



---

# AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA

## Manual de Eficiência Energética

Primeira edição



Iniciativa de Água e Saneamento



Iniciativa de Energia Sustentável e  
Mudança Climática



**Banco Interamericano de Desenvolvimento**

# **AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA**

## **Manual de Eficiência Energética**

Primeira edição

Iniciativa de Água e Saneamento  
Iniciativa de Energia Sustentável e Mudança Climática  
Washington  
2011

A produção desta publicação esteve a cargo do Escritório de Relações Externas do BID

© Banco Interamericano de Desenvolvimento. Todos os direitos reservados.  
As opiniões expressas nesta publicação são dos autores e não refletem necessariamente  
a posição oficial do Banco Interamericano de Desenvolvimento

Para mais informações ou consultas, contatar: [agua@iadb.org](mailto:agua@iadb.org) ou [secci@iadb.org](mailto:secci@iadb.org)

IDB-MG-112

# SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO .....	VII
RESUMO EXECUTIVO .....	IX
DEFINIÇÕES .....	XI
SIMBOLOGIA .....	XIII

## Capítulo 1

<b>Introdução: uma etapa chave do Plano Integral de Eficiência Energética</b> .....	1
---	---

## Capítulo 2

<b>Metodologia para uma auditoria energética</b> .....	3
Atividades de campo .....	4
Atividades de escritório .....	4

## Capítulo 3

<b>Pesquisa prévia</b> .....	7
Contexto nacional e do setor energético .....	7
Contexto nacional do setor de água .....	7
Situação particular da empresa de água e saneamento .....	7

## Capítulo 4

<b>Coleta de dados</b> .....	9
Dados do sistema elétrico .....	9
Dados nominais do motor .....	12
Dados nominais da bomba .....	13

## Capítulo 5

<b>Medições de campo</b> .....	15
Medição de parâmetros elétricos .....	15
Medição de parâmetros hidráulicos .....	19
Formatos de registro de dados em campo .....	24
Medições de temperatura .....	26

## Capítulo 6

<b>Análise de informações e avaliação de eficiência</b> .....	29
Perdas energéticas em sistemas de água .....	29
Balanco de energia do sistema .....	29
Aspectos a serem avaliados em uma auditoria de eficiência energética .....	30
Cálculo de perdas elétricas em condutores e transformadores .....	30
Cálculo de perdas e eficiência do motor .....	36
Cálculo de perdas e eficiência da bomba .....	40
Cálculo de perdas de carga em tubulações .....	44
Cálculo de perdas na rede .....	46
Cálculo de indicadores energéticos .....	52
Elaboração de balanços de energia .....	53
Análise das condições de operação .....	55

## Capítulo 7

<b>Identificação de oportunidades de economia de energia</b> .....	59
Medidas relacionadas com a tarifa de energia .....	59
Medidas para reduzir as perdas nas instalações elétricas .....	62

Medidas para aumentar a eficiência dos motores .....	65
Redução de vazamentos .....	74
Melhorar a operação .....	75
Melhorar a manutenção .....	78
Substituição da fonte de alimentação de energia elétrica .....	79

## Capítulo 8

<b>Avaliação das medidas de economia</b> .....	83
Avaliação das economias (balanço de energia esperado) .....	83
Avaliação econômica da economia e taxa de retorno .....	84
Elaboração do relatório final do plano de eficiência energética .....	85

## Lista de tabelas

Tabela 4.1: Informações a serem coletadas da empresa de água .....	10
Tabela 5.1: Descrição da campanha de medição .....	15
Tabela 5.2: Procedimento de cálculo da carga hidráulica de bombeamento ( $H_b$ ) e parâmetros a medir .....	24
Tabela 5.3: Formato para o registro de dados nominais e características do sistema eletromecânico .....	25
Tabela 5.4: Formato para o registro de medições de variáveis hidráulicas e elétricas de equipamentos de bombeamento .....	26
Tabela 6.1: Perdas em um transformador elétrico em função de sua capacidade nominal .....	32
Tabela 6.2: Resistência de diferentes bitolas de condutor e queda de tensão para o exemplo em desenvolvimento .....	35
Tabela 6.3: Cálculo de perdas energéticas finais por efeito Joule para o exemplo sob análise .....	36
Tabela 6.4: Redução da eficiência de um motor rebobinado em função da temperatura utilizada .....	38
Tabela 6.5: Viscosidade dinâmica da água .....	45
Tabela 6.6: Exemplo de desdobramento de perdas em um sistema de bombeamento do instituto costarricense de aquedutos e esgotos (AyA) .....	54
Tabela 7.1: Análise comparativa de tarifas elétricas no IDAAN Panamá .....	60
Tabela 7.2: Ações recomendadas para melhorar as condições em um transformador .....	62
Tabela 7.3: Ações recomendadas para corrigir o desequilíbrio de tensão de alimentação dos motores elétricos .....	65
Tabela 7.4: Ações recomendadas para corrigir condições de operação ineficiente dos motores elétricos .....	67
Tabela 7.5: Ações recomendadas para ajustar as curvas do equipamento de bombeamento à condição real de operação .....	70
Tabela 7.6: Sequência de atividades para implementar um programa de controle de vazamentos .....	75
Tabela 8.1: Formato de resumo de economias decorrentes do plano de economia de energia .....	85

## Lista de figuras

Figura I: Diagrama simples do balanço de energia .....	ix
Figura 1.1: Esquema das etapas necessárias para a realização de um piee .....	1
Figura 1.2: Esquema de um sistema típico de fornecimento e consumo energético em sistemas de água potável e saneamento .....	2
Figura 2.1: Metodologia para realizar uma auditoria energética .....	3
Figura 5.1: Medição de tensão (V) em equipamentos de bombeamento .....	17
Figura 5.2: Medição de corrente elétrica em equipamentos de bombeamento .....	18
Figura 5.3: Medição da potência real a jusante dos capacitores .....	19
Figura 5.4: Medição da potência real a montante dos capacitores .....	19
Figura 5.5: Posição do medidor de vazão .....	20
Figura 5.6: Medição de níveis quando há um manômetro apenas na descarga .....	22
Figura 5.7: Medição de níveis quando há manômetros na sucção e na descarga .....	22
Figura 5.8: Medição de níveis em equipamentos submersíveis .....	22
Figura 6.1: Perdas energéticas típicas nos componentes eletromecânicos de um sistema de água .....	29
Figura 6.2: Descrição gráfica do balanço de energia do sistema .....	30
Figura 6.3: Detalhe dos componentes típicos de uma subestação .....	31

Figura 6.4: Perdas em transformadores em função da temperatura. ....	33
Figura 6.5: Fluxo de energias em um motor elétrico. ....	36
Figura 6.6: Curvas típicas de eficiência vs. carga para motores de indução do tipo gaiola de esquilo. ....	37
Figura 6.7: Pontos de eficiência a reduzir em função da diferença de tensão em relação à nominal em um motor elétrico. ....	39
Figura 6.8: Redução porcentual da eficiência de um motor elétrico em função do desequilíbrio de tensão. ....	39
Figura 6.9: Diagrama energético global das bombas centrífugas. ....	41
Figura 6.10: Diagrama esquemático das eficiências que integram a eficiência eletromecânica. ....	42
Figura 6.11: Diagrama de Moody. ....	46
Figura 6.12: Arranjo padrão de bombas centrífugas operadas em paralelo. ....	47
Figura 6.13: Características de carga e capacidade de bombas centrífugas operadas em paralelo. ....	48
Figura 6.14: Efeito de várias bombas em paralelo sobre o sistema de condução. ....	48
Figura 6.15: Nomograma para cálculo de comprimento equivalente em acessórios de tubulações. ....	51
Figura 6.16: Desdobramento de perdas em um sistema de bombeamento do AyA na Costa Rica. ....	54
Figura 6.17: Diagrama esquemático dos problemas apresentados pela operação das bombas fora do ponto ideal. ....	56
Figura 6.18: Modificação da eficiência por variação de condições de operação em uma bomba. ....	57
Figura 7.1: Comparativo de custos por tarifa no IDAAN Panamá. ....	61
Figura 7.2: Curvas típicas de dois equipamentos de bombeamento com curvas H-Q diferentes. ....	69
Figura 7.3: Diagrama de uma bomba de turbina de eixo com rotor aberto e seus componentes. ....	71
Figura 7.4: Diagrama de um motor de eixo oco acoplado a uma bomba de turbina. ....	72
Figura 7.5: Esquema de funcionamento de um moinho de vento para a extração de água subterrânea. ....	81
Figura 8.1: Balanço de energia esperado ao implementar um plano de economia de energia. ....	83

### Lista de fotografias

Fotografia 5.1: Medição de pressão com manômetro do tipo Bourdon calibrado. ....	21
Fotografia 5.2: Medição do nível dinâmico de sucção em reservatórios de bombeamento. ....	23
Fotografia 5.3: Medição do nível dinâmico em reservatórios de bombeamento. ....	23
Fotografia 6.1: Componentes típicos de uma subestação. ....	31
Fotografia 6.2: Componentes típicos do sistema eletromotriz de um sistema de bombeamento. ....	34



## APRESENTAÇÃO

Como parte de sua cooperação técnica Eficiência Energética em Empresas de Água e Saneamento no Caribe, a Iniciativa de Energia Sustentável e Mudança Climática (SECCI, da sigla em inglês) do Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) financiou o desenvolvimento de uma metodologia regional para melhorar a eficiência energética e a manutenção de empresas fornecedoras de serviço de água nos países da América Latina e do Caribe. Essa metodologia, desenvolvida pelas firmas de consultoria Econoler International e a Alliance to Save Energy, enfoca principalmente a eficiência eletromecânica dos sistemas de bombeamento de água no Caribe. Esta publicação apresenta o manual de avaliação de eficiência energética. A folha de cálculo, um guia para a folha de cálculo e o manual de manutenção para avaliação dos sistemas estão também disponíveis no portal de publicações do BID: <http://www.iadb.org/publications/> e no portal da Iniciativa de Água e Saneamento: <http://www.iadb.org/en/topics/water-sanitation/energy-efficiency-for-utilities,4492.html>.

A supervisão da preparação deste manual esteve a cargo das seguintes pessoas da Unidade de Energia Sustentável e Mudança Climática (ECC, na sigla em inglês) e da Divisão de Água e Saneamento (WSA, na sigla em inglês): Christoph Tagwerker (ECC), Marcello Basani (WSA), Rodrigo Riquelme (WSA) e Gerhard Knoll (WSA). O manual foi desenvolvido pelos engenheiros Arturo Pedraza e Ramón Rosas da Econoler International e da Alliance to Save Energy.

Iniciativa de Água e Saneamento  
Iniciativa de Energia Sustentável e Mudança Climática

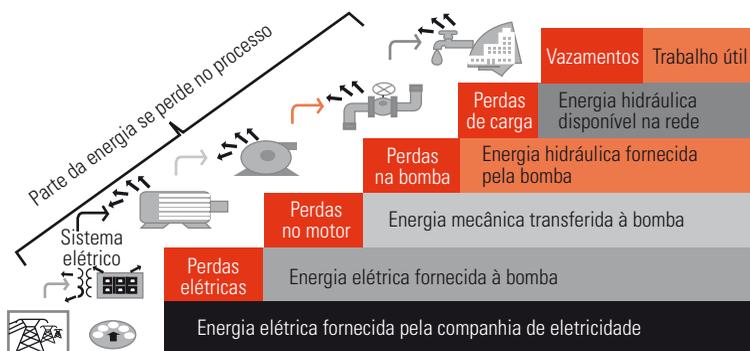


## RESUMO EXECUTIVO

Neste manual são descritas as etapas necessárias para realizar uma Auditoria Energética (AE) em um Sistema de Água e Saneamento para a América Latina, bem como as principais técnicas de engenharia que são utilizadas para o diagnóstico e a avaliação das oportunidades de economia mais importantes nesse tipo de sistemas, com o objetivo de identificar medidas técnicas e administrativas rentáveis para a economia de energia nessas instalações.

O princípio conceitual da AE é o Balanço de Energia. Essencialmente, ele se baseia no cálculo da energia consumida e das perdas em cada componente do processo de bombeamento. Isto é, da entrada de energia no terminal de ligação, passando por todos os elementos do sistema até a entrega da água no ponto de uso. Este método permite distinguir que quantidade de energia, da energia fornecida, se transforma em trabalho útil, que é o trabalho mínimo para bombear a água estritamente necessária, até todos os pontos do sistema de distribuição. Segue abaixo um diagrama simples do balanço:

FIGURA I: Diagrama simples do balanço de energia



A energia que não se transforma em trabalho útil representa uma perda dela e, portanto, de áreas de oportunidade de economia. Esta técnica permite identificar e quantificar onde se localizam as maiores perdas e o quanto se pode economizar sem deixar qualquer parte do sistema sem avaliar.

O manual explica de forma exata a sequência ordenada de atividades necessárias para a AE, as quais são apresentadas abaixo de forma resumida:

**Pesquisa prévia.** Nesta atividade, o contexto do país onde a empresa de água desenvolve a atividade é revisado, sobretudo, em termos da situação dos recursos hidráulicos e energéticos.

**Atividades de campo.** Incluem a coleta de dados chave dos sistemas de bombeamento e outros componentes (motores, bombas, tubulações, tanques e dados adicionais, tais como as condições de

operação, população e topografia) e medições de campo, onde são coletados os principais parâmetros operacionais, hidráulicos e energéticos necessários para os cálculos de eficiências, perdas e economias potenciais. No manual são fornecidas ferramentas, sob formatos, para fazer a captura dos dados e seu processamento automático.

**Processamento e análise das informações.** Incluem as avaliações de eficiência, o cálculo das perdas descritas para obter os balanços específicos para cada sistema, o cálculo de Indicadores Energéticos, sua análise estatística, a elaboração dos balanços de energia e análises da operação e práticas de Manutenção.

**Elaboração da proposta de medidas de economia.** Com a análise das informações e a avaliação dos elementos de maior consumo de energia, determinam-se as medidas de economia, sendo as principais delas:

- Economias em tarifas de fornecimento
- Redução de perdas nas instalações elétricas
- Melhora da eficiência em motores elétricos
- Melhora da eficiência nas bombas
- Redução de perdas mecânicas
- Redução de vazamentos de água e perdas de carga
- Melhora da operação
- Melhora da manutenção
- Substituição do fornecimento de energia
- Mudança de tecnologia
- Melhora da iluminação

Sugere-se considerar medidas a serem implementadas a médio e longo prazo, tais como políticas de propaganda para a comunidade, voltadas a propiciar a economia no consumo de água, já que isso afeta diretamente o consumo de energia e, em consequência, existe uma redução direta das perdas.

Ainda, sugere-se um plano de detecção de perdas na rede de distribuição de água potável.

**Avaliação das medidas.** Como parte final desta metodologia, explica-se como avaliar as medidas, calculando para cada uma as economias (diretas e indiretas) que serão alcançadas, o valor total dos investimentos para sua implantação, os custos adicionais associados (operação, manutenção e consumíveis) e os indicadores financeiros (retorno, valor presente líquido, análise do ciclo de vida do projeto, etc.).

No diagrama 2.1 (Metodologia para realizar uma Auditoria Energética) do Capítulo 2, essa sequência de atividades da AE é explicada com mais clareza.

## DEFINIÇÕES

As definições dos termos e expressões apresentados abaixo visam fornecer uma ideia comum entre os usuários do manual, de forma que todos usem os mesmos conceitos expostos.

**Água potável.** Líquido incolor, insípido e inodoro que pode ser encontrado em estado natural ou produzido por meio de um processo de purificação. Serve para o consumo humano e animal.

**Bomba.** Máquina hidráulica que transforma a energia mecânica em energia de pressão, que é transferida para a água.

**Carga de velocidade.** É a energia cinética por unidade de peso do líquido em movimento.

**Carga total de bombeamento.** A soma algébrica da carga de pressão na descarga, do nível de sucção, do nível no centro do manômetro, das perdas por atritos e singulares na tubulação e da carga de velocidade.

**Coefficiente de cisalhamento.** É o coeficiente de atrito da água com as paredes de uma tubulação; depende do material de construção ou revestimento da tubulação, do diâmetro da tubulação e da velocidade da água; com esse parâmetro são calculadas as perdas de energia em uma tubulação de água.

**Corrente elétrica.** É a intensidade de corrente que passa por um condutor com resistência R e cuja tensão elétrica é V.

**Fator de potência.** É a razão entre a potência ativa e a potência aparente, descrevendo a relação entre a potência transformada em trabalho útil e real e a potência total consumida.

**Fluxo.** Volume de água medido em uma unidade de tempo, geralmente expresso em litros por segundo.

**Fonte de abastecimento.** Local de onde a água é tomada para o fornecimento no sistema de distribuição.

**Hidrometria.** Medição da vazão ou fluxo.

**Nível de referência.** É o nível selecionado como referência para todas as medições hidráulicas, normalmente o plano inferior da placa-base de montagem do equipamento de bombeamento.

**Nível de sucção.** É a distância vertical do nível de referência até a superfície da água quando o equipamento de bombeamento está em operação.

**Nível dos centros de manômetro.** É a distância vertical entre o nível de referência e a posição do manômetro utilizado para medir as cargas de pressão na sucção e na descarga.

**Potência aparente e reativa.** Em um triângulo retângulo, a potência aparente é associada à hipotenusa, a potência ativa, a um cateto, e a potência reativa, ao outro cateto. O cosseno do ângulo entre a hipotenusa e o cateto adjacente, associado, respectivamente, à potência aparente e à potência ativa, é denominado Cosseno  $\text{Fi}$  ( $\text{Cos } \theta$ ).

**Potência ativa.** É a potência consumida por um motor elétrico transformada em trabalho útil.

**Potência elétrica.** É a potência de entrada, em Watts, que o motor elétrico acoplado à bomba requer em operação normal.

**Reservatório.** É a estrutura hidráulica complementar do sistema hidráulico, que serve como armazenamento provisório para bombear algum líquido de um nível inferior para um superior. É empregado para a água potável, água tratada, efluentes sanitários e efluentes pluviais.

**Tensão elétrica.** Trabalho elétrico medido entre dois pontos de um circuito elétrico.

**Vazamento.** Escape físico de água em uma rede de tubulações de água potável.

## SIMBOLOGIA

Os símbolos abaixo são os utilizados no manual:

<b>A<sub>eco</sub></b>	Economia anual que será obtida com a implantação da medida de economia proposta (\$/ano).
<b>C<sub>o</sub></b>	Capacidade requerida pelo capacitor.
<b>CUE</b>	Custo unitário da energia (\$/kWh).
<b>Db<sub>v</sub></b>	Desequilíbrio de tensão (V).
<b>D<sub>r-m</sub></b>	Distância do nível de referência ao manômetro (m).
<b>E<sub>c</sub></b>	Energia elétrica consumida no período de medição.
<b>FP</b>	Fator de potência.
<b>g</b>	Aceleração da gravidade (9,8 m/s <sup>2</sup> ).
<b>H<sub>b</sub></b>	Carga hidráulica de bombeamento (m).
<b>h<sub>f</sub></b>	Perdas de carga hidráulica por cisalhamento (m).
<b>h<sub>fs</sub></b>	Perdas de carga hidráulica por efeito de cisalhamento, acrescidas das perdas equivalentes por acessórios, na tubulação de sucção (m).
<b>HP<sub>nominal</sub></b>	Potência nominal no eixo do motor (a real verificada em campo) (kW).
<b>H<sub>t</sub></b>	Carga total de bombeamento (m).
<b>h<sub>fta</sub></b>	Perdas por cisalhamento na tubulação atual (m).
<b>h<sub>ftp</sub></b>	Perdas por cisalhamento na tubulação proposta (m).
<b>h<sub>v</sub></b>	Carga de velocidade (m).
<b>I<sub>a</sub></b>	Corrente elétrica na fase A (A).
<b>I<sub>b</sub></b>	Corrente elétrica na fase B (A).
<b>I<sub>c</sub></b>	Corrente elétrica na fase C (A).
<b>I</b>	Corrente circulando no condutor (A).
<b>I<sub>mae</sub></b>	Valor do investimento necessário para a aplicação da medida de economia proposta (\$).
<b>Iméd</b>	Corrente elétrica média das três fases (A).
<b>L<sub>c</sub></b>	Comprimento total do condutor (m).
<b>L<sub>o</sub></b>	Distância entre os dois pontos de medição da tensão (m).
<b>N<sub>s</sub></b>	Nível dinâmico de sucção da bomba.
<b>n<sub>ri</sub></b>	Período de recuperação do investimento (anos).
<b>P<sub>a</sub></b>	Potência ativa medida (kW).
<b>P<sub>Cu</sub></b>	Perdas de tensão nominal no núcleo (kW).
<b>P<sub>d</sub></b>	Carga de pressão na descarga (m).
<b>P<sub>e</sub></b>	Potência elétrica demandada pelo motor (kW).
<b>P<sub>e</sub>'</b>	Potência elétrica que o motor proposto demandará (kW).
<b>P<sub>ebm</sub></b>	Potência elétrica que o conjunto motor-bomba demanda atualmente.
<b>P<sub>emb</sub>'</b>	Potência elétrica esperada com o conjunto motor-bomba de melhor eficiência.
<b>P<sub>et</sub></b>	Potência elétrica que o transformador demanda atualmente.
<b>P<sub>eQm</sub></b>	Potência elétrica que o conjunto motor-bomba demanda atualmente com a vazão média.
<b>P<sub>eQm</sub>'</b>	Potência elétrica esperada com a vazão média.
<b>P<sub>Fe</sub></b>	Perdas no cobre à tensão nominal (kW).
<b>P<sub>h</sub></b>	Potência hidráulica de saída (kW).
<b>P<sub>j</sub></b>	Perdas por efeito Joule (W).
<b>P<sub>mb</sub></b>	Potência mecânica absorvida pela bomba (HP).
<b>P<sub>n</sub></b>	Potência nominal do transformador sob exame (kVA).

<b><math>P_{op}</math></b>	Pressão ideal de operação (m).
<b><math>P_r</math></b>	Potência reativa medida (kVAr).
<b><math>P_{rt}</math></b>	Potência real considerando todas as cargas alimentadas pelo transformador (kW).
<b><math>P_s</math></b>	Carga de pressão de sucção (m).
<b><math>P_{tot}</math></b>	Perdas totais (kW).
<b><math>Q</math></b>	Fluxo volumétrico (m <sup>3</sup> /s).
<b><math>R</math></b>	Resistência expressa do condutor ( $\Omega$ ).
<b><math>R_r'</math></b>	Resistência do condutor proposto ( $\Omega/m$ ).
<b><math>R_u</math></b>	Resistência real do condutor ( $\Omega/m$ ).
<b><math>V</math></b>	Tensão elétrica trifásica (V).
<b><math>V_{an}</math></b>	Tensão da fase A com relação ao neutro (V).
<b><math>V_{bn}</math></b>	Tensão da fase B com relação ao neutro (V).
<b><math>V_{cn}</math></b>	Tensão da fase C com relação ao neutro (V).
<b><math>V_{A-B}</math></b>	Tensão entre as fases A e B (V).
<b><math>V_{B-C}</math></b>	Tensão entre as fases B e C (V).
<b><math>V_{C-A}</math></b>	Tensão entre as fases C e A (V).
<b><math>V_{med}</math></b>	Tensão média entre fases (V).
<b><math>\Delta E_a</math></b>	Energia anual que é viável economizar com a implantação do variador (kWh/ano).
<b><math>\Delta E</math></b>	Redução de energia elétrica consumida.
<b><math>\Delta P_{et}</math></b>	Redução da potência elétrica esperada no transformador.
<b><math>\Delta P_e</math></b>	Redução da potência elétrica demandada.
<b><math>\Delta F</math></b>	Redução do faturamento de eletricidade.
<b><math>\Delta P_r</math></b>	Redução da pressão para esse registro.
<b><math>\Delta V_j</math></b>	Queda de tensão em um condutor elétrico.
<b><math>\gamma</math></b>	Peso específico da água (kg/m <sup>3</sup> ).
<b><math>\eta_b</math></b>	Eficiência da bomba (%).
<b><math>\eta_{em}</math></b>	Eficiência eletromecânica do conjunto motor-bomba (%).
<b><math>\eta_{física}</math></b>	Eficiência física (%).
<b><math>\eta_m</math></b>	Eficiência de operação do motor (%).
<b><math>\eta_m'</math></b>	Eficiência de operação do motor proposto (%).
<b><math>\eta_{em}'</math></b>	Eficiência esperada da bomba (%).
<b><math>\eta_{trans}</math></b>	Eficiência atual do transformador (%).
<b><math>\eta_{trans}'</math></b>	Eficiência esperada do transformador (%).
<b><math>\rho</math></b>	Densidade da água bombeada (kg/m <sup>3</sup> ).
<b><math>\Delta \\$</math></b>	Economia anual que será obtida com a implantação do variador (\$/ano).

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO: UMA ETAPA CHAVE DO PLANO INTEGRAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A Auditoria Energética (AE) em um sistema de Água e Saneamento é uma parte fundamental e o ponto de partida da realização de um Plano Integral de Eficiência Energética (PIEE).

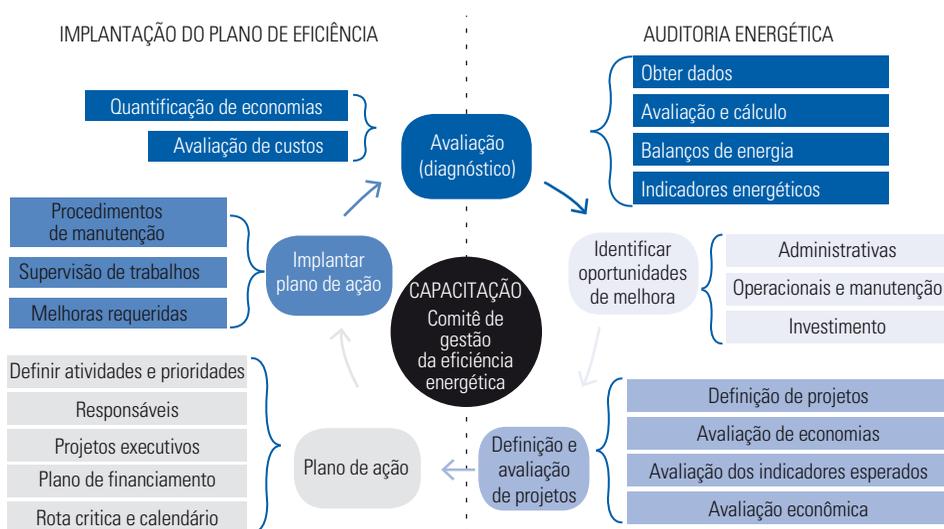
Realizar um PIEE em um sistema de água e saneamento envolve o desenvolvimento de uma sequência ordenada e escalonada de etapas que conduzam à determinação de onde e quanta energia é utilizada ao longo do sistema, o grau de eficiência com que ela é utilizada, as medidas e projetos específicos que permitam reduzir seu consumo e custos, o custo-benefício ou rentabilidade dessas ações, seu plano de implantação e os métodos de avaliação e monitoração dos resultados.

