

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
NÍVEL MESTRADO**

MARCOS GAUDIE LEY LINDAU

**METODOLOGIA DE DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO EM SISTEMAS DE
BOMBEAMENTO DE ÁGUA DO SETOR DE SANEAMENTO PELA ANÁLISE DE
INDICADORES DE DESEMPENHO**

**São Leopoldo
Março de 2023**

MARCOS GAUDIE LEY LINDAU

**METODOLOGIA DE DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO EM SISTEMAS DE
BOMBEAMENTO DE ÁGUA DO SETOR DE SANEAMENTO PELA ANÁLISE DE
INDICADORES DE DESEMPENHO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Orientador: Prof.º Dr. Paulo Roberto Wander

São Leopoldo
Março de 2023

L742m Lindau, Marcos Gaudie Ley.
Metodologia de diagnóstico energético em sistemas de bombeamento de água do setor de saneamento pela análise de indicadores de desempenho / por Marcos Gaudie Ley Lindau. – 2023.
128 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, São Leopoldo, RS, 2023.
“Orientador: Dr. Paulo Roberto Wander”.

1. Sistemas de bombeamento. 2. Energia elétrica. 3. Diagnósticos energéticos. 4. Indicadores hidroenergéticos. 5. Desperdício energético. 6. Eficiência energética. I. Título.

CDU: 621.22:620.9

Resumo: Os sistemas de bombeamento de água representam a maior parcela do consumo de energia das empresas de saneamento. A esta grande parcela, está associada uma despesa financeira significativa, que compromete a margem de investimento dessas empresas para novos projetos. Neste sentido, uma operação sustentável e eficiente deve ser vista com destaque, pois possibilita alocar recursos energéticos desperdiçados em novos investimentos para expansão e melhoria operacional desses sistemas, além do atendimento às metas de universalização de água e esgoto. No Brasil, pela operação ser majoritariamente manual e não contar com um monitoramento adequado das variáveis e parâmetros de processo, há um cenário de grande dificuldade em avaliar e comparar potenciais de eficiência energética em múltiplos sistemas de bombeamento. A escassez de dados leva a entidade gestora a tomar decisões baseadas em análises complexas e por muitas vezes subjetiva, sem resultados consistentes quanto as melhorias esperadas. Desta maneira, este trabalho propõe a formulação de uma metodologia de análise pautada no cálculo de índices e indicadores de rendimento para determinar o benefício energético através da comparação dos valores diagnosticados com referências de desempenho existentes na literatura. Para tanto, analisou-se a operação de oito elevatórias de água (EA) com relação a sua condição de eficiência energética, comparando a metodologia proposta com outras mais tradicionais. Os resultados obtidos possibilitaram determinar quais as ações de eficiência energética previstas foram as mais adequadas para cada caso e qual o seu potencial de redução de energia e demanda, além de ampliar o escopo de diagnóstico em relação as outras metodologias para além dos grupos motobombas. O maior desperdício em termos absolutos foi calculado para a elevatória de água EA-07, devido a perdas significativas na bomba e na adutora. Já em termos relativos, a EA-03 demonstrou um desperdício calculado de 76,43%, porém com pouco impacto no montante de energia potencialmente reduzido frente a outros sistemas. O trabalho destaca a importância de se trabalhar com um conjunto de indicadores para análise de eficiência desses sistemas, bem como fornecer resultados para diferentes possibilidades de melhoria de eficiência, buscando propiciar ao gestor do sistema a intervenção mais apropriada para a estratégia de investimento em eficiência energética disponível.

Palavras-chave: sistemas de bombeamento; diagnósticos energéticos, indicadores hidroenergéticos; desperdício energético.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAB	Adutora de Água Bruta
AAT	Adutora de Água Tratada
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AE	Auditoria Energética
AEE	Ação de eficiência energética
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BID	Banco Interamericano de Desenvolvimento
CEN	Consumo Específico Normalizado
CEPEL	Centro de Pesquisas em Energia Elétrica
EA	Elevatória de Água
EAT	Elevatória de Água Tratada
ECAM	<i>Energy performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring</i>
EE	Energia economizada ao longo de um ano
EAB	Elevatória de Água Bruta
EPE	Empresa de Pesquisas Energéticas
ETA	Estação de Tratamento de Água
EVO	<i>Efficiency Valuation Organization</i>
GIZ	<i>Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit</i>
GMB	Grupo Motobomba
IWA	<i>International Water Association</i>
M&V	Medição e Verificação
NBR	Norma Brasileira de Regulação
NPSH	<i>Net Positive Suction Head</i>
PIG	<i>Pipeline Inspection Gauge</i>
PROEESA	Projeto de Eficiência Energética em Sistemas de Abastecimento de Água
PIMVP	Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance
PROPEE	Procedimentos do Programa de Eficiência Energética
RAP	Reservatório Apoiado

REL	Reservatório Elevado
RDP	Redução de Demanda na Ponta
SNIS	Sistema Nacional de Indicadores de Saneamento
VI	Variável independente.
WaCCliM	<i>Water and Wastewater Companies for Climate Mitigation</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de seção transversal [m ²]
C	Coefficiente de rugosidade de <i>Hazen-Williams</i> [-]
$C_{payback}$	Confiança do <i>payback</i> []
CEN	Consumo específico normalizado [kWh/(m ³ x 100 mca)]
D	Diâmetro do tubo de seção circular [m]
$D_{payback}$	Desvio padrão do <i>payback</i> []
E_{cons}	Energia consumida [kWh]
FP	Fator de Potência [-]
FS	Fator de Serviço [-]
g	Aceleração gravitacional [m/s ²]
$Hamt$	Altura manométrica [mca]
H_f	Perda de carga total [mca]
H_g	Desnível geométrico [m]
H_l	Perda de carga linear ou distribuída [m]
H_s	Perda de carga singular ou localizada [m]
I	Corrente elétrica [A]
$i_{ED\ cenário}$	índice de energia dissipada na rede para cenário de referência [m/km]
L	Comprimento da tubulação [m]
$\eta_{GMB(\%)}$	Rendimento do grupo motobomba com acionamento [%]
P_c	Potência consumida no sistema de bombeamento [kW]
Pe	<i>Payback</i> esperado []
P_{ele}	Potência elétrica ativa [kW]
P_i	Potência instalada no sistema de bombeamento [kW]
p	Pressão manométrica [mca]
p_{rec}	Pressão relativa na linha de recalque [mca]
p_{suc}	Pressão relativa na linha de sucção [mca]
RC	Capacidade de reservação [-]
t	Tempo [s]
U_{linha}	Tensão elétrica de linha [V]
UHL	<i>Unit Head Loss</i> [m/km]
V_{bomb}	Volume bombeado [m ³]

Q	Vazão [m^3/s]
v	Velocidade instantânea [m/s]
$v_{\text{média}}$	Velocidade média [m/s]
v_{rec}	Velocidade na linha de recalque [m/s]
v_{suc}	Velocidade na linha de sucção [m/s]
z	Cota em relação ao nível de referência [m]
γ	Peso específico [N/m^3]
σ_x	Erro associado à variável x []

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Divisão das faixas de consumo por classe no país no ano de 2019, com destaque da representatividade do setor de saneamento.....	2
Figura 1.2 Evolução energética de sistemas de água, esgoto e evolução da despesa com energia elétrica das empresas de saneamento brasileiras.....	3
Figura 1.3 Ilustração de um sistema de bombeamento do setor de saneamento.	4
Figura 1.4 Principais funcionalidades do sistema de gestão de energia elétrica (base ligações).....	6
Figura 1.5 Recursos aportados pelo IFC em títulos e empréstimos na área de sustentabilidade para mercados emergentes de 2019 a 2021 (em bilhões de dólares). Em azul claro em empréstimos e azul escuro em títulos.	8
Figura 2.1 Componentes de análise do método de auditoria energética por balanço de energia de um sistema de bombeamento.	13
Figura 2.2 Perdas energéticas típicas nos componentes eletromecânicos de um sistema de bombeamento de água.	15
Figura 2.3 Balanço de energia obtido pelo método.	17
Figura 2.4 Planilha de cálculo da curva teórica do sistema e do NPSH a partir dos dados obtidos com diagramas e projetos. Nela, calcula-se a perda de carga na sucção e descarga por Hazen Willians.	29
Figura 3.1 Concepção do sistema de abastecimento de água com todas unidades.	35
Figura 3.2 Dados para dimensionamento da potência do GMB.	45
Figura 3.3 Distribuição típica de custos para o uso de bombas de grande porte entregadas em sistemas de bombeamento.....	58
Figura 3.4 Períodos durante um diagnóstico de eficiência energética e representação da economia de energia na forma de ausência de consumo.	64
Figura 4.1 Primeira configuração, referente a um sistema de bombeamento de água bruta com operação de um GMB apenas.....	72
Figura 4.2 Segunda configuração, referente a um sistema de bombeamento de água tratada com a operação de 1 GMB apenas.....	72
Figura 4.3 Terceira configuração referente a um sistema de bombeamento de água bruta com dois GMB operando em paralelo.	73
Figura 4.4 Quarta configuração referente a um sistema de bombeamento de água tratada com dois GMB operando em paralelo.	73

Figura 4.5 Imagem do software Google Earth como alternativa a definição do desnível geométrico por projetos existentes.....	75
Figura 4.6 Modelagem em CAD dos GMBs da elevatória.....	76
Figura 4.7 Diagramas hidráulicos elaborados.....	76
Figura 4.8 Exemplo de sistema supervisorio com medição de vazão por macromedidor e pressão na adutora.....	78
Figura 4.9 Processos da etapa de pré medição.....	81
Figura 4.10 Processo da etapa de medição / diagnóstico operacional.....	88
Figura 4.11 Processo de determinação do potencial de eficiência energética.....	92
Figura 5.1 Potencial de redução absoluta de energia calculada para cada elevatória e cada cenário da AEE, em que os potenciais de redução destacados foram aqueles adotados pela análise.....	103
Figura 5.2 Potencial de redução relativo ao consumo de energia (os resultados são dados em porcentagem da energia atualmente consumida). O gráfico apresenta em destaque os potenciais adotados pela análise.....	103
Figura 5.3 Balanço de energia por elevatória de acordo com cada componente....	108

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 Descrição da campanha de medição.....	14
Quadro 2.2 Classes de confiabilidade do payback expressa em estrelas.....	24
Quadro 2.3 Resumo dos métodos apresentados.....	30
Quadro 3.1 Ações recomendadas para corrigir condições de operação ineficiente dos motores elétricos.....	58
Quadro 3.2 Bandas de confiabilidade da fonte de informação.....	69
Quadro 3.3 Critérios de avaliação da qualidade dos dados aplicado a diagnósticos em sistemas de bombeamento.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 Consumo de energia elétrica no Brasil por classe nos anos de 2016 a 2019.....	2
Tabela 2.1 Redução do rendimento do motor rebobinado em função da temperatura utilizada no processo de rebobinagem.....	16
Tabela 2.2 Referências adotadas pela metodologia para desempenho do GMB.	19
Tabela 2.3 Valores esperados de rendimento.....	22

Tabela 2.4 Relação dos valores de rendimento para o intervalo de potência dos grupos.	25
Tabela 3.1 Perda de carga localizadas em termos de comprimentos equivalentes em função do diâmetro.	40
Tabela 3.2 Valor do coeficiente C sugerido para a fórmula de Hazen Willians.	41
Tabela 3.3 Valores do coeficiente C de Hazen Willians para tubulações em ferro fundido com revestimento de argamssa de cimento.	42
Tabela 3.4 Valores de referência para rendimento de conjuntos motobomba na unidade kWh/(m ³ x 100 mca)	53
Tabela 3.5 Valores de referência para conjuntos motobombas correspondentes em termos percentuais, do rendimento calculado (%).	53
Tabela 3.6 Resumo dos valores de referência encontrados para avaliação da perda de carga unitária em adutoras de recalque de água.	56
Tabela 4.1 Erros máximos admissíveis para os equipamentos medidores de pressão.	82
Tabela 4.2 Erros máximos admissíveis para os equipamentos medidores de vazão.	83
Tabela 4.3 Erros máximos admissíveis para os equipamentos medidores de potência e energia.	84
Tabela 4.4 Valor do erro para o caso da medição do tempo com horímetros.	84
Tabela 5.1 Características gerais de cada sistema de bombeamento analisado.	95
Tabela 5.2 Resultados dos métodos aplicados nos estudos de caso (condição atual).	98
Tabela 5.3 Classificação de cada sistema de acordo com o indicador CEN.	99
Tabela 5.4 Classifciação das elevatórias pelo índice de perda de carga unitária. ..	100
Tabela 5.5 Análise das velocidades nas tubulações de sucção e recalque.	101
Tabela 5.6 Análise da incerteza do rendimento calculado e da qualidade dos dados obtidos para o diagnóstico operacional.	102
Tabela 5.7 Resultados obtidos pela metodologia proposta com as três AEEs.	104

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO	6
1.1.1 Objetivo Geral	7
1.1.2 Objetivos Específicos	7
1.2 JUSTIFICATIVA	7
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	9
2 METODOLOGIAS DE DIAGNÓSTICOS ENERGÉTICOS	11
2.1 Diferentes abordagens em sistemas de bombeamento	11
2.1.1 Auditoria energética	12
2.1.2 Foco na redução de gases do efeito estufa	18
2.1.3 Custos evitados para o sistema elétrico	20
2.1.4 Manutenção e substituição de equipamentos	21
2.1.5 Método UFPB Eletrobras PROCEL	25
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	35
3.1 Sistemas de abastecimento de água	35
3.1.1 Estações Elevatórias	36
3.1.2 Adutoras	36
3.2 Cálculos e aspectos em mecânica dos fluidos e hidráulica em sistemas de bombeamento	36
3.2.1 Grupos Motobomba	36
3.2.2 Propriedades e simplificações adotadas	37
3.2.3 Velocidade nas tubulações	38
3.2.4 Perdas de carga	38
3.2.5 Alturas Manométrica e Geométrica	42
3.2.6 Potências e rendimentos	43
3.3 Indicadores hidroenergéticos	45
3.3.1 Consumo Específico de Energia Normalizado (CEN)	46
3.3.2 Índice de Energia dissipada na rede ou perda de carga unitária (<i>iED</i>)	49
3.3.3 Capacidade de atendimento dos reservatórios no horário de ponta (RC)	50
3.3.4 Utilização da capacidade de bombeamento (Ph4)	51
3.4 Valores de referência para os índices e indicadores	52
3.4.1 Desempenho dos grupos motobomba	52

3.4.2	Desempenho nas tubulações	54
3.5	Ações de Eficiência Energética típicas em sistemas de bombeamento	57
3.5.1	Substituição apenas do motor elétrico.....	58
3.5.2	Reabilitação ou substituição de grupos motobomba:	59
3.5.3	Redimensionamento e melhoria nas tubulações	60
3.5.4	Controle operacional de bombas por conversores de frequência e/ou aumento do volume reservado no sistema	61
3.6	Conceitos de Medição e Verificação em sistemas de bombeamento	62
3.6.1	Período de linha de base e determinação da economia.....	63
3.6.2	Estimativa <i>Ex-Ante</i>	64
3.6.3	Fronteira de medição.....	64
3.6.4	Variáveis independentes e fatores estáticos	65
3.6.5	Correlação modelo matemático energia e volume	66
3.7	Cálculo e avaliação da incerteza combinada	67
3.8	Qualidade dos dados adquiridos	69
4	METODOLOGIA	71
4.1.1	Etapa de pré medição e estudo do sistema	74
4.1.2	Etapa de diagnóstico operacional do sistema	82
4.1.3	Etapa de determinação do potencial de redução de energia	89
5	ESTUDO DE CASO	93
5.1	Características das elevatórias diagnosticadas	93
5.2	Comparação entre as metodologias	96
5.3	Classificação operacional dos sistemas	99
5.4	Potenciais de redução obtidos pela metodologia proposta	102
6	CONCLUSÕES	109
7	REFERÊNCIAS	111

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, as empresas de saneamento brasileiras enfrentam momentos desafiadores na operação dos seus serviços. O aumento da frequência e duração de estiagens vêm afetando a disponibilidade, qualidade e quantidade de água disponível para a população humana. Este cenário de estiagem, associado a déficits de chuva em algumas regiões tem relação direta com o aumento das temperaturas médias no planeta, sendo uma tendência para os próximos anos. Conforme o Relatório especial do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (2018), o processo de aquecimento global vem aumentando os riscos de ocorrências desses eventos ano após ano. Soma-se a isso a adoção de medidas desafiadoras pelo governo brasileiro para regulação dos serviços do setor, como o novo marco legal do saneamento, que impõe um cenário de fortes expectativas de investimentos a curto e médio prazo para as empresas que detêm a concessão desses serviços, a fim de atingir as metas de universalização de água e esgoto no país.

Neste contexto, a operação sustentável e eficiente dos sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário deve ser vista em destaque, principalmente pela possibilidade de operar os sistemas com reduzidos desperdícios energéticos. Isso não só evita a emissão de gases do efeito estufa e contribui para o uso sustentável da energia no planeta, como também possibilita, em um curto período, reduzir a despesa com energia elétrica dessas empresas, abrindo margem para alocação de recursos em novos investimentos para expansão dos sistemas e consequente atendimento às metas do novo marco regulatório.

O setor de saneamento representa uma parcela significativa no consumo de energia elétrica do país. Ele é composto pelos sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário, que são os grandes consumidores de energia elétrica do setor. Conforme EPE (2021) o consumo total de energia no país no ano de 2019 foi de 482,22 TWh. Deste consumo total, aferiu-se para o mesmo ano o consumo de 13,26 TWh para todas as empresas de saneamento participantes do SNIS (2,75% do total do consumo aferido para o país), em que 11,84 TWh (cerca de 92%) corresponderam à sistemas de abastecimento de água, e 1,42 TWh à sistemas de esgotamento sanitário (BRASIL, 2020). A Tabela 1.1 apresenta o consumo de energia (MWh) por

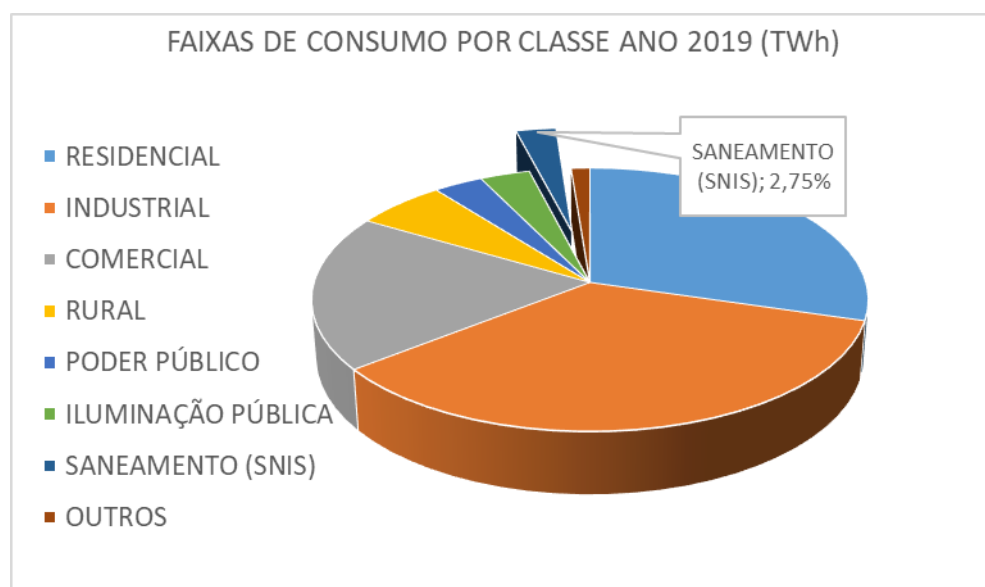
classe e a Figura 1.1 ilustra a representatividade do setor de saneamento frente ao consumo total do país.

