adequados.
- Verificar se é possível melhorar o rendimento do motor e da bomba ou se a bomba está trabalhando em seu ponto de rendimento ótimo.
- Identificar os problemas que mais afetam o funcionamento contínuo do sistema de bombeamento e eliminá-los.
- Compatibilizar o tempo de funcionamento de acordo com o sistema tarifário a que a empresa esteja sujeita.

4

IDENTIFICAÇÃO DAS OPORTUNIDADES NO SISTEMA EM GERAL

4.1 - Automação

A eficiência de um sistema de bombeamento começa pelo tipo de controle operacional selecionado para as operações de liga/desliga das elevatórias.

Além dos controladores lógico programáveis, utilizados nas estações de grande porte, são largamente utilizados os sistemas de pressostato, chaves-bóia e pressostato-timer, ou outra combinação entre si desses elementos.

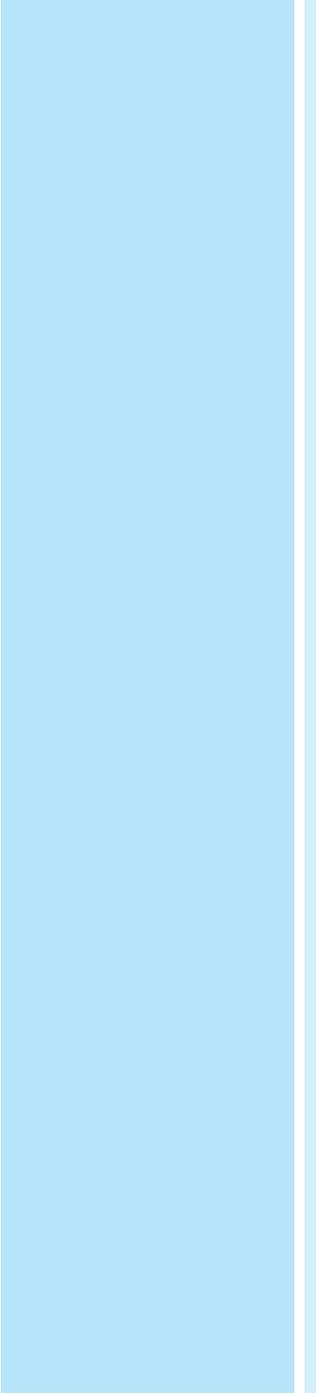
O quadro de comando elétrico da estação elevatória precisa “sentir” o nível do reservatório e, conseqüentemente, programar uma operação, seja ela simplesmente de desligar/ligar o único conjunto ou de desligar um dos vários conjuntos das elevatórias maiores, analisando, logicamente, o gradiente da variação de nível no reservatório e comandando a operação de acionamento de um ou mais dos conjuntos moto-bomba existentes na elevatória.

Há, ainda, a alternativa de comandar um variador de velocidade do motor, que fará com que a bomba opere em pontos diferentes, de acordo com a demanda ao longo do ciclo diário de abastecimento. No caso dos grandes sistemas, cada alternativa deve ser estudada cuidadosamente, de modo a selecionar a que melhor se adapte ao sistema em questão.

Qualquer que seja a alternativa tecnológica selecionada, a regra será sempre procurar fazer com que a bomba trabalhe o mais próximo possível do seu ponto de melhor rendimento, sem permitir extravasamento no reservatório nem seu esvaziamento total.

4.2 - Outras medidas

- Realizar a contratação adequada da demanda (kW). (ver anexo A do livro texto)
- Fazer a drenagem do ar das tubulações.
- Com bombas centrífugas, trabalhar com velocidades específicas (ver ANEXO) entre 40 e 60.
- Reduzir o consumo próprio (eficientização do sistemas de iluminação, climatização, equipamentos de tratamento e limpeza).



PARTE III
FONTES DE CONSULTA

PARTE III - FONTES DE CONSULTA

1

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEGRE, Helena, HIRNER, Wolfram, BAPTISTA, Jamie Melo e PARENA, Renato, **Performance indicators for water supply services**, Londres, IWA Publishing, 2000.