Esse processo envolve vários aspectos chave, tais como:

- O compromisso real da empresa de água e saneamento
- A avaliação do desempenho no consumo energético, incluindo sua relação com a operação e manutenção do sistema
- Elaborar um Plano de Ação, o que implica definir os objetivos, os prazos, os responsáveis e os recursos a serem utilizados
- A avaliação e monitoração dos resultados, o que implica medir o progresso da implantação do plano e monitoração dos resultados ou benefícios reais que se consigam no final do processo e de forma periódica

Na Figura 1.1, é apresentado um esquema das etapas necessárias para a realização de um PIEE.

**FIGURA 1.1:** Esquema das etapas necessárias para a realização de um PIEE.

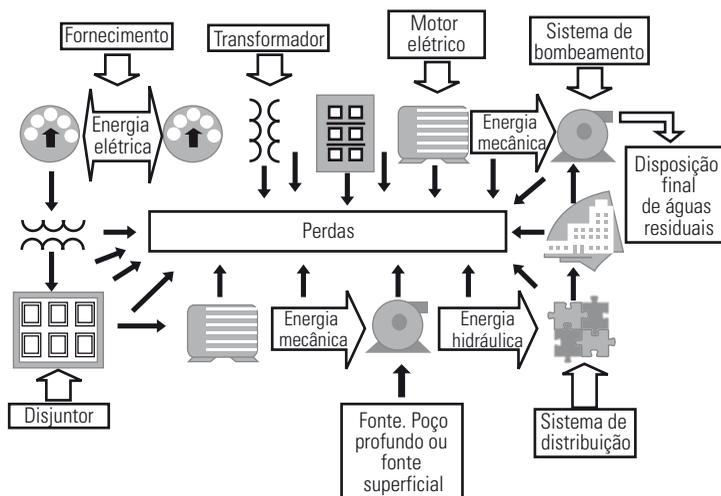


Como se pode observar, na primeira etapa do processo, durante a avaliação de desempenho, ocorre a realização da auditoria energética, que é o objetivo da metodologia descrita neste manual.

Essa atividade é uma etapa chave dentro do processo, uma vez que é a base para definir os potenciais de economia de energia que podem ser alcançados e as ações específicas para isso.

No caso dos sistemas de Água e Saneamento, os principais elementos para o fornecimento e a transformação energética, necessários para a produção, fornecimento e tratamento de água, são apresentados sob a forma de esquema, na Figura 1.2, na qual podemos ver a rede de equipamentos, do medidor de consumo do fornecedor de energia, passando pelo transformador, o centro de controle do motor e seus elementos correspondentes, o motor elétrico, a bomba e a disposição final da água potável e residual.

**FIGURA 1.2:** Esquema de um sistema típico de fornecimento e consumo energético em sistemas de água potável e saneamento



Nos capítulos seguintes, serão descritos os métodos e procedimentos necessários para realizar essa auditoria energética.

## Capítulo 2

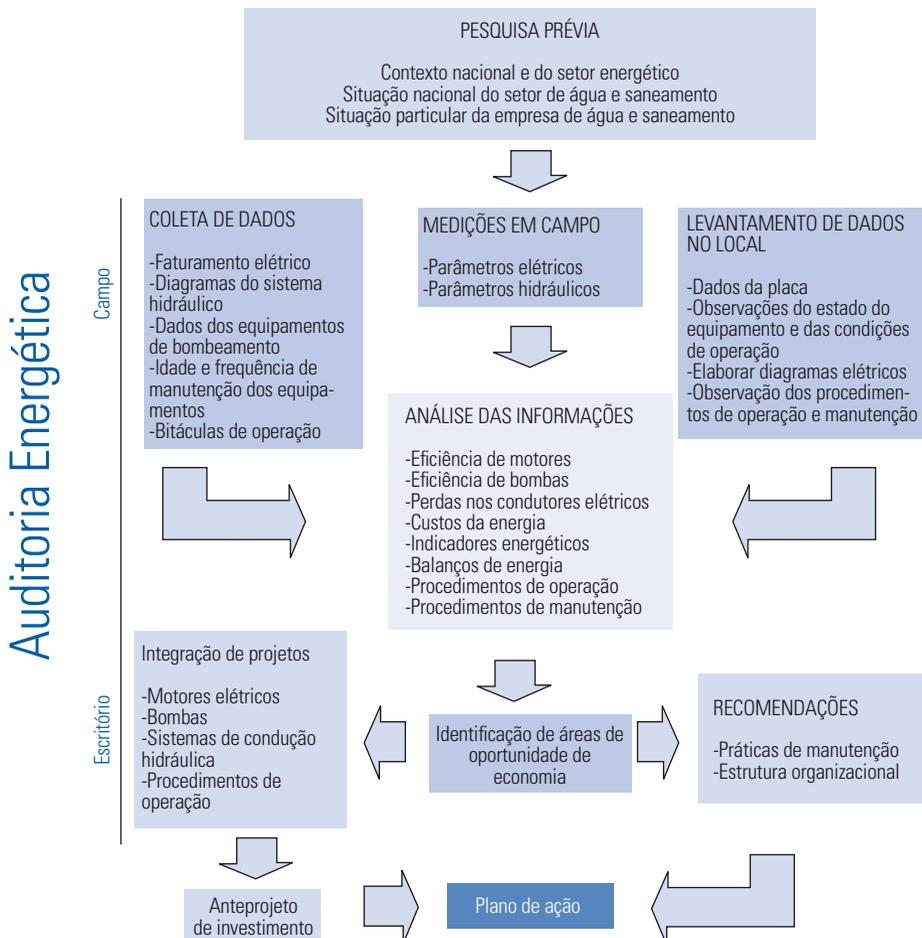
### METODOLOGIA PARA UMA AUDITORIA ENERGÉTICA

A Auditoria Energética (AE) em um Sistema de Água e Saneamento é a aplicação de um conjunto de técnicas para determinar como a energia é administrada, bem como a eficiência em cada um dos componentes consumidores em uma instalação de água e saneamento. Consiste na análise crítica de todos os componentes em uma instalação consumidora de energia, para determinar onde e como ela é utilizada, além de especificar quanta energia é desperdiçada.

O objetivo final é a identificação de medidas técnicas e administrativas rentáveis para a economia de energia nessa instalação, como parte do desenvolvimento de um plano integral de eficiência energética.

Para executar a AE, sugere-se seguir uma sequência ordenada que conduza a melhores resultados. Essa sequência requer a realização de trabalhos de campo e de escritório. Na Figura 2.1, apresenta-se um diagrama que indica de forma resumida as principais atividades para realizar uma AE em uma empresa de água.

**FIGURA 2.1:** Metodologia para realizar uma auditoria energética



Em termos gerais, e seguindo uma ordem das atividades descritas na Figura 2.1, a metodologia consiste na realização de trabalhos em duas etapas, uma primeira etapa com trabalhos de campo e a segunda etapa com trabalhos de escritório, que para fins práticos são descritos a seguir:

## ATIVIDADES DE CAMPO

As atividades de campo a serem realizadas são as seguintes:

- 1. Pesquisa prévia.** Tem como objetivo revisar o contexto geral da empresa de água e saneamento. Com a pesquisa prévia são determinados os sistemas e equipamentos que poderiam ser susceptíveis para a aplicação da AE.
- 2. Coleta de dados.** Depois da pesquisa prévia, deverão coletar-se os dados básicos dos sistemas, motores, bombas, tubulações, tanques, esquemas elétricos, hidráulicos, das disciplinas relacionadas e dados adicionais, bem como as condições de operação, população e topografia, necessários para a realização da AE.
- 3. Planejamento de medições de campo.** Com as informações obtidas nos itens anteriores, deverá ser realizada uma análise da planta que permita identificar os processos e, associados a eles, a relevância do consumo de energia, gerando um ordenamento quantitativo. Com essas informações, deverá ser definida uma estratégia para o trabalho de campo, enfatizando as áreas mais interessantes do ponto de vista energético.
- 4. Medições de campo.** Deve realizar-se uma campanha de medições de campo dos parâmetros elétricos e hidráulicos que permita realizar os cálculos de perdas e o balanço energético dos equipamentos submetidos à AE e, com isso, determinar os elementos que tenham uma economia potencial importante e gerar as propostas de medidas de economia correspondentes. As medições devem ter o foco no estabelecimento da linha base dos processos e da planta na sua totalidade.

## ATIVIDADES DE ESCRITÓRIO

As atividades de escritório a serem realizadas são as seguintes:

**5. Análise de informações e avaliação de eficiência.** Uma vez coletadas as informações produzidas nas atividades de campo, elas deverão ser analisadas. A análise proposta nesta metodologia se refere aos cálculos de perdas e às seguintes informações:

- Cálculo de perdas elétricas em condutores e transformadores
- Cálculo de perdas e eficiência do motor
- Cálculo de perdas e eficiência da bomba
- Cálculo de perdas de carga em tubulações
- Cálculo de perdas na rede
- Cálculo de indicadores energéticos
- Análise estatística dos indicadores
- Elaboração de balanços de energia
- Análise da operação
- Análise da manutenção

Com isso são determinados os elementos que têm um alto índice de perdas ou menor eficiência e, assim, as medidas de economia poderão concentrar-se neles.

**6. Proposta de medidas de economia.** Com a análise das informações e avaliação dos elementos de maior consumo de energia, serão determinadas as medidas de economia, que para a metodologia composta podem ser uma ou várias das seguintes:

- Economias em tarifas de fornecimento
- Redução de perdas nas instalações elétricas
- Melhora da eficiência em motores elétricos
- Melhora da eficiência em bombas
- Redução de perdas mecânicas
- Redução de vazamentos de água e perdas de carga
- Melhora da operação
- Melhora da manutenção
- Substituição do fornecimento de energia
- Melhora da iluminação
- Mudança de tecnologias
- Aproveitamento de energias residuais

A importância do balanço de energia é que as medidas a serem tomadas devem considerar a eficiência operacional do serviço, isto é, que o padrão definido da prestação de serviço (vazão, continuidade do serviço e pressão mínima) seja ou continue sendo cumprido.

**7. Avaliação das medidas.** Como parte final desta metodologia, as medidas de economia devem ser avaliadas, o que consiste na realização do seguinte:

- Calcular as economias (diretas e indiretas) que serão alcançadas com a medida.
- Calcular o valor total dos investimentos necessários para a implantação da medida.
- Cálculo dos custos adicionais (operação, manutenção e consumíveis) associados à medida.
- Determinar os indicadores financeiros (retorno, valor presente líquido, análise do ciclo de vida do projeto, etc.).

Seguindo com essa metodologia de forma ordenada, nos capítulos seguintes serão desenvolvidas as bases teóricas, os procedimentos e as atividades específicas que irão permitir à empresa de água e saneamento concretizar a AE nos sistemas de bombeamento.



## Capítulo 3.

### PESQUISA PRÉVIA

Antes de começar a realizar uma AE dos sistemas de bombeamento e visando à obtenção de um conhecimento geral da situação da empresa de água e saneamento, é indispensável realizar uma pesquisa prévia da situação atual da empresa.

Durante a pesquisa prévia, serão analisados os sistemas que poderiam, de forma geral, ser susceptíveis ou que teriam um potencial importante de economia energética.

A pesquisa prévia consiste na coleta de todas as informações do contexto onde a empresa de água desenvolve suas atividades, nos seguintes aspectos:

#### CONTEXTO NACIONAL E DO SETOR ENERGÉTICO

O contexto nacional onde a empresa de água e saneamento está posicionada deve ser conhecido. Para conhecê-lo, deverão ser levantadas as informações abaixo:

- Dados gerais da população
- Situação energética, fontes de energia, consumos de energia geral e por setores, etc.
- Estrutura das tarifas de energia.
- Problemática particular.
- Situação da maturidade legal do uso eficiente. Leis com que se conta para pressionar em favor do uso eficiente.

#### CONTEXTO NACIONAL DO SETOR DE ÁGUA

É de suma importância conhecer a posição atual e o contexto geral do setor de água em nível nacional, suas leis, regulamentações, estatísticas gerais, dentro das quais se desempenha a empresa de água que será auditada. Para isso, é preciso obter as informações seguintes:

- Tipos de companhia de água (públicas, privadas etc.)
- Contexto jurídico da água
- Principais fontes de água disponíveis
- Estatísticas nacionais de demanda de água, cobertura de água potável e esgotos, perspectiva, etc.
- Problemas para o fornecimento de água no país. Características topográficas, distância das fontes, etc.
- Outras informações de utilidade

#### SITUAÇÃO PARTICULAR DA EMPRESA DE ÁGUA E SANEAMENTO

Por último, nesta pesquisa inicial, é preciso revisar, em especial, a forma de operação, tecnologia aplicada e aspectos específicos do serviço de água e saneamento que a Empresa correspondente realiza. Para isso, deverão ser obtidas as informações seguintes:

- Infraestrutura geral: número e tipo de instalações
- Impacto do consumo de energia pela empresa de água e saneamento sobre o consumo energético nacional

- Instalações com maior consumo de energia e seu impacto nos custos totais
- Outros aspectos de interesse com relação a água e energia, como, por exemplo, o nível de perdas de água (água não contabilizada) e a identificação da estrutura da gestão energética.

Reitera-se que as informações incluídas na pesquisa prévia são de natureza geral e que, com elas, poderá ser realizado um melhor planejamento inicial da auditoria energética, escolhendo os sistemas de bombeamento prioritários por sua importância no consumo, aqueles onde, inicialmente, se detecta um potencial de economia importante, etc.

Uma vez realizada a análise de todas as informações obtidas durante essa pesquisa prévia, deverão seguir-se os próximos passos da auditoria, conforme será tratado, de forma mais detalhada, nos capítulos seguintes.

## Capítulo 4.

### COLETA DE DADOS

Um estudo ou procedimento de auditoria não pode ser realizado sem a obtenção dos dados necessários, ou a coleta deles. Portanto, a seguir serão descritos os dados básicos necessários, bem como a forma ou técnicas mais usuais para obtê-los.

A coleta dos dados básicos é realizada de duas formas:

- a) Coletando e analisando as informações da empresa de água; e
- b) Por meio do levantamento de dados no local a examinar.

Na Tabela 4.1 são definidas as informações requeridas que a empresa de água deverá fornecer para a realização da AE.

É conveniente que as informações sejam atualizadas na medida do possível e, de preferência, em formato digital.

Recomenda-se verificar seu grau de confiabilidade e fazer reconhecimentos de campo para conferi-las e ratificá-las. É conveniente, ainda, recorrer a outras bases de dados alternativas, tais como a internet, o sistema de satélite “Google Earth”, entre outras. Finalmente, é necessário pesquisar outras fontes de informações em escritórios federais, estaduais e municipais.

Caso não se obtenham todos os dados necessários dos equipamentos de bombeamento da empresa de água, eles deverão ser levantados em campo, para cada um dos equipamentos que serão analisados na auditoria. No apêndice deste documento se encontram os formatos e o procedimento detalhado para realizar esta atividade.

Os dados fundamentais que deverão ser obtidos ou conferidos em campo são os seguintes:

#### DADOS DO SISTEMA ELÉTRICO

Deverão ser levantados os seguintes dados do sistema elétrico:

**Diagrama unifilar.** É sumamente importante esquematizar o diagrama unifilar das conexões do equipamento, terminal de ligação, cabeamento, transformador, disjuntor principal, se tem ou não chave de partida.

**Fornecimento elétrico.** Faz referência à companhia de força e luz e aos dados correspondentes ao contrato com essa companhia. Deve-se ter cuidado especial em obter o que segue abaixo:

**Fornecedor.** Nome da companhia de força e luz.

**Número de serviço.** O número de contrato do recibo ou nota fiscal elétrica para este equipamento.

**Tarifa contratada.** A senha ou nome do esquema tarifário onde esse contrato esteja. Deve-se indicar se a medição é realizada em baixa ou média tensão.

**TABELA 4.1:** Informações a serem coletadas da empresa de água

Área	Fonte de informação	Informações a coletar	Observações
Geral	Cadastro de usuários	Número de ligações domiciliares	Classificadas pelo tipo de uso, com e sem medidor
	Relação e estudos de viabilidade	Cobertura da rede e do serviço	Em porcentagem de área e de habitantes e áreas de crescimento
	População e planos	População histórica	Dos últimos três censos e contagens nacionais
Técnica	Estatísticas de produção	Volumes fornecidos ao sistema	Extrato mensal, mínimo de um ano histórico, em metros cúbicos
		Vazões produzidas nas captações	Médias anuais, máximas diárias e máximos horários para a época de verão e inverno em climas extremos
		Características dos macro medidores	Tipo, modelo, data de instalação e calibragem, diâmetro
	Arquivos digitais e mapotecas	Planos da rede de água potável	Em escala real, georreferenciados, com diâmetros, materiais, rugosidades e comprimentos de tubulações, cotas topográficas em cruzeiros e tipos, localização de poços, bombeamentos e tanques, válvulas
		Planos de perfis de tubulações	Com indicações de alteração de diâmetro e material; localização de válvulas de ar e escape
		Projetos executivos anteriores	Dados adicionais de planos e medições podem ser obtidos.
Energética	Faturamento de energia	Dados gerais	Nome da companhia elétrica, tensão em volts, tarifa por equipamento de bombeamento, histórico mensal de faturamento em um ano (demanda máxima, consumo kWh, fator de potência), horário de pico.
	Planos, inventário de equipamentos e percurso de campo	Infraestrutura eletromecânica	Diagrama unifilar (bitola, proteções, transformadores, motores, capacitores e geradores), terminal de ligação (tipo, elemento de desconexão, para-raios, fusíveis), subestação elétrica (tipo, quantidade de transformadores, sistema de aterramento), transformadores (identificação, tipo, capacidade nominal em kVA, relação de transformação, idade), capacitores (localização, capacidade em kVAR, tipo de banco, elemento de desconexão, estado), equipamentos de medição.
		Sistema eletromotriz	Chave de partida (tipo, capacidade em Ampères), condutores elétricos (quantidade de fios, comprimento, bitola, material, tipo de isolamento), motor elétrico (marca, tipo, capacidade em HP, tensão de fornecimento em volts, corrente nominal, quantidade de polos, velocidade em carga plena, fator de serviço, eficiência nominal, idade, quantidade de rebobinagens, temperatura em °C)
		Sistema hidráulico do equipamento de bombeamento	Bombas (identificação, marca, tipo, modelo, material da carcaça, material do rotor, vazão nominal, carga nominal, eficiência nominal), sucção (nível dinâmico em aquífero e reservatório), características da tubulação de descarga, histórico de níveis dinâmicos em um ano.
Institucional	Relatórios Executivos	Índices de gestão	Indicadores de eficiência física, hidráulica e energética, tipos, evolução histórica em um ano, impactos, benefícios e custos
		Planos mestres e de viabilidade	Programas projetados, investimentos no curto e longo prazo, projetos de eficiência em desenvolvimento, metas anualizadas
		Organograma da instituição	Descrever funções, pessoal e interrelação com outras áreas
		Programas interinstitucionais	Programas de instituições locais e governamentais

**Transformador.** Levantar os dados mais importantes das características do transformador, tais como:

**Tipo.** O tipo de transformador que alimenta o equipamento, ou, no caso de um terminal de ligação de baixa tensão, descrever os elementos que o alimentam.

**Capacidade.** A capacidade do transformador ou dos transformadores; se o fornecimento for por meio de mais de um transformador, indicar a capacidade de cada um deles em kVA.

**Taxa de transferência.** Deve-se escrever a tensão de entrada e de saída do transformador ou a taxa de tensão de transformação, em volts separados por uma barra. Se o transformador tiver mais de uma tensão de saída, deve-se escrever a tensão real com a qual esteja funcionando nesse momento.

**Disjuntor principal.** Os dados do disjuntor principal do equipamento, isto é, o disjuntor onde chega a energia proveniente do transformador ou a alimentação principal do equipamento.

**Marca.** A marca do disjuntor ou o seu fabricante.

**Capacidade.** A capacidade nominal do disjuntor em ampères (A).

**Ajuste.** Se o disjuntor é do tipo ajustável, deverá escrever a capacidade nominal à qual o disjuntor esteja ajustado, em ampères (A).

**Chave de partida.** Se o equipamento de bombeamento possuir uma chave de partida, deve-se coletar as seguintes informações.

**Tipo.** Tipo de chave de partida. Se for um dispositivo eletrônico, indicar marca, modelo e elementos complementares.

**Capacidade.** Capacidade da chave de partida em HP.

**Proteção.** São os dados da proteção de sobrecarga do motor que estão na chave de partida.

**Marca.** Fabricante ou marca do elemento térmico de proteção do motor.

**Capacidade.** Indicar a faixa de calibragem do elemento térmico em ampères (A).

**Ajuste.** O ponto de calibragem do elemento térmico.

**Capacitores.** Se o equipamento possuir um banco de capacitores, escrever a capacidade total do banco em kVAR. Deve-se identificar tipo de capacitores e se o equipamento ou grupo de equipamentos é adequado.

**Sistema de aterramento.** As condições do sistema de aterramento deverão ser analisadas e registradas, tais como: se existe ou não o sistema de aterramento físico, se está separado do fio neutro, se o transformador, a chave de partida e o motor estão conectados a esse sistema, e colocar a bitola do fio terra do elemento descrito.

**Condutores.** Os dados necessários que fazem referência à bitola e ao comprimento de condutores em dois trechos, o primeiro, é o local de passagem do ponto de alimentação do serviço, seja um transformador ou um terminal de ligação, até a chave de partida ou o disjuntor do motor. O segundo trecho, onde se pedem os dados dos condutores, é aquele que vai da chave de partida ou do disjuntor do motor até o motor. Em ambos os casos deve-se fazer o levantamento do seguinte:

**Bitola.** É a bitola do condutor, seja em mm<sup>2</sup> ou em AWG, que pode ser obtido do revestimento do condutor.

**Comprimento.** O comprimento total dos condutores no trecho descrito.

**Agrupamento.** É a descrição de como esses condutores estão agrupados e o meio de canalização utilizado. Em particular, indicar quantos condutores monopolares ativos passam pelo duto, se são subterrâneos ou visíveis, e no caso de subterrâneos, verificar quantos dutos de outros equipamentos acompanham o duto do equipamento envolvido.

## DADOS NOMINAIS DO MOTOR

Deverão ser obtidas informações dos dados nominais do motor, que devem ser lidas diretamente nas placas do motor ou no registro de manutenção do equipamento sob exame. Assim, deverão ser obtidos os dados abaixo:

**Dados de placa nominais.** Essas informações estão descritas na placa do motor, ou, se a placa for ilegível, deve-se procurar o pedido de compra ou o documento onde as características do motor do equipamento sob exame sejam descritas.

**Marca.** Marca ou fabricante do motor.

**Capacidade.** Capacidade nominal do motor (HP).

**Velocidade.** Rotação do motor (RPM).

**Tensão.** A tensão nominal do motor em volts (V).

**Corrente.** A corrente nominal do motor (A).

**Eficiência.** A eficiência nominal especificada pelo fabricante (-).

**Tipo.** Tipo de motor.

**Carcaça.** É o tipo ou número de armadura que o motor possui.

**F.S.** É o fator de serviço que também pode ser lido na placa. Quando nela não for indicado o F.S., deverá possuir o valor de 1, indicando a porcentagem de sobrecarga de trabalho do motor. Um fator maior que 1 indica que o motor suporta essa sobrecarga.

**Sistema de controle.** Ativa a operação do motor, isto é, se o motor age por níveis discretos ou contínuos. Deve-se indicar a que processo pertence.

**Histórico.** É o histórico de manutenção do motor; os dados que interessam para a auditoria energética para o equipamento são os seguintes:

**Idade.** A idade ou o tempo de trabalho do motor desde sua primeira instalação (anos).

**Operação.** A média de horas de trabalho do motor em um ano (horas/ano).

**Quantidade de rebobinamentos.** O número de rebobinamentos realizados no motor na sua vida de serviço.

## DADOS NOMINAIS DA BOMBA

Neste item, deverão ser descritos os dados nominais ou de projeto da bomba. Se não dispuser dos dados em campo ou se eles estiverem ilegíveis na sua placa, será necessário ter acesso às documentações fornecidas no momento da aquisição do equipamento. Os dados requeridos são os seguintes:

**Corpo.** Dados referentes ao corpo da bomba, entre os quais:

**Marca.** Marca ou fabricante da bomba.

**Tipo.** Tipo de bomba, submersível, turbina vertical, horizontal, centrífuga, etc.

**Modelo.** O modelo da bomba segundo o fabricante.

**Idade.** A idade ou tempo em que o equipamento esteve em operação, desde sua instalação, em anos.

**Rotor.** Os dados correspondentes ao rotor da bomba e que devem ser obtidos são:

**Tipo.** O tipo de rotor da bomba.

**Material.** O material de fabricação do rotor.

**Diâmetro.** Diâmetro nominal do rotor (m).

**Idade.** A idade ou tempo de operação do rotor, em anos. Cabe notar que o rotor poderia ter uma idade diferente da bomba, se esse elemento foi trocado durante a vida da bomba.

**Eixo.** Os dados do eixo de transmissão entre o motor e a bomba:

**Diâmetro.** O diâmetro do eixo em polegadas (pol).

**Comprimento.** O comprimento do eixo em metros (m).

**Dados de projeto.** São as características hidráulicas de projeto do equipamento de bombeamento e que, segundo o modelo do fabricante, são descritos no ponto de operação ideal da bomba da curva de característica, com os dados seguintes:

**Carga.** A carga de projeto em metros de coluna de água (mca).

**Fluxo.** O fluxo de projeto em litros por segundo (l/s).

**Características do fluido.** Refere-se às características principais do fluido a ser bombeado, que dependerão da água, se ela for potável ou tratada. Os dados a serem obtidos são os seguintes:

**Fluido.** Descrição do fluido; água potável, água tratada ou outro.

**Temperatura.** Temperatura de trabalho ou temperatura média à qual o fluido está (°C).

**Peso específico.** O peso específico do fluido a ser bombeado (kg/m<sup>3</sup>).

**Observações.** Descrever quaisquer condições particulares do fluido que estiver sendo bombeado.

A obtenção desses dados é de suma importância para realizar a análise e o balanço de energia dos equipamentos sob exame. A coleta desses dados em campo deve ser realizada simultaneamente às medições de campo, que são descritas no capítulo seguinte.

Na primeira seção do Apêndice se mostra o formato onde deverão ser preenchidos esses dados.

## Capítulo 5.

### MEDIÇÕES DE CAMPO

Depois da obtenção dos dados básicos e com as informações fornecidas, deve-se planejar e executar uma campanha de medição de parâmetros elétricos e hidráulicos, para realizar a auditoria da instalação eletromecânica nos sistemas de bombeamento.

Baseando-se no resultado dessas medições, determina-se:

- A eficiência eletromecânica do conjunto motor-bomba e de ambos os componentes de forma separada.
- As curvas de comportamento carga-fluxo-eficiência do equipamento de bombeamento.

A campanha de medição se divide em atividades hidráulicas e trabalhos eletromecânicos em equipamentos de bombeamento, como é apresentado na Tabela 5.1.

**TABELA 5.1:** Descrição da campanha de medição

Campanha de medição	Atividade	Objetivo	Equipamento e ferramentas
Eletromecânica em equipamentos de bombeamento	Medição de parâmetros elétricos	Determinar a potência de operação e calcular eficiência	Analisador de potência de redes elétricas ou equipamentos de medição (voltímetro, amperímetro, etc.)
	Medição da vazão de descarga em bombas	Determinar a vazão de operação do equipamento	Medidor de fluxo ultrassônico ou eletromagnético
	Medição de pressões em descarga	Obter carga de operação do equipamento	Manômetro portátil tipo Bourdon
	Definição de níveis de referência em bombeamento	Obter carga de operação e perdas de carga hidráulica	Sonda elétrica, fita métrica, etc.