Tabela 1.1 Consumo de energia elétrica no Brasil por classe nos anos de 2016 a 2019.

	2016	2017	2018	2019	2020	$\Delta\%$ (2020/2019)	Part. % (2020)
Brasil	461780	467161	474820	482226	475648	-1,4	100
Residencial	132872	134369	137615	142781	148173	3,8	31,2
Industrial	165314	167398	169625	167684	166335	-0,8	35
Comercial	87873	88292	88631	92075	82522	-10,4	17,3
Rural	27267	28136	29168	28870	30908	7,1	6,5
Poder Público	15096	15052	15076	15752	12764	-19	2,7
Iluminação Pública	15035	15443	15690	15850	15463	-2,4	3,3
Serviço Público	14969	15196	15778	15958	16345	2,4	3,4
Próprio	3355	3277	3238	3257	3138	-3,7	0,7

Fonte: Adaptado de EPE (2021, p. 91)

Figura 1.1 Divisão das faixas de consumo por classe no país no ano de 2019, com destaque da representatividade do setor de saneamento.



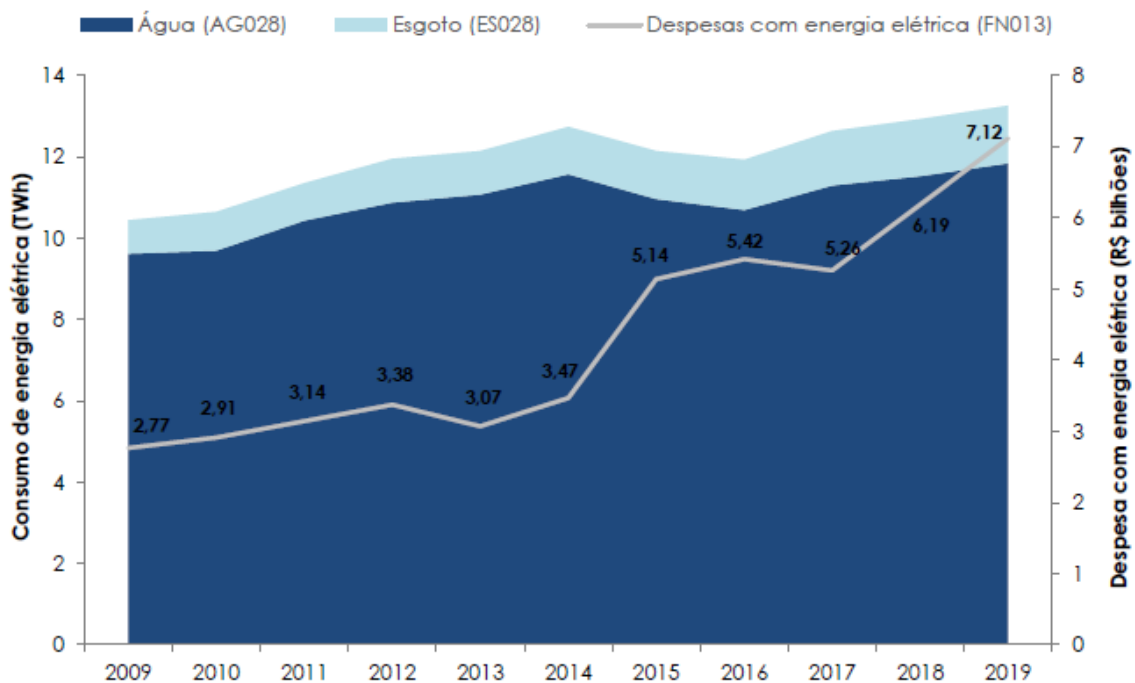
Fonte: O próprio autor.

A evolução do consumo de energia no saneamento, bem como das despesas para o seu uso, aponta uma tendência crescente nos últimos anos, sendo o crescimento da despesa mais acentuado que o de consumo neste período, devido a

fatores tarifários como a adoção do sistema de bandeiras e fim gradual da subvenção tarifária para o saneamento.

Com os sucessivos aumentos das tarifas de energia elétrica dos últimos 10 anos, no Brasil, a representatividade dos custos com energia se posiciona atualmente entre as três principais despesas das empresas de saneamento, chegando a representar até 30% das despesas operacionais (NICOLA *et al.*, 2018). A Figura 1.2 ilustra a situação apresentada.

Figura 1.2 Evolução energética de sistemas de água, esgoto e evolução da despesa com energia elétrica das empresas de saneamento brasileiras.



Fonte: Brasil (2020, p. 100)

O grande consumo de energia atribuído a sistemas de abastecimento de água é, portanto, fator preponderante na escolha deste grupo para uma análise de eficiência energética dentre os sistemas de saneamento. A este grande consumo diagnosticado, atribui-se como maior parcela a ação de sistemas de bombeamento, por sua operação eletrointensiva, caracterizada pelo uso de equipamentos de grande potência como motores elétricos acoplados a bombas hidráulicas (GOMES, 2021). A Figura 1.3 ilustra um sistema de bombeamento típico do setor de saneamento.

Figura 1.3 Ilustração de um sistema de bombeamento do setor de saneamento.



Fonte: WEG (2022)

Estima-se que atualmente no mundo, em média, 50% da energia gasta nesses sistemas se deva à ineficiência e às perdas na distribuição. O potencial técnico de recuperação de energia elétrica no país é, portanto, cerca de 4,705 TWh (ENERGIA-MME, 2011) sendo:

a) 2,62 TWh (~25%) com a redução de perdas reais de água (ENERGIA-MME, 2011);

b) 2,08 TWh (~20%) com a redução da altura manométrica de bombeamento, modulação de carga, uso de conversores de frequência, sistemas e bombas eficientes (ENERGIA-MME, 2011);

O presente estudo se delimitará às ações de eficiência associadas ao item b aplicadas nas estações elevatórias de água bruta e tratada, onde predominantemente ocorre o consumo de energia elétrica nos sistemas de abastecimento (GOMES, 2021). Para determinação deste desperdício é necessário que se avalie a operação dessas elevatórias de maneira criteriosa através da elaboração de um diagnóstico energético. O diagnóstico energético deve contemplar a determinação e medição de todos os fatores que influenciam o rendimento dessas elevatórias, sendo compostos por um conjunto de parâmetros e variáveis submetidos ao longo do tempo, não sendo, portanto, uma tarefa trivial de ser realizada (GOMES, 2012).

É necessário que se meçam os parâmetros chave desses sistemas na situação atual de operação para se obter resultados objetivos quanto ao estado de eficiência de cada um deles. Essa medição, contudo, deve ocorrer de maneira consistente, com

foco nas variáveis que impactam o modelo matemático da energia, em um período de amostragem capaz de abranger variações operacionais significativas devido a efeitos sazonais e com níveis de precisão adequados para uma análise de ganho em eficiência energética. Com os dados obtidos, é necessário calcular o desperdício energético de cada sistema em uma base de comparação, para assim chegar ao objetivo esperado de selecionar em ordem de prioridade quais unidades e quais investimentos devem ser feitos para fins potencializados de ganhos com eficiência energética. Nesta etapa entra o uso dos indicadores de desempenho, muito importantes para gestão de desempenho energético das unidades, pois permitem acompanhar os resultados das ações de efficientização (NICOLA *et al.*, 2018).

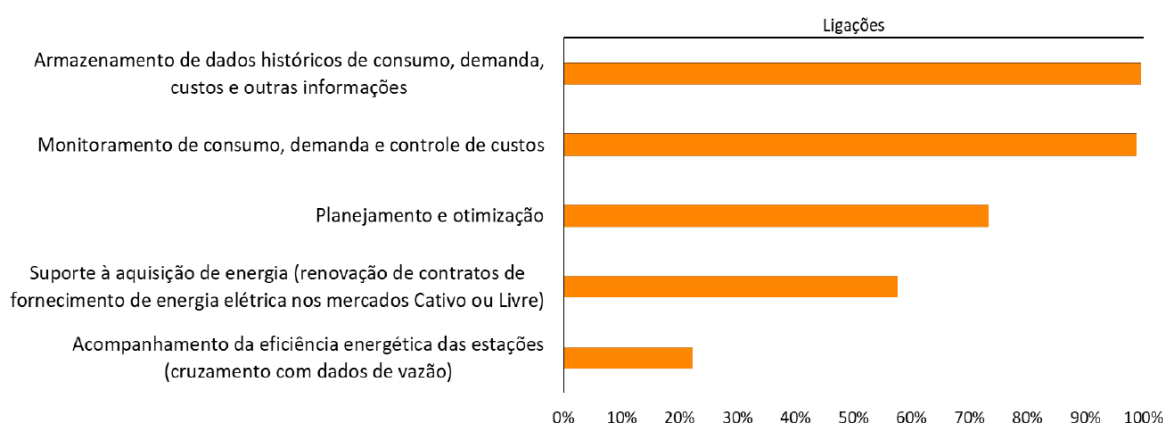
Entretanto, diante da dificuldade de parada dos sistemas para realização dessas medições, da dificuldade de acesso às estações com a operação local, da falta dos parâmetros de projetos e dados operacionais dos sistemas existentes e do alto custo de tempo e pessoal para unir todos os elementos necessários a se obter um diagnóstico conclusivo, as empresas de saneamento brasileiras possuem, na prática, problemas em avaliar e comparar potenciais de eficiência energética em múltiplos sistemas de bombeamento.

A inexistência de pessoal e equipes dedicadas às atividades de eficiência leva a dificuldade das companhias brasileiras em estruturar projetos de melhorias neste segmento (ASSOCIADOS, 2013). A integração multidisciplinar entre as áreas envolvidas (hidráulica, mecânica e elétrica) para a implantação de medidas que reduzam a ineficiência energética não faz parte da cultura da maioria das operadoras, excetuadas (em muitos casos, apenas parcialmente) as grandes empresas estaduais (NICOLA *et al.*, 2018). Conforme Ministério de Minas e Energia (2011), observa-se carência de projetos de eficiência energética e falta de cultura de medição elétrica e hidráulica no setor de saneamento, pois os diagnósticos efetuados pelas próprias prestadoras de serviço quase sempre são baseados em dados de placa e em práticas operacionais empíricas em que o nível de automação, supervisão e controle dos processos também é incipiente. As prestadoras de serviço de abastecimento de água, em sua maioria, não têm sistemas de gestão de energia implantados, seja por falta de conhecimento ou de recursos, e, às vezes, de ambos (NICOLA *et al.*, 2018).

O Diagnóstico Digital do Saneamento de 2020, evidencia que nos sistemas de gestão de energia elétrica dos prestadores de serviço em âmbito nacional falta a funcionalidade de acompanhamento da eficiência energética das estações de

bombeamento. O acompanhamento da eficiência energética nada mais é que o cruzamento de dados de vazão com energia e, conforme a Figura 1.4, está disponível para apenas 22,19% das ligações estudadas pelo diagnóstico, que contemplam um universo de 90% de todo país (FERREIRA; FINGER; MENDES, 2021). A falta dessa funcionalidade reitera o problema em determinar os potenciais de eficiência energética dessas empresas.

Figura 1.4 Principais funcionalidades do sistema de gestão de energia elétrica (base ligações).



Fonte: Ferreira, Finger e Mendes (2021)

Ainda, após o diagnóstico energético e implantação das ações em eficiência energética, é fundamental que haja um sistema de gestão de energia nas operadoras capaz de monitorar os resultados obtidos com as melhorias (NICOLA *et al.*, 2018).

1.1 OBJETIVO

Diante da dificuldade em avaliar e comparar potenciais de eficiência energética em múltiplos sistemas de bombeamento de água de maneira objetiva e simplificada, objetiva-se com este estudo propor uma metodologia de diagnóstico energético que identifique esses potenciais em múltiplos sistemas de bombeamento de água.

1.1.1 Objetivo Geral

Elaborar uma metodologia de diagnóstico energético que permita quantificar o desperdício energético de múltiplos sistemas de bombeamento de água pelo uso de indicadores de desempenho, indicando quais ações prioritárias devem ser adotadas para melhoria de eficiência desses sistemas.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho consistem em:

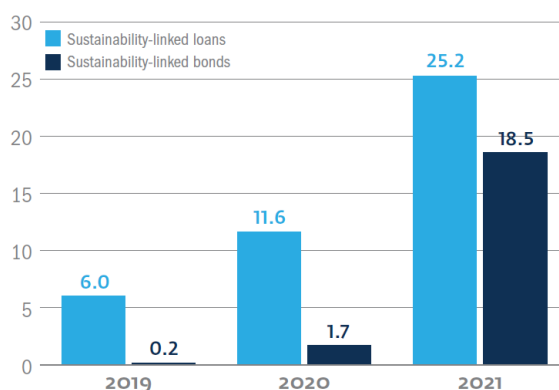
- Estudar os diagnósticos energéticos existentes, verificando as boas práticas adotadas em cada um deles;
- Determinar os parâmetros do processo de bombeamento que serão calculados, medidos e estimados, indicando as simplificações feitas para o equacionamento e obtenção dos resultados;
- Selecionar indicadores de desempenho para eficiência energética com valores de referência para definição de possíveis cenários de melhoria.
- Possibilitar, através do emprego da metodologia, a seleção de ações de eficiência energética de acordo com a sua relevância para melhoria em eficiência energética.
- Qualificar cada sistema diagnosticado pela metodologia conforme a classificação dos indicadores propostos, explicitando suas inadequações.
- Calcular o potencial de melhoria em eficiência energética de acordo com os valores obtidos pelos indicadores calculados e seus valores de referência.

1.2 JUSTIFICATIVA

Com uma crescente tendência de investimentos em sustentabilidade, que focam na eficiência energética de sistemas industriais pela alta capacidade de redução dos impactos da ação humana no aquecimento global e pelo alto retorno de investimento, algumas instituições financeiras internacionais como o IFC (*International Finance Corporation*) vêm aportando vultuosos recursos em mercados emergentes. Em 2021, a instituição aumentou em 327% o valor de financiamentos associado a

ações de sustentabilidade nesses mercados (DE LA ORDEN; DE CALONJE, 2022). A Figura 1.5 ilustra esta tendência.

Figura 1.5 Recursos aportados pelo IFC em títulos e empréstimos na área de sustentabilidade para mercados emergentes de 2019 a 2021 (em bilhões de dólares). Em azul claro em empréstimos e azul escuro em títulos.



Fonte: De la Orden e De Calonje (2022).

Dentre esses recursos aportados em mercados emergentes no ano de 2021, podemos citar o empréstimo de 453 milhões de reais destinados à CORSAN (Companhia Rio Grandense de Saneamento). O recurso, proveniente de uma linha de financiamento sustentável, destina-se a melhorias de eficiência energética e ao combate de perdas físicas de água da empresa, pela substituição de redes, adutoras, grupos motobombas e hidrômetros. Em específico, para a parte de eficiência energética em sistemas de bombeamento, o que contempla melhorias operacionais, substituições de equipamentos obsoletos e melhorias em longas adutoras, serão disponibilizados ao todo R\$ 95 milhões (DISCLOSURE - CORSAN WATER, 2022).

Além desses crescentes recursos que vem sendo disponibilizados à área de eficiência, podemos citar a publicação do novo marco legal do saneamento no ano de 2020 (Lei nº14.206/2020), que impôs um cenário de fortes expectativas de investimentos em um curto período no setor de saneamento nacional (previsão de investimento de 415 bilhões de reais nos próximos 15 anos).

Nas suas diretrizes, ele reforça a vontade de maior eficiência que já estava na lei anterior, pois menciona a necessidade do uso de tecnologias modernas e eficientes

como diretrizes, fomentando ainda mais a eficiência energética no setor, conforme trechos da lei apresentados em destaque.

VIII - estímulo à pesquisa, ao desenvolvimento e à utilização de tecnologias apropriadas, consideradas a capacidade de pagamento dos usuários, a adoção de soluções graduais e progressivas e a melhoria da qualidade com ganhos de eficiência e redução dos custos para os usuários (Lei nº14.206/2020, Art. 7);

XIII - redução e controle das perdas de água, inclusive na distribuição de água tratada, estímulo à racionalização de seu consumo pelos usuários e fomento à eficiência energética, ao reúso de efluentes sanitários e ao aproveitamento de águas de chuva (Lei nº14.206/2020, Art. 7);

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada dentro de seis capítulos, dispostos da seguinte maneira:

- Capítulo 2: referente à revisão bibliográfica de artigos e trabalhos sobre diagnósticos energéticos existentes que utilizam diferentes metodologias. As publicações trazidas ao trabalho estão vinculadas à métodos de análise de eficiência energética no setor de saneamento, em especial de sistemas de bombeamento de maneira geral.

- Capítulo 3: destinado à fundamentação teórica necessária para compreensão dos cálculos e dos indicadores que serão apresentados no capítulo seguinte, de apresentação da metodologia.

- Capítulo 4: apresentação da metodologia proposta de diagnóstico de eficiência energética de sistemas de bombeamento. A metodologia será apresentada em três partes: etapa de inclusão e validação dos dados, etapa de análise dos índices e indicadores da situação existente e etapa de determinação dos valores de referência e de seleção das ações de eficiência energética.

- Capítulo 5: neste capítulo, serão demonstrados os resultados obtidos durante os trabalhos do estudo de caso proposto e, ainda, serão discutidas as funcionalidades do método e suas aplicações e restrições. A comparação entre os métodos também será feita para fins de validação.

- Capítulo 6: por fim, no capítulo de Conclusões, serão apresentadas as conclusões resultantes do processo de estudo, a análise da metodologia proposta e abrangência, potencial e importância do trabalho no setor de saneamento. Também serão exploradas possíveis melhorias a serem implantadas em trabalhos futuros, com base nos resultados colhidos.