COSTA, Ênio Cruz da, **Mecânica dos fluidos**, Porto Alegre, Editora Globo, 1973.

CYPRIANO, José Márcio; LUCARELLI, Drausio L.; MERINO, Ramon W. Bonzi; NOGAMI, Paulo S; e SARTORI, José Ricardo, São Paulo, CETESB, 1974.

FALCO, Reinaldo de E MATTOS, Edson Ezequiel de. **Bombas industriais**, Rio de Janeiro, JR Editora Técnica, 1989.

JACUZZI, Noções de Hidráulica em www.jacuzzi.com.br/HTML/geral/infouteis.htm

KARASSIK, Igor J.; KRUTZSCH, William C.; FRASER, Warren H.; e MESSINA, Joseph P., *Pump Handbook*, McGraw-Hill, Inc, 1986.

MACINTYRE, Archibald Joseph, **Bombas e instalações de bombeamento**, Rio de Janeiro, Editora Guanabara, 1987.

STEPANOFF, A. J., **Centrifugal and axial flow pumps** (Theory, Design and Application), New York, John Wiley & Sons, Inc, 1957.

TSUTIYA, Milton Tomoyuki, **Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água**, São Paulo, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001.

WALSKI, Thomas M., CHASE, Donald V. e DRAGANA, Savic, **Water distribution modeling**, waterbury, CT, Haestad Press, 2001.

2

LINKS ÚTEIS

Salientamos, por seu conteúdo interessante e por oferecer um software de simulação hidráulica extremamente útil e gratuitamente (fonte aberta), o site: www.epa.gov .

LISTA DOS SITES DE INTERESSE

www.abes-dn.org.br

www.bermad.com.br

www.boosintl.com

www.bossintl.com/products/download/item/MikE+NET.html#11

www.cleaningwork.co.kr/Eng

www.dorot.com

www.epa.gov

www.flygt.com.br

www.haestad.com

www.iwahq.org.uk

www.jacuzzi.com.br

www.ksbbombas.com.br

www.leao.com.br

www.pollypig.com

www.woma.com.br

OUTROS LINKS ÚTEIS

www.cemig.com.br

www.aneel.org.br

www.eletronbras.gov.br/procel

www.inmetro.gov.br

3

ÓRGÃOS E INSTITUIÇÕES

Eletrobrás / Procel

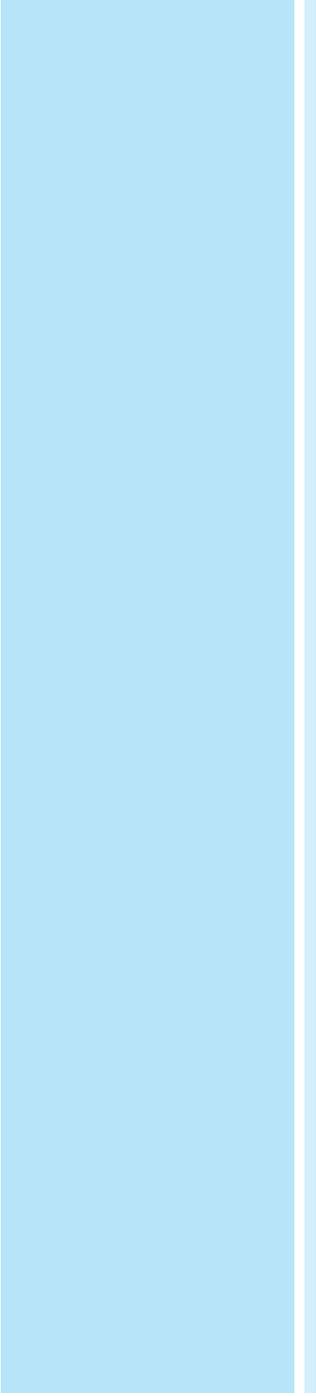
Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental - ABES