Para que as medições resultem o mais real possível e, portanto, os valores de eficiência sejam precisos, deve-se verificar:

- Que os equipamentos de medição estejam calibrados e em boas condições operacionais.
- Que o sistema a ser medido esteja em estado estável, sem perturbações que possam provocar uma medição falsa.

A seguir são detalhadas algumas recomendações importantes para realizar as medições, obter melhores resultados no registro de dados e evitar custos e tempos excessivos. No Apêndice deste documento são incluídos os formatos e procedimento detalhado para realizar esta atividade.

### MEDIÇÃO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS

Para evitar acidentes, todas as medições devem ser realizadas durante a operação normal e apenas por pessoal técnico qualificado, que deve observar os procedimentos internos de segurança e as práticas abaixo descritas.

## Condições

- Avaliar o ambiente antes de realizar a medição.
- Não trabalhar apenas em áreas perigosas.
- Usar equipamento de proteção pessoal adequado, de acordo com as recomendações locais de saúde e segurança.
- Verificar que o instrumento de medição seja homologado para o ambiente de medição.
- Familiarizar-se e saber utilizar o equipamento antes de qualquer medição.

## Práticas

- Medir o ponto de tensão mais baixo. Por exemplo, medindo a tensão em um painel de disjuntores, identificar o disjuntor de menor tensão para realizar a medição.
- Manter a atenção na área de medição e manter as mãos livres se as circunstâncias permitirem.
- Quando se trata de uma fase apenas, conectar o neutro primeiro e a fase em seguida. Depois de registrar a leitura, desconectar a fase primeiro e o neutro em seguida.
- Nos testes de tensão, utilizar o método de três pontos de teste.
  - 1) Realizar um teste em um circuito similar e desconhecido.
  - 2) Realizar a medição em um circuito a ser medido.
  - 3) Voltar a realizar um teste no primeiro circuito.

Esse processo permite verificar se o instrumento de teste está funcionando corretamente.

- Ao realizar medições em alta tensão, de três fases, usar sondas de medição com uma quantidade mínima de 4 mm da ponta de metal exposta (0,12 pol.). Isso reduz o risco de arco elétrico acidental entre as pontas de medição.
- Reduzir a possibilidade de curto-circuito com as mãos, fazendo a medição com uma só mão, se possível. Ao fazer as medições, não tocar em nenhuma estrutura conectada ao terra ao mesmo tempo.

Os parâmetros elétricos a serem medidos são:

- a) Tensão elétrica (V)
- b) Corrente elétrica (A)
- c) Fator de potência (%)
- d) Potência real ou ativa (kW)
- e) Potência reativa (kVar)

Nesses casos, a utilização do equipamento de medição adequado (voltímetro, amperímetro, wattímetro, multímetro, etc.) é indispensável. Deve-se realizar uma descrição dos equipamentos a utilizar antes de se descrever como se realiza a medição.

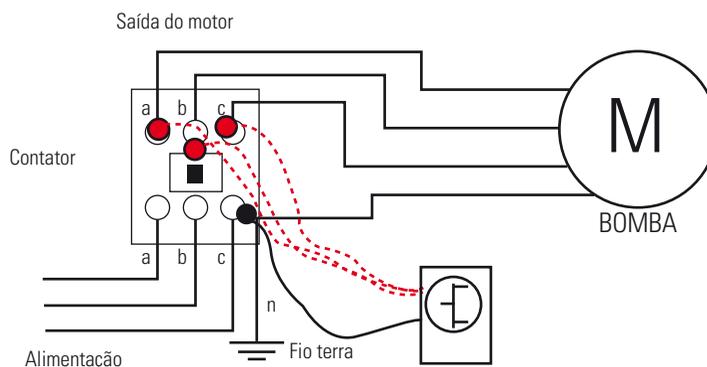
Para simplificar o processo de medição, recomenda-se utilizar um analisador de redes elétricas que, além de permitir a medição de parâmetros por fases, integra essas medições para obter diretamente os valores trifásicos, armazena em memória as informações para identificar tendências e, na maioria dos casos, mede outros parâmetros elétricos (que são importantes para avaliar a qualidade da energia utilizada no equipamento, como a distorção harmônica, entre outros).

## Medição de tensão elétrica (V)

Para realizar a medição da tensão elétrica em equipamentos de bombeamento, é necessário utilizar um voltímetro, tendo como referência a Figura 5.1., e proceder da seguinte forma:

- 1) Realizar a medição nos cabos de tensão elétrica que saem do contator para o motor da bomba.
- 2) Colocar o cabo vermelho do voltímetro sobre a ponta de saída do contator na linha “a”.
- 3) Colocar o cabo preto do voltímetro sobre a ponta do fio terra “n”.
- 4) Registrar a leitura de tensão ( $V_{an}$ ), correspondente à fase “a”.
- 5) Repetir a ação, colocando o cabo vermelho do voltímetro na ponta de saída “b” e “c” do contator (com o preto ao terra) e tomar os indicadores respectivos de tensão ( $V_{bn}$ ) na fase “b” e tensão ( $V_{cn}$ ) na fase “c”.
- 6) No caso da medição de tensão elétrica entre fases, o procedimento anterior deve ser repetido, colocando na saída do contator o cabo vermelho do voltímetro na ponta “a” e o cabo preto na ponta “b”; depois entre “a” e “c”; por último entre “b” e “c”.
- 7) Com a média desses três valores, calcula-se o valor da tensão elétrica trifásica (V). Recomenda-se realizar três leituras em cada cabo para conferir os dados. É razoável definir porcentagens de valores de variações máximas e mínimas aceitáveis.

**FIGURA 5.1:** Medição de tensão (V) em equipamentos de bombeamento



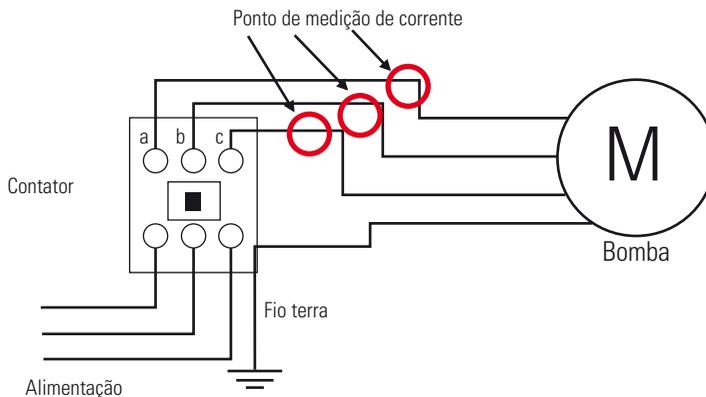
Obs.: a figura aplica-se apenas à partida direta. Portanto, deverá ser ajustada a cada situação particular, considerando medições com uma partida estrela-triângulo, partida suave ou variador.

### Medição de corrente elétrica

A medição da corrente elétrica é realizada com um amperímetro. O procedimento de medição é realizado da forma seguinte (ver a Figura 5.2):

- a) Ao utilizar um amperímetro monofásico, as leituras de corrente elétrica são realizadas uma por uma, colocando-o em cada um dos três terminais que saem do contator e que alimentam o motor. As leituras, registradas em cada terminal, serão as correntes das fases  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ , respectivamente. Com esses três valores, calculam-se ( $I_{pt}$ ) e a corrente elétrica trifásica total ( $I_{tt}$ ).
- b) Quando se utiliza um analisador de redes, não é necessário realizar leituras de corrente elétrica de forma individual, mas, sim, colocar os três amperímetros simultaneamente em cada um dos terminais de saída do contator e que alimentam o motor. Assim a leitura das correntes elétricas de cada cabo é obtida diretamente na tela do analisador.

**FIGURA 5.2:** Medição de corrente elétrica em equipamentos de bombeamento



Obs.: a figura aplica-se apenas à partida direta. Portanto, deverá ser ajustada a cada situação particular, considerando medições com uma partida estrela-triângulo, partida suave ou variador.

#### **Medição do Fator de Potência e cálculo da potência elétrica**

A medição do Fator de Potência (FP) pode ser realizada da mesma forma que a medição de corrente ou de tensão, utilizando, ainda, uma resistência similar àquela das grelhas elétricas. Esse método é muito prático, pois, às vezes, não há um wattímetro à mão. Assim, obtém-se o valor do FP utilizando-se somente o amperímetro ou o voltímetro, e aplicando-se as fórmulas matemáticas da lei dos senos e cossenos.

#### **Potência real ou ativa**

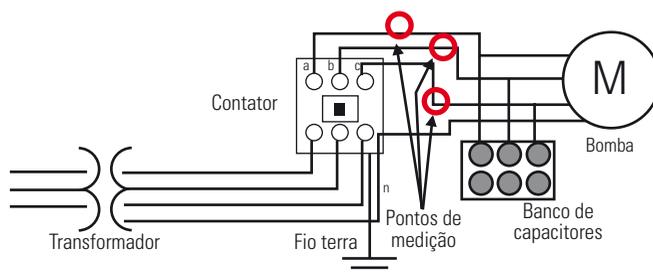
Para medir a potência real se utiliza um wattímetro, que se coloca na saída do contator, nos cabos que vão para o motor. O procedimento para realizar a medição do valor da potência real ou ativa é o seguinte:

- 1) Colocar os terminais de tensão do wattímetro sobre o fio da fase “a”.
- 2) A seguir, coloca-se o outro terminal de tensão do wattímetro no fio neutro “n”.
- 3) Inserir o gancho do amperímetro no fio da fase “a”.
- 4) Registrar a leitura da potência real ou ativa diretamente no wattímetro.
- 5) Repetir o processo acima para obter a potência real nas fases “b” e “c”.

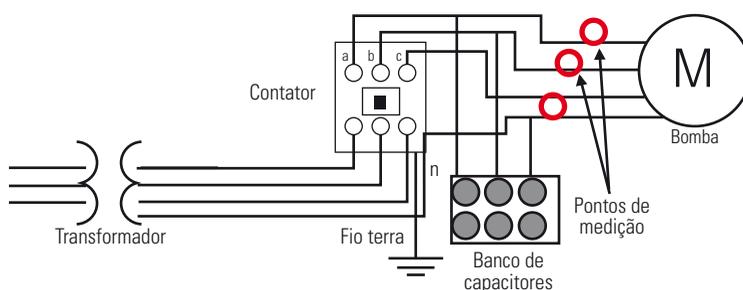
Se o equipamento de bombeamento possuir um banco de capacitores instalado, sugere-se fazer duas medições (ver Figura 5.3 e Figura 5.4):

- a) A primeira delas deve ser realizada à jusante do ponto de conexão do banco de capacitores, nos condutores que vão diretamente para a bomba submersível ou para o motor em bombas verticais de eixo, com o objetivo de que as medições não sejam influenciadas pelo efeito de compensação dos capacitores e reflitam a situação real do motor elétrico sob exame.
- b) A segunda medição deverá ser realizada com a corrente acima do capacitor. Essa medição descreverá o efeito da compensação do fator de potência sobre a rede elétrica.

**FIGURA 5.3:** Medição da potência real a jusante dos capacitores



**FIGURA 5.4:** Medição da potência real a montante dos capacitores



Obs.: As figuras 5.3 e 5.4 aplicam-se apenas à partida direta. Portanto, deverá ser ajustada a cada situação particular, considerando medições com uma partida estrela-triângulo, partida suave ou variador.

## MEDIÇÃO DE PARÂMETROS HIDRÁULICOS

Da mesma forma que na medição de parâmetros elétricos, para a medição de parâmetros hidráulicos deve-se contar com equipamentos de medição calibrados e em boas condições de utilização. Mesmo assim, quando se fazem medições, o sistema não deve sofrer perturbações. No caso das instalações unitárias, tais como poços ou equipamento de bombeamento, as medições se fazem diretamente na tubulação de descarga. Para as instalações que integram vários equipamentos de bombeamento, devem realizar-se as medições dos parâmetros hidráulicos de forma individual sobre sua tubulação de descarga.

Constrói-se a curva de funcionamento fluxo vs. carga hidráulica total de bombeamento ( $Q-H_b$ ) realizando-se medições desses dois parâmetros, modificando-se em cada leitura de dados as condições de operação.

Os parâmetros hidráulicos e os dados de referência a serem obtidos são os seguintes:

- Medição da vazão à descarga na bomba ( $Q$ )
- Medição da carga de pressão de operação, na sucção ( $P_s$ ) e descarga ( $P_d$ )
- Definição do nível de referência ( $N_r$ )
- Medição do nível dinâmico de sucção ( $N_s$ )

e) Medição de níveis dos centros dos manômetros ( $D_{r-m}$ ) na sucção, bem como na descarga, segundo o caso explicado abaixo.

### **Medição da vazão à descarga da bomba**

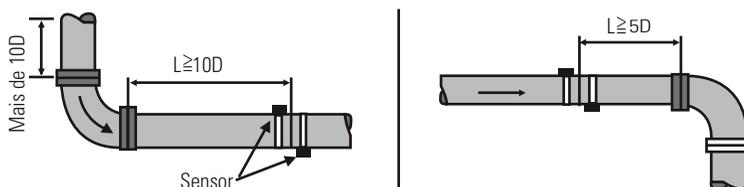
A medição das vazões é realizada em cada uma das captações produtoras de água para a rede, tais como poços, mananciais, represas, galerias filtrantes, etc. Isso deve ser realizado exatamente na tubulação onde a água entra na rede de distribuição. Além disso, nos casos de purificadoras, tanques ou bombas, é preciso medir a vazão bem na saída dessas estruturas.

Recomenda-se aproveitar os macromedidores instalados no sistema de água potável, desde que se obtenham previamente os erros de precisão desses equipamentos.

Quando não há um macromedidor na captação, recomenda-se utilizar um medidor portátil do tipo ultrassônico ou eletromagnético, pelo alto nível de exatidão que oferece e a versatilidade no seu uso. Esse medidor deverá estar certificado por um laboratório de ensaios credenciado.

A posição do medidor na tubulação de teste deve ser em trechos retos e, de preferência, horizontais, certificando-se de que, antes e depois do medidor, não existam obstáculos tais como cotovelos, válvulas, reduções, ampliações, bombas, etc., que distorçam o perfil de velocidades da água na seção de teste. Normalmente deve-se deixar uma folga equivalente a 10 diâmetros a montante e 5 diâmetros a jusante do eixo do medidor (ver Figura 5.5). Contudo, atualmente existem no mercado medidores que podem reduzir essas distâncias, as quais podem ser consultadas nos respectivos catálogos do fabricante.

**FIGURA 5.5:** Posição do medidor de vazão.



O medidor pode ser instalado em um conduto inclinado ou vertical, desde que o fabricante o permita em suas limitações de exatidão e quando exista certeza de que a tubulação sob exame esteja completamente cheia em toda sua seção. Para garantir a medição adequada, deve-se evitar colocar o medidor nos trechos onde existam bolhas de ar ou sólidos em suspensão.

A medição da vazão fornecida é realizada em um período curto, de aproximadamente 15 a 30 minutos. Se não forem detectadas variações de  $\pm 5\%$  na vazão, o valor registrado será considerado como o valor de fluxo médio fornecido à rede por essa captação. Se a variação de vazão for maior que essa porcentagem, deverão ser realizados testes contínuos durante pelo menos 24 horas, com o objetivo de obter um valor médio de fornecimento de água nesse ponto.

No caso de instalações eletromecânicas com uma bateria de vários equipamentos, como, por exemplo, bombas, a medição de vazão deverá ser realizada com equipamento individual, verificando se estão na

condição de operação mais usual, com a finalidade de avaliar a situação energética nas condições comuns de operação.

#### **Medição de cargas de pressão de sucção e descarga**

Para realizar as medições das cargas de pressão de sucção ( $P_s$ ) e descarga ( $P_d$ ), recomenda-se o uso de manômetros do tipo Bourdon, de preferência, aqueles que contenham glicerina, certificando-se de sua boa calibragem e que o terço médio de sua escala seja utilizado, posto que é o local onde sua exatidão é ideal. A forma de realizar a medição é mostrada nas imagens da Fotografia 5.1.

**FOTOGRAFIA 5.1:** Medição de pressão com manômetro do tipo Bourdon calibrado



Para efeitos práticos, nos cálculos, recomenda-se expressar a pressão em carga piezométrica, isto é, em metros de coluna de água (mca), ainda que os manômetros costumem ter escalas de  $\text{kg}/\text{cm}^2$  ou  $\text{lb}/\text{polegada}^2$ . As equivalências dessas unidades são as seguintes:

$$1 \text{ kg}/\text{cm}^2 = 10 \text{ mca}$$

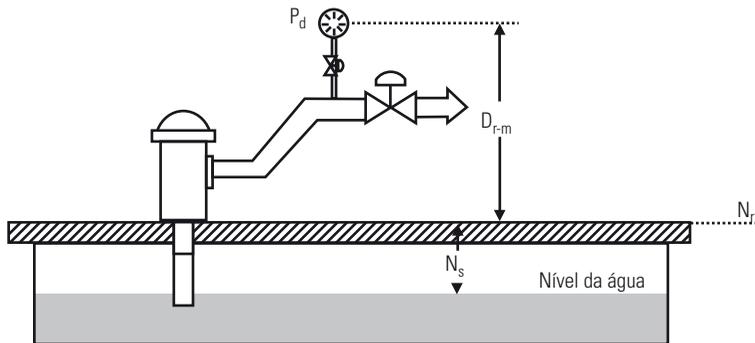
$$1 \text{ lb}/\text{polegada}^2 = 0,7031 \text{ mca}$$

As medições de pressão de sucção e descarga devem ser feitas o mais perto possível da bomba. Se não for possível fazer a medição na sucção, por se tratar de uma bomba vertical, ou porque não existe ponto de medição disponível, deve-se indicar nos formatos de registro de medições que não se aplica a medição de sucção. É indispensável realizar a medição da pressão na descarga.

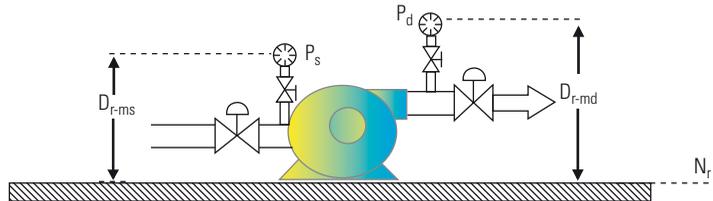
#### **Definição do nível de referência**

Para o cálculo da carga hidráulica total de bombeamento, é conveniente definir um nível de referência, a partir do qual os outros níveis serão medidos. Normalmente, o nível de referência está sobre a placa de montagem do motor, como se observa esquematicamente na Figura 5.6 e na Figura 5.7.

**FIGURA 5.6:** Medição de níveis quando há um manômetro apenas na descarga

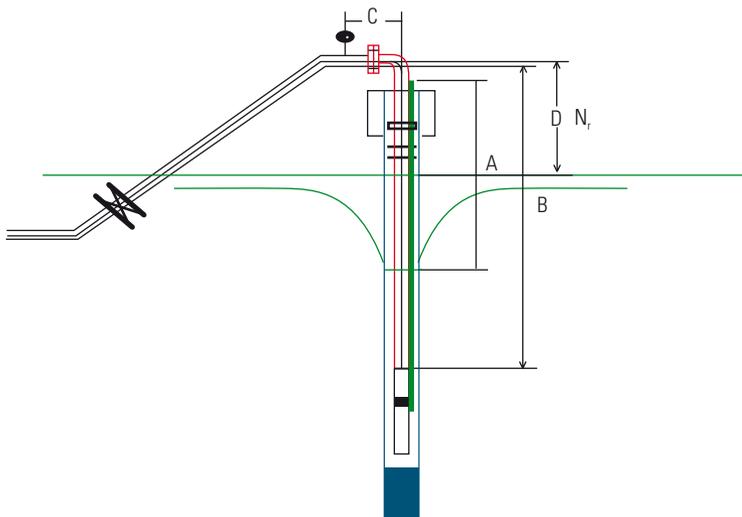


**FIGURA 5.7:** Medição de níveis quando há manômetros na sucção e na descarga



No caso de equipamentos de bombeamento submersíveis, o nível de referência é normalmente o nível do solo, conforme se observa na Figura 5.8.

**FIGURA 5.8:** Medição de níveis em equipamentos submersíveis



### **Medição do nível dinâmico de sucção**

O nível de sucção ( $N_s$ ) é a distância vertical entre o nível de referência e o espelho de água de onde a água está sendo bombeada, em condições de operação normal e estável. A medição pode ser realizada com uma sonda de nível ou com um flexômetro, dependendo das condições do lugar.

No caso de um reservatório de bombeamento, o nível dinâmico de sucção é o nível da superfície livre da água dentro do reservatório. E no caso de um poço, o nível de sucção corresponde a seu nível dinâmico no aquífero. Nas imagens da Fotografia 5.2 se mostra a medição de nível dinâmico com uma sonda elétrica.

**FOTOGRAFIA 5.2:** Medição do nível dinâmico de sucção em reservatórios de bombeamento



**FOTOGRAFIA 5.3:** Medição do nível dinâmico em reservatórios de bombeamento



Se durante a medição em um reservatório ou tanque, o nível da água mudar significativamente de posição, então a medição do nível de sucção deverá ser realizada de forma simultânea às medições de vazão, pressão e parâmetros elétricos. O valor poderá ser negativo ou positivo, dependendo de o nível estar abaixo ou acima do nível de referência.

### Medição de níveis nos centros dos manômetros

Nas Figuras 5.6 e 5.7, observa-se a forma de localizar os níveis nos centros de manômetros. Se somente se medir a carga de pressão na descarga, esse nível será designado como  $D_{r-m}$ . Caso as cargas de pressão sejam medidas tanto na sucção como na descarga, o nível do manômetro de descarga será designado como  $D_{r-md}$  e, para o caso do manômetro de sucção, como  $D_{r-ms}$ .

### Determinação da carga hidráulica de bombeamento

As medições de pressão e níveis descritos nos itens anteriores são utilizadas para calcular a carga hidráulica total de bombeamento ( $H_b$ ), que é constituída pela soma de vários valores medidos, que dependerão do tipo de bomba e do ajuste que houver. Na Tabela 5.2 se descreve o processo de cálculo e os parâmetros a serem considerados na determinação da carga hidráulica total de bombeamento, dependendo do tipo de equipamento e a aplicação em utilização.

**TABELA 5.2:** Procedimento de cálculo da carga hidráulica de bombeamento ( $H_b$ ) e parâmetros a medir

Caso	Fórmula	Parâmetros a medir ou calcular
Quando se mede apenas a pressão na descarga	$H_b = p_d + N_s + D_{r-m} + h_{fs} + h_v$	$H_b$ = Carga total de bombeamento (m) $p_d$ = Carga de pressão na descarga (mca) $N_s$ = Nível dinâmico de sucção (m) $D_{r-m}$ = Distância do nível de referência no manômetro (m) $h_{fs}$ = Perdas de carga hidráulica por efeito de cisalhamento na tubulação de sucção, acrescidas de acessórios (m) $h_v$ = Carga de velocidade (m)
Quando se mede a pressão na sucção e descarga	$H_b = p_d - p_s + D_{r-ms} + D_{r-md}$	$p_d$ = Carga de pressão na descarga (mca) $p_s$ = Carga de pressão de sucção (m) $D_{r-ms}$ = Distância do nível de referência no manômetro na sucção (m) $D_{r-md}$ = Distância do nível de referência no manômetro na descarga (m)

### FORMATOS DE REGISTRO DE DADOS EM CAMPO

É importante o uso de formatos de campo organizados para registrar as características do sistema eletromecânico dos equipamentos de bombeamento, bem como seus valores nominais e os dados obtidos em campanhas de medição deles. Na Tabela 5.3 se mostra um exemplo do formato sugerido para o registro das características do sistema eletromecânico e os dados nominais tanto da bomba como do motor. Na Tabela 5.4 se mostra um formato que pode ser utilizado nas medições de variáveis hidráulicas e elétricas dos equipamentos de bombeamento.

**TABELA 5.3:** Formato para o registro de dados nominais e características do sistema eletromecânico

**DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO DE EQUIPAMENTOS DE BOMBEAMENTO**

<b>Local:</b>	Durango, Dur.
<b>Data:</b>	11 de fevereiro de 2008

<b>Órgão:</b>	ÁGUAS DO MUNICÍPIO DE DURANGO		
<b>Sistema:</b>	Azcapotzalco	<b>Equipamento:</b>	Poço nº 59

**SISTEMA ELÉTRICO**

**FORNECIMENTO ELÉTRICO:**

Fornecedor: CFE  
 Nº de serviço: \_\_\_\_\_  
 Tarifa contratada: \_\_\_\_\_

**TRANSFORMADOR:**

Tipo: OA Costa  
 Capacidade: 150 kVA  
 Taxa de transferência: 13.2/440/254 V.

**CHAVE DE PARTIDA:**

Tipo: ATP111-2  
 Capacidade: 150 HP

**CONDUTOR ELÉTRICO:**

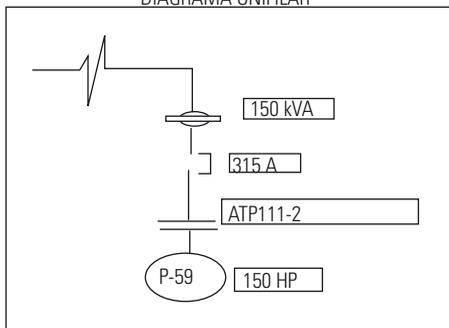
Bitola: 3/0 AWG 1HXF-3F  
 Comprimento: 3,5 m

**CAPACITORES:**

Capacidade: 20 kVAr

**OBSERVAÇÕES:**

DIAGRAMA UNIFILAR



**MOTOR ELÉTRICO**

**DADOS DE PLACA OU NOMINAIS:**

Marca: <u>US</u>	Tensão: <u>460 V</u>	Tipo: <u>RU</u>
Capacidade: <u>150 HP</u>	Corrente: <u>163 A</u>	Frame: _____
Velocidade: <u>1.775 RPM</u>	Eficiência: <u>92,4%</u>	F.S.: <u>1,15</u>

**HISTÓRICO:**

Idade: 12 anos Operação: 8.760 horas/ano Nº de rebobinagens: 4

**OBSERVAÇÕES:**

Motor sobre a superfície

**EQUIPAMENTO DE BOMBEAMENTO**

**CORPO:**

Marca: N/A  
 Tipo: T. Vertical  
 Modelo: 12-6  
 Idade: 12 anos

**ROTOR:**

Tipo: Semiaberto  
 Material: Bronze  
 Diâmetro: m  
 Idade: 12 anos

**DADOS DE PROJETO CARGA:**

Carga: 108 mca Fluxo: 60 lps

**OBSERVAÇÕES:**

**CARACTERÍSTICAS DO FLUIDO A SER BOMBEADO**

Fluido: Água potável Temp: 24 Viscosidade: 0,85 Centipoise  
 Observações: \_\_\_\_\_

**TABELA 5.4:** Formato para o registro de medições de variáveis hidráulicas e elétricas de equipamentos de bombeamento

MEDIÇÕES HIDRÁULICAS			
<b>NÍVEIS:</b>			
Nível do depósito de sucção (A):	_____ 92 m	Comprimento da tubulação na sucção (B):	_____ 128 m
Comprimento da tubulação de descarga (C):	_____ 4 m	Altura do manômetro de descarga (D):	_____ 0,4 m
<b>SUCÇÃO:</b>	Diâmetro: _____ 0,203 m	Material: _____ AC. C40	Leitura do manômetro: _____ kg/cm <sup>2</sup>
<b>DESCARGA:</b>	Diâmetro: _____ 0,203 m	Material: _____ AC. C40	Leitura do manômetro: _____ 1,3 kg/cm <sup>2</sup>
	Fluxo: _____ 35,0 lps		
MEDIÇÕES ELÉTRICAS			
<b>TENSÃO ENTRE FASES:</b>	Vab: _____ 251	Vbc: _____ 256	Vca: _____ 251
<b>CORRENTE POR FASE:</b>	Ia: _____ 108	Ib: _____ 126	Ic: _____ 115
<b>POTÊNCIA ATIVA:</b>	Pa: _____ 25	Pb: _____ 30	Pc: _____ 27
<b>FATOR DE POTÊNCIA:</b>	FPa: _____ 0,92	FPb: _____ 0,94	FPc: _____ 1
Inclui o efeito do banco de capacitores? (SIM ou NÃO):	_____ Não		
RESPONSÁVEL			
Levantamento de dados:	Moisés Romero González		
Medições:	Carlos Morales Zamora, Moisés Romero González		
Supervisão e análise:	Eng. Ramón Rosas Moya/Eng. Arturo Pedraza		

## MEDIÇÕES DE TEMPERATURA

As medições de temperatura são importantes, já que nos podem fornecer informações adicionais sobre o comportamento, operação e ações de manutenção que deverão ser realizadas no sistema elétrico de bombeamento. Recomenda-se indicar os equipamentos mínimos para medição de temperatura. Idealmente, seria adequado ter uma câmara térmica para medir essa variável. Recomendações também deverão ser incluídas.