2 METODOLOGIAS DE DIAGNÓSTICOS ENERGÉTICOS

O diagnóstico de um sistema de bombeamento consiste na determinação das possibilidades de ganhos em eficiência hidroenergética, sendo o seu produto final uma lista de intervenções e as respectivas estimativas de redução de consumo de energia elétrica e redução da demanda de potência no horário de ponta do sistema elétrico (GOMES, 2012). Em decorrência disso, ele é um componente de avaliação econômica de um dos maiores custos das empresas de saneamento e, ao mesmo tempo, uma maneira de avaliar o impacto ambiental de uma instalação. Por esses motivos ele se torna um elemento essencial no processo de definição de novos planos de investimentos, sendo objeto de constante avaliação por diferentes agentes, incluindo os gestores da própria empresa, as autoridades locais, os escritórios de regulação dos serviços, as agências de proteção ambiental, os clientes, os bancos de fomento e desenvolvimento, as agências não governamentais, entre outros (BYLKA; MROZ, 2019).

Atualmente, muitos métodos de diagnóstico energético em sistemas de abastecimento de água foram desenvolvidos. Os métodos variam em termos de escopo e objetivo da avaliação. Como cada método é aplicado a um propósito não é possível indicar um só que seja universal (BYLKA; MROZ, 2019). Dessa maneira, é importante que se conheçam os diferentes métodos para avaliação de eficiência energética em sistemas de bombeamento relacionados ao escopo do trabalho proposto, que tem como base quantificar o desperdício de energia em um sistema de bombeamento, para, assim, com o auxílio de indicadores, partir para elaboração de um novo método capaz de propor ações estratégicas de eficiência que potencializem os resultados de melhoria da unidade analisada.

2.1 Diferentes abordagens em sistemas de bombeamento

Nesta revisão fez-se um apanhado de diferentes metodologias relacionadas ao tema, com diagnósticos aplicados ao setor de saneamento orientados a diferentes abordagens, como:

- Diagnóstico por uma auditoria energética completa, englobando todos os componentes de um sistema de bombeamento para avaliação das oportunidades de economia mais importantes nesse tipo de sistema;

- Diagnóstico pela redução de gases do efeito estufa, enfatizando a questão ambiental envolvida no processo de saneamento e destacando os resultados obtidos com a sua redução em cada etapa;

- Diagnóstico pelos custos evitados para o sistema elétrico, com foco na redução de desperdícios e na melhoria da eficiência energética de equipamentos, processos e usos finais de energia;

- Diagnóstico pelo monitoramento da eficiência eletromecânica, voltado a manutenção e substituição de equipamentos, com o objetivo de melhoria na análise da condição do rendimento de grupos motobombas pautado no cálculo do indicador de *CEN*;

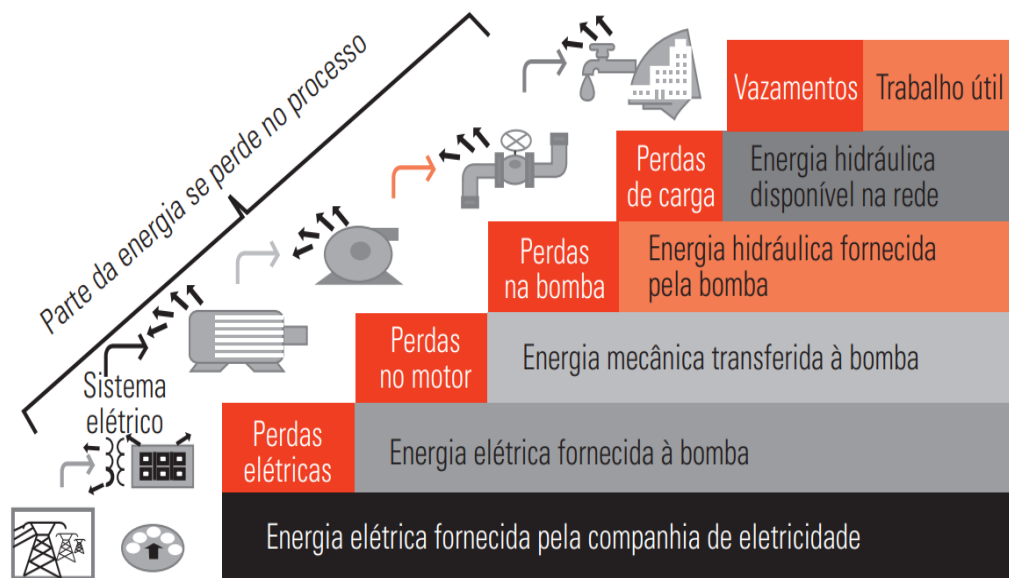
- Diagnóstico pelo método UFPB Eletrobras Procel, em que é apresentado um roteiro de medições e cálculos para obtenção de resultados abrangentes quanto ao rendimento e operação de um sistema de bombeamento.

A seguir são apresentados cada um dos tipos de diagnósticos.

2.1.1 Auditoria energética

A realização de um diagnóstico energético de um sistema de bombeamento por uma AE é uma das metodologias relacionadas ao escopo do trabalho. Publicada por Pedraza e Rosas (2012), ela tem como princípio conceitual o balanço de energia, que se baseia no cálculo da energia consumida e das perdas de cada componente dos processos envolvidos no sistema de bombeamento (isto é, da entrada de energia do 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. Com isso, é possível quantificar a parcela de energia desperdiçada em cada componente do processo e identificar as áreas que fornecem as maiores oportunidades de economia. A Figura 2.1 ilustra o conceito do balanço de energia aplicado pelo método.

Figura 2.1 Componentes de análise do método de auditoria energética por balanço de energia de um sistema de bombeamento.



Fonte: Pedraza e Rosas (2012, p.01)

Este método, portanto, tem como objetivo identificar as medidas técnicas e administrativas rentáveis para a economia de energia da instalação. Dentre essas medidas, são listadas algumas consideradas como principais:

- 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;

Em termos gerais, 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.

As atividades de campo iniciam com uma fase de pesquisa prévia e coleta de dados, que buscam a caracterização completa do sistema de bombeamento

analisado. Após a coleta de dados dos equipamentos e condições operacionais, segue-se para a fase de medições de campo dos parâmetros elétricos e hidráulicos. A campanha de medição se divide em atividades hidráulicas e trabalhos eletromecânicos em equipamentos de bombeamento, conforme o Quadro 2.1.

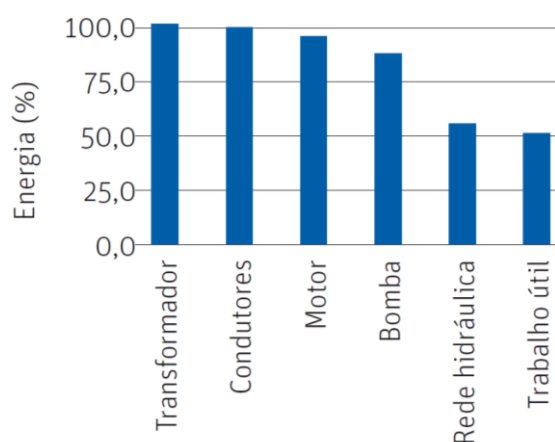
Quadro 2.1 Descrição da campanha de medição.

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	Analizador 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 a 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.

Fonte: Pedraza e Rosas (2012, p.31)

É possível, ainda, destacar as medidas que usualmente tem maior representatividade nas perdas de energia durante todo o processo de um sistema de bombeamento. Na apresentação da metodologia da auditoria, na etapa de avaliação da eficiência da unidade, é ilustrada a distribuição típica das perdas de energia relativa a cada componente analisado, conforme a Figura 2.2.

Figura 2.2 Perdas energéticas típicas nos componentes eletromecânicos de um sistema de bombeamento de água.



Fonte: Pedraza e Rosas (2012, p.29).

Observa-se que as maiores perdas 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%, não sendo incomum achar sistemas de bombeamento com perdas de até 60%. É precisamente nesta faixa que estão as maiores oportunidades a serem exploradas (PEDRAZA; ROSAS, 2012).

A metodologia de cálculo a ser aplicada durante uma AE na etapa do grupo motobomba de um sistema de bombeamento consiste na determinação da eficiência eletromecânica do grupo existente, suas condições de operação, seguida do cálculo da perda de carga nas tubulações. Com a determinação do rendimento atual e do rendimento do novo grupo proposto (ou do grupo reformado), é possível calcular a nova potência elétrica que o equipamento demandará.

Destaca-se que como parte da auditoria energética, recomenda-se avaliar de forma separada a eficiência do motor em relação à bomba acoplada a ele, 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 (PEDRAZA; ROSAS, 2012). Dessa forma, a referência propõe um método de engenharia para uma estimativa da eficiência do motor, pela sua curva. O método consiste em um processo iterativo, que calcula o rendimento do motor pela determinação de seu carregamento e sua curva de desempenho em carga:

carregamento x rendimento. Após determinado o rendimento e o carregamento, diminui-se o rendimento de acordo com os seguintes critérios:

- Se o motor tiver mais de 10 anos de idade, reduzir um ponto;
- Se o motor foi rebobinado, reduzir dois pontos ou, se a temperatura à qual o motor foi exposto durante a rebobinagem for conhecida, reduzir conforme a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Redução do rendimento do motor rebobinado em função da temperatura utilizada no processo de rebobinagem.

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

Fonte: Pedraza e Rosas (2012, p.38).

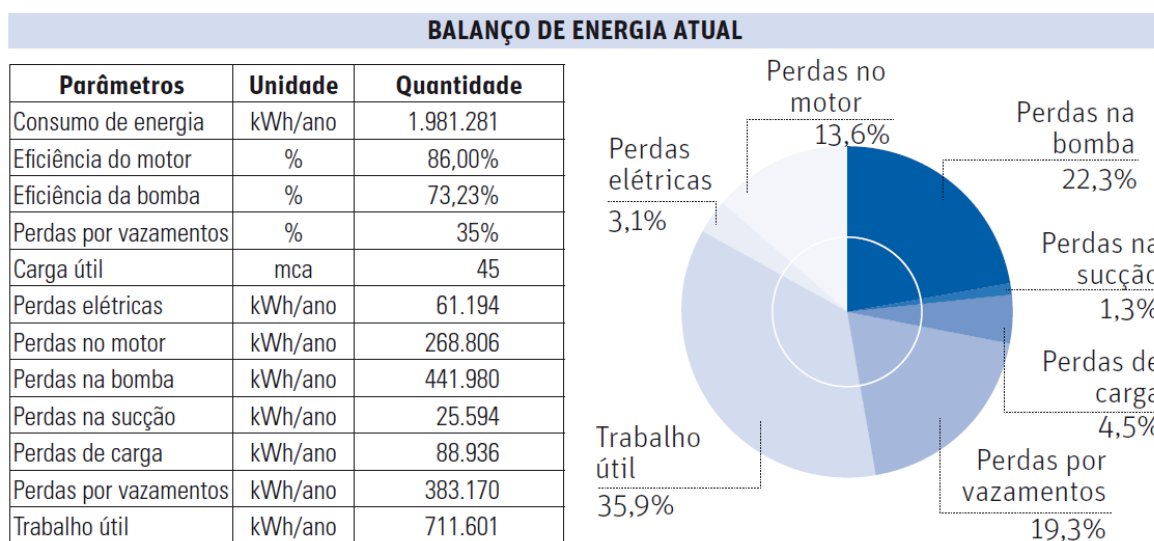
Para avaliação da rede hidráulica e de seu potencial de redução de perdas pelo efeito de cisalhamento da água sobre as paredes da tubulação, que podem atingir em alguns casos 30% da potência demandada pelo equipamento de bombeamento (PEDRAZA; ROSAS, 2012), a metodologia propõe a avaliação da velocidade do fluido. Se for observada uma velocidade dentro da tubulação superior a 2,0 m/s e ela for antiga e estiver em más condições, deve-se propor a sua substituição por uma de maior diâmetro, com a qual se consigam velocidades entre 1,0 e 1,5m/s. Se a tubulação estiver em bom estado, pode-se avaliar a instalação de uma nova tubulação paralela à antiga, de modo a atingir os mesmos níveis de velocidade. Com a definição dos parâmetros da nova tubulação, calcula-se a perda de carga reduzida e, conseqüentemente, a nova potência elétrica necessária para o sistema. Com a nova potência definida, propõe-se uma nova bomba que trabalhe na zona de máxima eficiência, cumprindo os seguintes requisitos:

- Seleção de um motor apropriado à bomba selecionada, cuidando para que o fator de carga ou carregamento esteja entre 70% e 80%;
- Verificação da eficiência do motor e da bomba selecionados;

- Cálculo da nova eficiência eletromecânica combinando ambas as eficiências por meio da equação do rendimento global do grupo (PEDRAZA; ROSAS, 2012);

A obtenção do resultado do desperdício de energia será dada pela diferença do consumo calculado para configuração atual pelo consumo calculado para a condição de maior eficiência. Com as eficiências e perdas dos diferentes elementos do sistema determinados, obtêm-se os valores dos consumos de energia em cada elemento do sistema. 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 (PEDRAZA; ROSAS, 2012). A Figura 2.3 ilustra o resultado de uma AE aplicada em um sistema de bombeamento.

Figura 2.3 Balanço de energia obtido pelo método.



Fonte: Pedraza e Rosas (2012, p.54).

Observa-se que para as perdas de carga compara-se o valor medido com a carga útil, dado pela 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, expressada em metros de coluna da água (PEDRAZA; ROSAS, 2012).

2.1.2 Foco na redução de gases do efeito estufa

O diagnóstico energético desenvolvido pelo projeto *WaCClim* tem como foco guiar as instalações de bombeamento de água e esgoto para a redução de emissão de gases do efeito estufa. Para o cálculo dos resultados foi criada uma ferramenta, a ECAM, que possibilita através da sua metodologia quantificar os gases do efeito estufa emitidos pela unidade analisada e indicar alternativas de redução através da gestão do uso de energia nas instalações de água e esgoto. O método tem como objetivo transformar os dados coletados dos sistemas analisados em uma fonte confiável de informação sobre performance energética e emissão de gases do efeito estufa (GIZ; IWA, 2017). A ferramenta permite analisar um sistema de bombeamento de maneira independente dos demais estágios do processo de produção de água (elevatória de água bruta), situação em que é possível focar no desperdício energético associado aos grupos motobombas e à rede hidráulica.

O cálculo do desperdício de energia se dá pela diferença entre a energia consumida pelo grupo motobomba existente no período atual e a energia consumida pelo grupo motobomba proposto (de maior eficiência) no período futuro. Ao novo grupo de maior eficiência é atribuído pelo usuário um valor de entrada de rendimento eletromecânico.

O diagnóstico de um sistema de bombeamento de água bruta realizado por este método faz o uso de dois indicadores para avaliação da condição de eficiência do sistema: o consumo específico normalizado (CEN) e a perda de carga unitária. Para o CEN a metodologia adota as referências do indicador *wOp19*, da IWA, classificando os valores de rendimento dos grupos de acordo com o tipo da bomba (submersível ou externa) e a sua potência, dividida em 4 intervalos (de 5,6 a 15,7, de 15,7 a 38, de 39 a 96 e maior que 96 kW), conforme Tabela 2.2.

Tabela 2.2 Referências adotadas pela metodologia para desempenho do GMB.

Intervalo de potências (kW)		Rendimento insuficiente	Rendimento aceitável	Bom rendimento
de	a			
5,6	15,7	igual ou inferior a 51,40%	de 51,40% a 82,03%	igual ou superior a 82,03%
15,7	38	igual ou inferior a 55,35%	de 55,35% a 85,99%	igual ou superior a 85,99%
39	96	igual ou inferior a 59,30%	de 59,30% a 88,47%	igual ou superior a 88,47%
> 96		igual ou inferior a 63,25%	de 63,25% a 88,47%	igual ou superior a 88,47%

Fonte: GIZ, IWA (2017, p.61)

Para a perda de carga unitária na adutora ligada ao grupo motobomba, a metodologia apresenta o cálculo da equação 2.1.

$$UHL = \frac{1000 (H_{amt} - H_g)}{L} \quad (2.1)$$

Em que UHL é a perda de carga unitária calculada pelo método, H_{amt} a altura manométrica, H_g a altura geométrica e L o comprimento da adutora.

O índice classifica o resultado obtido em quatro níveis de desempenho:

- Menor ou igual que 2 m/km, bom;
- Entre 2 e 4 m/km, aceitável;
- Maior que 4 m/km, insatisfatório;
- Demais valores, cálculo inconsistente.

Para estimar o desperdício de cada estação elevatória analisada, deve-se alterar o rendimento global do novo grupo motobomba, com um valor de entrada definido pelo usuário. Pelo método, a tubulação hidráulica não pode ser alterada, não compondo a base de cálculo do desperdício energético do sistema analisado. Isso se deve ao fato de o cálculo da perda de carga unitária ser feito pela diferença entre a altura manométrica e o desnível geométrico, sem a composição de parâmetros característicos da tubulação, como diâmetro e coeficiente de rugosidade. A determinação do desperdício de energia para a condição de maior eficiência, portanto, é realizado apenas com a alteração do parâmetro de rendimento do grupo motobomba.

2.1.3 Custos evitados para o sistema elétrico

O princípio conceitual do diagnóstico energético pelo método de custos evitados da ANEEL é a redução da potência e energia da rede elétrica da distribuidora. Ele tem como objetivo promover o uso eficiente e racional de energia elétrica por meio de projetos que demonstrem a importância e a viabilidade econômica de ações de combate ao desperdício e de melhoria da eficiência energética de equipamentos, processos e usos finais de energia (FERREIRA; GONÇALVES, 2019). Esse método se baseia na determinação da eficiência do sistema e no cálculo da energia consumida e demanda na ponta nos períodos *ex-ante* (antes das ações de eficiência) e *ex-post* (depois das ações de eficiência), para assim, no período de um ano, calcular os benefícios e viabilidade do projeto. Os resultados dessa metodologia se baseiam no cálculo da redução de demanda na ponta (RDP) e da energia economizada em um ano (EE). A identificação de oportunidades de economia de energia podem ser uma ou várias para esse tipo de método. Para sistemas de bombeamento, Gonçalves e Ferreira (2019) destacam as seguintes medidas de eficiência energética que obtêm resultados satisfatórios de energia economizada e de demanda retirada na ponta:

- Reabilitação ou substituição de motobombas contemplando a substituição de motores, substituição de conjuntos motobomba, realização e limpeza de conjuntos motobomba em poços e redimensionamento das canalizações de sucção e recalque;
- Melhoria de carga através de inversores de frequência;
- Redução de perdas de água e do volume bombeado;
- Aumento do volume reservado;

Sobre a primeira ação de eficiência energética, Ferreira e Gonçalves (2019) citam que ações de limpeza dos grupos e de redimensionamento de tubulações não devem ser adotadas isoladamente nesse tipo de diagnóstico, entretanto, se adotadas em conjunto com as ações de substituição ou reparo de motores e/ou bombas essas medidas potencializam os resultados de energia evitada (EE) e retirada de demanda na ponta (RDP) e podem ser computados.