Universidades

Instituto Nacional de Eficiência Energética - INEE

Associação Brasileira de Empresas de Conservação de Energia - ABESCO

SENAI



ANEXOS

Tabela A: Grandezas e unidades de medidas

	GRANDEZA	SÍMBOLO	UNIDADE	UNIDADES PRÁTICAS
I	Massa específica	ρ	kg/m ³	
II	Peso específico	γ	N/m ³	kgf/m ³
III	Pressão	p	N/m ² (Pascal – Pa)	kgf/cm ²
IV	Vazão (volumétrica)	Q	m ³ /s	l/s, m ³ /h
V	Viscosidade absoluta	μ	N . s/m ² (ou Pa . s)	cP (centipoise)
VI	Viscosidade cinemática	ν	m ² /s	cSt (centistoke)
VII	Energia (Trabalho)	W	J (Joule) (N x m)	kWh, MWh
VIII	Potência	P	Watt (J/s)	hp e cv
IX	Freqüência	F	Hz (Hertz) – 1 s ⁻¹	rpm (rotação por minuto)
X	Carga Hidráulica (energia/volume)	H	m.c.a. (metros de coluna de água)	m

Conversão de unidades

- Massa específica - 1 utm/m³ = 9,81 kg/m³;
- Peso específico - 1 kgf/m³ = 9,81 N/m³;
- Pressão - 1 kgf/cm² = 9,81 N/cm² = 9,81 N/ 0,0001 m² = 98100 N/m² = 98,1 x 10³ Pa = 10 m.c.a (utilizando unidades do sistema inglês, para pressão em psi (pounds per square inch) e carga de pressão em ft (pés), 1 psi = 2,31 ft, entendido “ft” como pés de coluna de água);
- Vazão - 1 m³/s = 1000 l/s = 60 m³/min ou 1 l/s = 3,6 m³/h;
- Viscosidade absoluta - 1 cP (centipoise) = 0,001 Pa . s (Pascal segundo);
- Viscosidade cinemática - 1 cSt (centistoke) = 0,000001 m²/s;
- Energia (trabalho) - 1 J = 1 W x s = 0,001 kW x (1/3600) h = 1/3.600.000 kWh, ou 1 kWh = 3.600.000 J;
- Potência - 1 W = 0,001341 hp (horse power)
1 hp = 746 W ou 1 cv = 735 W;
- Freqüência - 1 Hertz (Hz) = 1 rps
ou 1 Hz = 60 r.p.m ou 1 r.p.m. = 1/60 Hz.

Relações notáveis

• Equação da continuidade

$$Q = S_1 \cdot U_1 = S_2 \cdot U_2 \text{ em que:}$$

Q é a vazão dada;

S é a área da seção transversal da tubulação no trecho i por onde flui o líquido; e

U_i a velocidade média de escoamento.

• Carga hidráulica

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{U_1^2}{2 \times g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{U_2^2}{2 \times g} + h_{12} \text{ "Teorema de Bernoulli", em que:}$$

Z é a cota topográfica do ponto considerado ou energia potencial;

$U^2 / 2.g$ é a energia cinética;

p/γ é a "carga" de pressão ou energia piezométrica (de pressão); e

h_{12} é a perda de carga no trecho entre os pontos "1" e "2".

Dimensionalmente, as três "cargas" são expressas em unidades de comprimento.

• Perdas de carga

Perda de carga distribuída

$$h = \frac{8 \times f}{\pi^2 \times g} \times \frac{Q^2 \times L}{D^5} \text{ "fórmula de Darcy-Weisbach", em que:}$$

h é a perda de carga distribuída ao longo do trecho de canalização;

L é o comprimento;

D é o diâmetro;

g é a aceleração da gravidade no local (9,81 m/s²); e

f é o fator que procura representar o estado de conservação das paredes internas da tubulação.

$$f = \frac{1,325}{\left[\ln \left(\frac{\epsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2}$$

em que:

Re é o número de Reynolds; e

ϵ é a rugosidade (“aspereza”) da parede interna do tubo.