As medições de temperatura deverão ser realizadas nos seguintes elementos:

**No equipamento de controle.** As medições de temperatura no equipamento de controle são realizadas para determinar uma possível sobrecarga de corrente em condutores ou uma falta de ajuste dos

parafusos ou elementos de sujeição dos terminais dos condutores. Para isso deve fazer-se uma medição da temperatura nos seguintes elementos do equipamento de controle:

**Entrada do disjuntor.** Medir a temperatura nos terminais dos condutores que vêm do transformador para o disjuntor principal em cada uma das fases (A, B e C).

**Saída do disjuntor.** Medir a temperatura nos terminais de saída do disjuntor principal para o motor em cada uma de suas fases (A, B e C).

**Entrada da chave de partida.** Medir a temperatura dos terminais nos condutores de entrada da chave de partida em cada uma de suas fases (A, B e C).

**Saída da chave de partida.** Medir a temperatura dos terminais dos condutores de saída que vão até a chave de partida, em cada uma de suas fases (A, B e C).

**No motor.** A medição de temperatura no motor pode determinar a falta de manutenção no motor, uma sobrecarga nele ou atrito, ou instabilidade dos eixos longitudinais, quando, ao realizar esta medição, se observem grandes diferenças de temperatura entre as partes. Para o motor, deve-se medir a temperatura nos elementos seguintes:

**Carcaça.** Medir a temperatura na carcaça do motor.

**Rolamentos.** Deve-se medir a temperatura nos rolamentos ou mancais do motor, isto é, no começo e final do eixo.

**No transformador.** Da mesma forma que no equipamento de controle, as medições de temperatura são realizadas para determinar possível sobrecarga de corrente em condutores, ou uma falta de ajuste dos parafusos ou elementos de sujeição dos terminais dos condutores no transformador, bem como a falta de manutenção do transformador. Para isso, deve-se medir a temperatura nos seguintes elementos do transformador:

**Bornes do alimentador.** Medir a temperatura nos terminais ou bornes do alimentador do terminal de ligação principal do serviço de energia elétrica, que se conecta com o transformador, isto é, no lado de alta tensão em cada uma de suas fases ( $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$ ).

**Bornes de baixa tensão.** Medir a temperatura nos terminais de saída do transformador, isto é, nos terminais de baixa tensão, tanto no terminal de condutor neutro ( $X_0$ ) como em cada uma das fases ( $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$ ).

**Carcaça.** Medir a temperatura da carcaça do transformador na parte superior e na parte inferior. Essa medição ajuda a determinar a temperatura de trabalho do transformador e identificar uma possível sobrecarga.

**Radiador.** Medir a temperatura no radiador do transformador, desde que o tipo de transformador tenha esse elemento; as medições deverão realizar-se tanto na parte superior como inferior do radiador. Essa medição determina de forma indireta o diferencial de temperatura do óleo do transformador.



## Capítulo 6.

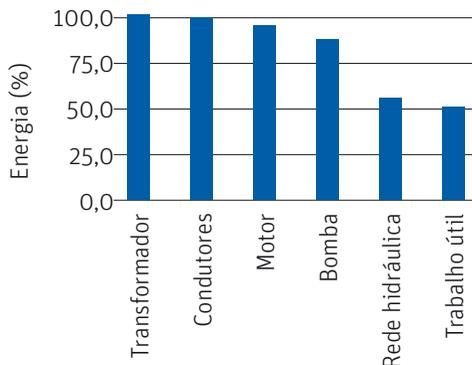
### ANÁLISE DE INFORMAÇÕES E AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA

O passo seguinte é realizar a avaliação e análise dos dados técnicos obtidos e das medições realizadas. Esta avaliação terá como principal objetivo a determinação das perdas energéticas e a eficiência dos diferentes componentes do sistema de bombeamento mediante uma auditoria de eficiência energética, dando como resultado o balanço de energia.

#### PERDAS ENERGÉTICAS EM SISTEMAS DE ÁGUA

Dentro das instalações do sistema de água potável, a distribuição típica de perdas de energia é apresentada na Figura 6.1.

**FIGURA 6.1:** Perdas energéticas típicas nos componentes eletromecânicos de um sistema de água



Observa-se que as maiores perdas de energia se apresentam durante a transformação da energia mecânica em hidráulica (da bomba à rede hidráulica), que em alguns casos atinge valores entre 40% e 45%. Embora não seja incomum, uma vez recebida a energia no motor elétrico, achar sistemas de bombeamento com perdas de até 60%.

É precisamente nessa faixa de 40% a 45% que estão as oportunidades exploradas abaixo, em decorrência da otimização da operação hidráulica, onde também existem oportunidades importantes de economia de energia.

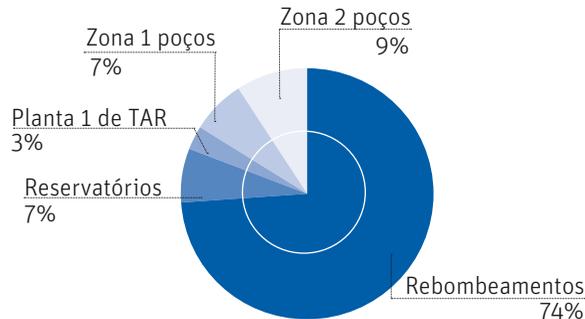
#### BALANÇO DE ENERGIA DO SISTEMA

No começo da auditoria de eficiência energética, recomenda-se analisar a distribuição do consumo de energia ao longo do sistema sob exame. Isso é conhecido como análise do balanço de energia.

Para realizar o balanço de energia do sistema, devem-se somar os consumos de energia de todas as instalações que o compõem, poços, plantas de tratamento e bombeamentos, obtendo-se a percentagem de consumo em cada um deles em relação ao total de energia do sistema.

Com o balanço de energia, identificam-se as instalações de maior consumo de energia no sistema para o planeamento da auditoria energética. Na Figura 6.2 se mostra um balanço padrão em um sistema de água potável e saneamento.

**FIGURA 6.2:** Descrição gráfica do balanço de energia do sistema



## ASPECTOS A SEREM AVALIADOS EM UMA AUDITORIA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Baseado na distribuição de perdas descrita acima, a Auditoria Energética (AE) em um sistema de água potável deve incluir a análise dos sistemas típicos onde a energia é consumida que, em ordem de importância, são:

- Fornecimento elétrico, incluindo as características do contrato de fornecimento.
- Sistema eletromotriz, incluindo o transformador.
- Conjunto motor-bomba, incluindo eficiências, condições de operação e aspectos de manutenção.

É importante notar que, embora existam muitas perspectivas para analisar os sistemas elétricos, para os fins da AE, deve-se enfatizar a análise dos aspectos que mais incidam no consumo energético.

Neste capítulo são descritas as características mais importantes e os principais aspectos a serem avaliados, bem como a metodologia de cálculo a aplicar durante a auditoria de eficiência energética de cada componente da cadeia energética de uma instalação padrão dos sistemas de água potável e saneamento, que será útil para o desenvolvimento posterior da carteira de projetos de economia de energia.

## CÁLCULO DE PERDAS ELÉTRICAS EM CONDUTORES E TRANSFORMADORES

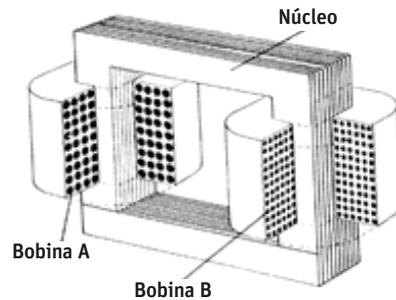
### Cálculo de perdas no transformador

A subestação elétrica é o espaço que aloja o primeiro elemento de condicionamento do fornecimento elétrico até o sistema eletromecânico no interior das instalações, que é o transformador elétrico, que tem a função de reduzir a tensão da rede aos valores que os equipamentos requerem.

**FOTOGRAFIA 6.1:** Componentes típicos de uma subestação.



**FIGURA 6.3:** Detalhe dos componentes típicos de uma subestação.



Os principais aspectos a observar e avaliar durante a auditoria de eficiência energética são as condições de operação do transformador elétrico e as perdas energéticas por dissipação em seus componentes.

**A. Avaliação de perdas.** As perdas em um transformador são de dois tipos: perdas no entreferro (núcleo) e perdas no enrolamento (cobre).

As perdas no núcleo ( $P_{Fe}$ ) são as perdas geradas no núcleo ferromagnético, devido a dois fatores fundamentais: a energia mínima de magnetização e as correntes parasitas que circulam pelo núcleo devido ao fluxo magnético presente e falhas no material ferromagnético. Essas perdas são independentes da carga à qual o transformador é submetido e são praticamente invariáveis quanto a tensão e a frequência são constantes. É um dado que normalmente é proporcionado pelo fornecedor.

As perdas no cobre ( $P_{Cu}$ ) são as geradas nos enrolamentos do transformador, ao circularem por eles as correntes. O valor delas é determinado pelo quadrado da corrente e a resistência elétrica dos enrolamentos e estão diretamente relacionadas com o fator de potência.

As perdas totais são iguais às perdas no núcleo acrescidas das perdas no cobre a plena carga, corrigidas pelo índice de carga (a potência à carga dividida pela potência a plena carga) ao quadrado. A seguir é apresentada a fórmula para o cálculo das perdas totais.

$$P_{tot} = P_{Fe} + P_{Cu} * [P_{rt} (kW) / (FP * P_n(kVA))]^2$$

onde:

$P_{tot}$  = Perdas totais, kW

FP = Fator de potência

$P_{Fe}$  = Perdas no núcleo sob tensão nominal, kW

$P_{Cu}$  = Perdas no cobre sob tensão nominal, kW

$P_n$  = Potência nominal do transformador sob exame, kVA

$P_{rt}$  = Potência real considerando todas as cargas alimentadas pelo transformador, kW

Na Tabela 6.1 são detalhadas as perdas  $P_{Fe}$  e  $P_{Cu}$  sob carga nominal para transformadores de capacidades nominais comerciais, para fins de avaliação prática durante a auditoria de eficiência energética, caso o transformador não possua seus dados específicos dados pelo fabricante.

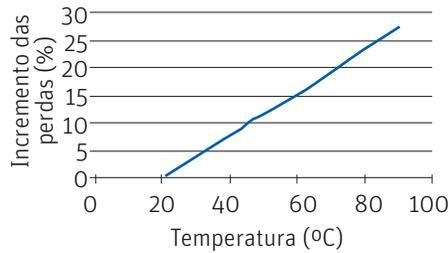
**TABELA 6.1:** Perdas em um transformador elétrico em função de sua capacidade nominal.

Potência nominal (kVA)	Perdas no ferro (W)	Perdas no cobre à potência nominal (W)
25	195	670
50	345	810
75	400	1.080
100	435	1.085
125	480	2.350
160	490	2.600
200	570	3.400
250	675	4.230
315	750	5.250
400	900	6.200
500	1.000	8.050
630	1.250	9.000
800	1.690	10.800
1.000	1.800	12.600
1.250	2.010	16.800
1.600	2.500	19.000
2.000	2.750	23.900
2.500	3.480	29.600
3.150	3.500	30.500
4.000	4.300	34.000
5.000	5.000	39.500
6.300	6.300	45.000
8.000	7.000	57.000
10.000	7.600	68.500

Como é óbvio, as perdas estão diretamente relacionadas com o fator de potência, portanto, para reduzi-las é necessário trabalhar com um fator de potência próximo da unidade.

**B. Inspeção da temperatura de operação.** O outro fator que incrementa o nível de perdas é a ineficiente remoção do calor, que se reflete na alta temperatura de operação por funcionamento deficiente do sistema de arrefecimento. O nível de perdas em função da temperatura é apresentado na Figura 6.4.

**FIGURA 6.4:** Perdas em transformadores em função da temperatura



### Análise do fator de potência

A grande maioria dos equipamentos elétricos, particularmente os motores de indução do tipo gaiola de esquilo, que são utilizados nos sistemas de água e saneamento, consome tanto potência ativa ou de trabalho  $P_a$  (kW), que é a potência que o equipamento transforma em trabalho útil, como potência reativa ou não produtiva  $P_r$  (kVAr), que fornece o fluxo magnético necessário para o funcionamento do equipamento, mas que não se transforma em trabalho útil. A soma das duas é conhecida como potência total aparente  $S$  (kVA)

Ambos os valores são medidos durante a campanha de medição de parâmetros elétricos acima descrita.

### Causas e efeitos do baixo fator de potência

Uma deterioração do fator de potência (FP) provoca um aumento da corrente que, por sua vez, aumenta as perdas no sistema, dentre as quais se destacam:

- a) Aumento das perdas por efeito Joule, que são produzidas em função do quadrado da corrente, manifestando-se:
  - Nos condutores entre o medidor e o usuário
  - Nos enrolamentos dos transformadores de distribuição
  - Nos dispositivos de operação e proteção.
- b) Uma queda de tensão nas linhas de alimentação, relacionada a um:
  - Incremento na corrente demandada, com o que se reduz a capacidade de carga instalada. Isso é importante no caso dos transformadores de distribuição.
  - Incremento das perdas Joule na linha de alimentação. Essas perdas afetam o produtor e distribuidor da energia elétrica. Por isso o usuário é punido, fazendo com que pague mais por sua eletricidade.

A tarefa durante a auditoria de eficiência energética a respeito da análise do FP consistirá no seguinte:

**A.** Na hipótese de que a fornecedora meça o FP e aplique um custo ou bonificação por alto ou baixo FP, registrar o valor estatístico de FP durante o período em análise, juntamente com a estatística de faturamento para determinar o comportamento do FP no decorrer do tempo e seu impacto no custo.

**B.** Medir o FP real de todos os equipamentos diagnosticados. Se o instrumento de medição não registrar diretamente o valor de FP trifásico, deverá ser calculado baseando-se nos valores de potência real e potência reativa real obtidos durante as medições. A forma de calculá-lo é a seguinte:

$$FP = \frac{Pa}{\sqrt{(Pa^2 - Pr^2)}}$$

Onde:

FP = Fator de potência (-).

Pa = Potência ativa medida (kW).

Pr = Potência reativa medida (kVAr).

Também pode-se calcular tomando-se esses valores do medidor do fornecedor.

**C.** As instalações deverão ser vistoriadas, para se certificar de que possuam algum sistema para compensar o FP, geralmente capacitores e o local de instalação deles.

### Cálculo de perdas em condutores elétricos

O conjunto integrado pelos condutores, transformadores de controle, proteções, chaves de partida, controladores e demais elementos que fornecem energia aos equipamentos que transformam energia elétrica em energia mecânica (motores) recebe o nome de sistema eletromotriz.

Na Fotografia 6.2 são mostrados sistemas eletromotrizes e seus componentes

**FOTOGRAFIA 6.2:** Componentes típicos do sistema eletromotriz de um sistema de bombeamento



Nesses componentes, os principais aspectos a observar e avaliar durante a auditoria de eficiência energética são os seguintes:

Do conjunto desses sistemas, é nos condutores elétricos onde se deve tomar maior cuidado na verificação e levantamento de dados durante a auditoria de eficiência energética.

Os condutores se comportam como uma resistência pura, isto é, absorvem potência segundo a expressão seguinte:

$$P = R * I$$

Onde:

P = perdas por efeito Joule (W).

R = resistência do condutor ( $\Omega$ ).

I = corrente circulando no condutor (A).

Além disso, essa resistência gera uma queda de tensão que é calculada em função da corrente.

A avaliação energética como parte da auditoria de eficiência energética consiste em calcular as perdas no condutor, cujo método é ilustrado no exemplo seguinte:

**Exemplo:** Calcular as perdas em um condutor elétrico que alimenta um motor de 150 A conectado a um equipamento de bombeamento submersível. A bitola do condutor instalado é de 1/0 com 4 fios a 440 V como determina a norma internacional. O comprimento do cabo é de 130 m. Trata-se de selecionar a bitola ideal do condutor elétrico, para alimentar um equipamento de bombeamento que demande 150 ampères a 440 V.

Na Tabela 6.2 se mostra o cálculo de perdas e queda de tensão para diferentes bitolas de condutor e as perdas para essa distância e amperagem específicas.

**TABELA 6.2:** Resistência de diferentes bitolas de condutor e queda de tensão para o exemplo em desenvolvimento

Bitola	Resistência			$\Delta V$	
	Ohms/km	L (km)	Ohms	Volts	%
1/0	0,3290	0,13	0,04277	6,42	1,46
2/0	0,2610	0,13	0,03393	5,09	1,16
3/0	0,2070	0,13	0,02691	4,04	0,92
4/0	0,1640	0,13	0,02132	3,20	0,73
250	0,1390	0,13	0,01807	2,71	0,62
300	0,1157	0,13	0,01504	2,26	0,51
350	0,0991	0,13	0,01288	1,93	0,44
400	0,0867	0,13	0,01127	1,69	0,38
500	0,0695	0,13	0,00904	1,36	0,31
600	0,0578	0,13	0,00751	1,13	0,26
750	0,0463	0,13	0,00602	0,90	0,21

Com esses valores são calculadas as perdas energéticas trabalhando 6.000 horas ao ano e um índice de custo energético de 1,4 \$/kWh em média, conforme o procedimento descrito na Tabela 6.3.

0.7978
0.6531
0.5471
0.4668

**TABELA 6.3:** Cálculo de perdas energéticas finais por efeito Joule para o exemplo sob análise

Tensão (V) =	440 V
Corrente (I) =	150 A
Queda de tensão ( $\Delta V/I$ ) =	6.424 V
	1,5%
Resistência ( $R=\Delta V/I$ ) =	0,0428 $\Omega$
Perdas ( $P_j = I^2 \times R$ ) =	963,6 watts
	0,9636 kW
Operação =	6.000 h/ano
Perdas de energia =	5.782 kWh/ano
	7.909,23 \$/ano

Obs.: Cabe destacar que o cálculo acima não considera o efeito que a temperatura tem na resistência e que a corrente tem o efeito de aumentar a temperatura do cabo.

## CÁLCULO DE PERDAS E EFICIÊNCIA DO MOTOR

Os motores elétricos são os equipamentos responsáveis por transformar a energia elétrica em energia mecânica giratória, que é transferida à carga, seja ela qual for. A Figura 6.5 ilustra o fluxo de energias correspondente a um motor elétrico.

**FIGURA 6.5:** Fluxo de energias em um motor elétrico.



No caso dos sistemas de água, a carga típica são os sistemas de bombeamento, ainda que existam também outros tipos de cargas, tais como ventoinhas, sopradores, agitadores e transportadores, utilizados nas plantas de tratamento de água residual e potável.

Do universo dos motores elétricos, o motor de indução é, sem dúvida, o mais popular de todos, devido à sua grande versatilidade e baixo custo, sendo, portanto, o de maior aplicação no nível industrial, bem como no doméstico. Além disso, é utilizado quase universalmente nos sistemas de bombeamento centrífugo de água municipal. Talvez até se tenha exagerado um pouco na aplicação, tanto que, por causa do baixo custo, em muitos casos suas grandes qualidades não foram aproveitadas adequadamente, propiciando usos extremamente ineficientes em algumas de suas aplicações.

## Perdas típicas em um motor elétrico

Em geral, as perdas de um motor elétrico são descritas na forma abaixo:

- Perdas elétricas (no estator e no rotor) (variam com a carga).
- Perdas no ferro (núcleo) (essencialmente independentes da carga).
- Perdas mecânicas (atrito e turbulência do vento) (independentes da carga). As perdas mecânicas ocorrem nos rolamentos, ventoinhas e escovas (quando se utilizam) do motor.
- Perdas de carga por dispersão (dependentes da carga). Essas perdas são constituídas por várias perdas menores que são geradas por fatores tais como a perda de fluxo induzido pelas correntes do motor, a distribuição não uniforme da corrente no estator e os condutores do rotor, o entreferro e assim por diante. Essas perdas combinadas chegam a constituir até 10% a 15% das perdas totais do motor e tendem a aumentar com a carga.

Sob condições normais de tensão e frequência, as perdas mecânicas e magnéticas se mantêm praticamente constantes, independentemente da carga impulsionada; já as perdas elétricas variam com a potência exigida no eixo.

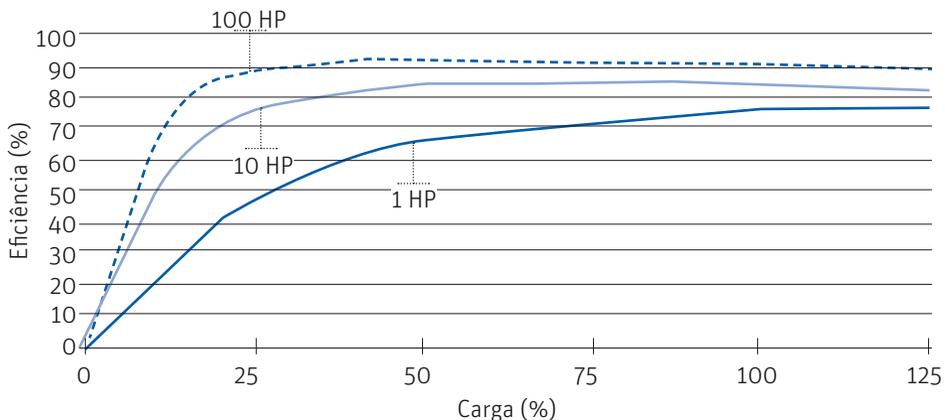
## Avaliação da eficiência dos motores

A eficiência de um motor elétrico é a medida de sua capacidade de transformar a potência elétrica que toma da linha em potência mecânica útil. Usualmente é expressa em porcentagem da relação entre a potência mecânica e a potência elétrica.

$$\text{Eficiência} = \frac{\text{Potência mecânica}}{\text{Potência elétrica}} \times 100$$

Todas as perdas descritas influem no valor real da eficiência de um motor em operação. Mas, de forma geral, sabe-se que a eficiência máxima acontece quando operam entre 75% e 95% de sua potência nominal, diminuindo levemente quando se incrementa e de forma significativa quando se reduz. Na Figura 6.6 se mostra, como referência, a curva de eficiência típica para motores de indução do tipo gaiola de esquilo para diferentes capacidades, que serve também para a metodologia de avaliação da eficiência real do motor.

**FIGURA 6.6:** Curvas típicas de eficiência vs. carga para motores de indução do tipo gaiola de esquilo



Como parte da auditoria de eficiência energética, recomenda-se avaliar de forma separada a eficiência do motor em relação à bomba normalmente acoplada a ela, com a finalidade de conhecer detalhadamente onde a energia está sendo desperdiçada. Avaliar separadamente a eficiência de cada componente é útil para adotar melhores decisões de ações a implementar dentro de um plano de economia energética.

A metodologia para realizar essa avaliação tem o foco na determinação da eficiência ( $\eta_m$ ) e, portanto, no nível de perdas energéticas dos motores elétricos sob exame.

O método de engenharia mais prático e confiável para uma estimativa apropriada para a tomada de decisões é o método da curva do motor. Ele é um procedimento iterativo, baseado na comparação da eficiência calculada em relação à relatada pelas curvas características de eficiência em função do fator de carga para o motor sob exame.

A seguir, a metodologia é explicada de forma detalhada:

**Passo 1.** A partir das características nominais do motor (HP, RPM e V), a curva de eficiência do motor é identificada na Figura 6.6.

**Passo 2.** A partir da potência elétrica demandada pelo motor (medição realizada) se calcula o fator de carga nominal mediante a equação abaixo:

$$FC = \frac{P_e / \eta_m}{HP_{nom.} * 0,746}$$

Onde:

- $FC$  = fator de carga de operação do motor
- $P_e$  = potência elétrica demandada pelo motor (dado obtido em medições de campo)
- $\eta_m$  = eficiência de operação do motor
- $HP_{nom}$  = potência nominal do motor (a real verificada no campo) (HP)

**Passo 3.** Na curva do motor, comprova-se que a eficiência utilizada no Passo 1 corresponde ao fator de carga calculado. Caso contrário, repete-se o passo anterior, utilizando-se a eficiência que corresponda ao FC calculado até que ambos os valores coincidam, encerrando-se o processo iterativo. Os últimos valores de eficiência e fator de carga são os valores reais do motor sob exame.

**Passo 4.** Uma vez determinada a eficiência e o fator de carga nominal, a eficiência diminui segundo os critérios abaixo:

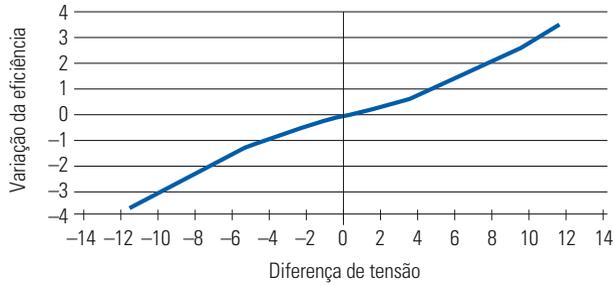
- Se o motor tiver mais de 10 anos de idade, reduzir um ponto.
- Se o motor foi rebobinado, reduzir dois pontos (ver a fórmula detalhada no Apêndice) ou, se a temperatura à qual o motor foi exposto durante a rebobinagem for conhecida, reduzir conforme a Tabela 6.4.