Para o cálculo dos índices RDP e EE em uma ação de reabilitação ou substituição de motobombas, determina-se o carregamento médio do motor nos períodos *ex-ante* e *ex-post*. O carregamento é dado pela razão entre a potência requerida, no eixo, e a potência nominal do motor. Após, é calculado o rendimento do motor no ponto de carregamento, sendo obtido diretamente na curva rendimento

versus carregamento dado pelo fabricante. A energia consumida no período de um ano será, então, a potência média utilizada (potência elétrica no ponto de carregamento com o rendimento correspondente) multiplicada pelo número de horas de funcionamento anual. O carregamento representa uma das principais mudanças do projeto, pois espera-se que o novo motor, por ser de maior rendimento, tenha uma potência nominal menor em relação ao anterior (GONÇALVES; FERREIRA, 2019). Além disso, o cálculo de uma potência requerida menor, em decorrência do aumento do rendimento da bomba no ponto hidráulico analisado, possibilita uma redução na potência nominal do motor, nas horas de funcionamento do sistema ou até na supressão de um grupo bombeador para compor o sistema. Para projetos deste tipo, é importante tomar o cuidado para não definir novos motores com carregamento muito altos que possam impor alguma limitação futura ao sistema.

Como maneira de auxiliar no cálculo do carregamento e rendimento do motor, o CEPEL propõe a utilização de um software, denominado BD Motor, criado para auxiliar consumidores industriais a minimizar o alto consumo de energia de seus motores no setor industrial do país. Ele agrega um banco de dados de motores de indução trifásicos, ferramentas de análise de carregamento de motores, e ferramentas de análise de retorno de investimentos em soluções eficientes para soluções na área e é indicado para utilização no diagnóstico de custos evitados ao sistema elétrico.

Por se tratar de um diagnóstico que foca na redução de energia e potência demandada da rede elétrica, principalmente pela substituição de equipamentos por novos de alto rendimento, no diagnóstico devem ser incluídos dados sobre a vida útil dos equipamentos. Conforme Ferreira e Gonçalves (2019) a vida útil de equipamentos eletromecânicos pode variar de 5 a 15 anos, dependendo do contexto.

2.1.4 Manutenção e substituição de equipamentos

O PROEESA propõe um método para monitoramento e pré-diagnóstico das eficiências de sistemas elevatórios de água adequada às condições existentes em campo e que geralmente não são ideais. O método pretende dotar os prestadores de serviço com uma ferramenta de apoio à decisão para intervenções associadas à manutenção e/ou à substituição de equipamentos que possibilitem ganhos econômicos (FERREIRA; DE OLIVEIRA, 2017). Ele é indicado para o controle do rendimento de estações elevatórias usando a informação existente e disponível. O

processo é considerado um pré-diagnóstico da operação de estações elevatórias (unidades consumidoras de eletricidade), que identificará aquelas com maior potencial de economia. Porém, para efeitos de justificar investimentos avultados é necessário sustentar a decisão com um diagnóstico embasado em valores medidos e com elevada exatidão por meio de auditorias energéticas e diagnósticos em campo (FERREIRA; DE OLIVEIRA, 2017).

O método calcula inicialmente o indicador CEN. Para o cálculo do rendimento do grupo motobomba, utiliza-se a equação 2.2, uma simplificação que permite a conversão do indicador em rendimento percentual, considerando a potência e a vazão constantes ao longo do período de análise.

$$\eta_{GMB(\%)} = \frac{0,2725}{CEN} \quad (2.2)$$

Em que o *CEN* é calculado com o valor médio da altura manométrica para um período mínimo de análise de 2 meses.

Após o cálculo, utiliza-se como referência para avaliação do indicador CEN a norma NOM-006-ENER-2015 (norma oficial mexicana publicada pela secretaria de energia do país) que classifica o rendimento do grupo motobomba com motor externo conforme o seu tipo e sua potência, de acordo com a Tabela 2.3

Tabela 2.3 Valores esperados de rendimento.

Intervalo de potências (kW)		Valores sem credibilidade	Rendimento insuficiente e baixa confiabilidade	Rendimento insuficiente	Rendimento mediano	Bom rendimento	Bom rendimento, mas baixa confiabilidade	Valores sem credibilidade
de	a							
5,6	15,7	inf. 16%	de 16 a 20%	de 20 a 52%	de 52 a 64%	de 64 a 83%	de 83 a 120%	sup. a 120%
15,7	38	inf. 16%	de 16 a 20%	de 20 a 56%	de 56 a 68%	de 68 a 83%	de 83 a 125%	sup. a 125%
38	96	inf. 16%	de 16 a 20%	de 20 a 60%	de 60 a 72%	de 72 a 83%	de 83 a 131%	sup. a 131%
96	261	inf. 16%	de 16 a 20%	de 20 a 64%	de 64 a 72%	de 72 a 83%	de 83 a 131%	sup. a 131%

Fonte: Ferreira e De Oliveira (2017, p. 21)

Para cada valor de entrada obtido, a ferramenta permite que o usuário insira o seu nível de confiabilidade. A confiabilidade do dado de entrada é dada em porcentagem de erro admitido relativo à magnitude da grandeza em questão. Sempre que pelo menos um dos três valores de entrada for fruto de uma estimativa (volume, energia e altura manométrica), deve-se atentar para a confiabilidade do resultado obtido. A propagação dos erros associados a cada uma das três grandezas de entrada resulta no cálculo da incerteza do rendimento, com a aplicação da função de propagação de incerteza na equação que calcula o rendimento, conforme as equações 2.3 e 2.4 (FERREIRA; DE OLIVEIRA, 2017).

$$\eta_{GMB(\%)} = 0,2725 \frac{V_{bomb} H_{man}}{E_{cons}} \quad (2.3)$$

Em que $\eta_{GMB(\%)}$ é o rendimento do grupo motobomba, V_{bomb} é o volume elevado no período de referência, H_{man} é a altura manométrica média de bombeamento e E_{cons} a energia consumida no período de referência.

$$\sigma_n = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta_{GMB}}{\partial V_{bomb}} \sigma_V\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_{GMB}}{\partial H_{man}} \sigma_H\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_{GMB}}{\partial E_{cons}} \sigma_E\right)^2} \quad (2.4)$$

Em que δ_n é o erro associado ao rendimento, σ_V é o erro associado ao volume elevado no período de referência, σ_H é o erro associado à altura manométrica média de bombeamento e σ_E é o erro associado à energia consumida no período de referência.

Calculando-se as derivadas parciais da função η_{GMB} , obtém-se a equação 2.5.

$$\sigma_n = \sqrt{\left(0,2725 \frac{H}{E} \sigma_V\right)^2 + \left(0,2725 \frac{V}{E} \sigma_H\right)^2 + \left(0,2725 \frac{VH}{E^2} \sigma_E\right)^2} \quad (2.5)$$

No método, a incerteza do rendimento é utilizada para se determinar a confiabilidade do *payback* simples calculado da razão do custo total da intervenção

pele potencial de economia. A fim de minimizar os riscos com altos investimentos dispendidos na substituição de equipamentos, deve-se levar em conta a confiabilidade da informação obtida (FERREIRA; DE OLIVEIRA, 2017). Assim, para facilitar uma leitura de confiabilidade do *payback* foi desenvolvida uma classificação de estrelas conforme o Quadro 2.2.

Quadro 2.2 Classes de confiabilidade do *payback* expressa em estrelas

Nível de Confiança do <i>Payback</i>	Avaliação de Confiança
Elevado – o erro associado é inferior a 20%	★★★
Mediano – erro associado maior ou igual que 20% e inferior a 40%	★★
Baixo - erro associado é maior ou igual que 40% e inferior a 100%	★
Sem classificação – erro associado superior a 100%	-

Fonte: Ferreira e De Oliveira (2017, p. 28)

Em que a confiança do *payback* é dada pela equação 2.6.

$$C_{\text{payback}} = \frac{D_{\text{payback}}}{Pe} 100 \quad (2.6)$$

Em que C_{payback} é a própria confiança do *payback*, D_{payback} é seu desvio padrão e Pe é o *payback* esperado.

Aplicando-se a metodologia se obtém as seguintes informações úteis para a tomada de decisão em relação a medidas de manutenção preventiva e substituição de equipamentos:

- Avaliação das instalações elevatórias em relação ao seu desempenho hidroenergético (satisfatório, mediano e insatisfatório)
- Priorização instalações elevatórias visando a manutenção preventiva com base no potencial de economia mensal (R\$/mês) e (kWh/mês);
- Priorização instalações elevatórias visando a substituição de equipamento eletromecânico com base no *payback* simples (meses);

Nas situações em que há inversores de frequência, os três dados em análise (volume de água elevado, energia consumida e altura manométrica) são variáveis em função da rotação da bomba. Não se considera que o uso de inversores de frequência invalide o cálculo realizado do consumo específico normalizado, pois duas variáveis, o volume de água e a energia consumida são medidas e a altura manométrica necessária é a prevista no projeto para abastecer o reservatório ou da rede, em caso de *boosters* (FERREIRA; DE OLIVEIRA, 2017).

O potencial de redução energética, por sua vez, é calculado pela diferença de rendimentos, ao atribuir-se um valor para o rendimento esperado após o período de intervenção. Destaca-se nesta planilha o cálculo da incerteza associada ao resultado do rendimento, valor que é utilizado para determinar a qualidade da informação quando se apresenta o potencial de economia da ação de melhoria de eficiência do grupo motobomba. Caso o valor da incerteza seja muito grande, o *payback* mínimo do investimento aumentará, fazendo com que o projeto tenha que apresentar maior potencial de redução de energia para ser considerado viável.

Para definição do valor da meta do rendimento, recomenda-se usar valores abaixo dos indicados pelos fabricantes de motobombas, pois esses são obtidos em condições laboratoriais que dificilmente se replicam em situações de campo. Os valores são apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 Relação dos valores de rendimento para o intervalo de potência dos grupos.

Intervalor de potências (kW)		Rendimentos para conjuntos com motor externo (%)	Rendimentos para conjuntos com motor submersível (%)
de	a	(valor conservador)	(valor conservador)
5,6	15,7	64%	50%
15,7	38	68%	57%
38	96	72%	62%
96	261	72%	63%

Fonte: Ferreira e de Oliveira (2017, p.23).

2.1.5 Método UFPB Eletrobras PROCEL

O diagnóstico hidroenergético proposto por (GOMES; CARVALHO, 2012) visa identificar as ações de eficiência energética a serem implantadas em um sistema de

saneamento, sendo ferramenta necessária para definir os estudos a serem executados para o melhoramento ou modernização desses sistemas (GOMES; CARVALHO, 2012).

As ações de eficiência resultantes do diagnóstico pela metodologia proposta são classificadas como ações operacionais para a redução do consumo de energia elétrica em sistemas de bombeamento. Segundo o método, elas podem ser agrupadas em:

- Diminuição da potência de equipamentos, que contempla a substituição de motores e/ou bombas nas estações elevatórias, a redução da altura manométrica do sistema de bombeamento e a redução do volume de água fornecido.

- Controle operacional: que contempla a utilização de bombas com velocidade variável (conversores de frequência) e alteração nos procedimentos operacionais de ETAs.

Além dessas ações, Gomes e Carvalho (2012) ressalta haver outras ações estruturantes voltadas a redução dos custos com energia elétrica, como, por exemplo, a alteração no sistema de bombeamento e reservação, que permite desligar ou reduzir o período de funcionamento dos grupos motobombas em horários de ponta, por exemplo. Destaca-se, contudo, que reservatórios elevados são geralmente muito caros, suas implantações somente são viáveis se a economia de energia elétrica, proporcionada pelas paradas das bombas nos horários de ponta, compensar os custos de investimento destes reservatórios.

Quanto a medidas de substituição de motores e/ou bombas nas estações elevatórias, Gomes e Carvalho (2012) destaca que a troca dos motores de baixo rendimento ou de rendimento padrão por máquinas de alto rendimento é, normalmente, a ação mais direta para a diminuição do consumo de energia elétrica nos sistemas de bombeamento, sendo comum as companhias de abastecimento terem como primeira ação dos departamentos de eficiência energética e operacional a substituição de motores antigos por motores de alto rendimento. É feito também a recomendação que, em estações elevatórias que possuem dois ou mais conjuntos motobombas de pequena potência operando em paralelo e com regularidade, que se faça o estudo de substituição por apenas um conjunto. Dessa maneira, é possível diminuir o consumo energético mantendo a mesma vazão.

Quanto a medidas de redução de altura manométrica, destaca-se que para sistemas de bombeamento as perdas de energia excessivas se concentram no

barrilete e/ou nas adutoras. Conforme Gomes e Carvalho (2012), as principais medidas para reduzir a perda de energia nas tubulações de recalque são: diminuição da rugosidade mediante a limpeza ou revestimento das paredes internas dos tubos, substituição da tubulação por outra de maior diâmetro e implantação de nova tubulação em paralelo a já existente.

Quanto a redução do volume de água fornecido, destaca-se como alternativa diminuir as pressões e vazões do sistema. Isso faz com que as perdas reais de água sejam minimizadas. As maneiras para redução dessas perdas são através do controle de pressão, controle de vazamentos e reabilitação da infraestrutura. Sobre esse último ponto, Gomes e Carvalho (2012) menciona que a grande maioria dos sistemas de abastecimento de água existentes no Brasil e no mundo foram projetados e construídos a várias décadas. Segundo o autor, tubulações com vida útil de 30 ou 40 anos, estão funcionando há mais de 50, 60 ou até 100 anos. A alternativa ideal para os sistemas que possuem problemas de operação seria a reabilitação de todos os componentes hidráulicos deteriorados e obsoletos; entretanto, esta solução não é viável do ponto de vista econômico. O autor então ressalta que as intervenções de reabilitação de sistemas de distribuição de água devem ser precedidas de uma análise da viabilidade técnica e econômica das possíveis alternativas que impliquem em mudanças nas estruturas e nos processos operacionais (GOMES; CARVALHO, 2012).

Para determinar quais dessas ações de eficiência energética devem ser adotadas é proposto um método de diagnóstico hidroenergético baseado em uma lista de tarefas básicas a serem cumpridas, disponível no material do autor. Como exemplos podemos citar a medição das variáveis elétricas e hidráulicas de maneira simultânea para o cálculo do rendimento dos conjuntos motobomba e a medição de parâmetros das tubulações para aferição do desempenho hidráulico dos sistemas. O autor destaca que, nas instalações de maior porte e responsabilidade, onde geralmente o custo da energia elétrica é bastante significativo para o operador do sistema, a ausência de monitoramento contínuo não se justifica, nem mesmo por razões econômicas, sendo imprescindível um longo período de dados para análise, e não somente medições instantâneas dos parâmetros.

De maneira resumida, a metodologia proposta pelo autor pode ser dividida em:

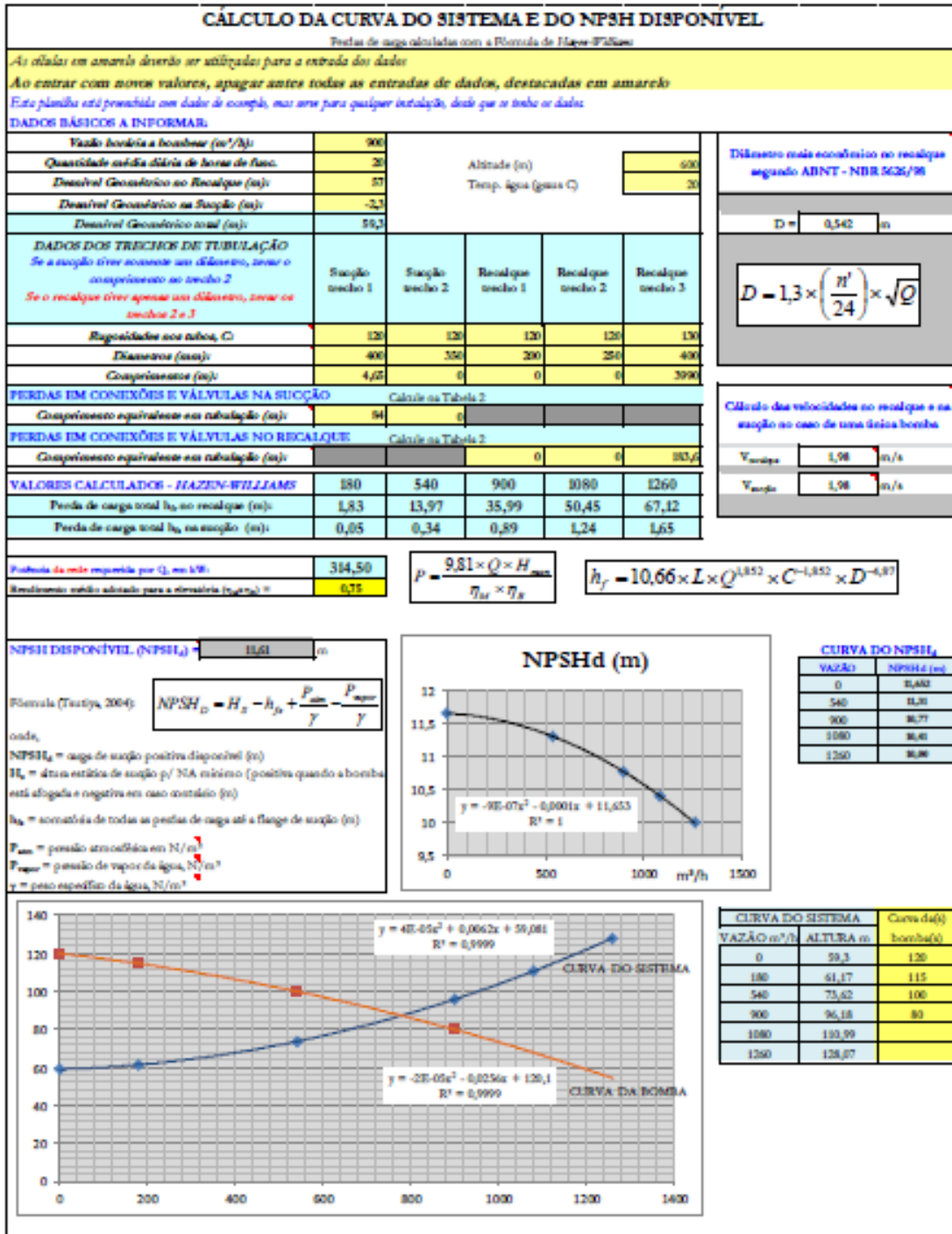
-Planejamento e recomendações para levantamento de campo em sistemas de bombeamento: que consiste na etapa antes do deslocamento da mão de obra para

campo, onde haverá a realização das medições. Aqui, documentos como projetos, incluindo plantas elétricas e hidráulicas, diagramas, faturas de energia e procedimentos de operação devem ser reunidos. Além disso, dados dos volumes bombeados, produzidos ou disponibilizados, e informações sobre os medidores de vazão utilizados e dados de calibração ou aferição simples. As análises hidráulicas precisarão de séries históricas de dados, as mais extensas possíveis, de preferência de um ano ou mais. Além dos dados em si, os métodos utilizados pelo cliente do diagnóstico, para obtenção dos volumes bombeados, precisam ser conhecidos, incluindo informações de calibração ou aferição em campo dos medidores. Previamente aos levantamentos de campo, a curva do sistema, bem como a curva do NPSH disponível, pode ser calculada teoricamente, por meio do aplicativo criado especificamente para a metodologia. Com isso, é possível a comparação com as condições reais medidas em campo. A Figura 2.4 ilustra o aplicativo citado.