Tabela B: Valores da rugosidade absoluta para diversos materiais

TIPO DE TUBO	VALOR DA RUGOSIDADE EM MM
Ferro fundido novo cimentado	0,102
Aço galvanizado novo	0,102 a 4,6
Aço sem revestimento novo	0,028
PVC novo	0,0015

Fonte: Haestad, Walski, Chase e Savic em “Water Distribution Modeling”

$$h = \frac{10,65 \times Q^{1,852} \times L}{C^{1,852} \times D^{4,87}} \quad \text{“fórmula de Hazen-Williams”, em que:}$$

C representa o estado de conservação das paredes internas da tubulação.

Tabela C: Valores de “C” por tipo de tubo, idade e qualidade de água.

TIPO DE TUBO				
Tipo de tubo	25 mm	75 mm	150 mm	300 mm
Ferro fundido novo cimentado	-	129	133	138
Água moderadamente agressiva - 30 anos	-	83	90	97
Água moderadamente agressiva - 60 anos	-	69	79	85
Água moderadamente agressiva - 100 anos	-	61	70	78
Condições severas - 30 anos	-	41	50	58
Condições severas - 60 anos	-	30	39	48
Condições severas - 100 anos	-	21	30	39
Aço galvanizado novo	120	129	133	-
PVC novo	134	142	145	147

Fonte: Haestad, Walski, Chase e Savic em “Water Distribution Modeling”

Comentário: A conceituação do estado de conservação das paredes internas do tubo é bem mais preciso como feito por Darcy-Weisbach do que por Hazen-Williams. Observe-se que na expressão empírica desses últimos o valor de "C" independe do diâmetro (D) e do tipo de escoamento (número de Reynolds) considerados. Na verdade, uma parede com uma aspereza maior será tão mais significativa quanto menor for o diâmetro em questão. Uma aspereza da ordem de 1 mm em uma tubulação de 50 mm de diâmetro tem um significado muito maior para o atrito do que essa mesma aspereza numa tubulação de 1000 mm de diâmetro.

Perda de carga localizada

$$h_L = K \cdot \frac{U^2}{2 \cdot g} \quad \text{em que:}$$

h_L é a perda de carga localizada; e
 K é o coeficiente de perda de carga localizada

Tabela D: Valores de "k" - Coeficiente de perda de carga localizada para diversas peças

TIPO DE PEÇA	VALOR DE "k"
Ampliação gradual (velocidade na seção menor)	0,3
Bocais	2,75
Comporta aberta	1
Cotovelo de 90 graus	0,9
Cotovelo de 45 graus	0,4
Crivo	0,75
Curva de 90 graus	0,4
Curva de 45 graus	0,2
Entrada normal em canalização	0,5
Registro de Gaveta aberto	0,2
Registro de Globo aberto	10
Tê passagem direta	0,6
Tê saída de lado	1,3
Válvula de pé	1,75
Válvula de retenção	2,5

Fonte: Azevedo Neto. Manual de Hidráulica - 1973

Perdas no sistema de abastecimento

$$Perda = \left(\frac{M - \sum_i^n V_i}{M} \right) \cdot 100 \quad \text{em que:}$$

M - volume distribuído (m³). É o volume medido na saída do reservatório ou, se houver mais de um, nas saídas dos reservatórios. Em suma, é o volume disponibilizado para o consumo.

F - volume faturado (m³). É a soma dos volumes considerados para efeito de faturamento em todas as economias.

C - volume consumido (m³). É a soma dos volumes efetivamente medidos em cada economia. Para as economias não hidrometradas, considera-se o volume mínimo da categoria.

m - volume micromedido (m³). É a soma dos volumes efetivamente medidos em cada economia. As economias não hidrometradas não entram nessa soma.

- Se o "**ΣVi**" considerado for o **faturado**, a perda se chama "perda faturada".
- Se o "**ΣVi**" considerado for o **medido**, a perda se chama "perda medida".
- Se o "**ΣVi**" considerado for o **micromedido**, a perda se chama "perda estimada".

ATENÇÃO: No último caso, apenas são somados os volumes medidos onde tem hidrômetro. Onde não tem, divide-se o somatório dos volumes micromedidos pelo número de economias onde eles foram micromedidos (economias hidrometradas) e multiplica-se pelo número de economias totais para se ter o volume micromedido "**estimado**" para todas elas, inclusive as não hidrometradas. Por isso, o nome dessa perda de "estimada".