**TABELA 6.4:** Redução da eficiência de um motor rebobinado em função da temperatura utilizada

Temperatura (°C)	Pontos de redução da eficiência
633	0,0053
683	0,0117
733 (maçarico)	0,0250
Químico	0,0040

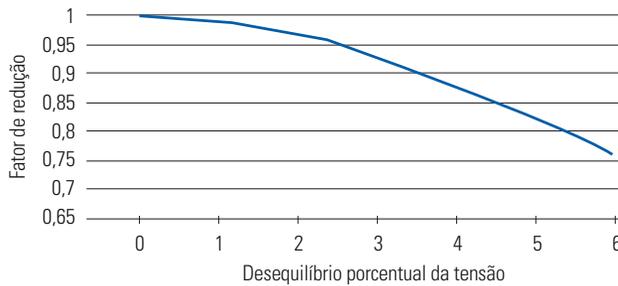
- Se a tensão de alimentação for diferente daquela da placa, aplicar o ajuste à eficiência indicado na curva mostrada na Figura 6.7:

**FIGURA 6.7:** Pontos de eficiência a reduzir em função da diferença de tensão em relação à nominal em um motor elétrico



- Se a tensão de alimentação medida apresentar um desequilíbrio, aplicar o ajuste à eficiência indicado na curva mostrada na Figura 6.8:

**FIGURA 6.8:** Redução percentual da eficiência de um motor elétrico em função do desequilíbrio de tensão



Os cálculos de desequilíbrio de tensão, corrente e diferença em relação à nominal são detalhados a seguir:

### Desequilíbrio de tensão ( $D_{BV}$ )

O desequilíbrio de tensão é calculado a partir das medições de tensão entre fases, por meio da seguinte equação:

$$D_{BV} = \max((\max(V_{A-B}, V_{B-C}, V_{C-A}) - V_{méd}), (V_{méd} - \min(V_{A-B}, V_{B-C}, V_{C-A})))$$

Onde:

- $D_{BV}$  = desequilíbrio de tensão (-).
- $V_{A-B}$  = tensão entre as fases A e B (V).
- $V_{B-C}$  = tensão entre as fases B e C (V).

$V_{C-A}$  = tensão entre as fases C e A (V).  
 $V_{méd}$  = tensão média entre fases (V).

### Desequilíbrio de corrente ( $D_{BI}$ )

O desequilíbrio de corrente é calculado a partir das medições de corrente por fase, por meio da seguinte equação:

$$D_{BI} = \max((\max(I_A, I_B, I_C) - I_{méd}), (I_{méd} - \min(I_A, I_B, I_C)))$$

Onde:

$D_{BI}$  = desequilíbrio de corrente (-).  
 $I_A$  = corrente da fase A (A).  
 $I_B$  = corrente da fase B (A).  
 $I_C$  = corrente da fase C (A).  
 $I_{méd}$  = corrente média das três fases (A).

### Tensão de alimentação diferente da nominal (VDN)

O valor da tensão de alimentação diferente da nominal é calculado em termos percentuais, segundo a seguinte equação:

$$VDN = (V_{méd} - V_{placa}) / V_{placa} * 100$$

Onde:

$VDN$  = diferença percentual entre o valor da tensão de alimentação e o dado de placa da tensão nominal (-).  
 $V_{méd}$  = tensão média entre fases (V).  
 $V_{placa}$  = valor da tensão nominal de alimentação indicado na placa (V).

## CÁLCULO DE PERDAS E EFICIÊNCIA DA BOMBA

Como já foi comentado, um dos maiores pontos de perdas energéticas ocorre na etapa de transformação da energia elétrica em energia mecânica obtida por meio do sistema de bombeamento e transmitida para o fluido sob a forma de potência manométrica.

Portanto, é importante diagnosticar vários aspectos que podem ser a causa de um excessivo consumo energético e, ao mesmo tempo, oportunidades para economizar energia de forma substancial e com baixo custo.

Os principais aspectos a diagnosticar nesses sistemas são:

- Eficiência eletromecânica atual.
- Condições de operação do sistema.
- Características das instalações e perdas energéticas no sistema de condução.

### Perdas e cálculo de eficiência na bomba

Durante sua operação, as bombas sofrem perdas naturais como resultado dos mecanismos hidráulicos que existem no interior e exterior de seus componentes. Portanto, é lógico que a eficiência da bomba nova não possa ser mantida.

Para entender a origem das perdas na operação de bombeamento, que finalmente repercutem no consumo energético, é importante revisar os diferentes tipos de perdas que ocorrem nas bombas, classificadas na forma abaixo:

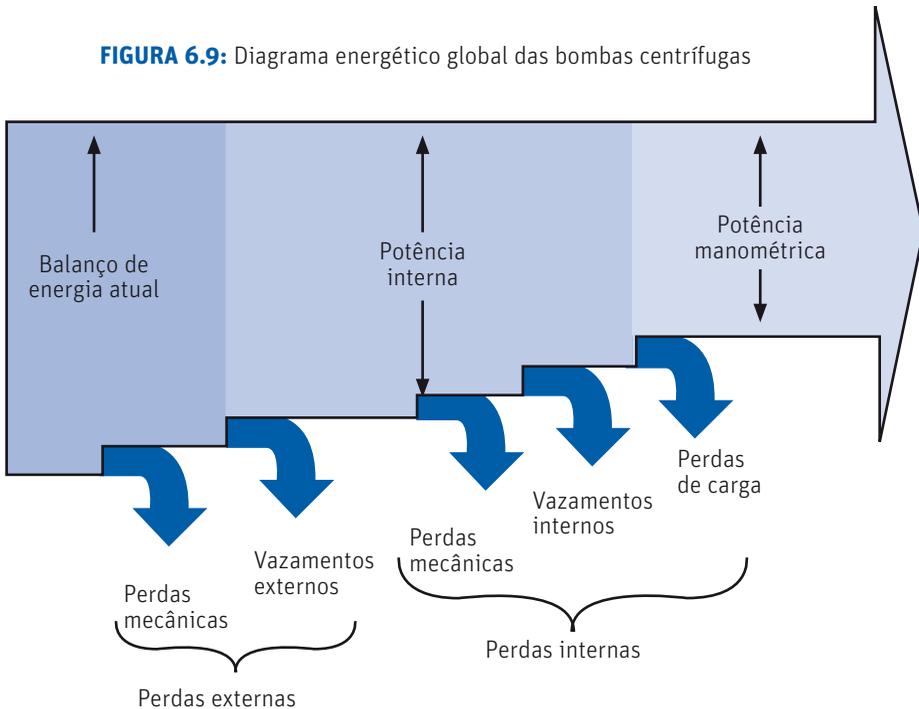
### Perdas internas

- Perdas de carga: resultam da viscosidade e da turbulência do fluido. Um exemplo de perdas de carga são as perdas por choques na entrada do difusor.
- Perdas por vazamentos: em uma bomba, as perdas por vazamentos internos têm como causa o jogo que necessariamente deve existir entre partes móveis, tais como o rotor e partes fixas.
- Perdas por atrito interno: em uma bomba centrífuga, o rotor tem superfícies inativas do ponto de vista de sua função de comunicar energia ao fluido. Isso gera atrito viscoso, o que provoca vazamentos internos por atrito no fluido.

### Perdas externas

- Vazamentos externos: eles se produzem nos lugares onde o eixo atravessa a carcaça da máquina. Uma parte da vazão que entra na bomba é desviada antes de entrar no rotor e se perde.
- Perdas por atrito externo:
  - Atrito mecânico nas gaxetas que existem nos eixos.
  - Atrito mecânico nos rolamentos da bomba.

A Figura 6.9 apresenta de forma gráfica os fluxos de perdas e diversos rendimentos da bomba centrífuga sob a forma de diagrama de Sankey.



A eficiência global com a qual a bomba opera é calculada então como o quociente entre a potência manométrica de saída  $P_s$  e entre a potência mecânica absorvida  $P_m$ , que no diagrama é identificada como potência externa. A fórmula da eficiência é:

$$\eta_b = \frac{\text{Potência de saída (Ps)}}{\text{Potência absorvida (Pm)}} \times 100$$

Onde:

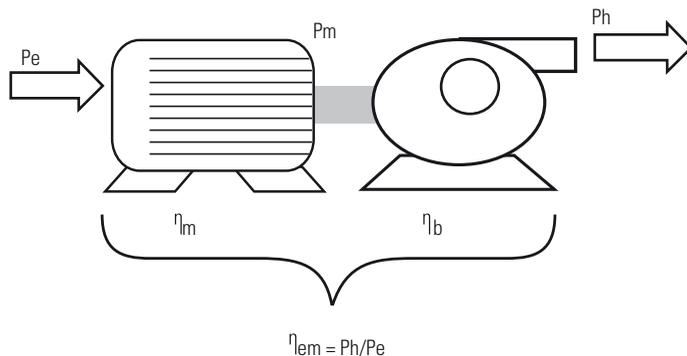
- $\eta_b$  = eficiência da bomba (-).
- $P_s = Q \rho g H_t / 746$  (HP).
- $P_m$  = potência mecânica absorvida pela bomba (HP).
- $Q$  = fluxo volumétrico ( $m^3/s$ ).
- $\rho$  = densidade da água bombeada ( $kg/m^3$ ).
- $g$  = aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ).
- $H_t$  = carga total de bombeamento (mca).

Com base na dificuldade em medir a potência mecânica separadamente e a partir daí medir a eficiência da bomba, recomenda-se avaliar a eficiência eletromecânica do conjunto bomba-motor, conforme o detalhado abaixo.

#### Avaliação da eficiência eletromecânica ( $\eta_{em}$ )

A eficiência eletromecânica corresponde à eficiência do conjunto motor-bomba, que graficamente pode ser representado pela Figura 6.10.

**FIGURA 6.10:** Diagrama esquemático das eficiências que integram a eficiência eletromecânica



E se determina da forma seguinte:

**Passo 1.** Em primeiro lugar, calcula-se a potência manométrica por meio da fórmula:

$$P_h = H_t * Q * \gamma * g / 1000$$

Onde:

- $P_h$  = potência manométrica (kW).
- $H_t$  = carga total de bombeamento (mca).
- $Q$  = fluxo ( $m^3/s$ ).
- $\gamma$  = peso específico da água ( $kg/m^3$ ).
- $g$  = aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ).

O valor de  $Q$  é um dado obtido das medições de campo, os valores  $\gamma$  e  $g$  são dados quase constantes na faixa típica de temperaturas de operação e geralmente se tomam os valores de 1 e 9,81 respectivamente.

A carga total de bombeamento é uma combinação das diferentes cargas parciais que se calculam conforme o seguinte:

### *Cálculo da carga total de bombeamento ( $H_t$ )*

Dependendo do tipo de medições realizadas, a carga total de bombeamento será calculada da forma seguinte:

- Se a pressão de sucção foi medida, como se recomenda fazer nos sistemas de bombeamento:

$$H_t = (P_d - P_s) * 10.3$$

Onde:

- $H_t$  = carga total de bombeamento (mca).
- $P_d$  = pressão de descarga medida ( $kg/cm^2$ ).
- $P_s$  = pressão de sucção medida ( $kg/cm^2$ ).

- Se a pressão de sucção não foi medida, como acontece no caso dos poços profundos ou sistemas de bombeamento onde a pressão de sucção não possa ser medida:

$$H_t = (P_d * 10.3) + N_s + D_{r-m} + h_v + h_{fs}$$

Onde:

- $H_t$  = carga total de bombeamento (mca).
- $P_d$  = pressão de descarga medida ( $kg/cm^2$ ).
- $N_s$  = nível de sucção (m).
- $D_{r-m}$  = nível de referência dos centros do manômetro (m).
- $H_v$  = carga de velocidade (mca).
- $H_{fs}$  = perdas por atrito na tubulação de sucção (mca).

### *Carga de velocidade ( $h_v$ )*

A carga de velocidade está em função do diâmetro da tubulação, para o qual é necessário calcular a área da seção transversal da tubulação de descarga ( $A$ ) na forma seguinte:

$$A = \eta * (\Phi)^2 / 4$$

Onde:

- $A$  = área da seção transversal da tubulação ( $m^2$ ).
- $\Phi$  = diâmetro da tubulação (m).
- $\eta$  = igual a 3,1416.

Com base nesse cálculo, podemos calcular também a velocidade do fluido ( $v$ ) com a fórmula:

$$v = Q / A$$

Onde:

- v = velocidade do fluído (m/s).
- Q = vazão medida em campo (m<sup>3</sup>/s).
- A = área da seção transversal da tubulação (m<sup>2</sup>).

Com esses valores, finalmente podemos calcular a carga por velocidade com a fórmula:

$$h_v = v^2 / (2 * g)$$

Onde:

- h<sub>v</sub> = carga de velocidade (mca).
- v = velocidade do fluído (m/s).
- g = aceleração da gravidade (m<sup>2</sup>/s).

**Passo 2.** Com o valor de Ph calculado e a potência elétrica medida, a eficiência eletromecânica é calculada com a fórmula seguinte:

$$\eta_{EM} = P_h / P_e$$

Onde:

- η<sub>EM</sub> = eficiência eletromecânica (-).
- P<sub>h</sub> = potência manométrica (kW).
- P<sub>e</sub> = potência elétrica medida (kW).

**Passo 3.** Uma vez calculada a eficiência eletromecânica, a eficiência da bomba η<sub>b</sub> separadamente, calcula-se a eficiência das bombas (η<sub>b</sub>) da seguinte maneira:

$$\eta_B = \eta_{EM} / \eta_M$$

Onde:

- η<sub>M</sub> = eficiência do motor (-).

Este valor é calculado para todos os equipamentos a serem diagnosticados e é o que será utilizado como base para o desenvolvimento do plano de eficiência energética.

## CÁLCULO DE PERDAS DE CARGA EM TUBULAÇÕES

As tubulações de sucção e descarga também geram perdas energéticas devido ao atrito do fluido sobre as paredes. Para o cálculo dessas perdas, recomenda-se o procedimento seguinte:

Em primeiro lugar, calcula-se o coeficiente de atrito, determinado por meio da equação de Colebrook-White, a partir dos valores do número de Reynolds e rugosidade relativa, definido como o quociente entre a rugosidade absoluta (ε) e o diâmetro (D) em mm.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[ \frac{\epsilon/D}{3.71} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right]$$

A fórmula acima é do tipo implícita e, portanto, deve ser iterada. Alternativamente, pode-se utilizar a fórmula seguinte, que é explícita (sem necessidade de iterar) e utiliza os mesmos parâmetros.

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$$

Fonte: Guerrero, O. (1995). Equação Modificada de Colebrook-White. Revista Engenharia Hidráulica do México, Vol. X, pp. 43–48, janeiro-abril.

A rugosidade absoluta ( $\epsilon$ ) é uma característica do material da tubulação. Os valores para os diferentes materiais são mostrados na Figura 6.11.

O número de Reynolds é definido como:

$$Re = v * D * \rho / \mu$$

Onde:

$v$  = velocidade do fluido (m/s).

$D$  = diâmetro interior da tubulação (m).

$\mu$  = viscosidade cinemática do fluido (mPa·s), que se determina a partir de tabelas como função da temperatura.

$\rho$  = densidade do fluido (kg/m<sup>3</sup>).

**TABELA 6.5:** Viscosidade dinâmica da água

Temperatura (°C)	Viscosidade (mPa·s)
10	1,308
20	1,002
30	0,7978
40	0,6531
50	0,5471
60	0,4668

As perdas por atrito na tubulação são calculadas por meio da fórmula seguinte:

$$h_f = f * (L/D) * (v^2/2 * g)$$

Onde:

$h_f$  = perda de carga por atrito (m).

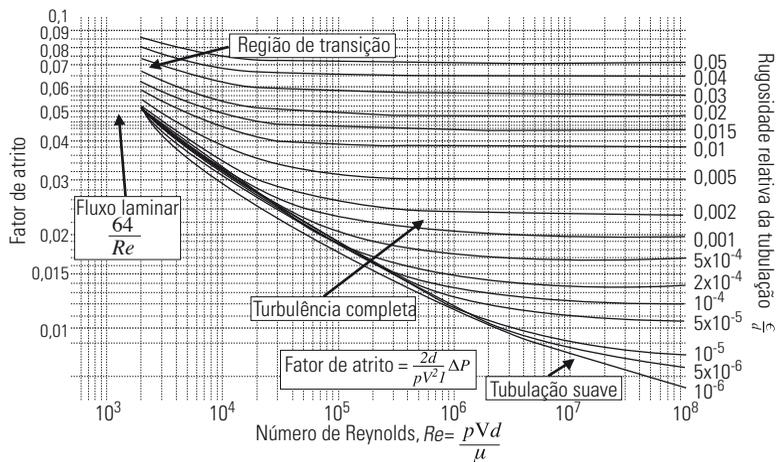
$f$  = coeficiente de atrito

$L$  = comprimento da tubulação (m).

$D$  = diâmetro da tubulação (m).  
 $v$  = velocidade do fluido (m/s).  
 $g$  = aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>).

O fator de atrito ou coeficiente de atrito é obtido pelo diagrama, iterando-se a fórmula de Colebrook ou utilizando-se o diagrama de Moody (ver Figura 6.11), onde se consegue representar a expressão de Colebrook em um ábaco de fácil manipulação, que integra o valor de  $f$  para todos os tipos de fluxos. Neste diagrama se coloca o valor da rugosidade relativa calculada nesse quadro e o valor do número de Reynolds, e para cada uma das tubulações de sucção e descarga. O valor obtido no diagrama deverá ser colocado no quadro correspondente.

**FIGURA 6.11:** Diagrama de Moody



Material	$\epsilon$ (mm)
Concreto, grosso	0,25
Concreto, liso	0,025
Tubulação flexível	0,0025
Vidro, plástico	0,0025
Ferro fundido	0,015
Redes de esgotos velhas	3,0
Aço revestido de argamassa	0,1
Aço oxidado	0,5
Aço forjado	0,025
Canalização principal velha	1,0

## CÁLCULO DE PERDAS NA REDE

Outro aspecto básico a ser avaliado durante a auditoria de eficiência energética e onde geralmente há áreas de oportunidade para corrigir situações de excessivo consumo energético, sendo uma fonte de medida de economia de baixo custo, são as características de instalação e, particularmente, as características da rede de condução associada a cada sistema de bombeamento.

Dentre os pontos-chave, há a configuração física das tubulações de descarga de poços profundos e dos sistemas de condução para a descarga das baterias de bombeamento ou em captações superficiais, como tomadas de água em rios, mananciais, represas ou galerias filtrantes.

Os principais pontos a serem observados são os seguintes:

**A. Condições de sucção.** Em muitas ocasiões, a eficiência dos sistemas é afetada pela falta de condições apropriadas de carga na sucção. Tecnicamente, esse conceito é conhecido como altura de sucção líquida positiva. Durante a auditoria de eficiência energética é importante verificar que se cumpram as condições mínimas para que não ocorra esse problema. Apesar de não ser o mais recorrente, observa-se em projetos inadequados, acarretando problemas nas bombas.

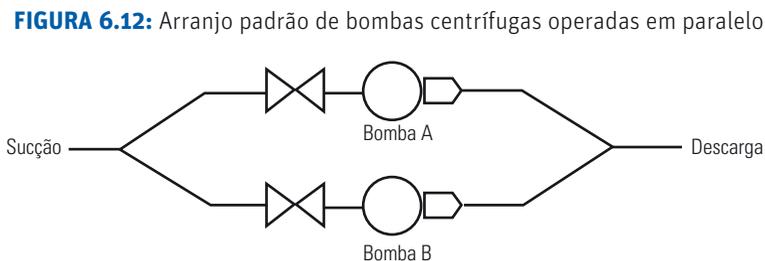
**B. Características dos sistemas de condução.** É muito comum encontrar baixa capacidade dos sistemas de condução na descarga dos sistemas de bombeamento. Isso se reflete em três problemas típicos que deverão ser identificados durante a auditoria de eficiência energética para emitir as recomendações pertinentes:

**B.1** Problemas de contrapressão que se opõem ao fluxo de uma fonte ou equipamento de bombeamento. Isso acontece quando se juntam vazões de fontes que normalmente descarregam com diferentes pressões.

**B.2** Redução na capacidade de produção de tubulações de bombeamento. Esse problema ocorre com frequência nos sistemas de bombeamento compostos por equipamentos múltiplos trabalhando em paralelo, onde o número de equipamentos foi aumentado com o intuito de fornecer mais vazão à rede sem revisar a capacidade da condução, o que faz com que, ao trabalharem juntamente, os equipamentos não forneçam a vazão para a qual são projetados de forma individual e sua eficiência se reduza significativamente.

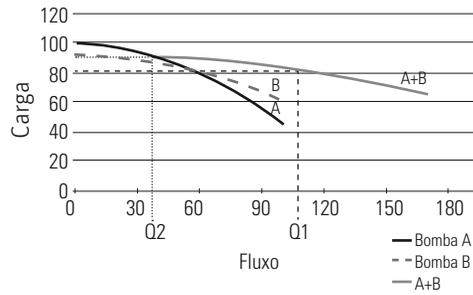
Esse problema é explicado tecnicamente pela teoria dos sistemas operando em paralelo, que é brevemente descrita a seguir:

Observar o uso de duas bombas dispostas como se mostra na Figura 6.12.



Normalmente obtém-se a curva de operação do arranjo somando-se as capacidades de cada bomba para iguais condições de carga. O resultado disso é apresentado na Figura 6.13:

**FIGURA 6.13:** Características de carga e capacidade de bombas centrífugas operadas em paralelo



Onde teoricamente:

$$Q_{AB} = Q_A + Q_B$$

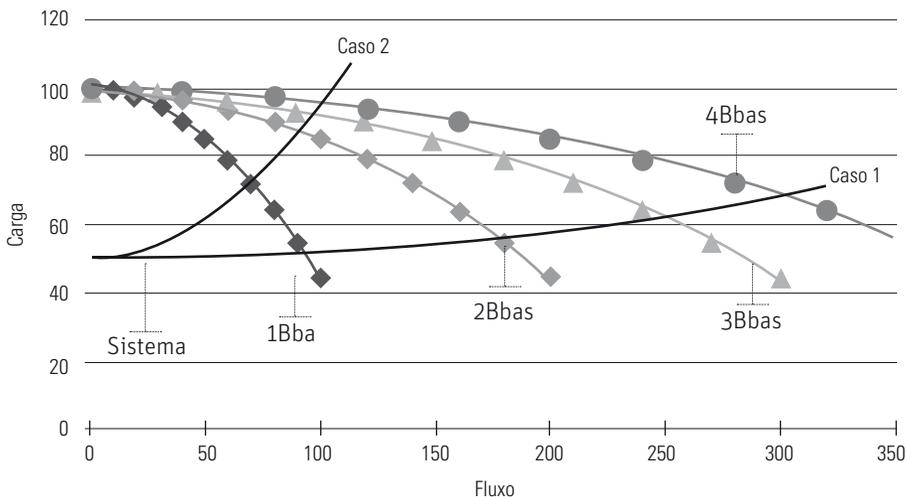
Com frequência se pensa que, com a colocação de uma bomba adicional, o fluxo será o dobro e, colocando-se uma terceira bomba adicional, será o triplo, e assim por diante.

Na verdade, isso não acontece dessa maneira pois, existindo mais fluxo pelo mesmo sistema de condução, a carga aumenta, e isso faz com que o aporte de cada bomba individualmente diminua, conforme se observa na Figura 6.14, onde é mostrado o comportamento conjunto para dois casos:

No Caso 1, a curva do sistema é bastante plana para as 4 bombas, pois à medida que mais bombas são colocadas, o fluxo aumenta.

No Caso 2, a situação é diferente, já que a curva do sistema não é tão plana como no Caso 1. Repare-se que, com a entrada da quarta bomba, o fluxo total praticamente não aumenta, mas sim é distribuído entre as 4 bombas.

**FIGURA 6.14:** Efeito de várias bombas em paralelo sobre o sistema de condução



### B.3 Perdas excessivas de energia pela baixa capacidade dos sistemas de condução existentes.

É possível que, em alguns sistemas de distribuição, as perdas energéticas por cisalhamento (atrito) nas tubulações sejam significativas. Para avaliar essa possibilidade durante a auditoria de eficiência energética recomenda-se seguir o procedimento abaixo:

- Com os dados coletados durante a campanha de medição e inspeção de campo, avaliar a velocidade do fluido nas tubulações primárias de condução de descarga de poços e sistemas de bombeamento.
- Nas tubulações de condução, onde houver velocidades do fluido acima de 2,0 m/s, que é o critério estabelecido na prática, avaliar as perdas energéticas por esse conceito, para integrá-las depois em uma medida da carteira de projetos de eficiência energética a considerar.

Para realizar essa avaliação de perdas em condução, existem as opções seguintes:

- 1) Realizar a avaliação com os métodos de análise de conduções baseados na modelação hidráulica, o que envolve a necessidade de construir essa ferramenta antes dessa avaliação.
- 2) Aplicar o procedimento convencional para uma avaliação rápida do potencial de economia.

Nas primeiras fases do plano, esta última opção é recomendável ao se determinar as “medidas de economia de rápida implementação” sem necessidade de esperar contar com o modelo de simulação.

Para realizar a análise sob o método convencional, segue-se o procedimento abaixo:

**Passo 1.** Calcular as perdas primárias (tubulação reta) por atrito na tubulação atual, por meio da metodologia seguinte:

i) Cálculo do coeficiente de atrito

O coeficiente de atrito é determinado por meio do diagrama de Moody a partir dos valores do número de Reynolds e rugosidade relativa,

O número de Reynolds é calculado com a fórmula seguinte:

$$Reynolds = v * D / \eta$$

Onde:

v = velocidade do fluido (m/s).

D = diâmetro da tubulação (m).

$\eta$  = viscosidade cinemática do fluido (m<sup>2</sup>/s), que é determinada a partir de tabelas como função da temperatura.

O valor da rugosidade relativa ( $\epsilon$ ) é calculado por meio da fórmula seguinte:

$$\epsilon = \frac{\epsilon}{D}$$

Onde:

$\varepsilon$  = rugosidade absoluta (mm).

D = diâmetro (mm).

A rugosidade absoluta é uma característica do material. Os valores de  $\varepsilon$  para diferentes tubulações são apresentados abaixo.

**Valores de  $\varepsilon$  para diferentes tubulações  $\varepsilon$  (mm)**

Aço rebitado	0,9 a 9
Concreto	0,3 a 3
Ferro fundido	0,25
Ferro galvanizado	0,15
Ferro fundido asfaltado	0,12
Aço comercial ou ferro forjado	0,025 a 0,046
Tubulação flexível	0,0015 a 0,025

ii) Cálculo das perdas de carga por atrito (mca)

$$h_f = f * (L/D) * (v^2/2*g)$$

Onde:

f = coeficiente de atrito (do diagrama de Moody ou fórmula Colebrook) (-).

L = comprimento da tubulação (m).

D = diâmetro da tubulação (m).

v = velocidade do fluido (m/s).

g = aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>).

**Passo 2.** Calculo de perdas secundárias (acessórios)

A determinação das perdas secundárias pode ser realizada por vários métodos. No presente trabalho, apenas mencionaremos o método de comprimento de tubulação reta equivalente.

Esse método consiste em avaliar a queda de pressão gerada através de um acessório de tubulação e determinar um comprimento de tubulação reta que gere a mesma quantidade de perda.

Na Figura 6.15 se mostra um nomograma com diversos acessórios de tubulação, que possui três escalas.