- Ensaio de campo em sistemas de bombeamento: A verificação do desempenho das condições reais de funcionamento de conjuntos elevatórios por meio de medições feitas em campo. Conforme Gomes e Carvalho (2012), essas medições permitem que os resultados de campo possam ser comparados com aqueles previstos nos catálogos dos fabricantes e/ou pelo projeto do sistema (curva teórica levantada na etapa anterior) e assim dê subsídios a projetos de melhoria da eficiência e/ou a formulação da base de regras práticas, para conformações operacionais mais eficazes. O autor cita que, para ter dados consistentes, é necessário que as medições das grandezas elétricas, hidráulicas e mecânicas sejam simultâneas, a fim de caracterizar o estado do sistema de forma completa. Determina-se a medição de 5 pontos na curva do sistema e da bomba para medição, sendo o de *shut-off*, 25%, 50%, 75% e 100% da vazão do conjunto pela regulagem através do estrangulamento por meio de válvulas.

Com os cálculos realizados e os dados medidos, determina-se a curva da bomba e os rendimentos do equipamento para cada ponto de operação e condição registrados (GMB operando sozinho e em paralelo, por exemplo).

Figura 2.4 Planilha de cálculo da curva teórica do sistema e do NPSH a partir dos dados obtidos com diagramas e projetos. Nela, calcula-se a perda de carga na sucção e descarga por Hazen Williams.



Fonte: Gomes e Carvalho (2012, p. 151).

O Quadro 2.3 resume os métodos apresentados vinculados ao escopo do trabalho.

Quadro 2.3 Resumo dos métodos apresentados.

Princípio Conceitual	Objetivos	Abrangência	Oportunidades (ações de eficiência)	Resultados
Auditoria Energética (PEDRAZA; ROSAS, 2012)				
<p>Balanco de Energia em sistemas de bombeamento baseado no cálculo da energia consumida e das perdas em cada componente do processo bombeamento.</p>	<p>Identificação das medidas técnicas e administrativas rentáveis para economia de energia na instalação, como parte de um desenvolvimento de um plano de eficiência energética.</p>	<p>Cálculo das perdas energéticas em cada componente do processo de bombeamento de maneira separada, permitindo distinguir que quantidade de energia se transforma em trabalho útil e que parcela é desperdiçada. Pelo balanço de energia é possível distinguir onde se concentram as maiores perdas do sistema.</p>	<p>Economia em tarifas de fornecimento, redução das perdas nas instalações elétricas, melhora de rendimento em motores elétricos, melhora de rendimento em bombas, redução das perdas mecânicas, redução de vazamentos e perdas de carga, melhora da operação pelo uso de conversores de frequência, melhora da manutenção, substituição do fornecimento de energia, mudança de tecnologias e melhora da iluminação.</p>	<p>Balanco de energia do sistema, com a contribuição de cada componente para o sistema, cuja finalidade é identificar os elementos do sistema onde estão os maiores consumos e servir de base para o planejamento das medidas de economia correspondentes.</p>

Princípio Conceitual	Objetivos	Abrangência	Oportunidades (ações de eficiência)	Resultados
ECAM – Ferramenta de diagnóstico com foco na redução de gases do efeito estufa (GIZ; IWA, 2017)				
<p>Calcular a emissão de gases do efeito estufa em todas as etapas do processo de um sistema de saneamento por um diagnóstico energético que avalia a condição atual do sistema analisado.</p>	<p>Guiar as instalações de bombeamento de água e esgoto para a redução de emissão de gases do efeito estufa.</p>	<p>Para elevatórias de água, o método calcula o desperdício energético associado a grupos motobombas de baixo rendimento, através da análise do CEN. Não é calculado o desperdício decorrente da configuração dos parâmetros em tubulações.</p>	<p>Redução do consumo de energia do sistema pela melhora do rendimento do grupo motobomba analisado.</p>	<p>Avaliação da condição atual do sistema pelo uso de indicadores de desempenho:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Consumo específico (CE) em kWh/m³; - Consumo específico normalizado (CEN), com a classificação de eficiência de acordo com a wOp19, da IWA; - Perda de carga unitária da adutora (m/km), com a classificação de desempenho em quatro níveis. <p>Cálculo do desperdício de energia e conversão em kg CO₂ emitidos na atmosfera para os resultados de melhoria nos GMBs.</p>

Princípio Conceitual	Objetivos	Abrangência	Oportunidades (ações de eficiência)	Resultados
Diagnóstico energético sob a ótica de custos evitados para o sistema elétrico PROPEE ANEEL (FERREIRA; GONÇALVES, 2019)				
<p>Redução da potência e energia da rede elétrica da distribuidora para benefício do sistema elétrico nacional.</p>	<p>Promover o uso eficiente e racional de energia elétrica por meio de projetos que demonstrem a importância e a viabilidade econômica de ações de combate ao desperdício e de melhoria da eficiência energética de equipamentos, processos e usos finais de energia</p>	<p>Cálculo do consumo de energia de um grupo motobomba nos períodos antes das ações de eficiência (<i>ex-ante</i>) e pós as ações de eficiência (<i>ex-post</i>), pelo carregamento do motor e o seu rendimento para nova condição hidráulica determinada.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Reabilitação ou substituição de motobombas contemplando a substituição de motores, substituição de conjuntos motobomba, realização e limpeza de conjuntos motobomba em poços e redimensionamento das canalizações de sucção e recalque; - Melhoria de carga através de inversores de frequência; - Redução de perdas de água e do volume bombeado; - Aumento do volume reservado; 	<p>Índices de redução de energia na ponta (RDP) e de energia economizada (EE).</p>

Princípio Conceitual	Objetivos	Abrangência	Oportunidades (ações de eficiência)	Resultados
Planilha PROEESA de monitoramento e pré diagnóstico da eficiência eletromecânica (FERREIRA; DE OLIVEIRA, 2017)				
<p>Apoio à decisão para intervenções de manutenção dirigida e para substituição de equipamentos, pautado no cálculo de indicadores de rendimento e comparando os valores diagnosticados com referências de desempenho relativos a bombas e motores.</p>	<p>Realização de um monitoramento e pré-diagnóstico de eficiência eletromecânica, monitorando o rendimento eletromecânico e estimando os potenciais de economia em sistemas de bombeamento.</p>	<p>Determinação do CEN com o valor médio da altura manométrica para um período mínimo de análise de 2 meses. Do cálculo do CEN determinação do rendimento do GMB. Cálculo do potencial de redução energética pela melhoria do rendimento dos GMBs atribuindo-se um valor para o rendimento esperado após o período da ação de eficiência. Não análise os parâmetros das tubulações.</p>	<p>Intervenções de manutenção dirigida e para a substituição de equipamentos (motores e bombas) de maior rendimento.</p>	<p>Avalia a situação atual do desempenho do GMB pelo CEN e indica a necessidade de agendar ou realizar a manutenção preventiva dos GMBs, reestabelecendo seu rendimento ótimo. Indica, pela análise do payback simples, a viabilidade de substituição do equipamento. Prioriza as unidades com maior urgência de intervenção.</p>

Princípio Conceitual	Objetivos	Abrangência	Oportunidades (ações de eficiência)	Resultados
Diagnóstico hidroenergético rede LEHNS (GOMES; CARVALHO, 2012)				
<p>Determinação do rendimento eletromecânico de cada GMB de um sistema de bombeamento, levando em conta os diferentes regimes de operação e combinações de paralelismo.</p> <p>Determinação das perdas nas tubulações e de seus parâmetros determinantes para melhoria.</p>	<p>Cálculo teórico da curva do sistema, bem como da curva do NPSH disponível, possibilitando comparar as informações de projeto com as condições reais medidas em campo Levantamento em campo do rendimento dos conjuntos motobombas, bem como das curvas características de cada bomba e levantamento em campo do coeficiente C de Hazen Willians.</p>	<p>Medição dos parâmetros hidroenergéticos de um sistema de bombeamento, desde o poço de sucção até o processo final de recalque.</p>	<p>Ações operacionais para a redução do consumo de energia elétrica em sistemas de bombeamento, agrupadas em:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Diminuição da potência de equipamentos, que contempla a substituição de motores e/ou bombas nas estações elevatórias, a redução da altura manométrica do sistema de bombeamento e a redução do volume de água fornecido. - Controle operacional: que contempla a utilização de bombas com velocidade variável (conversores de frequência) e alteração nos procedimentos operacionais de ETAs. 	<p>Obtenção do rendimento dos GMBs e o desempenho hidráulico das tubulações pelo cálculo das perdas na sucção e descarga. Obtenção do coeficiente C de Hazen Willians para verificação do potencial.</p>

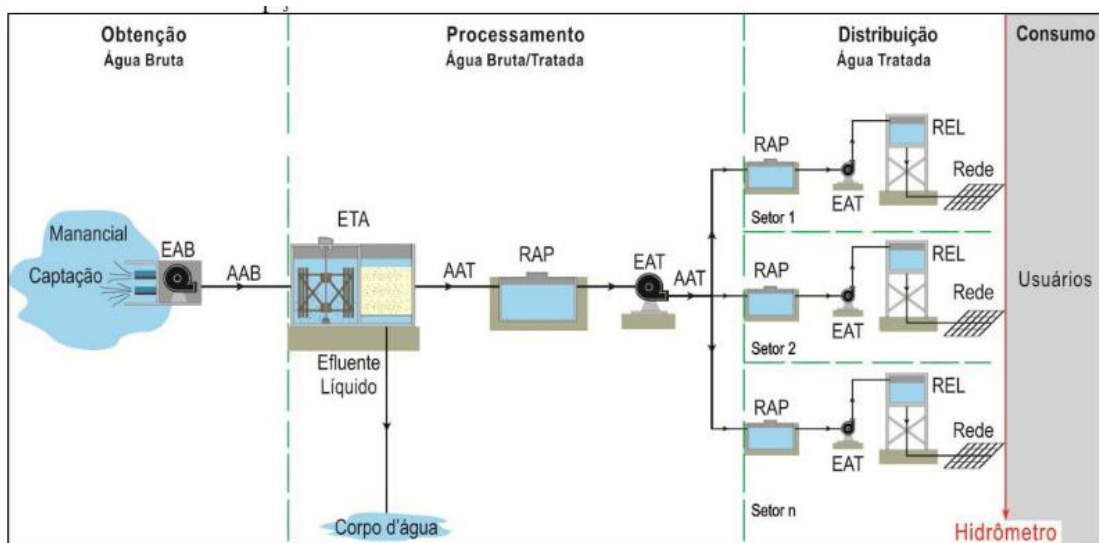
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada a fundamentação teórica dos assuntos referentes às etapas de uma metodologia de diagnóstico energético de estações elevatórias de água. Propõe-se com isso estabelecer alguns aspectos e simplificações considerados tanto para os cálculos nas áreas de mecânica dos fluidos, hidráulica e eletrotécnica, quanto para obtenção dos valores de rendimento do conjunto motobomba, das perdas nas tubulações e da redução de consumo de energia e demanda com a adoção das ações de eficiência energética propostas. Além disso, apresentam-se alguns conceitos básicos do Protocolo Internacional de Medição e Verificação (PIMVP) adotados para análise de eficiência desses sistemas.

3.1 Sistemas de abastecimento de água

Os sistemas de abastecimento de água são estruturas de engenharia necessárias para distribuir água potável para as populações a serem atendidas, compostos pelas unidades de captação, tratamento, estações elevatórias, adutoras, reservatórios, redes de distribuição e as ligações prediais (GOMES, 2021). A Figura 3.1 ilustra o sistema e seus componentes.

Figura 3.1 Concepção do sistema de abastecimento de água com todas unidades.



Fonte: Pereira (2014, p.37)

3.1.1 Estações Elevatórias

As estações elevatórias, também conhecidas como de recalque ou de bombeamento (GOMES, 2021), consistem no conjunto de obras e equipamentos destinados a recalcar a água pressurizada de um ponto com cota topográfica inferior até um ponto com cota topográfica superior. Destinam-se, portanto, a fornecer carga piezométrica ao sistema. Elas são compostas por tubulações, válvulas, acessórios, bombas e motores. Nos sistemas de abastecimento de água há geralmente várias estações elevatórias, tanto para o recalque de água bruta (EAB), como para o recalque de água tratada (EAT). Também é comum a estação elevatória tipo “*booster*” que se destina a aumentar a pressão e/ou vazão em adutoras ou redes de distribuição de água (TSUTIYA, 2004). São nessas estações que se dá aproximadamente 95% dos consumos de energia no saneamento (NICOLA *et al.*, 2018).

3.1.2 Adutoras

O transporte de água entre os mananciais, as estações de tratamento de água e os reservatórios são realizados por meio de tubulações, também chamadas linhas adutoras, que conduzem a água por recalque e/ou gravidade (GOMES, 2021). As adutoras não distribuem a água aos consumidores, pois se destinam a conduzir água entre as unidades que precedem a rede de distribuição (TSUTIYA, 2004)

3.2 Cálculos e aspectos em mecânica dos fluidos e hidráulica em sistemas de bombeamento

No setor de saneamento é comum a necessidade de mover água contra a ação da gravidade através de tubulações pressurizadas. Para isto, faz-se o uso de bombas hidráulicas, que do ponto de vista energético são máquinas que convertem energia mecânica, produzida por um motor, em energia hidráulica, na forma de pressão e energia cinética e/ou potencial (GOMES, 2012).

3.2.1 Grupos Motobomba

No contexto das máquinas de fluxo, as bombas são dispositivos que convertem trabalho mecânico em energia de fluido. O trabalho pode ser oriundo de uma fonte

qualquer, sendo que atualmente, graças à alta eficiência, larga faixa de potência e praticidade, predomina o uso do motor elétrico. Ao conjunto do motor acoplado à bomba denomina-se grupo motobomba ou GMB. Na prática, o GMB fornece um campo de pressões (e vazões correspondentes) ao fluido, sendo que é a tubulação que transforma esta pressão na forma da energia final desejada (GOMES, 2012).

Nos sistemas de bombeamento de água, as turbobombas rotativas, particularmente as centrífugas, predominam de forma absoluta. Além de cobrirem grandes faixas de vazão e pressão, possuem ótimos rendimentos e baixos custos de instalação, operação e manutenção (GOMES, 2012).

3.2.2 Propriedades e simplificações adotadas

Para os cálculos na área da mecânica dos fluidos e hidráulica aplicados a sistemas de bombeamento, é possível adotar algumas simplificações sem prejuízo aos resultados que compõe o diagnóstico operacional desses sistemas. Em relação ao fluido, água, considera-se:

- Newtoniano (relação linear diretamente proporcional entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidades dessa distribuição ou de sua taxa de deformação);

- Incompressível (densidade constante, pelos estudos não envolverem altos valores de pressões);

- Peso específico de 9810 N/m^3 a $T=15^\circ\text{C}$ e 1 atm.

Em relação ao escoamento, considerou-se:

- Em meio contínuo e homogêneo;

- Uniforme, ou seja, quando em um instante qualquer os vetores das velocidades são os mesmos em todos os pontos do escoamento;

- Unidimensional, desprezando-se as variações de velocidade e outras grandezas transversais à direção do escoamento. As condições numa seção transversal são dadas em função de valores médios de velocidade, densidade e outras propriedades.

- Em regime permanente.

Com a utilização dessas premissas, é possível calcular os parâmetros hidráulicos importantes para a análise dos sistemas de bombeamento.

3.2.3 Velocidade nas tubulações

Para o cálculo da velocidade do escoamento nas tubulações, considera-se que a velocidade média é a velocidade constante que produz a mesma vazão proporcionada pela integração do perfil de velocidades real (GOMES, 2012), dada pela equação 3.1.

$$v_{média} = \frac{Q}{A} = \frac{1}{A} \int_A v \, dA \quad (3.1)$$

Em que $v_{média}$ é a velocidade média do fluido, A é a área de seção transversal do tubo, Q a vazão volumétrica e v o perfil de velocidades ao longo do tubo.

Considera-se também o princípio de conservação da massa, em que a massa se conserva para as duas seções transversais da tubulação, a de entrada e da saída. Em escoamentos de regime permanente é válido presumir, portanto, que a massa que penetra na tubulação é igual à massa que sai. Como o fluido é considerado incompressível, a conservação da massa pode ser estendida para volume, concluindo-se que a vazão volumétrica também se conserva (GOMES, 2012). A equação 3.2 apresenta a relação quando um fluido passa por um tubo de extremidades 1 e 2.

$$Q = v_{média\ 01} \cdot A_1 = v_{média\ 02} \cdot A_2 \quad (3.2)$$

Em que esta é a forma mais simples da equação da continuidade,

3.2.4 Perdas de carga

Para o cálculo das perdas de carga a partir de dados medidos na instalação, considera-se a equação da energia para um trecho de tubulação sem bombas ou turbinas.

$$H_f = \left(p_1 + \frac{v_{média01}^2}{2g} \right) - \left(p_2 + \frac{v_{média02}^2}{2g} \right) + \Delta H_g \quad (3.3)$$

Em que o termo H_f é a perda de carga total, p_1 é a pressão no ponto 1, p_2 é a pressão no ponto 2 do tubo, $v_{média01}$ é a velocidade média na seção do ponto 1, $v_{média02}$ é a velocidade média na seção do ponto 2, g aceleração da gravidade e ΔH_g o desnível geométrico (ou a diferença de cotas) entre os pontos 1 e 2.

Essa equação pode ser obtida pela 1ª lei da Termodinâmica, considerando-se o escoamento adiabático ($Q = 0$), em que os termos H_b (entalpia resultante da energia adicionada por uma bomba no trecho) e H_t (entalpia resultante da retirada de energia do fluido através de uma turbina no trecho) denotam o trabalho (W) e são considerados nulos - ausência de calor adicionado ou retirado do fluido. O termo H_f representa o acréscimo da energia interna (U) ao fluido, ocasionado pelo atrito viscoso durante o escoamento na tubulação. Sem as simplificações mencionadas, a equação da 1ª lei da Termodinâmica é representada por:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_{média01}^2}{2g} + z_1 + H_b - H_t - H_f = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_{média02}^2}{2g} + z_2 \quad (3.4)$$

Consideram-se as perdas de carga lineares ou distribuídas (H_l), que resultam do atrito interno do fluido e o deste com as paredes do tubo e as perdas singulares ou localizadas (H_s), que ocorrem nos acessórios associados, tem-se a equação 3.5, para o cálculo da perda resultante H_f da soma desses dois componentes.

$$H_f = H_l + H_s \quad (3.5)$$

Para este trabalho, que propõe o cálculo das perdas em adutoras e redes de instalações de água fria, com diâmetros superiores a 50 mm, utilizou-se a fórmula de *Hazen Williams*, dada sua simplicidade e ampla utilização neste contexto (GOMES, 2012). A perda de carga linear é então calculada pela equação 3.6.

$$H_l = 10,66 L Q^{1,852} C^{-1,852} D^{-4,87} \quad (3.6)$$

Em que H_l é a perda de carga linear no conduto, L é o comprimento da tubulação, Q a vazão do fluido, C o coeficiente de rugosidade característico do

conduto e D o diâmetro interno do conduto. Destaca-se, na equação, os parâmetros C e D , pois são estes que podem ser alterados por uma ação de reparo ou substituição de rede, sendo passíveis de análise para um projeto de melhoria em eficiência energética.