• Altura manométrica

$$HMT = H_G + h + h_L \quad \text{em que:}$$

HMT é a altura manométrica total; e

H_G é a diferença de cotas entre a superfície livre da água do local para onde se deseja bombear e a superfície livre da água de onde ela será bombeada

• Tubulações associadas

1 - Para tubos em paralelo:

$$D_{eq} = \left(\frac{L_{eq}^{0,54}}{C_{eq}} \cdot \sum_1^n \frac{C_i \cdot D_i^{2,63}}{L_i^{0,54}} \right)^{0,38} \quad \text{Hazen-Williams}$$

$$D_{eq} = [(f_{eq} \cdot L_{eq})^{0,5} \cdot \sum_1^n \frac{D_i^{2,5}}{(f_i \cdot L_i)^{0,5}}]^{0,4} \quad \text{Darcy-Weisbach}$$

2 - Para tubos em série:

$$D_{eq} = \frac{1}{C_{eq}^{0,38}} \times \left(\frac{\sum_1^n L_i}{\sum_1^n \frac{L_i}{C_i^{1,852} \times D_i^{4,87}}} \right)^{0,205} \quad \text{Hazen-Williams}$$

$$D_{eq} = \left(\frac{f_{eq} \cdot \sum_1^n L_i}{\sum_1^n \frac{f_i \cdot L_i}{D_i^5}} \right)^{0,2} \quad \text{Darcy-Weisbach}$$

• Potência

$$P = \frac{\gamma \cdot Q \cdot HMT}{\eta_b \cdot \eta_M} \quad \text{em que:}$$

P é a potência absorvida da rede elétrica (W);

η_b é o rendimento da bomba; e

η_M é o rendimento do motor elétrico.

$\eta_t = \eta_b \cdot \eta_M$ é o rendimento total do conjunto motobomba.

• **NPSH** (NET POSITIVE SUCTION HEAD)

$$NPSH_d = \frac{p_s}{\gamma} + \frac{U_s^2}{2g} - \frac{p_v}{\gamma} \text{ em que:}$$

$NPSH_d$ é a carga mínima com a qual o líquido deve chegar ao ponto do rotor como líquido.

Tabela E: Velocidade máxima recomendada

DIÂMETRO NOMINAL(DN mm)	VELOCIDADE(m/s)
50	0,70
75	0,80
100	0,90
150	1,00
200	1,10
250	1,20
300	1,40
> 400	1,50

Fonte: NBR 12.214

• **Leis de similaridade**

Varição com a rotação (n):

$$\bullet Q_1 = \frac{n_1}{n} \times Q \quad (\text{vazão})$$

$$\bullet H_1 = \left(\frac{n_1}{n} \right)^2 \times H \quad (\text{altura manométrica total})$$

$$\bullet P_1 = \left(\frac{n_1}{n} \right)^3 \times P \quad (\text{potência})$$

Variação com o diâmetro do rotor:

$$\bullet Q_1 = \frac{d_1}{d} \times Q \quad (\text{vazão})$$

$$\bullet H_1 = \left(\frac{d_1}{d} \right)^2 \times H \quad (\text{altura manométrica total})$$

$$\bullet P_1 = \left(\frac{d_1}{d} \right)^3 \times P \quad (\text{potência})$$

• Velocidade específica

Decorrente das leis de similaridade, define-se com a seguinte relação:

$$n_s = 3,65 \times \frac{n \times \sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H^3}} \quad \text{no Sistema Técnico (ST)}$$

$$n_s = 1.000 \times \frac{n \times \sqrt{Q}}{\sqrt[4]{(H \cdot g)^3}} \quad \text{no Sistema Internacional (SI)}$$

em que:

n_s é a “velocidade específica”; e
 n é a rotação da bomba

Nesta expressão, devem ser utilizadas as seguintes unidades:

n	em rpm, no ST e rps, no SI
Q	em m ³ /s
H	em m
g	em m/s ²