Unindo com uma reta o ponto da escala esquerda, correspondente ao acessório envolvido, com o ponto de escala direita correspondente ao diâmetro interior da tubulação, o ponto de interseção dessa reta com a escala central indica a quantidade de tubulação reta equivalente do acessório.

Uma vez obtido o comprimento equivalente dos acessórios, determinaremos a queda de pressão ou perdas secundárias por meio da expressão seguinte:

$$h_{fs} = f * \left( \frac{\sum L}{D} \right) * \left( \frac{v^2}{2 * g} \right)$$

Onde:  $\sum L$ : a soma de todos os comprimentos equivalentes cujo diâmetro seja igual.



**Passo 3.** Uma vez calculadas as perdas totais por atrito, calcula-se a potência elétrica necessária para compensar as perdas de carga por atrito.

Esse é o ponto final da avaliação de perdas durante a auditoria de eficiência energética, calculada com a fórmula:

$$P_e = \frac{(hfr * Q * 9.81)}{\eta_{em}}$$

Onde:

- $P_e$  = potência elétrica necessária para compensar perdas (kW).
- $hfr$  = perdas de carga por atrito (mca).
- $Q$  = vazão manejada (l/s).
- $\eta_{em}$  = eficiência eletromecânica do conjunto motor-bomba.

É frequente constatar que, quando não existe capacidade suficiente de condução, a potência elétrica necessária para compensar esse problema é equivalente a uma porcentagem significativa da potência que o equipamento de bombeamento a ela associado esteja demandando, que é uma base fundamental para o cálculo dessa medida de economia dentro do plano de eficiência energética.

## CÁLCULO DE INDICADORES ENERGÉTICOS

Os indicadores são medidas da eficiência e eficácia do sistema de água potável. Embora exista uma grande quantidade de indicadores, no cenário da eficiência energética sob exame, propõe-se o acompanhamento mínimo do seguinte:

- a) Indicador energético (IE) (kWh/m<sup>3</sup>).
- b) Indicador de custo unitário de energia (CUE) (\$/kWh).

Nas empresas de água e saneamento é importante determinar esses indicadores de forma permanente e, especialmente, quando se estiver realizando ações de incremento de eficiência, posto que, por meio delas, pode-se avaliar o desenvolvimento do avanço que se conseguir no sistema de água potável e, portanto, estabelecer as políticas e programas nesse sentido.

### Indicador Energético (IE) (kWh/m<sup>3</sup>)

#### Cálculo

Representa a relação exata entre a energia utilizada pelos equipamentos de bombeamento em um sistema de água potável para produzir o volume total de água fornecida à rede de distribuição: o volume de água produzido é expresso em metros cúbicos por ano. A energia utilizada é determinada utilizando-se os dados do histórico de consumo de energia elétrica apresentado nas notas fiscais da companhia local de eletricidade. Os consumos em quilowatts-hora de cada equipamento de bombeamento do sistema são somados em um ano. O IE é calculado dividindo-se o total dos quilowatts-hora consumidos em um determinado ano, entre o total de água produzida nas captações do sistema de fornecimento.

$$IE = \frac{\text{Energia total consumida por equipamentos (kWh/ano)}}{\text{Volume total de água produzida em captações (m<sup>3</sup>/ano)}}$$

### Meta

Não existe um valor do indicador base de referência, já que depende, em grande parte, do tipo de captações de água disponíveis no sistema de abastecimento e da topografia da cidade. Sistemas com fornecimento de água somente por bombeamento e topografias muito acidentadas tenderão a elevar o índice; da mesma forma, sistemas com muitos vazamentos na rede farão com que aumente o volume da água fornecida e, portanto, a energia utilizada para produzir essa quantidade de água adicional.

Para uma empresa de água, esse indicador apresentará uma queda quando se reduzirem os consumos de energia com equipamentos de bombeamento eficientes e na medida em que reduzam os vazamentos na rede.

### Indicador de custo unitário de energia (CUE) (\$/kWh)

#### Cálculo

Representa o custo específico por unidade de energia consumida, que depende de vários fatores, tais como o tipo de tarifa elétrica contratada, o fator de carga (que reflete as horas de operação reais sobre as horas naturais) e fatores que incidem no faturamento energético, como a punição ou bonificação pelo fator de potência da instalação.

Esse indicador é calculado com base em uma estatística de consumo e faturamento energético anual coletado pela empresa de água e saneamento, bem como a produção anual de água potável.

$$\text{CUE} = \frac{\text{Valor do faturamento elétrico (\$/ano)}}{\text{Energia total consumida (kWh/ano)}}$$

### Meta

Da mesma forma que o indicador acima, não existe um valor médio de referência.

Cabe a cada empresa de água estabelecer a meta do índice, em função de sua infraestrutura eletromecânica e dos custos respectivos.

## ELABORAÇÃO DE BALANÇOS DE ENERGIA

Uma vez determinadas as eficiências energéticas dos componentes do sistema de bombeamento, deve-se determinar o balanço de energia atual do equipamento sob exame.

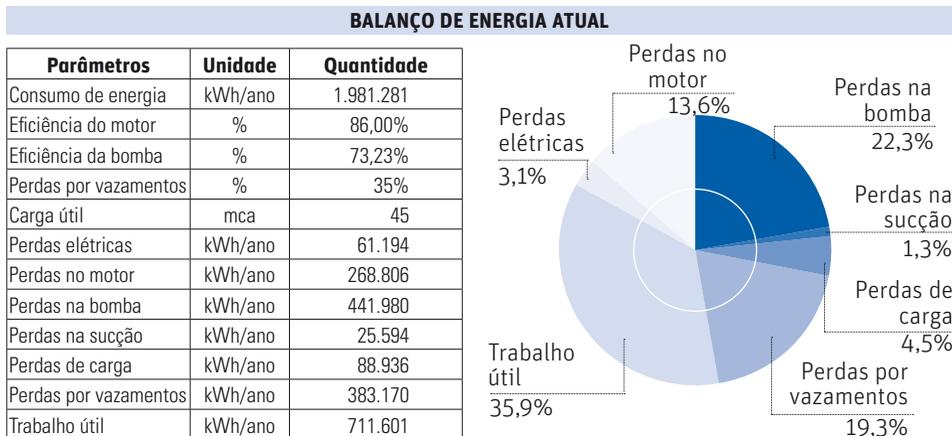
A finalidade do balanço de energia é identificar os elementos do sistema de bombeamento onde estão os maiores consumos energéticos e **serve de base para o planejamento das medidas de economia correspondentes.**

O valor mais significativo obtido desse balanço é o desdobramento de todas as perdas energéticas ao longo da rede de fornecimento e utilização da energia, distinguindo-a do trabalho útil, que nos indica a quantidade de energia que é realmente utilizada pelo sistema para fins de bombeamento de água. Tudo o que não seja trabalho útil transforma-se em perdas, e o balanço nos permite distinguir como estão distribuídas e quais são as que têm mais impacto, o que, por sua vez, nos indica onde está o maior potencial de economia energética a ser aproveitado.

Para realizar esse balanço, as eficiências e perdas dos diferentes elementos do sistema deverão ser determinadas, conforme indicado nos itens anteriores. Esses resultados são desdobrados segundo os conceitos descritos na Tabela 6.6, e obtêm-se os valores dos consumos de energia em cada elemento do sistema.

**TABELA 6.6:** Exemplo de desdobramento de perdas em um sistema de bombeamento do Instituto Costarricense de Aqüedutos e Esgotos (AyA)

**FIGURA 6.16:** Desdobramento de perdas em um sistema de bombeamento do AyA na Costa Rica



A seguir são descritos os elementos que compõem o balanço de energia.

**Consumo total.** É a energia total consumida pelo sistema elétrico em um ano de operação calculada como a soma da média da potência ativa em todas as fases, mais as perdas de energia nos condutores do trecho do transformador até o disjuntor principal, multiplicada pelo tempo de operação. Assim, obtêm-se o consumo total de energia em kWh.

**Eficiência do motor.** É a eficiência real do motor.

**Eficiência da bomba.** É a eficiência real da bomba.

**Perdas por vazamentos.** É a estimativa de perdas por vazamentos na rede de distribuição, conforme estudos prévios, e deve ser um valor fornecido.

**Carga Útil.** É a carga que a bomba deve ter devido ao desnível físico por questões topográficas do sistema, acrescida da distância que existe entre a sucção e o cabeçote da bomba, e é expressada em metros de coluna de água.

**Perdas Elétricas.** São as perdas de energia devidas aos elementos elétricos, neste caso, as devidas às perdas de energia nos condutores.

**Perdas no motor.** São as perdas de energia que existem no motor devido à sua eficiência real de trabalho.

**Perdas na bomba.** São as perdas de energia que existem na bomba devido à sua eficiência de trabalho.

**Perdas na sucção e descarga.** São as perdas de energia provocadas pelo atrito do fluido nas tubulações de sucção e descarga.

**Perdas de carga.** São as perdas totais de carga da bomba calculadas em relação à carga líquida da bomba e à carga útil correspondente (desnível).

**Perdas por vazamentos.** São as perdas de energia estimadas a partir do fluido perdido em vazamentos na rede de distribuição, calculadas em função do fator de vazamentos.

**Trabalho útil.** É o trabalho real expresso em unidades de energia que o sistema de bombeamento realmente requer, isto é, a energia que realmente é utilizada para que o sistema de bombeamento cumpra com o trabalho pedido.

Uma vez calculadas as perdas de cada um dos elementos que compõem o sistema de bombeamento pode-se fazer um gráfico de pizza, como o mostrado na Figura 6.16, para uma melhor percepção do balanço energético.

## **ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO**

Neste ponto é preciso observar dois aspectos:

- As condições de carga e vazão reais nas quais operam os sistemas de bombeamento, para determinar se são constantes ou mudam por períodos.
- A forma de operação em relação à gestão de níveis dos reservatórios no caso dos bombeamentos e tanques de regulação.

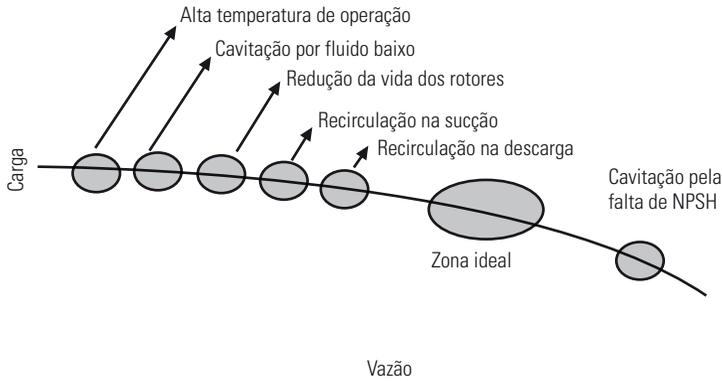
Para o primeiro aspecto, o problema a ser considerado é o seguinte.

Segundo seu projeto, todos os equipamentos têm um ponto ideal de operação carga-vazão, onde são minimizadas todas as perdas descritas acima. Fora desse ponto ocorrem problemas como os que se seguem abaixo:

- Baixo rendimento energético.
- Redução do tempo de vida de seus componentes, particularmente dos rotores e anéis de desgaste.
- Cavitação por baixo fluxo na sucção.
- Capital ocioso sem ocupar (no caso de subutilização).
- Maior pressão pela deterioração do meio ambiente (no caso de subutilização).

No gráfico da Figura 6.17 são mostrados problemas típicos da operação fora da zona ideal de operação.

**FIGURA 6.17:** Diagrama esquemático dos problemas apresentados pela operação das bombas fora do ponto ideal

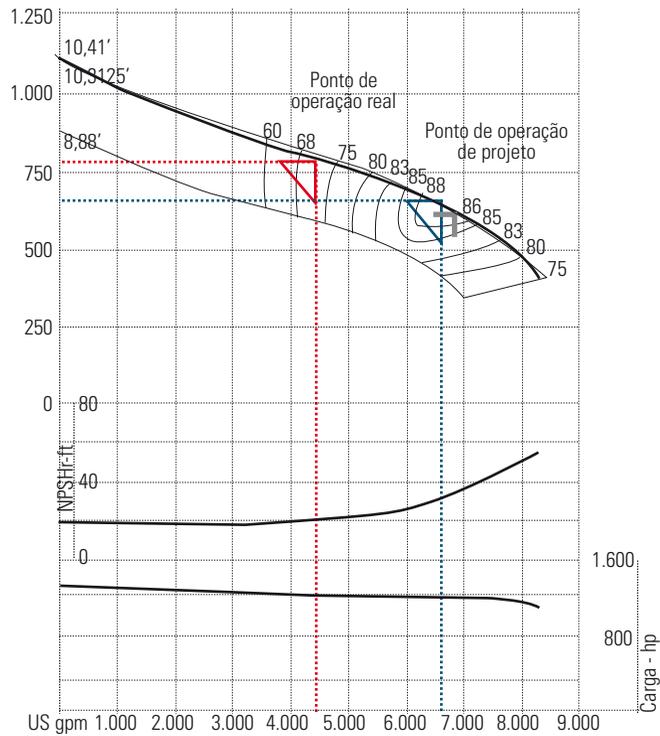


É muito comum constatar-se que os sistemas de bombeamento operam sob condições diferentes daquelas para as quais foram projetados. Dentre as causas que provocam esse problema, podemos mencionar as seguintes:

- Rodízios excessivos. É comum constatar-se que os equipamentos operam para diferentes pontos da rede, inclusive no mesmo dia. É típica a operação de rodízio, onde um dia o sistema fornece diretamente à rede e no outro dia fornece para um tanque, para abastecer outra zona populacional.
- Reparações urgentes. Devido à falta de manutenção preventiva, é comum atender consertos urgentes e faltar componentes no estoque para realizar os consertos pertinentes ou a substituição de equipamentos apropriados para cada aplicação, motivo pelo qual geralmente se recorre à instalação de equipamentos disponíveis que, na maioria dos casos, foram projetados para outras condições de operação.

O efeito na redução da eficiência do sistema de bombeamento é ilustrado na Figura 6.18, onde se pode observar uma variação significativa nas condições de operação carga-vazão, que podem envolver variações de até 20% na eficiência do equipamento.

**FIGURA 6.18:** Modificação da eficiência por variação de condições de operação em uma bomba



No segundo aspecto, a situação a ser verificada é a operação típica quanto ao controle de níveis na sucção e descarga dos equipamentos de bombeamento. É muito comum que essa operação seja realizada manualmente, provocando deficiências tais como vazamento em tanques, o que faz com que os equipamentos sejam operados por mais tempo do que o devido, ou que sejam operados por tempos prolongados sob condições desfavoráveis de carga e, portanto, de eficiência eletromecânica.

Diante dessa situação, é muito importante que durante a auditoria de eficiência energética se realizem as tarefas seguintes:

- Identificar claramente o esquema de operação do equipamento sob exame. Isso inclui as condições de operação de carga-vazão para diferentes períodos do dia ou semanalmente e a duração deles.
- Conseguir os parâmetros de projeto ou, se possível, a curva original de projeto do equipamento que estiver instalado nesse momento, para poder fornecer as recomendações pertinentes para cada situação.



## Capítulo 7.

### IDENTIFICAÇÃO DE OPORTUNIDADES DE ECONOMIA DE ENERGIA

Baseando-se na análise das informações obtidas durante a auditoria de eficiência energética, incluindo as condições operacionais e de manutenção verificadas, desenvolve-se uma carteira de projetos que abranja todas as oportunidades possíveis de economia energética, bem como monetária, incluindo as medidas com baixo ou nenhum investimento e as que requeiram investimento; para estas, é preciso realizar a análise de custo-benefício, que pode ser uma análise de retorno simples do investimento, ou uma análise mais profunda, baseada no valor presente líquido que considere o tempo de vida do bem adquirido, o que será tratado no Capítulo 8 deste manual.

Em geral, as ações determinadas em cada projeto visam controlar e otimizar as variáveis que afetam o consumo e custo energético.

Para os fins deste manual, as medidas de economia são classificadas nos grupos seguintes:

- 1) Medidas relacionadas com a tarifa de energia.
- 2) Medidas para a redução de perdas nas instalações elétricas.
- 3) Medidas para aumentar a eficiência dos motores.
- 4) Medidas para aumentar a eficiência das bombas.
- 5) Redução de perdas de carga.
- 6) Redução de vazamentos.
- 7) Melhora da operação.
- 8) Melhora da manutenção.
- 9) Substituição da fonte de alimentação de energia elétrica.

A descrição detalhada e suas respectivas bases teóricas, bem como os critérios utilizados para a aplicação dessas medidas, são descritos abaixo, seguindo a ordem acima descrita.

#### MEDIDAS RELACIONADAS COM A TARIFA DE ENERGIA

##### Mudança para uma tarifa mais econômica

Uma área de oportunidade de economia sempre atraente nos sistemas de bombeamento consiste em modificar a tarifa contratada com a companhia fornecedora de energia elétrica por alguma outra que seja mais rentável. Para isso, uma atividade fundamental da auditoria energética é o estudo da tabela aplicável de tarifas.

As tarifas usualmente aplicáveis para empresas de água e saneamento podem variar, segundo os contratos estabelecidos com a empresa fornecedora de energia elétrica.

O projeto de otimização tarifária é composto de duas etapas:

**Etapa 1.** Identificar as tarifas em que todos e cada um dos serviços da empresa de água se encontram, bem como as demandas e consumos de cada instalação. Com essas informações se inicia a análise das tarifas contratadas.

**Etapas 2.** Avaliar as possibilidades e economia no custo da energia elétrica com as diferentes tarifas aplicáveis. Essencialmente, trata-se de fazer um comparativo dos valores que seriam pagos em cada uma das tarifas nas quais o serviço possa ser contratado.

Nesta fase é importante considerar todos os custos associados para cada tarifa. Por exemplo, se modificarmos uma tarifa fornecida em baixa tensão por uma fornecida em média ou alta tensão, será preciso considerar nos custos os investimentos necessários para a aquisição e instalação de transformadores elétricos, bem como os custos associados à manutenção desses transformadores. Para ilustrar a situação, cabe observar o caso de um fornecedor de água na América Central, onde se fez uma análise comparativa de tarifas em algumas das principais estações de bombeamento. As tarifas analisadas foram:

- Tarifa em baixa tensão com demanda (BTD).
- Tarifa em baixa tensão por bloco horário (BTH).
- Tarifa em média tensão com demanda (MTD).
- Tarifa em média tensão por bloco horário (MTH).

A Tabela 7.1 mostra essa análise.

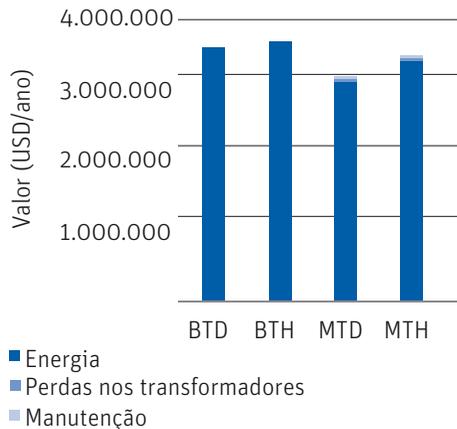
**TABELA 7.1:** Análise comparativa de tarifas elétricas no IDAAN Panamá

	Tarifa	Consumo (kWh/ano)	Tarifa	Economia (USD/ano)	Investimento (USD)	Mtto (USD/ano)	Pay-Back (anos)
Betania	BTD	574.356	MTD	17.355,80	30.400,00	5.000,00	2,46
Cabima	BTD	923.520	MTD	27.786,29	30.400,00	5.000,00	1,33
Ciudad Bolivar	BTD	5.773.440	MTD	174.409,63	50.000,00	8.000,00	0,30
Don Bosco	BTD	1.158.400	MTD	34.624,47	32.000,00	7.000,00	1,16
Gonzalillo	BTD	413.920	MTD	12.496,23	11.500,00	4.500,00	1,44
Las Cumbres	BTD	1.176.320	MTD	35.509,72	30.400,00	5.000,00	1,00
La Paz Mirador	BTD	836.800	MTD	25.281,25	28.000,00	4.500,00	1,35
Cuívo Chivo	BTD	997.760	MTD	30.105,95	30.400,00	5.000,00	1,21
Mañanitas	BTD	713.280	MTD	21.508,21	28.000,00	5.000,00	1,70
Pacora (água tratada)	BTD	2.078.076	MTD	62.247,73	34.000,00	6.500,00	0,61
Pacora (água bruta)	BTD	2.421.120	MTD	73.167,39	34.000,00	7.500,00	0,52
Chorrera (agua bruta)	BTD	2.896.320	MTD	87.725,87	34.000,00	7.000,00	0,42
Cáceres	BTD	1.566.720	MTD	46.361,66	34.000,00	7.000,00	0,86
TOTAL:				648.580,21	407.100,00	77.000,00	0,71

As tarifas contratadas atualmente são em baixa tensão (BTD). Contudo, na tabela observa-se que em todos os casos a mais econômica é a de média tensão (MTD), e os investimentos exigidos são amortizados em um período de tempo inferior a um ano em média, considerando que na tarifa MTD será preciso pagar pelas perdas no transformador e haverá um custo adicional correspondente à manutenção dos transformadores.

A Figura 7.1 mostra, para o conjunto das plantas sob exame, o custo da energia consumida em cada planta, bem como os custos por perdas de energia nos transformadores e os custos pela manutenção deles, associados às 4 tarifas analisadas. Nela se pode ver com clareza que, das 4 opções, a tarifa MTD é a mais econômica.

**FIGURA 7.1:** Comparativo de custos por tarifa no IDAAN Panamá.



Como pode ser observado no exemplo, não existe uma metodologia específica para essa análise. Contudo, a análise pode adequar-se ao esquema tarifário que corresponda à empresa de água e saneamento.

### Controle da demanda

Na maioria dos países da América Central, o custo da energia elétrica tem um valor diferente, dependendo da hora do dia em que ela for utilizada. Esse tipo de tarifa, que muitas vezes é utilizado na contratação do serviço para os sistemas de água e saneamento, é conhecido como tarifa horária. Nesse tipo de tarifas existe um horário conhecido como "horário de pico", onde o custo unitário da energia geralmente é bem mais alto do que no resto do dia. Nas instalações onde o fornecimento da energia elétrica é contratado com esse tipo de tarifa, recomenda-se analisar as alternativas para a implantação de uma medida de economia, que consiste em gerenciar o consumo nesse período de pico. Esse esquema é conhecido como "esquema de controle da demanda", por meio do qual se trata de reduzir a carga hidráulica em operação durante o horário de pico, para fazer reduzir, com isso, o valor da demanda faturável de energia elétrica atribuível a esse período e, portanto, o montante global pago à companhia fornecedora.

O controle da demanda pode ser realizado por qualquer dos métodos abaixo:

- Modificação dos procedimentos de operação para reduzir a carga no horário de pico.
- Instalação de temporizadores para desligar equipamentos antes do início do horário de pico e colocá-los em funcionamento no final desse horário.
- Implantação de um sistema de controle automático que desligue equipamentos em função da demanda e os coloque em operação em função de algum parâmetro do processo, como pressão ou nível.

Os passos para o cálculo de benefícios econômicos dentro do desenvolvimento do plano são os seguintes:

**Passo 1.** Calcular a média da demanda faturável atual, bem como os consumos médios de energia em horários de pico, intermediário e base.

**Passo 2.** Determinar as condições hidráulicas que haverá para parar no horário de pico, bem como as que haverá para implementar fora do horário de pico e a demanda faturável.

Propor uma nova forma de operação dos equipamentos, de forma tal que a carga no horário de pico seja a menor possível. Para isso, apoiar-se na capacidade de regulação dos tanques.

Como resultado dessa análise, calcular a carga que estará operando em cada um dos horários, bem como o número de horas de operação ao mês, de forma tal que se possa calcular a energia que será consumida em cada um dos horários.

**Passo 3.** Determinar as economias a serem obtidas com a medida:

- 1) Calcular o valor do faturamento atual.
- 2) Calcular o valor do faturamento esperado.
- 3) Calcular as economias a serem obtidas.

## MEDIDAS PARA REDUZIR AS PERDAS NAS INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

### Melhorar o arrefecimento dos transformadores

Se durante a campanha de medição as temperaturas registradas pelo transformador forem elevadas ou estiverem em uma faixa fora do padrão, podem ocorrer perdas significativas de energia. Nesse caso, deve-se avaliar o custo para corrigir essa falha. A avaliação é realizada na forma seguinte:

- Situação observada durante a auditoria: as perdas de energia elétrica no transformador representam mais de 2% do consumo total da energia.
- Ações a implantar: dependendo da problemática em particular, deverão ser aplicadas as ações indicadas na Tabela 7.2:

**TABELA 7.2:** Ações recomendadas para melhorar as condições em um transformador

Condição observada	Ação recomendada
O transformador tem muitos anos em operação e/ou está em más condições.	Fazer uma manutenção geral no transformador e, se ele apresentar falhas irreversíveis, trocá-lo por outro novo, de baixas perdas.
O transformador apresenta uma alta temperatura devido à falta de ventilação no ambiente onde está instalado.	Melhorar a ventilação no ambiente onde o transformador estiver, seja por meio da instalação de exaustores ou abrindo janelas para ventilação do local.
O transformador apresenta alta temperatura de operação devido às altas temperaturas ambientes.	Instalar um sistema de ventilação forçada no transformador.

- Metodologia de cálculo:

**Passo 1.** Calcular a eficiência com a qual o transformador trabalhará, seguindo a metodologia descrita na seção de cálculo de perdas no transformador no Capítulo 6 deste manual.

**Passo 2.** Calcular a redução da potência elétrica que o transformador demandará uma vez que a ação corretiva for implementada, mediante a equação:

$$\Delta P_{et} = \frac{\eta_{trans}}{\eta_{trans'}} * P_{et}$$

Onde:

$\Delta P_{et}$  = redução da potência elétrica esperada (kW).

$P_{et}$  = potência elétrica que o equipamento demanda atualmente (kW).

$\eta_{trans}$  = eficiência atual do transformador (-).

$\eta_{trans}'$  = eficiência esperada do transformador (-).

**Passo 3.** Calcular as economias de energia.

Obs.: Para os casos em que houver perdas por aumento da temperatura e for necessário instalar dispositivos de arrefecimento (ventoinhas), deverá ser realizada a análise correspondente aos custos energéticos adicionais devidos a esses equipamentos. Recomenda-se, ainda, revisar a viabilidade de mudanças de localização ou aberturas naturais de ventilação (no teto, para que o ar quente saia) para evitar esses gastos.

### Aumentar o bitola de condutores

Na hipótese de detectar-se que as bitolas dos condutores não são da bitola que o equipamento de bombeamento requer, deve-se selecionar um condutor que não só cumpra a NOM, mas que também economize energia.

- Situação observada durante a auditoria: os condutores elétricos estão em más condições e/ou estão sobrecarregados ou próximos do limite de sua capacidade de carga.
- Ações a implantar: Substituir os condutores atuais por condutores novos de maior bitola.
- Metodologia de cálculo:

**Passo 1.** Calcular a resistência unitária do condutor nas condições atuais:

- a) Medir a tensão entre fase e neutro, em dois pontos do condutor, separados por uma distância  $L_0$  (quanto maior for a distância, maior será a confiabilidade nos resultados).
- b) Medir a corrente circulante com o amperímetro.
- c) Calcular a queda de tensão  $\Delta V$  como a diferença entre as duas medições realizadas.
- d) Calcular a resistência unitária por meio da equação:

$$R_u = \frac{\Delta V_{tensão}}{I * L_0}$$

Onde:

$R_u$  = resistência real do condutor ( $\Omega/m$ ).