Para o cálculo de H_s , adota-se o método da determinação da perda de carga pelo comprimento equivalente, em que existem tabelas que fixam, em função das características de cada acessório, valores de perda de carga localizada transformadas em perda de carga distribuída ou normal. Ou seja, um valor de comprimento reto de tubulação que produziria, nas mesmas condições, a perda de carga localizada causada pelo acessório em análise (MATTOS, EDSON EZEQUIEL DE; FALCO, 1998). Portanto, as perdas de carga singulares H_s são calculadas através de comprimentos equivalentes de diâmetros para cada acessório instalado. A Tabela 3.1, retirada da referência Pimenta (1981, apud Gomes, 2012) demonstra essa relação.

Tabela 3.1 Perda de carga localizadas em termos de comprimentos equivalentes em função do diâmetro.

PEÇA ESPECIAL	Comprimento expresso em quantidade de diâmetros
Cotovelo de 90	45,00
Cotovelo de 45	20,00
Curva de 90	30,00
Curva de 45	15,00
Entrada normal em conduto	17,00
Entrada de borda	35,00
Ampliação gradual (considere o maior diâmetro)	12,00
Redução gradual (usar o maior diâmetro)	6,00
Registro de gaveta aberto	8,00
Registro tipo globo aberto	350,00
Válvula borboleta aberta	30,00
Saída de canalização	35,00
Tê, passagem direta	20,00
Tê, saída de lado	50,00
Tê, saída bilateral	65,00
Válvula de pé com crivo	250,00
Válvula de retenção	100,00

Fonte: Gomes (2012, p. 35)

Para determinação do coeficiente de rugosidade característico do conduto (C), foram adotados valores sugeridos por Azevedo Netto, et. al. (1998, apud Gomes, 2012) para a fórmula de *Hazen Willians*, conforme a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Valor do coeficiente C sugerido para a fórmula de Hazen Willians.

TUBOS	NOVOS	USADOS	USADOS
		+/- 10 ANOS	+/- 20 ANOS
Aço corrugado (chapa ondulada)	60	-	-
Aço galvanizado roscado	125	100	-
Aço rebitado, novos	110	90	80
Aço soldado, comum (revestimento betuminoso)	125	110	90
Aço soldado com revestimento epóxico	140	130	115
Chumbo	130	120	120
Cimento-amianto	140	130	120
Cobre	140	135	130
Concreto, bom acabamento	130	-	-
Concreto acabamento comum	130	120	110
Ferro fundido, revestimento epóxico	140	130	120
Ferro fundido, revestimento de argamassa de cimento		Ver figura 3.1	
Grés cerâmico, vidrado (manilhas)	110	110	110
Latão	130	130	130
Madeira, em aduelas	120	120	110
Tijolos, condutos bem executados	100	95	90
Vidro	140	-	-
Plástico (PVC)	140	135	130

Fonte: GOMES, Heber Pimentel (2012, p. 31)

E para tubulações em ferro fundido, com revestimento de argamassa de cimento, utilizou-se os valores do coeficiente C conforme a Tabela 3.3 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**(MATTOS, EDSON EZEQUIEL DE; FALCO, 1998).

Tabela 3.3 Valores do coeficiente C de Hazen Willians para tubulações em ferro fundido com revestimento de argamassa de cimento.

Idade Tubulação	Diâmetros													
	0,10 m	0,15 m	0,20 m	0,25 m	0,30 m	0,35 m	0,40 m	0,45 m	0,50 m	0,60 m	0,75 m	0,90 m	1,05 m	1,50 m
0	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130
5	117	118	119	120	120	120	120	120	120	120	121	122	122	122
10	106	108	109	110	110	110	111	112	112	112	113	113	113	113
15	96	100	102	103	103	103	104	104	105	105	106	106	106	106
20	88	93	94	96	97	97	98	98	99	99	100	100	100	100
25	81	86	89	91	91	91	92	92	93	93	94	94	94	95
30	75	80	83	85	86	86	87	87	88	89	90	90	90	91
35	70	75	78	80	82	82	83	84	85	85	86	86	87	88
40	64	71	74	76	78	78	79	80	81	81	82	83	83	84
45	60	67	71	73	75	76	76	77	77	78	78	79	80	81
50	56	63	67	70	71	72	73	73	74	75	76	76	77	78

Fonte: Adaptado de Mattos e Falco (1998, p. 89)

3.2.5 Alturas Manométrica e Geométrica

O cálculo da altura manométrica se dá aplicando-se a equação da energia entre um ponto na superfície livre do reservatório inferior e a descarga na tubulação de recalque (quando a descarga for livre) ou em um ponto na superfície livre do reservatório elevado, quando a descarga for abaixo do nível da água (GOMES; CARVALHO, 2012).

$$H_{amt} = H_{ga} + H_{gr} + H_{fa} + H_{fr} + \frac{v^2_{média}}{2g} \quad (3.7)$$

Em que H_{ga} é a altura geométrica de aspiração, H_{gr} é a altura geométrica de recalque, H_{fa} é a perda de carga na aspiração e H_{fr} é a perda de carga no recalque.

Na prática desconsidera-se a parcela referente à energia cinética, pois ela é inexpressiva em relação à energia total (GOMES, 2012). Os cálculos aplicados a metodologia proposta também irão desprezar essa parcela.

Caso a bomba se encontre afogada, a altura geométrica de aspiração se encontra acima da bomba e, portanto, adota-se sinal positivo (para situação não afogada, sinal negativo).

Importante destacar que a altura manométrica é uma função quadrática da vazão. Sua curva é conhecida como curva do sistema e é dada pela relação apresentada na equação 3.8.

$$H_{amt} = H_g + kQ^2 \quad (3.8)$$

Em que k representa um conjunto de fatores constantes, decorrentes da perda de cargas lineares e singulares agrupados e Q a vazão.

3.2.6 Potências e rendimentos

A energia total transmitida ao fluido pela bomba é a altura manométrica, H_{amt} , que representa a quantidade de energia recebida por cada unidade de peso de fluido bombeado. Para obter esta energia na forma de potência basta multiplicá-la pela vazão gravimétrica γQ conforme a equação 3.9 (GOMES, 2012)

$$P_{hid} = \gamma Q H_{amt} \quad (3.9)$$

A potência hidráulica P_{hid} é convenientemente chamada de potência útil e compreende a potência efetivamente utilizada pelo fluido para o seu escoamento. O rendimento da bomba pode ser entendido como a razão entre a potência de saída entregue ao fluido (P_{hid}) pela potência de entrada da bomba entregue pelo eixo do motor, potência mecânica (P_{mec}). A equação 3.10 representa a equação para obtenção do rendimento da bomba.

$$\eta_{bomba} = \frac{P_{hid}}{P_{mec}} \quad (3.10)$$

De maneira similar, a razão de P_{mec} e a potência entregue ao motor pelo painel de acionamento, P_{ac} , é considerado o rendimento do motor, dado pela equação 3.11.

$$\eta_{motor} = \frac{P_{mec}}{P_{ac}} \quad (3.11)$$

De maneira análoga, a razão de P_{ac} e a potência elétrica ativa entregue ao painel de acionamento, P_{ele} , é considerada o rendimento do acionamento (η_{ac}), dado pela equação 3.12.

$$\eta_{ac} = \frac{P_{ac}}{P_{ele}} \quad (3.12)$$

O produto entre o rendimento da bomba, do motor e do painel de acionamento é considerado o rendimento global do conjunto motobomba (η_{GMB}), dado pela equação 3.13.

$$\eta_{GMB} = \eta_{bomba} \eta_{motor} \eta_{ac} \quad (3.13)$$

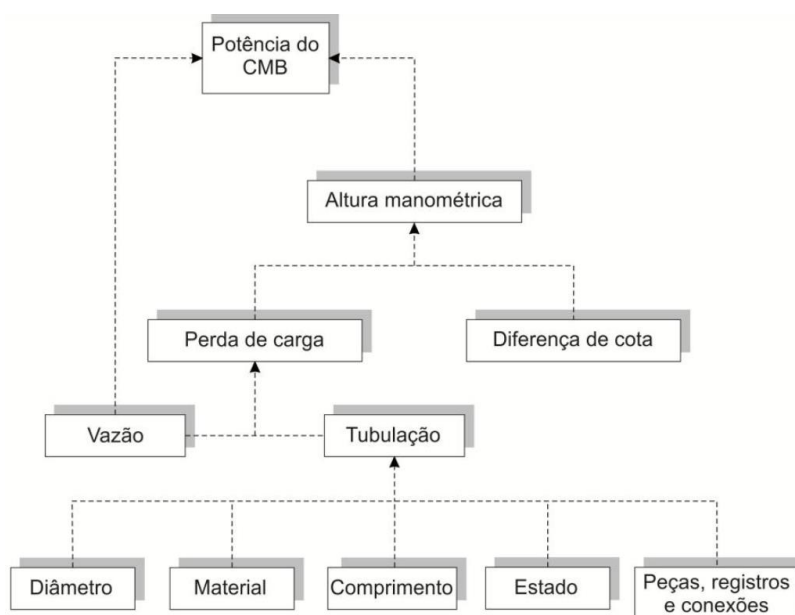
E o rendimento global do conjunto motobomba (η_{GMB}), dado diretamente por:

$$\eta_{GMB} = \frac{\gamma Q Hamt}{P_{ele}} \quad (3.14)$$

Em que γQ representa a vazão gravimétrica, $Hamt$ a altura manométrica e P_{ele} a potência elétrica ativa entregue ao painel de acionamento.

Pereira (2014) resume em forma de fluxograma os dados necessários para dimensionamento da potência de um grupo motobomba, conforme apresentado na Figura 3.2.

Figura 3.2 Dados para dimensionamento da potência do GMB.



Fonte: Pereira (2014, p. 46)

Importante observar que os rendimentos de bombas de grande porte podem atingir mais de 85%, enquanto de pequenas unidades podem chegar a 40%. Valores de referência para cálculos preliminares situam-se em torno de 40% para bombas pequenas e 60% para bombas de médio porte (GOMES, 2012).

3.3 Indicadores hidroenergéticos

Para analisar um grupo expressivo de sistemas de bombeamento quanto a sua condição operacional, é possível utilizar um conjunto de índices e indicadores de desempenho já conhecidos na literatura e amplamente utilizados em diagnósticos das mais diferentes formas. Isso possibilita uma classificação comparativa entre os diferentes sistemas analisados, elencando as prioridades de intervenção e calculando para cada caso o potencial de redução de energia para cada uma das ações de eficiência selecionadas. Eles são fundamentais para uma gestão eficiente dos sistemas de bombeamento, mesmo que não ocorram expansões do sistema ou substituição de componentes, as condições operativas tenderão a sofrer alterações com a passagem do tempo (NICOLA *et al.*, 2018).

A esses sistemas, destacam-se:

- Indicador de Consumo Específico Normalizado (*CEN*) ou Ph5 - indicador de desempenho infra estrutural conforme Alegre *et al.* (2000) - para avaliação da eficiência dos GMBs que compõem a elevatória de bombeamento;

- Índice de energia dissipada na rede – *iED* (GOMES *et al.*, 2017), ou perda de carga unitária - para avaliação da condição de eficiência a jusante dos grupos motobomba;

- Valores das velocidades de entrada e saída das bombas, para avaliação específica de adequação dos diâmetros das tubulações analisados às condições operacionais existente;

- Indicador RC - capacidade de atendimento dos reservatórios no horário de ponta (LIMA *et al.*, 2015) – conjugado com o indicador de utilização da capacidade de bombeamento - Ph4 (ALEGRE *et al.*, 2000) - para avaliação qualitativa da possibilidade de redução do consumo e demanda de energia no horário de ponta.

Apresentam-se as equações utilizadas para cálculo de cada um deles, bem como o seu significado dentro do contexto aplicado à sistemas de bombeamento.

3.3.1 Consumo Específico de Energia Normalizado (*CEN*)

É o indicador que detecta a necessidade de melhoria de rendimento dos conjuntos motobomba da estação elevatória analisada. Ele é o indicador de desempenho infra estrutural adotado pela *International Water Association* (IWA) e consiste no valor da energia total consumida durante o período de referência sobre o volume bombeado neste mesmo período multiplicado pela altura manométrica normalizada de cada conjunto motobomba (ALEGRE *et al.*, 2000). Este indicador propôs o artifício de reduzir as alturas manométricas de diferentes instalações a uma altura única, de modo a permitir a comparação de desempenho destas (GOMES, 2012). É na prática uma medida indireta do rendimento médio dos conjuntos motobombas de uma elevatória, pois o *CEN* varia linearmente e de forma inversamente proporcional ao rendimento do conjunto motobomba, ou seja, na medida em que o rendimento aumenta, o *CEN* diminui (GOMES, 2012).

Por regra geral, sugere-se calculá-lo por instalação elevatória, podendo conter um ou diversos conjuntos motobombas. Desta forma, o rendimento é calculado de modo conjunto e sem distinção se um conjunto motobomba é mais eficiente que o outro (FERREIRA; DE OLIVEIRA, 2017).

A unidade do indicador é kWh/(m³.100 mca). A equação 3.15 explicita a relação do indicador e sua relação direta com os rendimentos do grupo motobomba analisado, desde que algumas simplificações sejam realizadas.

$$CEN = \frac{E}{V \times \frac{H_{amt}}{100}} \quad (3.15)$$

Em que CEN é o consumo específico normalizado, E é a energia consumida pela elevatória de bombeamento, V é o volume bombeado e H_{man} é a altura manométrica.

É válido afirmar que, quando não há grandes variações na vazão e altura manométrica durante o período de análise, o consumo de energia aproximado pode ser dado pela igualdade da equação 3.16.

$$E(J) = \int P_{ele} dt = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_{amt}}{\eta_{GMB}} t \quad (3.16)$$

Quanto a utilização de conversores de frequência pelos sistemas em análise, não se considera que o seu uso invalide o cálculo realizado, pois duas variáveis, o volume de água e a energia consumida, serão medidas, sendo a altura manométrica calculada, considerada como fator estático, constante (FERREIRA; DE OLIVEIRA, 2017). Assim, o termo H_{man} não entra na integral, restando a vazão multiplicada pelo período de análise, o que resulta no volume bombeado, possibilitando reescrever conforme a equação 3.17.

$$E(J) = \frac{\gamma \cdot H_{amt} \cdot V}{\eta_{GMB}} \quad (3.17)$$

Como a equação do CEN utiliza a unidade kWh/m³, e não J/m³, é necessário fazer a conversão de unidades. Sabendo que 1Wh=3600J, tem-se a igualdade da equação 3.18.

$$E(kWh) = \frac{E(J)}{3600 \cdot 1000} \quad (3.18)$$

Com a equação do consumo de energia substituindo o termo no numerador da equação dada em (3.17), tem-se a relação da equação 3.19.

$$CEN = \frac{\frac{\gamma \cdot H_{amt} \cdot V}{3600 \cdot 1000 \eta_{GMB}}}{V \cdot \frac{H_{amt}}{100}} \quad (3.19)$$

Com as devidas simplificações, chegamos a igualdade da equação 3.20.

$$CEN = \frac{\gamma \cdot 100}{3600 \cdot 1000 \eta_{GMB}} \quad (3.20)$$

Com o peso específico da água dado por 9810 N/m³, tem-se por fim a relação da equação 3.21.

$$CEN = \frac{9810 \cdot 100}{3600 \cdot 1000 \eta_{GMB}} = \frac{0,2725}{\eta_{GMB}} \quad (3.21)$$

Ou seja, o CEN para uma situação ideal, em que os rendimentos do motor e da bomba do grupo fossem unitários, daria um valor ótimo de 0,2725 kWh/(m³.100 mca). O valor mínimo teórico, portanto, correspondentes a rendimentos do motor e da bomba de 100% é de 0,27 kWh/m³.100 mca (ALEGRE et al., 2000).

Em relação à altura manométrica utilizada para o cálculo desse indicador, destaca-se que para bombas com variação significativa desse parâmetro ao longo do período de referência pode ser necessário subdividir este período em um número limitado de intervalos de tempo (ALEGRE et al., 2000). Essa subdivisão deve ser uma composição dos valores médios de altura manométrica e vazão encontrados nas frações relativas ao período de referência, em que cada fração tem um peso diferente para o cálculo da altura manométrica resultante.

Esse indicador tornou-se útil para comparar o desempenho de estações de bombeamento com alturas manométricas distintas, graças ao recurso de normalização para uma altura de 100 metros. Entretanto, de acordo com Gomes (2021), há restrições quanto a utilização deste indicador. A primeira, é sobre o uso do recurso da normalização para uma altura de 100 metros. Neste aspecto, do ponto de vista do conjunto motobomba, não importa se os que ele tem que vencer se referem a desnível geométrico ou perda de carga nas linhas de recalque. Assim, esse indicador não avalia o desempenho dos processos hidráulicos a jusante dos conjuntos motobomba, apenas avalia a eficiência de seus conjuntos.

O segundo aspecto mencionado por Gomes (2021) é a respeito de uma possível discrepância nas avaliações de eficiência energética em sistemas de bombeamento, avaliado em um trabalho de pesquisa realizado pelo LENHS UFPB (BEZERRA, 2009). Ocorre que quando o controle de pressão é feito no bombeamento, ou seja, diminuindo a altura manométrica, geralmente o *CEN* tem o seu valor aumentado, já que a *Hamt* e o volume bombeado são inversamente proporcionais ao indicador. Isso ocorre com o uso de conversores de frequência, que permitem variar a velocidade de rotação dos grupos motobombas, permitindo eliminar o excesso de pressão na rede, diminuindo o volume de perdas reais de água e o consumo relacionado com a pressão e a energia consumida. Como a altura manométrica da bomba e o volume bombeado do sistema diminuem e, na maior parte dos casos, essa redução é mais significativa que a redução da potência elétrica solicitada da rede, uma vez que o rendimento tende a cair ligeiramente pelas perdas no conversor e pela operação do conjunto em um ponto diverso do nominal, o indicador *CEN* poderá, nestes casos aumentar, indicando equivocadamente uma perda de eficiência (GOMES, 2021).

3.3.2 Índice de Energia dissipada na rede ou perda de carga unitária (*iED*)

É o índice que detecta a necessidade de melhoria de desempenho da adutora da linha de recalque. Parte-se do princípio que a altura manométrica total de um sistema de bombeamento pode ser decomposta em parcelas referentes ao desnível geométrico e às perdas de carga (GOMES, 2012), conforme a equação 3.22.

$$\text{Altura manométrica total} = \text{Desnível Geométrico} + \text{Perdas de carga} \quad (3.22)$$

O Índice de Energia Dissipada na Rede (i_{ED}), proposto por GOMES et al., (2017), relaciona a perda de carga hidráulica com o comprimento da adutora analisada, proporcionando um valor numérico na unidade mca/m que permite julgar o quanto uma determinada rede está dissipando energia no ponto de vista hidráulico (GOMES et al., 2017). É possível calculá-lo conforme a equação 3.23.

$$i_{ED} = \frac{H_f}{L} \quad (3.23)$$

Em que H_f é a perda de carga total calculada na linha de recalque e L é o comprimento total da linha adutora analisada.

Com este índice é possível avaliar as condições das tubulações em diferentes sistemas de bombeamento para análise e comparação de seus desempenhos energéticos. Como a potência útil demandada em uma instalação de bombeamento varia de forma diretamente proporcional à altura manométrica e a altura manométrica aumenta com o valor das perdas de carga, é possível estimar a parcela de contribuição de cada tubulação para a composição da potência útil requerida para a bomba e, conseqüentemente, da posterior possibilidade de redução dessa parcela e do consumo de energia do sistema. Uma vez constatada que a parcela de perda de carga é significativa para o sistema, é necessário que se analise a condição de eficiência das tubulações.

3.3.3 Capacidade de atendimento dos reservatórios no horário de ponta (RC)

Como forma de avaliar a capacidade que o sistema tem de reduzir a sua demanda no horário de maior consumo, em que a energia é mais cara, avalia-se o indicador RC , que é um dos indicadores propostos por LIMA et al., (2015). Ele representa a capacidade que os reservatórios da estação elevatória têm de atender o sistema no horário de ponta. Ele é calculado conforme a equação 3.24.

$$RC = \frac{\sum \frac{t \cdot P_c}{782 \cdot P_i}}{n_e} \cdot 100 \quad (3.24)$$

Em que RC (%) é a capacidade de reservação, t é o número de horas de operação do sistema de bombeamento durante o período de ponta por um ano, P_c é a demanda média no horário de ponta, P_i é a potência máxima instalada dada pelo dado nominal do motor considerando o fator de serviço, 782 é o número de horas no período de ponta em um ano, n_e é o número de estações de bombeamento que compõem o sistema. É um indicador útil para detectar potenciais de redução de demanda no horário de ponta e deve ser avaliado juntamente com o nível de criticidade do sistema (dado pela utilização dos GMBs durante um dia médio de operação).

3.3.4 Utilização da capacidade de bombeamento (Ph4)

O indicador de capacidade de bombeamento (Ph4) é um dos indicadores proposto no guia técnico da IWA (ALEGRE *et al.*, 2000). Ele pode ser interpretado como um nível de criticidade do sistema, uma vez que é dado pela razão do consumo máximo diário de energia para bombeamento pela capacidade máxima de bombeamento da estação elevatória analisada. Ele mede a capacidade de bombeamento remanescente no dia de maior consumo energético (ALEGRE *et al.*, 2000). Sistemas muito críticos podem estar em processo eminente de expansão, devendo ser um indicador apropriado para verificação antes de executar ações de eficiência energética. Se muito baixo, pode indicar boa capacidade de modulação dos grupos para atendimento ao sistema, justificando a implantação de um conversor de frequência. Ele é calculado pela equação 3.25.

$$Ph4 = \frac{D2}{C7 \cdot 24} \cdot 100 \quad (3.25)$$

Em que D2 é o consumo máximo diário de energia para bombeamento (kWh) e C7 é a capacidade máxima de bombeamento das estações elevatórias.

Conforme Vilanova (2012), este indicador também pode sinalizar que os conjuntos motobombas estão superdimensionados, com operação deficiente ou que o sistema se encontra com baixa capacidade de reservação.

3.4 Valores de referência para os índices e indicadores

A utilização de indicadores de índices e indicadores de desempenho facilita a implementação de rotinas de *benchmarking*, quer internamente à entidade gestora (comparando o desempenho obtido em unidades operacionais ou em subsistemas diferentes), quer externamente (comparando o seu desempenho com o de outras entidades gestoras semelhantes), promovendo melhorias de desempenho (ALEGRE *et al.*, 2000). Assim, ao adotar valores que classificam os sistemas analisados, é possível fornecer um quadro de referência comum para comparação do desempenho de entidades gestoras e para identificação de possíveis medidas corretivas.

Dessa maneira, apresentam-se as referências utilizadas para classificação dos sistemas de bombeamento analisados quanto a condição existente de eficiência bem como os valores a serem alcançados após melhorias em eficiência energética.

3.4.1 Desempenho dos grupos motobomba

Para análise da condição de eficiência dos grupos motobombas que compõe uma instalação elevatória, apresenta-se como referência os valores propostos por Ferreira (2021), que estabelece três faixas para o desempenho dessas instalações: insuficiente, mediano e bom. Esses limites derivam parcialmente da norma oficial mexicana NOM-006-ENER-2015 (FERREIRA, 2021). A Tabela 3.4 apresenta os valores de referência na unidade kWh/(m³ x 100 mca) tanto para bombas externas como para bombas submersas, enquanto que a Tabela 3.5 apresenta a correspondência em termos percentuais de rendimento.

Tabela 3.4 Valores de referência para rendimento de conjuntos motobomba na unidade kWh/(m³ x 100 mca)

Tipo de motor	externo				submerso			
	0	15,7	38	96	0	15,7	38	96
Desempenho insuficiente e informação de baixa confiabilidade	1,703	1,703	1,703	1,703	1,703	1,703	1,703	1,703
Desempenho insuficiente	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09
Desempenho mediano	0,524	0,487	0,454	0,426	0,779	0,58	0,478	0,462
Bom desempenho	0,426	0,401	0,378	0,378	0,545	0,478	0,44	0,433
Bom desempenho, mas baixa confiabilidade na informação	0,328	0,313	0,299	0,299	0,495	0,44	0,407	0,401
Valor sem credibilidade	0,228	0,218	0,208	0,208	0,345	0,306	0,284	0,278

Fonte: Ferreira (2021, p. 54)

Tabela 3.5 Valores de referência para conjuntos motobombas correspondentes em termos percentuais, do rendimento calculado (%).

Tipo de motor	externo				submerso			
	0	15,7	38	96	0	15,7	38	96
Valor sem credibilidade	0	0	0	0	0	0	0	0
Desempenho insuficiente e informação de baixa confiabilidade	16	16	16	16	16	16	16	16
Desempenho insuficiente	25	25	25	25	25	25	25	25
Desempenho mediano	52	56	60	64	35	47	57	59
Bom desempenho	64	68	72	72	50	57	62	63
Bom desempenho mas baixa confiabilidade na informação	83	87	91	91	55	62	67	68
Valor sem credibilidade	120	125	131	131	79	89	96	98

Fonte: Ferreira (2021, p. 54)

Após a classificação das instalações elevatórias por esse indicador, é possível propor um valor ótimo a ser alcançado com a melhoria dos grupos motobombas para o cálculo do potencial de ganho em eficiência energética. Esse valor pode corresponder aos critérios de projeto, em que já se conheçam os rendimentos mínimos de cada equipamento que será instalado, ou caso ainda não se tenham dados concretos, é possível adotar para os cálculos uma referência de rendimento global conservador, conforme Tabela 2.4 apresentada na metodologia PROEESA.

3.4.2 Desempenho nas tubulações

De acordo com a equação 3.6 (fórmula de Hazen-Williams) é possível constatar que o valor do diâmetro da adutora tem uma alta representatividade no cálculo da perda de carga em escoamentos de condutos forçados. Dessa maneira, para avaliação do desempenho energético nas tubulações, a seleção do diâmetro ótimo de uma adutora ganha destaque. Como demonstrado pelas equações 3.1 e 3.2, é possível afirmar que a área da seção do tubo é fator determinante para o cálculo da velocidade de um escoamento de vazão (Q). Assim, os critérios de velocidade de escoamento para o dimensionamento do diâmetro das tubulações e, conseqüentemente, da configuração do diâmetro ótimo para a condição de melhor eficiência podem ser adotados. Para a determinação das velocidades para condições operacionais adequadas adotam-se as seguintes referências:

- ABNT NBR 12214:1992 determina para o barrilete de sucção a adoção de velocidades entre 0,6 m/s e 1,5 m/s; e no barrilete de recalque a adoção de velocidades entre 0,6 m/s e 3,0 m/s;

- Pedraza e Rosas (2012) estabelece um critério prático para avaliação de perdas energéticas pela análise da velocidade nas tubulações de condução de recalque. Conforme o autor, onde houver escoamento com velocidade acima de 2,0 m/s, devem-se avaliar as perdas energéticas nessas tubulações. Dessa avaliação podem surgir algumas possibilidades para reduzir o impacto energético que as conduções com altas velocidades representam, sendo algumas delas:

- a) Instalação de 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, caso a tubulação atual esteja em bom estado;

b) 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, caso a tubulação atual esteja em mau estado.

- Tsutiya (2004) determina uma faixa para a velocidade econômica em adutoras de recalque como sendo entre valores de 1,0 e 1,5 m/s, reafirmando os valores adotadas pelas referências mencionadas anteriormente. O autor ainda menciona o porquê de se estabelecer os critérios de velocidade. Pequenas velocidades favorecem a formação de depósitos de materiais sedimentáveis nas tubulações e dificultam a remoção hidráulica de ar nos pontos altos. Por outro lado, velocidades elevadas aumentam as perdas de carga e favorecem o aparecimento de transientes hidráulicos, cujas sobre pressão e subpressão nas tubulações variam em função da velocidade. A velocidade mínima adotada para projetos é de 0,5 m/s em adutoras. Para diversos tipos de materiais das adutoras, como concreto, ferro fundido, aço e plásticos, os limites máximos de velocidade apresentados na literatura tem variado em 4,0 a 6,0 m/s. Entretanto, levando-se em conta os aspectos técnicos e econômicos, o limite máximo de velocidade nas adutoras não tem ultrapassado o valor de 3,0 m/s. De acordo com Tsutiya (2004, apud Rey et. al) é recomendável que a velocidade máxima seja menor, não ultrapassando 1,5 m/s.

Quanto a velocidade do fluido na sucção, respeitar os valores previstos em norma (ABNT NBR 12214:1992) favorecerá uma operação adequada do grupo motobomba, evitando fenômenos como o da cavitação (TSUTIYA, 2004).

Além da análise das velocidades nas tubulações, propõe-se analisar a efetiva perda de carga calculada nas tubulações. Para tanto, adota-se o índice de perda de carga unitária ou energia dissipada na rede (iED).

Alguns estudos já categorizaram determinadas metas e valores de referência para esse índice. A *AWWA (American Water Works Association)* em um de seus trabalhos, estabelece que valores acima de 3 m/km para adutoras de diâmetro igual ou maior que 400 mm e valores acima de 10 m/km para adutoras de diâmetro igual ou menor que 300 mm para o índice, são considerados como fortes indicativos na contribuição em perdas de energia (HASHEMI; FILION; SPEIGHT, 2018). Ainda, de acordo com GIZ; IWA, (2017), é possível estabelecer as seguintes referências para uma classificação clara deste índice em três níveis:

- iED menor ou igual a 2 m/km, condição considerada boa.
- iED maior que 2 m/km e menor que 4 m/km, condição considerada aceitável.

- iED maior que 4 m/km, condição considerada insatisfatória.

Importante destacar que o processo de avaliação de desempenho de adutoras por uma faixa de valores de perda de carga é a maneira mais simples de abordar o problema. Esse critério de análise ignora uma série de parâmetros chave altamente relevantes para a tomada de decisão na melhoria de adutoras, como por exemplo o custo de energia (CABRERA *et al.*, 2018). Também em casos particulares, como uma linha adutora com ganho de energia por diferença de cotas (descida de uma ladeira) podem-se dispor de perdas de carga hidráulicas superiores a 10 m/km, o que expõe uma fragilidade significativa deste indicador.

A Tabela 3.6 resume os valores das referências encontradas.

Tabela 3.6 Resumo dos valores de referência encontrados para avaliação da perda de carga unitária em adutoras de recalque de água.

Diâmetro da adutora (mm)	D < 300	D < 400	D > 400
HASHEMI; FILION; SPEIGHT (2018 apud AWWA 2017)			
Desempenho insatisfatório	10 m/km ou maior	x	3 m/km ou maior
GIZ; IWA, (2017)			
Desempenho insatisfatório	4 m/km ou maior		
Desempenho aceitável	de 2 até 4 m/km		
Desempenho bom	até 2 m/km		

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Importante mencionar que a avaliação da perda carga excessiva em uma adutora de recalque deve também contar com uma análise econômica das repercussões dos energéticos do bombeamento frente ao custo de investimento da tubulação. Dessa maneira, pode-se obter diâmetros ótimos na linha adutora com velocidades superiores a 2 m/s.

3.5 Ações de Eficiência Energética típicas em sistemas de bombeamento

Uma ação de eficiência energética (AEE) consiste em uma atividade ou conjunto de atividades concebidas para aumentar a eficiência energética de uma instalação, sistema ou equipamento. Várias AEEs podem ser implantadas em uma instalação ao mesmo tempo, cada uma com uma intensidade diferente. Uma AEE pode implicar em alterações dos equipamentos da instalação e revisões dos procedimentos de operação e manutenção. Uma AEE pode ser aplicada como uma alteração a um sistema ou instalação já existente (EVO INTERNACIONAL, 2014).

No contexto de sistemas de bombeamento de água do setor de saneamento, destacam-se ações de eficiência energética associadas à etapa do processo que concentra as maiores oportunidades de ganho em eficiência energética a serem exploradas - transformação de energia mecânica em energia hidráulica. As ações de eficiência destacadas para sistemas de bombeamento se baseiam no material de Ferreira e Gonçalves (2019) e Pedraza e Rosas (2012) e consistem em:

AEE 01: substituição apenas do motor elétrico;

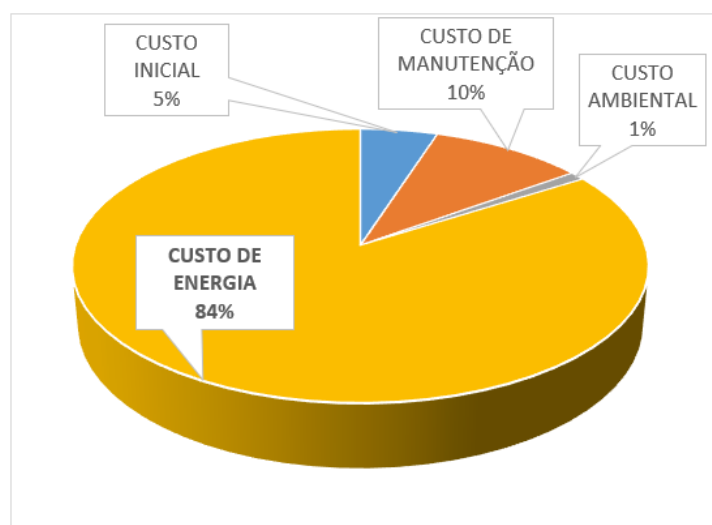
AEE 02: reabilitação ou substituição de grupos motobomba;

AEE 03: substituição GMB potencializada com melhoria na sucção e adutora;

AEE 04: melhoria de operação por implementação de conversor de frequência e/ou aumento do volume reservado no sistema.

As ações de eficiência energética destacadas têm em comum o fato de trabalhar com a concepção de modernização dos sistemas pela substituição e/ou melhoria dos equipamentos. Alguns estudos mostram que 30 a 50% da energia consumida por meio de sistemas de bombeamento pode ser economizada com a substituição de equipamentos mais modernos ou sistemas de controle que automatizam a operação (PASSETO, 2001). A Figura 3.3 ilustra a distribuição de custos para grupos motobomba de grande porte e a relevância do custo energético na sua operação.

Figura 3.3 Distribuição típica de custos para o uso de bombas de grande porte empregadas em sistemas de bombeamento.



Fonte: Adaptado de MARQUES (2001 apud Tsutiya 2004, p. 317)

As AEEs típicas são utilizadas em projetos de eficiência de sistemas de bombeamento nos contextos apresentados.

3.5.1 Substituição apenas do motor elétrico

É a AEE adotada nos casos que o motor existente apresenta baixos valores de rendimento, seja pelo seu baixo carregamento ou pela sua condição de uso; carregamento, idade e número de reboinagens com as técnicas estabelecidas por Pedraza e Rosas (2012), resumidas no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 Ações recomendadas para corrigir condições de operação ineficiente dos motores elétricos.

Condição observada	Diagnóstico	Ação corretiva proposta
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 novo de alta eficiência para operar a 75% de sua capacidade
O motor foi reboinado 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	

Fonte: Adaptado de Pedraza e Rosas (2012, p. 67)

Destaca-se que cada rebobinagem pode reduzir o rendimento de 1% a 5% conforme *EASA – Electrical Apparatus Service Association* (NICOLA *et al.*, 2018).

O que definirá um rendimento baixo será o valor do potencial de economia de energia obtido com essa ação de eficiência. Cabe observar que como normalmente os motores operam por milhares de horas, o ganho de eficiência através da substituição por motores de rendimento mais elevado se traduz numa economia considerável que se pagará em poucos anos ou mesmo em meses. O projeto dos motores W22 IR4 Super Premium, que apresenta perdas de 20% a 40% menores em comparação com os motores elétricos convencionais, oferece os níveis de rendimento mais altos disponíveis para motores elétricos de indução (NICOLA *et al.*, 2018). Devido a isso, o investimento para a substituição de motores já instalados pelos motores W22 IR4 Super Premium retorna num período muito curto, resultando não somente em economia de energia, mas também na confiabilidade e disponibilidade da planta. A economia de energia será ainda maior se o motor antigo tiver sido submetido a rebobinagens durante a sua vida.

3.5.2 Reabilitação ou substituição de grupos motobomba:

Como já mencionado, um dos maiores pontos de perdas energéticas em sistemas de bombeamento ocorre justamente na etapa de transformação da energia elétrica em energia mecânica obtida por meio do sistema de bombeamento e transmitida para o fluido sob potência hidráulica (PEDRAZA; ROSAS, 2012). Esta AEE é adotada nos casos que o grupo motobomba apresenta baixos valores de rendimento (o que pode ser constatado pelo indicador de consumo específico normalizado). Isso pode ocorrer tanto pela eficiência baixa do próprio equipamento em si ou por condições inadequadas de operação do sistema atendido pelo grupo motobomba.