$\Delta V_{tensão}$  = queda de tensão (V).

$I$  = corrente (A).

$L_0$  = Distância entre os dois pontos de medição da tensão (m).

**Passo 2.** Calcular a redução das perdas elétricas no condutor com a aplicação dessa medida de economia de energia com a equação:

$$\Delta P_{et} = \frac{(R_r - R'_r) * I^2 * L_c}{1000}$$

Onde:

- $\Delta P_{et}$  = redução das perdas elétricas (kW).
- $R_r$  = resistência real do condutor atual ( $\Omega/m$ ).
- $R'_r$  = resistência do condutor proposto ( $\Omega/m$ ).
- $I$  = corrente (A).
- $L_c$  = comprimento total do condutor (m).

**Passo 3.** Calcular as economias de energia elétrica.

**Passo 4.** Calcular o valor das obras associadas à troca de condutores.

**Passo 5.** Avaliação técnico-econômica da conveniência da troca.

### Otimizar o Fator de Potência (FP)

O objetivo desta medida é eliminar os problemas provocados por um baixo FP. Em geral, um valor inferior a 90% justifica adotar ações que resultam muito rentáveis, para compensá-lo e atingir valores próximos da unidade.

O mecanismo para identificar a economia por essa medida é o seguinte:

- Situação observada durante a auditoria: o fator de potência no equipamento de bombeamento registrado pela companhia fornecedora ou medido durante a medição de parâmetros elétricos em campo é menor que 0,90 (ou 90%).
- Ações a implantar: se o baixo fator de potência for gerado por motores superdimensionados ou trabalhando em condições deficientes, substituir esses motores por outros novos, de alta eficiência, com capacidade para operar por volta de 75% de carga.

Uma vez que o problema dos motores for resolvido, compensar o FP com bancos de capacitores, mediante o procedimento abaixo:

- a) Medir o fator de potência.
  - b) Propor a instalação de um banco de capacitores com capacidade para elevar o fator de potência para níveis da ordem de 0,97.
  - c) Instalar os capacitores propostos a jusante da chave de partida, de forma que fiquem energizados somente quando o motor for energizado.
- Metodologia de cálculo:

**Passo 1.** Calcular a capacidade requerida do capacitor a ser proposto, por meio da equação:

$$C_o = P_e \left\{ \frac{\sqrt{1-FP^2}}{FP} - \frac{\sqrt{1-(0.97)^2}}{0.97} \right\}$$

Onde:

$C_o$  = capacidade requerida do capacitor (kVar).

$P_e$  = potência elétrica demandada pelo motor (kW).

FP = fator de potência do motor medido (-).

E selecionar a capacidade  $C_{bc}$  do banco de capacitores comercial que se aproxime mais do valor de  $C_o$ .

**Passo 2.** Calcular o valor de FP que a instalação com o banco de capacitores proposto alcançará, por meio da equação:

$$FP' = \frac{P_e}{\sqrt{P_e^2 - (Pr - C_o)^2}}$$

Onde:

Pr = potência reativa que o motor demanda, obtida durante as medições de campo.

**Passo 3.** Calcular as economias de energia elétrica ao se reduzirem os efeitos descritos na seção sobre a análise do FP no Capítulo 6 deste manual.

**Passo 4.** Comparar a economia resultante com o custo da instalação do banco de capacitores, para avaliar a rentabilidade dessa medida, seguindo o procedimento descrito no Capítulo 4 deste Manual.

## MEDIDAS PARA AUMENTAR A EFICIÊNCIA DOS MOTORES

### Corrigir os desequilíbrios de tensão

Situação observada durante a auditoria: Existe um desequilíbrio de tensão na alimentação elétrica do motor e, portanto, está trabalhando com uma eficiência menor.

Ações a implantar: dependendo da origem do desequilíbrio em tensão, implantar as ações indicadas na Tabela 7.3.

**TABELA 7.3:** Ações recomendadas para corrigir o desequilíbrio de tensão de alimentação dos motores elétricos

Origem do desequilíbrio de tensão	Ações corretivas a implantar
Desequilíbrio na corrente demandada pelo motor, que produz uma queda de tensão em cada fase e, portanto, o desequilíbrio de tensão.	Fazer uma manutenção no motor e, se a falha for irreversível, substituir o motor por um motor novo de alta eficiência.
Desequilíbrio com origem na alimentação da companhia fornecedora.	Solicitar à companhia fornecedora a correção do problema.
Desequilíbrio gerado pelo transformador da subestação própria.	Fazer uma manutenção no transformador e, se a falha for irreversível, substituir o transformador por um transformador novo de baixas perdas.
Desequilíbrio gerado por um desequilíbrio nas cargas do transformador.	Balacear as cargas do transformador.

- Metodologia de cálculo: o efeito positivo de eliminar o desequilíbrio de tensão se reflete na melhora da eficiência do motor, cujo benefício é calculado conforme segue abaixo.

**Passo 1.** Calcular a eficiência com a qual o motor trabalhará, uma vez que o desequilíbrio de tensão seja corrigido, seguindo o procedimento descrito na seção sobre cálculo de perdas e eficiência do motor, apresentada no Capítulo 6 deste manual.

**Passo 2.** Calcular a potência elétrica que o equipamento demandará uma vez que a ação corretiva seja implementada.

**Passo 3.** Calcular as economias a alcançar.

### Substituição do motor elétrico por um motor de alta eficiência

Esta medida é recomendável quando se esgotarem as possíveis ações que não envolvam o investimento que a substituição do motor representa. Essa medida é altamente recomendável quando o motor sofre uma falha e é necessário repará-lo.

- Metodologia de cálculo: para avaliar os benefícios e a rentabilidade desta medida os passos seguintes devem ser seguidos:

**Passo 1.** Calcular a eficiência com a qual o motor atual trabalha.

**Passo 2.** Propor um motor novo de alta eficiência e especificar o respectivo valor de eficiência.

Os motores de alta eficiência se diferenciam dos motores padrão pelas características abaixo:

- a) Utilização de aço com melhores propriedades magnéticas.
- b) Redução do entreferro.
- c) Redução da espessura da laminação.
- d) Incremento na bitola dos condutores.
- e) Utilização de ventoinhas e sistemas de arrefecimento mais eficientes.
- f) Utilização de melhores materiais isolantes.

**Passo 3.** Cálculo das economias de energia a obter. Orçar o motor de alta eficiência proposto e avaliar sua rentabilidade.

Lembrar que um motor de alta eficiência possui correntes de partida maiores que as correntes padrão; além disso, o tamanho deles é maior, o que deverá ser incluído na viabilidade técnica de sua troca.

### Otimização da eficiência do motor

A auditoria da eficiência dos motores elétricos sob operação, além do cálculo da eficiência real, envolve uma análise das possíveis causas que a afetam, dependendo da condição deficiente achada. Na Tabela 7.4 são apresentadas as ações corretivas recomendadas para os motores elétricos que trabalhem sob condições ineficientes de operação.

**TABELA 7.4:** Ações recomendadas para corrigir condições de operação ineficiente dos motores elétricos

Condição observada	Diagnóstico	Ação corretiva proposta
Tensão de alimentação abaixo da nominal	A tensão no terminal de ligação está abaixo da nominal.	a) Corrigir com os TAPs do transformador (Os TAPs são os componentes físicos em forma de manivela —trocadores— de um transformador, que são utilizados para graduar a relação de transformação da tensão e ajustar a tensão de saída do motor, para absorver as variações do fornecedor). b) Solicitar ao fornecedor que corrija o problema.
	A tensão no terminal de ligação apresenta variações maiores que 5%.	Solicitar ao fornecedor que corrija o problema
	A tensão no terminal de ligação é a nominal e não apresenta variações significativas.	a) Corrigir com os TAPs do transformador b) Praticar o diagnóstico e manutenção do transformador
Desequilíbrio da tensão de alimentação do motor	A tensão no terminal de ligação está desequilibrada.	a) Solicitar ao fornecedor que corrija o problema
	A tensão no terminal de ligação está equilibrada e no secundário do transformador, desequilibrada.	Realizar um diagnóstico e manutenção do transformador
	A tensão nos bornes do secundário do transformador está equilibrada e na alimentação do motor, desequilibrada.	a) Revisar a conexão de aterramento do transformador e do motor e, caso sejam detectados problemas, corrigi-los. b) Revisar as conexões do CCM, starter de partida e motor e, caso sejam detectados problemas, corrigi-los.
Desequilíbrio na corrente demandada pelo motor	O desequilíbrio em corrente é inversamente proporcional ao desequilíbrio em tensão.	Corrigir o desequilíbrio em tensão
	O desequilíbrio é produzido por uma demanda desequilibrada pelas fases do motor.	a) Se o desequilíbrio for menor que 5%, realizar manutenção no motor b) Se o desequilíbrio for maior que 5%, substituir o motor por outro novo de alta eficiência.
A velocidade de operação do motor está abaixo da velocidade a plena carga	Problemas com mancais e/ou rolamentos.	Lubrificar e, no caso, substituir os elementos com problemas.
Alta temperatura e/ou alta vibração nos mancais e/ou rolamentos		
O motor é de eficiência padrão e tem mais de 10 anos de operação	A eficiência de operação do motor é baixa.	Substituir o motor atual por um motor novo de alta eficiência para operar a 75% de sua capacidade.
O motor foi reparado (rebobinado) mais de duas vezes.	A eficiência do motor está reduzida.	
O motor está trabalhando com um fator de carga menor que 45%	O motor está trabalhando em uma zona onde sua eficiência de operação é baixa.	
O motor está trabalhando com um fator de carga maior que 100%	O motor está trabalhando em uma zona onde sua eficiência de operação é baixa.	

A aplicação dessas opções pode melhorar substancialmente a eficiência de um motor elétrico e, com isso, reduzir as perdas energéticas. Por exemplo, a redução de 30% nas perdas de um motor de 10 HP com 82% de eficiência incrementa seu valor para 87,4%, o que também pode representar um benefício significativo no consumo energético.

Dentro dessa gama de ações, as mais recorrentes e suas respectivas recomendações são descritas a seguir.

### Substituição do conjunto bomba-motor

Esta medida é recomendável quando a eficiência eletromecânica tenha ficado substancialmente baixa e o potencial de economia de energia a respeito das NOMs determinada durante a AE tenha ficado em, no mínimo, 20%. É sabido que esse potencial de economia de energia pode ser melhorado com equipamentos comercialmente disponíveis.

Também é importante revisar isoladamente os valores de eficiência reais estimados para os motores elétricos. O critério geral é que se o potencial para melhorar a eficiência dos motores ultrapassar 5%, a substituição do conjunto bomba-motor será ainda mais recomendável, dado que o potencial de economia fica garantido em ambos os componentes e a medida pode ser sumamente rentável.

- Metodologia de cálculo: o procedimento para avaliar a economia e rentabilidade dessa medida é o seguinte:

**Passo 1.** Calcular o custo anual da energia consumida pelo conjunto motor-bomba em operação.

Propor uma nova bomba que trabalhe na zona de máxima eficiência e calcular a eficiência eletromecânica cumprindo as recomendações seguintes:

- Selecionar o motor apropriado à bomba selecionada, cuidando para que o fator de carga esteja entre 70% e 80%.
- Verificar a eficiência do motor e da bomba selecionados.
- Calcular a eficiência eletromecânica combinando ambas eficiências por meio da equação:

$$\eta_{em} = \eta_b * \eta_m$$

**Passo 2.** Calcular a potência elétrica que o equipamento demandará uma vez implementada a ação corretiva, por meio da equação:

$$P_{emb}' = P_{emb} * \frac{\eta_{em}}{\eta'_{em}}$$

Onde:

- $P_{emb}'$  = potência elétrica esperada com o conjunto motor-bomba de melhor eficiência (kW).
- $P_{emb}$  = potência elétrica que o conjunto motor-bomba demanda atualmente (kW).
- $\eta_{em}$  = eficiência atual do conjunto motor-bomba (-).
- $\eta'_{em}$  = eficiência esperada da bomba (-).

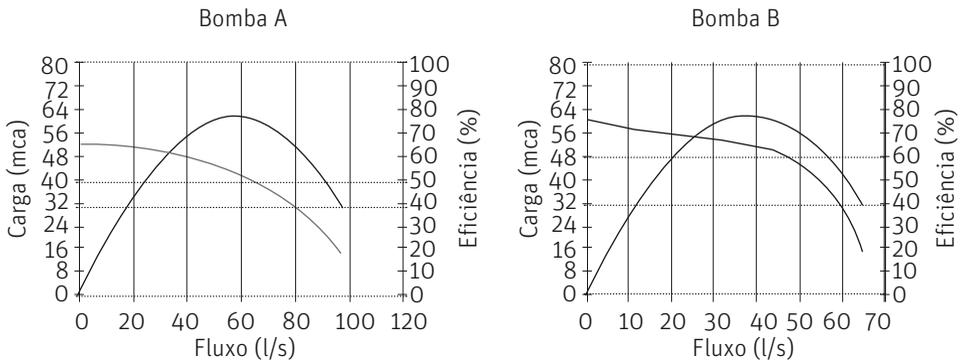
**Passo 3.** Calcular as economias a obter.

**Passo 4.** Orçar o conjunto motor-bomba proposto e avaliar a rentabilidade.

• Recomendações para a seleção da bomba: para aumentar as possibilidades de sucesso e garantir a eficiência de energia projetada, é importante selecionar o equipamento de bombeamento entre várias marcas comerciais disponíveis, levando em consideração o seguinte:

- a) Não calcular margens de segurança irreais ou incluir na especificação informações inapropriadas.
- b) Se a bomba tiver que operar em mais de um ponto de carga hidráulica-fluxo, é preciso selecioná-la para que em ambos os pontos apresente uma eficiência “razoavelmente alta”. Como ilustração dessa recomendação, na Figura 7.2 se mostra o exemplo de dois equipamentos de bombeamento que têm curvas de operação diferentes. Como se pode ver, a bomba B, com uma curva mais plana, seria a adequada para a aplicação de alterações frequentes no nível dinâmico, enquanto que a bomba A seria a mais favorável quando o nível é mais estável.

**FIGURA 7.2:** Curvas típicas de dois equipamentos de bombeamento com curvas H-Q diferentes



Recomenda-se que, uma vez instalado o equipamento, o ponto de operação dele seja conferido e, se necessário, fazer as adequações necessárias.

## MEDIDAS PARA AUMENTAR A EFICIÊNCIA DAS BOMBAS

### Adequação do equipamento de bombeamento ao ponto de operação real

Com esta medida, o procedimento para determinar uma recomendação consiste em definir ao menos dois pontos de operação carga-fluxo onde opere o equipamento de bombeamento. Depois disso, as características do equipamento instalado deverão ser analisadas e avaliar se é recomendável uma adequação dele às condições de operação reais (ex.: redução do número de bacias, recorte de rotores, troca de rotores ou substituição do equipamento de bombeamento). Contudo, toda alteração pode gerar mudanças de projeto, tais como: um recorte no diâmetro de saída do rotor pode alterar as curvas de eficiência das bombas, por isso, essa atividade deve ser feita em concordância com o fabricante.

Na Tabela 7.5 são indicadas algumas ações que podem ser realizadas para aumentar a eficiência da bomba, segundo o tipo de problemática.

**TABELA 7.5:** Ações recomendadas para ajustar as curvas do equipamento de bombeamento à condição real de operação

Tipo de bomba	Localização do ponto de operação	Ação corretiva
Vertical multietapa	Acima da curva da bomba	Aumentar etapas até conseguir fazer a curva da bomba passar pelo ponto de operação
		Substituir os rotores por novos rotores de maior diâmetro, desde que seja possível
	Abaixo da curva da bomba	Eliminar etapas até conseguir fazer a curva da bomba passar pelo ponto de operação
		Recortar os rotores no tamanho requerido para que a curva da bomba passe pelo ponto de operação
Horizontal	Acima da curva da bomba	Substituir os rotores por novos rotores de maior diâmetro, desde que seja possível
	Abaixo da curva da bomba	Recortar os rotores no tamanho requerido, para que a curva da bomba passe pelo ponto de operação

• Metodologia de cálculo de economias:

**Passo 1.** Calcular a potência elétrica que o equipamento demandará uma vez que a ação corretiva for implementada, por meio da equação:

$$P_e' = P_e * \frac{\eta_m}{\eta_m'}$$

Onde:

$P_e$  = potência elétrica demandada pelo motor atual (kW).

$P_e'$  = potência elétrica que o motor proposto demandará (kW).

$\eta_m$  = eficiência de operação do motor atual (-).

$\eta_m'$  = eficiência de operação do motor proposto (-).

**Passo 2.** Calcular as economias a serem obtidas.

• Redução da potência elétrica demandada  $\Delta P_e$

$$\Delta P_e = P_e - P_e'$$

• Redução da energia elétrica consumida  $\Delta E$

$$\Delta E = \Delta P_e * H_{oa}$$

Onde  $H_{oa}$  é o número de horas de operação anual.

• Redução do faturamento elétrico  $\Delta F$

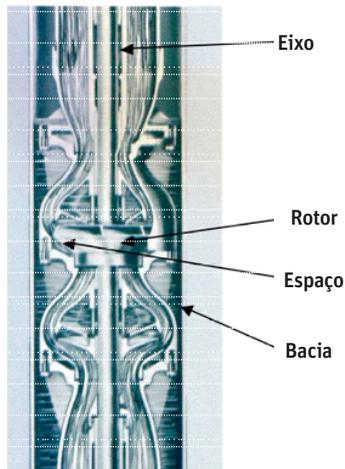
$$\Delta F = \Delta E * CUE$$

Onde CUE é o custo unitário da energia (\$/kWh).

### Ajuste da posição dos rotores em bombas de turbina com rotor aberto

- Situação observada durante a Auditoria: a bomba tipo turbina vertical, com rotores abertos apresenta baixa eficiência de operação.
- Ações a implantar: ajustar o eixo com os rotores das bacias, elevando ou rebaixando o eixo com a porca de ajuste. Na Figura 7.3 se ilustra o arranjo dos rotores dentro das bacias da bomba.

**FIGURA 7.3:** Diagrama de uma bomba de turbina de eixo com rotor aberto e seus componentes

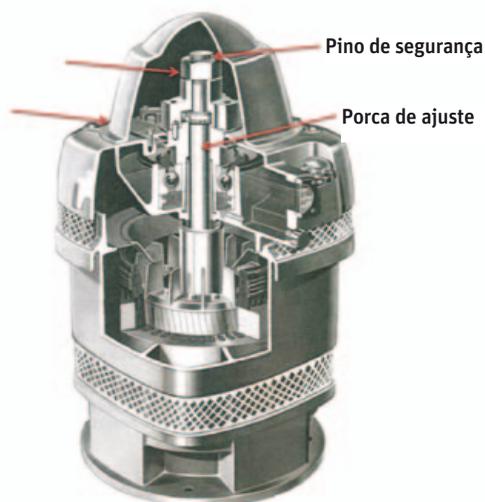


Este ajuste é calibrado no eixo desde a instalação do equipamento, seguindo as indicações do fabricante. Se a posição dos rotores não ficou bem ajustada ou se desajustou com o passar do tempo, provoca-se uma redução da eficiência da bomba.

O procedimento para ajustar o eixo à posição de projeto é o seguinte:

**Passo 1.** Remover a tampa do motor vertical, para descobrir a porca de ajuste do eixo (ver Figura 7.4)

**FIGURA 7.4:** Diagrama de um motor de eixo oco acoplado a uma bomba de turbina



(Fonte: Manual de operação Byron Jackson para bombas de turbina)

**Passo 2.** Desmontar o pino de segurança que impede o movimento da porca.

**Passo 3.** Uma vez que a porca esteja livre, deve ser afrouxada até que deixe de sustentar o peso do eixo. Nesse momento se aperta com a mão até o topo. Em seguida, toma-se a medida do restante do eixo acima do nível da porca.

**Passo 4.** Elevar o eixo ajustando a porca até o topo superior na bacia, tomando novamente a medida correspondente. A diferença será a folga total que os rotores têm dentro da bacia. Esse valor deve coincidir com o valor fornecido pelo fabricante. Caso contrário, indica atrito do rotor com a bacia.

**Passo 5.** Para realizar o ajuste deve-se afrouxar novamente o eixo até o topo onde o rotor se apoia na bacia. Uma vez isso realizado, deve-se ajustar o eixo conforme as especificações do fabricante, por meio do ajuste da porca, subindo a distância recomendada pelo fabricante, que dependerá do diâmetro do eixo e da carga hidráulica.

• Metodologia de cálculo de economias:

**Passo 1.** Determinar a eficiência  $\eta_b$  com que a bomba trabalha uma vez realizado o ajuste à posição do eixo seguindo o procedimento de cálculo descrito na seção sobre avaliação da eficiência eletromecânica no Capítulo 6 deste manual.

**Passo 2.** Calcular a potência elétrica que o equipamento demandará uma vez implementada a ação corretiva.

**Passo 3.** Calcular as economias a serem conseguidas.

## REDUÇÃO DE PERDAS DE CARGA

### Correção de defeitos na configuração de tubulações de descarga e na operação

- Situação observada durante a auditoria: este ponto se aplica aos sistemas de bombeamento que durante a AE se tenha determinado que têm algum problema na configuração de sua tubulação de descarga que esteja provocando um baixo rendimento energético de algum ou todos os equipamentos envolvidos, tais como recirculações desnecessárias, contrapressões que evitem o fluxo adequado de um equipamento determinado, dentre outras.
- Ações a implantar: as recomendações nesse caso serão a modificação das tubulações de descarga ou configuração das conduções primárias para evitar os problemas mencionados.
- Metodologia de cálculo: ela dependerá da situação que se tiver achado, que pode derivar, por exemplo, em uma melhora na vazão produzida ou evitar a operação de um equipamento que não esteja sendo produtivo.

### Redução de perdas por cisalhamento em conduções

Aplica-se a redução de perdas pelo efeito de cisalhamento da água sobre as paredes da tubulação para reduzir o impacto energético que as conduções com altas velocidades representam, que em alguns casos podem atingir 30% da potência demandada pelo equipamento de bombeamento.

- Situação observada durante a auditoria: a velocidade da água dentro da tubulação é superior a 2,0 m/s.
- Ações a implantar: avaliar as ações descritas abaixo e selecionar aquela que resulte mais rentável.
  - a) Se a tubulação está em operação há vários anos e em más condições, propor a substituição da tubulação atual por uma de maior diâmetro, com a qual se consigam velocidades de água entre 1,0 e 1,5 m/s.
  - b) Se a tubulação estiver em bom estado, analisar as opções seguintes:
    - b.1. Instalar uma tubulação em paralelo à atual, de um diâmetro tal que a velocidade da água se reduza para um valor entre 1,0 e 1,5 m/s.
    - b.2. Substituir a tubulação atual por uma de maior diâmetro, com a qual se consigam velocidades de água entre 1,0 e 1,5 m/s.
- Metodologia de cálculo:

**Passo 1.** Calcular as perdas por cisalhamento existentes na tubulação atual e na tubulação proposta, por meio da metodologia descrita no Capítulo 6.

**Passo 2.** Calcular a redução da potência elétrica requerida pelo motor, por meio da seguinte equação:

$$\Delta P_e = \frac{\left[ (h_{fta} - h_{ftp}) * Q * \gamma * g \right]}{\eta_{em} * 1000}$$

Onde:

- $\Delta P_e$  = redução da potência elétrica demandada (kW).
- $h_{fta}$  = perdas por cisalhamento na tubulação atual (m).
- $h_{ftp}$  = perdas por cisalhamento na tubulação proposta (m).
- $Q$  = vazão da tubulação (m<sup>3</sup>/s).
- $\gamma$  = peso específico da água (kg/m<sup>3</sup>).
- $g$  = aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>).
- $\eta_{em}$  = eficiência eletromecânica do sistema de bombeamento envolvido (-).

**Passo 3.** Calcular as economias de energia elétrica.

**Passo 4.** Orçar a obra implícita para a troca da tubulação proposta e avaliar a rentabilidade.

## REDUÇÃO DE VAZAMENTOS

### Implantar uma campanha de detecção e eliminação de vazamentos

O objetivo do controle de vazamentos é reduzir ao mínimo o tempo decorrido entre a ocorrência de um vazamento e sua eliminação, por meio da revisão e ajuste contínuo de procedimentos e ações, visando aumentar a eficácia da conservação e manutenção da rede de distribuição.

O controle de vazamentos de água é uma atividade contínua no tempo e no espaço, onde são estabelecidos os processos para coordenar as ações de localização e eliminação de vazamentos, com base na monitoração contínua da rede, relatórios de vazamentos detectados pelos usuários, programas de busca sistemática de vazamentos ocultos, elaboração periódica de balanços e amostragem de avaliação, etc.

A formulação do projeto de controle de vazamentos é realizada na forma abaixo:

- 1) Com uma amostragem de campo e dados estatísticos recentes se elabora uma avaliação de perdas e um balanço da água, visando estimar as porcentagens de água a serem reduzidas em cada item.
- 2) Coleta de informações e dados para a redução de vazamentos, tais como, por exemplo, pessoal, orçamento, procedimentos, equipamentos, resultados e indicadores.
- 3) Determinação das causas da ocorrência de vazamentos de água, apontando os problemas principais, os equipamentos e recursos necessários, as ações requeridas no curto e médio prazo.
- 4) Estabelecer um programa de controle de vazamentos para definir as atividades gerais, priorizadas e agendadas, com seus custos e benefícios, e indicando suas fontes de financiamento.
- 5) Execução das ações no curto prazo, como a implantação de um departamento de controle de vazamentos, módulos de atendimento ao público para relatório de vazamentos, equipamentos urgentes, capacitação do pessoal, etc.
- 6) Depois começa o processo de eliminação de perdas e implantação do processo coordenado com as ações de controle.
- 7) Execução do controle de estatísticas e monitoração de informações.
- 8) Elaboração do balanço de água a cada ano e avaliação periódica dos indicadores seguintes:
  - a) Porcentagem de vazamentos potenciais = volume de perdas / volume produzido.
  - b) Relação custo-benefício da redução e controle = custo de ações / custo da água recuperada.

Na Tabela 7.6 se mostram as atividades específicas que devem ser desenvolvidas em um programa de controle de vazamentos de sistemas de água potável.

**TABELA 7.6:** Sequência de atividades para implementar um programa de controle de vazamentos

Prioridade	Ação específica	Custo unitário (centavos de \$/ligação registrada)
1	Formação das equipes de pessoal técnico, administrativo e de campo que desenvolverão as atividades de melhora da eficiência física (controle de vazamentos) com equipamentos de escritório, cálculos, equipes de campo e ferramentas.	14
2	Implantação dos procedimentos de recepção, análise, encaminhamento e acompanhamento dos relatórios de vazamentos.	11
3	Providenciar junto à companhia telefônica a designação de números telefônicos facilmente memorizáveis para receber comunicações do público.	1
4	Projeto, elaboração e implantação de formatos de campo e recebimento de comunicações.	5
5	Promoção da colaboração do público para a comunicação de vazamentos por meio de propaganda, procedimentos e acordos de coordenação.	5
6	Manutenção de um estoque mínimo de reserva de materiais de uso frequente para reparos.	82
7	Manutenção e reposição de equipamentos, ferramentas e veículos.	29
8	Programa de testes de amostragem em campo para identificar ocorrência de vazamentos.	15
9	Programa de busca sistemática de vazamentos visíveis em ligações domiciliares segundo as estatísticas de vazamentos.	12
10	Programa de avaliação sistemática do estado das válvulas.	12
11	Programa de busca sistemática de vazamentos visíveis em tubulações principais e secundárias, segundo as estatísticas de vazamentos.	8
12	Adquisição de equipamentos detectores de vazamentos e localização de metais.	43
13	Programa de busca sistemática de vazamentos ocultos em tomadas domiciliares e tubulações principais.	12
14	Implantação de um sistema de monitoração em tempo real e de informação geográfica para busca e detecção de vazamentos ocultos.	23

## MELHORAR A OPERAÇÃO

### Instalação de variadores de frequência

- Situação observada durante a auditoria: nos sistemas com fornecimento direto à rede, onde a demanda de água é variável e nos quais os consumos energéticos por essas variações durante a avaliação tenham se mostrado atraentes durante a AE, fundamentalmente por seus níveis de consumo e custo energético, recomenda-se propor e avaliar a opção de aplicar um sistema de velocidade variável no equipamento de bombeamento.
- Ações a implantar: implementar um sistema de controle de pressão e vazão por meio de um variador de frequência eletrônico adaptado ao motor elétrico.
- Metodologia de cálculo: para implementar corretamente essa medida e calcular as economias dela decorrentes, proceder na forma abaixo:

**Passo 1.** Selecionar os equipamentos resultantes como viáveis e considerar seus consumos energéticos operando sem variador de frequência,<sup>1</sup> bem como as pressões e vazões registradas durante as monitorações.

A monitoração deve ser realizada durante 24 horas, com leituras, no mínimo, a cada hora, dos parâmetros seguintes:

- Pressão de descarga (kg/cm<sup>2</sup>).
- Vazão (m<sup>3</sup>/s).
- Potência elétrica demandada pelo motor (kW).

O registro de dados poderá ser feito no formato apresentado na tabela abaixo:

Data	Hora (mínimo 24 horas)	Pressão (kg/cm <sup>2</sup> )	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Potência (kW)

**Passo 2.** Selecionar a pressão ideal de operação para cada sistema de distribuição de água potável, em função do seguinte:

- A pressão ideal de operação é a pressão mais baixa sob a qual o sistema poderia operar sem deixar de fornecer o serviço em nenhum ponto da rede. Ela costuma ser o valor mais baixo registrado durante a monitoração. Portanto, será preciso verificar em campo ou em um modelo de simulação hidráulica se, operando sob essa pressão, a água potável continua sendo fornecida nos pontos mais altos dessa rede.
- Se com a pressão mínima registrada na monitoração se consegue que a água chegue bem a todos os pontos da rede, verificar em campo até que valor é possível fazer a pressão descer sem reduzir o nível do serviço. Esse valor de pressão será a pressão ideal de operação.
- Se com a pressão mínima registrada na monitoração não se conseguir que a água chegue corretamente a todos os pontos da rede, verificar em campo até que valor é necessário fazer a pressão subir para que a água atinja a pressão adequada em todos os pontos da rede. Esse valor de pressão será a pressão ideal de operação.

---

<sup>1</sup> Nos variadores de frequência, as perdas, os harmônicos e o fator de potência dependem da tecnologia de fabricação. Portanto, não é possível fazer cálculos, motivo pelo qual a norma obriga os fabricantes a declarar os valores desses fatores; segundo o exposto, para calcular as perdas nos variadores de frequência, é preciso considerar o seguinte:

- 1) As perdas no variador de frequência são obtidas do catálogo do equipamento ou, na falta, a potência ativa nos bornes do motor e a potência ativa na entrada do variador deverão ser medidas com um wattímetro, obtendo-se as perdas pela diferença das medições.
- 2) As harmônicas produzidas pelo variador de frequência deverão ser incluídas, que são obtidas do catálogo do equipamento ou, na falta, devem ser medidas com um analisador de rede.
- 3) Deve-se medir o fator de potência na entrada do variador de frequência.

**Passo 3.** Calcular a energia elétrica que será economizada conforme o que segue:

i) Calcular o perfil de pressão reduzida.

Para cada um dos registros obtidos durante a monitoração, calcular a redução da pressão e descarga, por meio da seguinte equação:

$$\begin{aligned} \text{Se } p_{op} > p_r &\rightarrow \Delta p_r = 0,0 \\ \text{Se } p_{op} < p_r &\rightarrow \Delta p_r = p - p_{op} \end{aligned}$$

Onde:

- $p_{op}$  = pressão ideal de operação (kg/cm<sup>2</sup>).
- $p_r$  = pressão registrada na monitoração (kg/cm<sup>2</sup>).
- $\Delta p_r$  = redução da pressão para esse registro (kg/cm<sup>2</sup>).

ii) Calcular o perfil de potência elétrica economizada.

Para cada um dos registros obtidos durante a monitoração, calcular a potência elétrica que será economizada com a instalação de um variador de velocidade que mantenha a pressão no valor ideal obtido no passo anterior, por meio da equação:

$$\Delta P_e = \frac{\Delta P_r * Q * 9.81}{\eta_{em}}$$

Onde:

- $\Delta P_e$  = potência elétrica economizada (kW).
- $\Delta p_r$  = redução da pressão de descarga (mca).
- $Q$  = vazão (l/s).
- $\eta_{em}$  = eficiência eletromecânica do conjunto motor-bomba.

iii) Calcular a energia economizada com a seguintes equação:

$$\Delta E = \sum_{i=2}^{n_m} \left[ \frac{(\Delta P_{e,i} + \Delta P_{e,i-1})}{2} * (h_{r,i} - h_{r,i-1}) \right]$$

Onde:

- $\Delta E$  = energia economizada no período de medição (24 horas) (kWh/período).
- $\Delta P_{e,i}$  = potência elétrica economizada na leitura i (kW).
- $h_{r,i}$  = hora em que a leitura i foi tomada (h).
- $n_{im}$  = número total de leituras tomadas durante o tempo de monitoração (1/ano).

iv) Calcular as economias anuais que serão obtidas com a implantação da medida com a equação.

$$A\$ = \Delta E * CUE$$

Onde:

- $A\$$  = valor anual da economia que será obtida com a implementação do variador (\$/ano).

$\Delta E$  = energia anual que é viável economizar com a implementação do variador (kWh/ano).  
CUE = custo unitário da energia (\$/kWh).

Uma vez determinadas as economias de energia elétrica, faz-se uma estimativa do valor dos investimentos necessários para a implantação dessa medida de economia e uma avaliação econômica do projeto de investimento.

### Instalação de tanques de regulação

É possível que, em algumas situações onde a água esteja sendo fornecida diretamente à rede, seja necessário instalar um tanque de regulação para reduzir a capacidade do sistema de bombeamento, trabalhando a consumo médio, e assim reduzir a potência elétrica dele. Essa situação é analisada na forma que segue:

- Situação observada durante a auditoria: o fornecimento de água é direto à rede com uma potência exigida conforme o fluxo máximo horário.
- Ações a implantar: instalar um tanque de regulação ou utilizar algum tanque disponível, reduzindo a potência do equipamento de bombeamento.
- Metodologia de cálculo:

**Passo 1.** Calcular a vazão e carga hidráulica total que o equipamento de bombeamento terá trabalhando para o tanque de regulação.

**Passo 2.** Calcular a potência elétrica que o equipamento de bombeamento demandará, uma vez implementada a ação corretiva, por meio da equação:

$$P_{eQm}' = \frac{H_{tmb} * Q}{(H_{tmb} * Q)'} * P_{eQm}$$

Onde:

$P_{eQm}'$  = potência elétrica esperada com a vazão média (kW).

$P_{eQm}$  = potência elétrica que o conjunto motor-bomba demanda atualmente com a vazão média (kW).

$(H_{tmb} * Q)$  = produto da carga hidráulica pela vazão atual do conjunto motor-bomba ( $m^3/s$ ).

$(H_{tmb} * Q)'$  = produto da carga hidráulica pela vazão esperada do conjunto motor-bomba ( $m^3/s$ ).

**Passo 3.** Cálculo das economias de energia elétrica.

**Passo 4.** Orçar a obra que implica a instalação do novo tanque e conjunto motor-bomba propostos e avaliar a rentabilidade.

## MELHORAR A MANUTENÇÃO

### Manutenção preventiva e preditiva

Como parte do plano de economia de energia, deve-se recomendar a implementação de um programa de manutenção preditiva e preventiva, caso a empresa o tenha. Dentre os principais benefícios que são obtidos com um bom programa de manutenção nas instalações, temos:

- a) Maior disponibilidade do equipamento.
- b) Maior capacidade de bombeamento.
- c) Maior confiabilidade do equipamento.
- d) Operação mais bem planejada e mais eficiente.
- e) Melhor serviço à população.
- f) Menor estresse do pessoal.
- g) Redução de custos de operação e administração.
- h) aumento da vida útil dos equipamentos.
- i) Redução das necessidades de investimento.
- j) Economia de energia.
- k) Economia monetária.

Para mais detalhes na auditoria de manutenção e ações recomendadas, consulte o *Manual de Manutenção para Sistemas de Bombeamento de Água* ou o programa de manutenção da empresa de água.

## **SUBSTITUIÇÃO DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

### **Uso de fontes de energia renovável**

As energias renováveis têm constituído uma parte importante da energia utilizada pelos seres humanos desde os tempos remotos, especialmente a solar, a eólica e a hidráulica. A navegação a vela, os moinhos de vento ou de água e o projeto arquitetônico dos prédios para aproveitar a luz solar, são bons exemplos disso.

Na década de 1970, começou-se a considerar as energias renováveis como uma alternativa viável às energias tradicionais ou convencionais, por sua disponibilidade presente e futura garantida, bem como por seu menor impacto ambiental no caso das energias limpas e, por esse motivo, foram chamadas de energias alternativas. Atualmente muitas dessas energias são uma realidade e não uma alternativa. Portanto, o nome de alternativas já não deve ser utilizado. A porcentagem de uso de energias renováveis em nível mundial como fonte de energia primária representou 14,5% em 2007 e 20,1% da geração total de energia elétrica.

As fontes renováveis de energia podem dividir-se em duas categorias: não contaminantes ou limpas e contaminantes.

As contaminantes são obtidas a partir da matéria orgânica ou biomassa<sup>2</sup> e podem ser utilizadas diretamente ou como combustível (madeira ou outra matéria vegetal sólida), ou convertida em bioetanol ou biogás, mediante processos de fermentação orgânica, ou em biodiesel, mediante reações de transesterificação e dos resíduos urbanos.

Nos sistemas de água potável se pode obter energia a partir dos lodos das centrais depuradoras e de tratamento de água. Essa energia também é contaminante, porém, também o seria em grande medida se não fosse aproveitada, já que os processos de decomposição da matéria orgânica são realizados com emissão de metano e dióxido de carbono.

---

<sup>2</sup> Cabe salientar que apesar de a biomassa poder contaminar na sua fase de combustão, também é verdade que na sua fase de crescimento captura CO<sub>2</sub> e, portanto, a biomassa possui uma emissão líquida de valor zero.

Dentre as energias não contaminantes, temos (de acordo com a sua fonte):

- O Sol: energia solar.
- O vento: energia eólica.
- Os rios e correntes de água doce: energia hidráulica.
- Os mares e oceanos: energia maremotriz.
- O calor da Terra: energia geotérmica.
- As ondas: energia undimotriz.
- A chegada de massas de água doce para massas de água salgada: energia azul.

#### ***Aplicação da energia solar em sistemas de água potável:***

Nos sistemas de água potável existe um bom número de sistemas e subsistemas que podem utilizar a energia solar; alguns exemplos são:

- Sistemas de fechamento automático de válvulas, tanques e válvulas de controle
- Monitoração de pressões e qualidade da água
- Bombeamento em pequenos sistemas de água potável, que podem ser empregados em zonas rurais onde não exista suficiente pressão para o fornecimento da rede de água potável ou zonas afastadas da rede de energia elétrica.

#### ***A energia eólica nos sistemas de água potável***

A geração de energia eólica, de forma complementar àquela realizada pela fiação da rede elétrica existente, permite resolver os problemas de abastecimento e segurança de energia de água potável em comunidades rurais com efeitos econômicos inferiores aos de um sistema convencional.

Uma solução energética híbrida, com um arranjo eólico e apoio com máquinas diesel, em projetos de água potável rural (APR) é altamente atraente e econômica, dado que são tecnologias complementares, permitindo assim não só reduzir os custos, mas também aumentar a segurança do sistema, uma vez que:

- A energia eólica tem custos de manutenção muito baixos, o que faz com que os custos de produção de água diminuam consideravelmente.
- Muitos sistemas APR que atualmente estão em funcionamento possuem sistemas que incluem grandes gastos em consumo de energia elétrica e poderiam cobrir parte de suas necessidades com energia eólica. Para implementar um sistema de geração eólica é preciso selecionar um local com alto potencial e desenvolver registros confiáveis de velocidades de ventos que permitam avaliar adequadamente o recurso eólico e a potência eólica a ser instalada. A escolha de um bom local de potencial eólico permite reduzir o tamanho do moinho de vento e, com isso, os custos iniciais, que são os mais importantes em um projeto desse tipo.

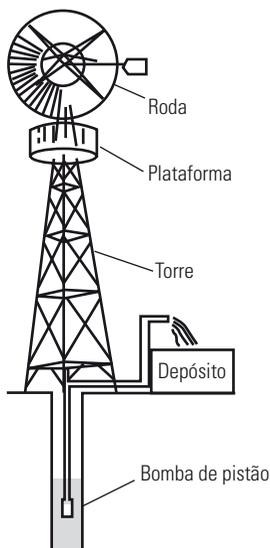
As informações de vento devem ser coletadas diretamente no local a ser desenvolvido, utilizando anemômetros ou sensores de vento instalados por um período mínimo de 6 meses.

Os moinhos de vento ou aerogeradores são máquinas muito simples, que transformam a energia mecânica do vento em energia mecânica para o bombeamento, sendo muito eficientes para um sistema de bombeamento já que não requerem passar a outra forma de energia como a elétrica. Para realizar essa operação, de forma eficiente e econômica, consegue-se a segurança do sistema por meio de reservatórios de acumulação, cujo volume é determinado a partir do estudo de ventos e consumo estimado. São equipamentos de baixo custo, muito simples, que utilizam bombas do tipo pistão e requerem uma

manutenção mínima. Por exemplo, um sistema completo (sem poço), para bombear um litro por segundo, custa aproximadamente US\$ 3.400.

As pequenas turbinas eólicas têm aproximadamente de 1 a 10 kW e permitem fornecer energia elétrica aos projetos APR para processos de tratamento e seu próprio funcionamento. O custo de instalação desses equipamentos é variável e depende principalmente da distância do local e do custo da torre, que é aproximadamente 50% do valor total dos equipamentos. Os custos atuais são de US\$ 2 e 6 por watt instalado.

**FIGURA 7.5:** Esquema de funcionamento de um moinho de vento para a extração de água subterrânea



### Produzir e aproveitar o biogás nas estações de tratamento de águas residuais

O biogás é um gás combustível, gerado em meios naturais ou em dispositivos específicos, pelas reações de biodegradação da matéria orgânica, por meio da ação de microorganismos (bactérias metanogênicas, etc.), e outros fatores, na ausência de ar (isto é, em um ambiente anaeróbico). Quando a matéria orgânica se descompõe na ausência de oxigênio, esse tipo de bactérias atua, gerando biogás.

### Aplicação de biogás em sistemas de água potável

A implementação de um sistema de biodigestores para a despoluição (produtiva) de águas servidas com geração de biogás, e a posterior geração de energia elétrica, é um processo onde se obtém um duplo resultado:

- 1) A despoluição das águas residuais, conseguindo cumprir e superar a norma vigente.
- 2) A obtenção de biogás como subproduto.

Esse biogás pode ser utilizado para a geração de energia elétrica e/ou térmica e permite aproveitar os dejetos e materiais orgânicos. A energia elétrica pode ser gerada mediante o uso de um motor de combustão e seu próprio gerador.



## Capítulo 8.

### AValiação DAS MEDIDAS DE ECONOMIA

#### AValiação DAS ECONOMIAS (BALANÇO DE ENERGIA ESPERADO)

Uma vez que as propostas de economia, as especificações do equipamento a ser trocado e as atividades a realizar para o plano de economia de energia tenham sido avaliadas, deve-se analisar as eficiências, as perdas e o balanço energético que a adoção dessas medidas envolve para se poder determinar a economia total potencial esperada ao implementar o plano de economia.

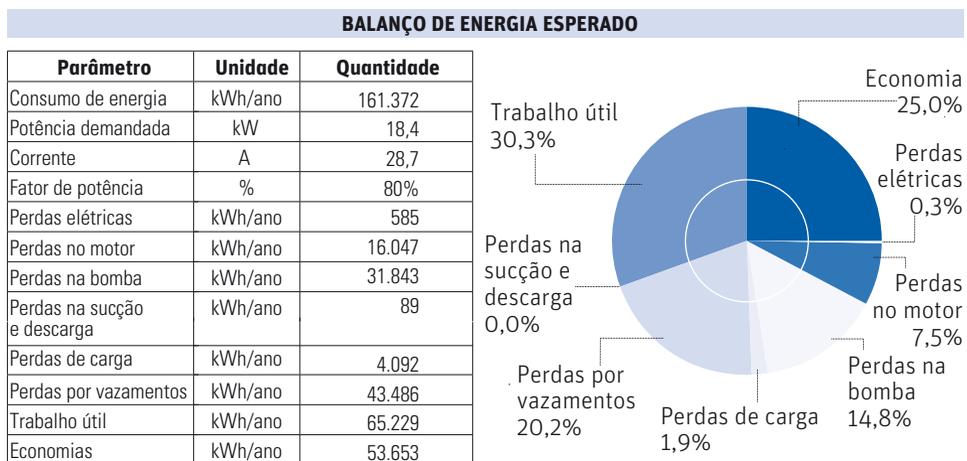
A nova avaliação deverá ser realizada conforme os componentes energéticos descritos no Capítulo 6 deste manual, substituindo-se os dados dos equipamentos e levando-se em consideração as novas medidas de economia.

Segundo as avaliações dos componentes do motor e condutores elétricos, e as especificações da bomba nova proposta, supondo-se que a bomba trabalhará dentro da faixa de máxima eficiência na curva de carga-vazão, pode-se realizar novamente um balanço de energia esperado uma vez implementadas as medidas de economia propostas.

O cálculo do balanço esperado é realizado da mesma forma que o descrito no Capítulo 6 deste manual. Nesse caso, o balanço esperado determina, ainda, a porcentagem de economia que haverá ao implementar as medidas de economia.

Na Figura 8.1 se mostra um exemplo do balanço de energia esperado para um sistema de bombeamento.

**FIGURA 8.1:** Balanço de energia esperado ao implementar um plano de economia de energia



Como se pode observar, segundo o exemplo, esperam-se economias de até 25% da energia atualmente utilizada pelo sistema de bombeamento.

A avaliação financeira das medidas de economia é o passo final do projeto de economia de energia, após o qual se poderá apresentar um relatório executivo dos resultados da auditoria energética, além da apuração dos indicadores esperados. Neste capítulo será descrita a apuração das economias, bem como os detalhes da integração do relatório executivo e a apuração dos índices energéticos mais comuns.

## **AVALIAÇÃO ECONÔMICA DA ECONOMIA E TAXA DE RETORNO**

**Passo 1.** Cálculo de economias.

O cálculo de economias é determinado a partir de um custo geral da energia elétrica e das economias de energia obtidas na avaliação do balanço de energia esperado, conforme o que segue abaixo.

**Custo da energia (CUE).** O custo geral da energia elétrica deve ser obtido em unidades monetárias locais ou em dólares, por kWh.

**Economias diretas.** São as economias esperadas de forma direta, ao se reduzirem as perdas de energia decorrentes do novo balanço energético, pela implementação das medidas de economia sugeridas para cada sistema de bombeamento. Essa economia é obtida do balanço energético esperado em kWh/ano. Obtém-se o custo da economia de energia ao se multiplicar a energia economizada pelo custo da energia.

**Economias adicionais.** Essas economias se referem às economias adicionais obtidas ao se instalar o banco de capacitores, devido às economias por redução de perdas nos condutores. Mas, caso se trabalhe com um baixo fator de potência, isso poderá envolver um custo adicional de multa pela fornecedor do serviço de energia elétrica, sendo que o custo dessas multas no último ano de operação também poderá acrescentar-se à análise.

$$\text{Economia total anual } (A_{eco}) = \text{economias diretas} + \text{economias adicionais}$$

**Passo 2.** Cálculo do custo dos investimentos.

Como as propostas de economia envolvem a compra de equipamento, materiais e realização de trabalhos adicionais, deve considerar-se o cálculo do investimento correspondente, para cada um dos sistemas de bombeamento de forma particular. Sugere-se incorporar à tabela de investimentos um índice de recuperação de investimentos.

Para o cálculo do investimento deve levar-se em consideração todos os custos de investimento envolvidos na realização do plano de economia de energia, isto é, um por um dos elementos da proposta de economia que impliquem a compra de equipamento, instalação e mão-de-obra devem ser desdobrados.

**Passo 3.** Análise da taxa de retorno do investimento.

Por último, deve realizar-se uma análise da taxa de retorno do investimento que será preciso fazer para realizar o plano de economia de energia proposto.

O cálculo do período simples de recuperação do investimento é realizado por meio da seguinte equação:

$$n_{ri} = \frac{I_{mae}}{A_{eco}}$$

Onde:

- $n_{ri}$  = período de recuperação do investimento (anos).
- $I_{mae}$  = valor do investimento necessário para a aplicação da medida de economia proposta (\$).
- $A_{eco}$  = economia monetária anual que será obtida com a implantação da medida de economia proposta (\$/ano).

Uma vez calculadas todas as economias e a taxa de retorno do investimento, realiza-se um resumo das economias de energia globais, distinguindo-se as medidas convencionais ou de rápida implementação e as medidas resultantes da operação hidráulica.

O formato sugerido para concentrar e mostrar os potenciais de economia de energia são apresentados na Tabela 8.1.

**TABELA 8.1:** Formato de resumo de economias decorrentes do plano de economia de energia

Descrição da medida de economia	Consumo atual		Economias (1)		% (2)	Investimento (3)	Taxa de retorno (anos) (4)
	Energia kWh/ano	Faturamento \$/ano	Energia kWh/ano	Faturamento \$/ano			

Os principais dados a preencher são os seguintes:

- 1) Economias de energia e faturamento anuais para cada medida de economia que resulte da soma de economias energéticas, bem como monetárias, de todos os equipamentos ou sistemas de bombeamento onde se aplique cada medida.
- 2) Porcentagem de economia por tipo de medida a realizar. Calcula-se dividindo-se a economia de cada medida entre o consumo e o custo energético anual atual.
- 3) Calcula-se o custo do investimento total para cada medida.
- 4) Estima-se o tempo simples de retorno do investimento (pay-back simples) dividindo-se o valor do investimento pela economia monetária anual (anos).
- 5) Finalmente, os valores totais de economia e porcentagem são obtidos com a soma de todas as medidas e se pode realizar uma somatória por tipo de medidas, para distinguir a economia de energia potencializada com medidas de economia de energia resultantes da operação hidráulica.

## ELABORAÇÃO DO RELATÓRIO FINAL DO PLANO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O passo final da auditoria de eficiência energética é preparar um relatório que contenha as observações e conclusões da auditoria de eficiência energética, enfatizando-se as oportunidades de economia de energia, e o plano de ação para implantá-las, que deve conter as bases e os passos seguidos na análise. Um bom relatório deverá conter as informações detalhadas a seguir:

**a. Relatório executivo:** o objetivo do relatório é permitir à alta gerência da empresa de água e saneamento obter de forma breve todos os resultados importantes e entender logo os resultados da auditoria, bem como os custos e benefícios das recomendações. Este relatório não deverá ter mais de quatro páginas.

Este item deverá incluir uma tabela de resumo das economias, segundo o que foi descrito na seção anterior deste capítulo.

Os principais dados a integrar nessa tabela-resumo são os seguintes:

- Economias de energia e faturamento anuais para cada medida de economia, resultantes da somatória de economias, tanto energéticas como econômicas, de todos os equipamentos ou sistemas de bombeamento, onde se aplicar cada medida.
- Porcentagem de economia por medida. Calcula-se dividindo-se a economia por cada medida entre o consumo e custo energético anual atual.
- Custo de investimento total para cada medida.
- Rentabilidade dos investimentos a realizar ao menos pelo método de tempo simples de retorno do investimento; isto é, dividindo-se o valor do investimento pela economia monetária anual.
- Os valores totais de economia de energia, monetária e suas porcentagens servem também para distinguir a economia adicional conseguida com as medidas convencionais e com as medidas decorrentes da operação hidráulica

**b. Descrição da situação atual das instalações avaliadas:** nesta parte se divulga a situação das instalações da empresa de água no momento em que a auditoria foi realizada. Deve conter um resumo com os dados básicos das instalações e incluirá:

- Dados gerais das instalações eletromecânicas (equipamentos e condições).
- Descrição geral do sistema de produção e distribuição de água potável e saneamento (captações e distribuições: poço a tanque, poço à rede, combinada, fluxos extraídos, etc.).

**c. Análise de consumos energéticos:** neste item se mostram os dados coletados e analisados referentes ao consumo energético nas instalações. A situação energética deve ser apresentada com gráficos para facilitar a compreensão, tais como os seguintes:

- Consumos energéticos anuais, incluindo demanda elétrica máxima de todas as instalações e serviços contratados pela empresa.
- Tarifas elétricas aplicáveis.
- Balanço energético global da empresa de água.
- Variações mensais de consumo de energia e produção (custos).
- Apresentação de indicadores que forem aplicáveis a partir dos resultados gerados pela análise e gráficos obtidos.

**d. Recomendações e medidas de economia:** neste item se descreverá o estado das instalações e a problemática achada na própria instalação e sua manutenção.

- A primeira parte deste item descreverá a situação encontrada nos sistemas eletromecânicos da empresa e as observações do equipamento a ser auditado. Será apresentada uma apreciação geral do estado das instalações.

- Na segunda parte, serão apresentadas as oportunidades de economia. Cada uma delas deverá possuir os seguintes incisos:
    - **Recomendação:** descrições claras e concisas das ações a adotar para se atingir as economias esperadas.
    - **Estimativa de economia:** apresentação das premissas e dos cálculos que se fizeram para alcançar a economia estimada da recomendação.
    - **Estimativa de investimento:** explicação das premissas e dos cálculos que foram realizados para se chegar ao investimento requerido para realizar a recomendação.
    - **Análise financeira:** explicação que determine a rentabilidade econômica do plano. No mínimo, pelo método do período de recuperação do investimento e, se for necessário, utilizando-se os métodos do valor presente líquido e da taxa interna de retorno.
- e. Apêndice.** Incluir os documentos de orçamento dos equipamentos novos a serem adquiridos.







[www.iadb.org](http://www.iadb.org)