Com o passar dos anos, esses grupos sofrem um desgaste natural que conduz a uma queda gradual do rendimento. Assim, eles podem estar operando em condições de ineficiência, sem que haja conhecimento por parte do prestador de serviços responsável por sua operação. Frequentemente, nos sistemas de abastecimento de água, há grupos que operam por mais de 20 anos, sendo que a vida útil habitual de equipamentos eletromecânicos varia entre 5 e 15 anos, dependendo do contexto (FERREIRA; GONÇALVES, 2019).

3.5.3 Redimensionamento e melhoria nas tubulações

É a AEE adotada nos casos em que há grandes perdas energéticas no sistema de condução, sendo possível elencar algumas medidas factíveis técnica e economicamente (GOMES, 2012):

- Reforço ou troca das tubulações de recalque, por outras de menor aspereza e/ou maior diâmetro;
- Limpeza ou revestimento de tubulações;
- Eliminação de ar do sistema, pela introdução de dispositivos antivórtice nos tanques de sucção e de ventosas em pontos adequados do sistema de recalque;
- Eliminação de perdas de carga singulares em barriletes de entrada e saída das elevatórias, por meio de reconfiguração geométrica das tubulações, realinhamento de peças, aumento do diâmetro, substituição de peças e válvulas de controle por outras mais eficientes ou tecnologias mais eficientes;
- Redução da vazão bombeada pelo sistema, acarretando menor custo energético específico, seja devido à incorporação de suprimentos alternativos de água mais econômicos ou redução das perdas reais de água.

As ações de reforço ou troca das tubulações de recalque, bem como de limpeza ou revestimento, podem compreender desde a passagem de dispositivos denominados PIG, dotados de “escovas helicoidais” de material metálico, até por sua substituição parcial ou total, ou instalação em paralelo de uma nova tubulação.

A ação de revestimento como maneira de melhorar o coeficiente de rugosidade característico de um conduto de aço ou ferro fundido (materiais típicos de longas adutoras) pode ocorrer através da execução das paredes da tubulação com argamassa de cimento (TSUTIYA, 2004). É possível com essa ação recuperar tubos com ou sem revestimento, que apresentem sérios problemas de corrosão e

incrustação. Para diâmetros superiores a 150 mm, pode ser um processo econômico, se comparado com a troca da tubulação por uma nova. É eficiente, porque devolve a tubulação suas características de adução, evitando um processo corrosivo. Sobre o revestimento com argamassa de cimento em tubulações, destaca-se ser uma das técnicas mais usadas para reabilitação das tubulações. Ela pode ser aplicada em tubulações de 100 mm até 2000 mm de diâmetro e tem as seguintes vantagens: não é necessária a abertura de valas, as tubulações antigas são reabilitadas e há redução na interrupção do fornecimento de água. Entretanto tem a desvantagem de reduzir o diâmetro interno da tubulação (VENTURINI e BARBOSA, 2002, apud Tsutiya, 2004). Para diâmetros menores recomenda-se a substituição da tubulação por uma nova ou limpeza por raspagem (MACEDO e RIBEIRO, 1985, apud Tsutiya, 2004).

Ressalta-se o enorme ganho em eficiência energética que ações de redução de vazamentos de água pode trazer, porém esse assunto não é escopo deste trabalho.

3.5.4 Controle operacional de bombas por conversores de frequência e/ou aumento do volume reservado no sistema

É a AEE destinada a reduzir o consumo de energia de grupos motobomba pela variação de velocidade e/ou redução do consumo de energia e demanda no horário de ponta. Assim, é possível adaptar a operação nos casos em que há necessidade de alterar a vazão de bombeamento em função da oscilação da demanda ao longo do período de funcionamento (FERREIRA; GONÇALVES, 2019). É possível, desta maneira, realizar o abastecimento de uma região sem condições de sobre-pressão em tubulações devido a essas variações, reduzindo o desperdício de energia e, além disso, diminuindo o volume perdido por vazamentos e ocorrências de rompimento de rede.

Destaca-se como forma de diagnosticar uma situação ineficiente, a operação dos grupos para manutenção dos reservatórios sempre no nível máximo. Isto geralmente conduz a um gasto excessivo e desnecessário de energia elétrica. A forma de operação deve ser otimizada, mantendo o nível dos reservatórios cheio no início do horário de ponta e com volume seguro ao final desse período (NICOLA *et al.*, 2018). É importante ressaltar que para a implantação segura e precisa desse tipo de recurso é fundamental a instalação de dispositivos de monitoramento de nível e de vazão,

tanto na entrada, quanto na saída dos reservatórios, o que não é prática da maior parte das operadoras, que costumam instalar medidores apenas na entrada dos reservatórios. Deve-se também realizar análise técnica e econômica para que se avalie a possibilidade de implantação de sistema de telemetria e de automação, de forma a que os despachos dos conjuntos sejam feitos à distância e, de preferência, automaticamente (NICOLA *et al.*, 2018).

Quando a situação de operação dos grupos não pode ser alterada em decorrência da necessidade de manutenção de pressões adequadas na rede de distribuição e o consequente risco de desabastecimento do sistema, deve-se então verificar o sistema de bombeamento e reservação.

A alteração no sistema de bombeamento-reservação, pelo aumento da capacidade de reservação com a construção de novos reservatórios, é uma alternativa para redução do consumo de energia e demanda no horário de ponta. Essa ação consiste em aproveitar a capacidade volumétrica de reservatórios de regularização para abastecer a região atendida, com o desligamento dos equipamentos de bombeamento em determinados horários do dia. Estes reservatórios podem abastecer as regiões atendidas, desde que sua cota topográfica seja suficiente para pressurizar a rede de distribuição com pressões superiores às pressões mínimas admissíveis (GOMES; CARVALHO, 2012).

3.6 Conceitos de Medição e Verificação em sistemas de bombeamento

Para obtenção dos valores necessários para calcular um conjunto de índices e indicadores em sistemas de bombeamento é recomendado seguir com rigor uma estratégia de medição de seus parâmetros chave. Da mesma forma, para determinar benefícios obtidos após a implementação de um programa de melhoria em eficiência energética nesses sistemas, é recomendável adotar alguns conceitos e boas práticas de como fazê-lo, uma vez que a economia representa a ausência de consumo de energia, água ou redução de demanda, não podendo portanto ser medida (EVO INTERNACIONAL, 2014).

Faz-se necessário, nestes casos, aplicar um processo de análise que possa estimar o consumo da instalação antiga nas condições após a intervenção, pois a eficiência energética é sempre a energia medida após a implementação das ações subtraída da energia que teria sido consumida na ausência da medida. Para tanto procede-se com medições antes da ação de eficiência energética e se estabelece um

modelo matemático sobre o comportamento de variáveis que determinam ou influenciam o consumo de energia e a relação entre ambos: consumo de energia e variáveis. Estas variáveis são denominadas variáveis independentes – em geral, para sistemas de bombeamento, produção de água, água consumida, água elevada, etc. (GONÇALVES; FERREIRA, 2019).

Recomenda-se utilizar nestes casos o Protocolo Internacional para Medição e Verificação de Performance (PIMVP – EVO, 2012), que descreve as melhores práticas atualmente disponíveis para medir e verificar os resultados de projetos de eficiência energética. A utilização do PIMVP auxiliará na determinação dos requisitos básicos a observar, os cuidados que se devem ter, os critérios para selecionar as variáveis e opções disponíveis para avaliação da eficiência energética nesses sistemas (GONÇALVES; FERREIRA, 2019).

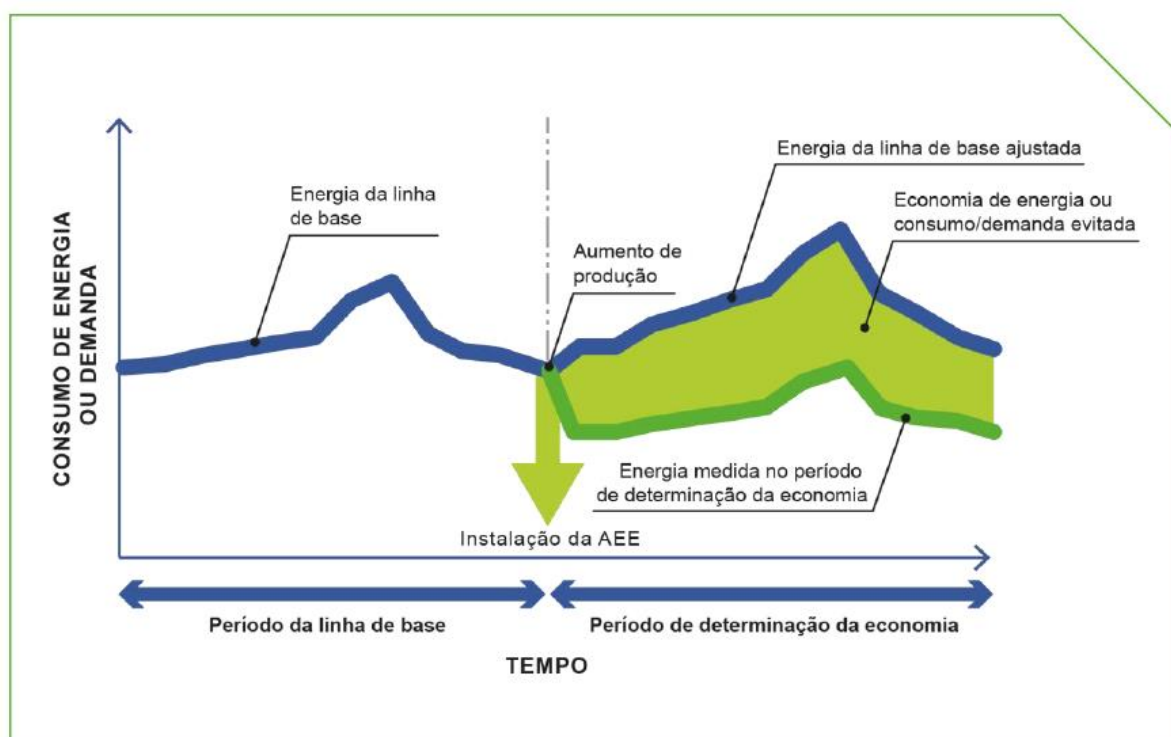
3.6.1 Período de linha de base e determinação da economia

Conforme EVO (2017), o período da linha de base é o período de tempo definido escolhido para representar a operação da instalação ou sistema antes da implementação de uma ação de eficiência energética (AEE). Ele deve ser capaz de representar todos os modos de funcionamento da instalação, cobrindo um ciclo de funcionamento completo, desde o consumo máximo de energia ao mínimo (EVO, 2017). No caso de sistemas de bombeamento, o comportamento das variáveis independentes não é uniforme ao longo do ano, devido a fatores aleatórios, sazonais ou de planejamento de atividades. Dessa maneira, é recomendável que o período de linha de base seja sempre de no mínimo 12 meses (ALEGRE et al., 2000).

O período subsequente é intitulado de período de determinação da economia e correspondente ao sistema analisado após a implementação das ações de eficiência energética. Para possibilitar que neste período se reflitam todos os modos de funcionamento de um sistema de bombeamento analisado, é recomendável que ele também seja de no mínimo 12 meses.

A Figura 3.4 ilustra os períodos ao longo do tempo e em relação as ações de eficiência implementadas.

Figura 3.4 Períodos durante um diagnóstico de eficiência energética e representação da economia de energia na forma de ausência de consumo.



Fonte: EVO (2017, p. 9)

Como a eficiência não é medida diretamente, há sempre alguma incerteza no resultado obtido (GONÇALVES; FERREIRA, 2019).

3.6.2 Estimativa *Ex-Ante*

Uma vez definidas as ações de eficiência energética integrantes do projeto, deve-se estimar as economias e demanda de energia elétrica resultantes. Essas estimativas são baseadas em análises de campo, conhecimento técnico, dados típicos, experiências anteriores e cálculos de engenharia (FERREIRA; GONÇALVES, 2019).

3.6.3 Fronteira de medição

Conforme EVO (2017), a fronteira de medição é uma fronteira imaginária desenhada em torno de equipamentos, sistemas ou instalações para segregar aqueles que são relevantes na determinação da economia de energia daqueles que

não o são. Na prática, é o local onde serão instalados os medidores para o registro dos efeitos da ação de eficiência energética (FERREIRA; GONÇALVES, 2019).

Em uma análise com foco na melhoria de desempenho de sistemas de bombeamento, seja pela escolha mais apropriada dos equipamentos (motores e bombas) à condição de operação existente, seja pela alteração da condição de operação através das reduções de perdas nas tubulações a montante e jusante desses equipamentos, se estabelece uma fronteira de medição dentro da instalação onde esses equipamentos estão localizados para medição da sua energia. Essa fronteira pode englobar toda a unidade consumidora, no caso de não haver cargas adicionais significativas ao sistema de bombeamento analisado, ou apenas parte dela, no caso de haver demais cargas não relevantes para a análise de eficiência na unidade consumidora. Estações elevatórias de água bruta são bons exemplos de sistemas de bombeamento que podem ser analisados englobando toda unidade consumidora, pois as cargas mais significativas usualmente se restringem aos grupos motobombas. No caso das estações de tratamento de água (ETA), que contam com as elevatórias de água tratada, há cargas diversas além dos grupos de bombeamento que compõe o sistema associados ao processo de tratamento de água. Desta forma, há a necessidade de segregar da análise os equipamentos que não são relevantes para a melhoria de eficiência no projeto proposto.

Uma vez definida a fronteira de medição para cada caso, deve-se verificar quais variáveis explicam a variação do consumo de energia elétrica e como poderão ser medidas (FERREIRA; GONÇALVES, 2019).

3.6.4 Variáveis independentes e fatores estáticos

As variáveis independentes são definidas pelo PIMVP como parâmetros esperados de variar rotineiramente e que apresentam impacto considerável no consumo de energia e/ou demanda de um sistema ou instalação (EVO, 2017).

Por sua vez, os fatores estáticos são características de uma instalação que afetam o consumo de energia e demanda, dentro da fronteira de medição definida, porém esperadas que não se alterem (EVO, 2017).

Em elevatórias de recalque de água podemos citar como variáveis independentes: volume de água aduzido, horas de operação e altura manométrica do sistema. Em algumas instalações a altura manométrica pode ser considerada também

como um fator estático – caso em que o nível de pressão não apresenta desvios significativos durante a operação (FERREIRA; GONÇALVES, 2019). Isso que minimiza o esforço de monitoramento e simplifica a modelagem do sistema para o diagnóstico.

Com a medição da energia e desses parâmetros, é possível definir uma função matemática de modelagem do consumo da linha de base do sistema, que poderá ser utilizada na fase de determinação da economia após implantação das ações de eficiência para assim calcular a economia.

3.6.5 Correlação modelo matemático energia e volume

No caso de diagnósticos energéticos em sistemas de bombeamento, deve-se atentar para que a energia medida tenha uma correlação com o volume de água produzido, que é a variável independente do processo. Caso contrário, AEE em equipamentos como grupos motobombas podem não trazer os benefícios calculados, uma vez que parcela significativa da energia aferida não está relacionada a sua operação. É o caso de algumas elevatórias de água tratada, em que existem diferentes cargas fora do foco da ação de eficiência energética proposta. Pegar dados do medidor da concessionária nestes casos pode distorcer os resultados desses benefícios. Assim, faz-se necessário verificar se a energia consumida pode ser explicada pelo volume de água bombeada, caso não seja, devem-se instalar medidores de energia diretamente nos equipamentos em que se darão as AEE, ou seja, nos próprios painéis dos grupos motobombas.

Essa verificação pode ser feita através da análise de índices estatísticos obtidos por um modelo matemático, que relaciona a variável dependente, que se pretende explicar (energia consumida) e a variável independente, volume de água elevada (m^3). A energia consumida, por ser uma função do volume de água bombeada, pode ser explicada por uma equação linear de maneira aproximada, no formato da equação 3.26

$$E = a . V + b \tag{3.26}$$

A correlação é indicada por meio de índices estatísticos, como o coeficiente de variação do erro médio quadrático [CV(EMQ)], o erro médio de viés (EMV) ou outros métodos publicados na literatura de estatística (EVO, 2017).

De acordo com Ferreria e Gonçalves (2019), o modelo matemático da energia em função do volume bombeado pode ser considerado como de boa adesão, se o coeficiente de correlação R^2 for maior que 0,75 (idealmente maior que 0,9). Caso não se obtenha esses valores para o modelo obtido, devem-se refazer as medições diminuindo os erros ou aumentando o número de meses da análise.

3.7 Cálculo e avaliação da incerteza combinada

A determinação da economia de energia por um diagnóstico energético deve ocorrer de forma confiável. Para isso, é preciso que haja um nível de incerteza razoável nos valores calculados. A incerteza dessa economia pode ser gerenciada controlando-se os erros aleatórios e sistemáticos. Os erros aleatórios são afetados pela qualidade dos equipamentos de medição, pelas técnicas de medição e pela concepção do procedimento de medição. Os erros sistemáticos são afetados pela qualidade dos dados de medição, suposições e análises (EVO INTERNACIONAL, 2014). Os erros podem aparecer devido à imprecisão do medidor, procedimentos de amostragem ou de ajuste. Todas as medições físicas e análises estatísticas são baseadas em estimativas de tendências centrais, como valores médios e quantificação da variação como faixa de variação, desvio padrão, erro padrão e variância (EVO INTERNACIONAL, 2014). A economia de energia é considerada estatisticamente válida se for relativamente grande em relação às variações estatísticas. Especificamente, a economia deve ser maior que duas vezes o erro padrão do valor da linha de base. Se a variância da linha de base for muito grande, o comportamento aleatório não explicado no uso da energia da instalação ou sistema é grande e uma determinação simples da economia não é confiável (EVO INTERNACIONAL, 2014). Conforme o protocolo de Medição e Verificação dos Resultados (PIMVP) define-se por padrão atingir uma precisão de 10% com 95% de confiabilidade nos projetos de eficiência energética, sendo que a confiabilidade a confiabilidade do dado de entrada é dada em porcentagem de erro admitido relativamente à magnitude da grandeza em questão.

Uma das maneiras mais utilizadas para determinar a incerteza de saída é aproximar a função f com uma função linear através das séries de Taylor. Essa linearização simplifica a análise da incerteza, com o ônus de introduzir um erro de aproximação (BALBINOT, 2019). Com uma função que possui variáveis independentes, a equação geral para a propagação de incertezas pode ser aproximada de maneira mais simples por:

$$\sigma_G^2 = \left(\frac{\partial Q}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 + \dots \quad (3.27)$$

Em que σ_G^2 é a variância para a distribuição Q , dependente das variáveis x , y e z .

Considerando que a variância pode ser dada conforme a equação (3.28):

$$\sigma_w^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum (Q_i - Q_{vm})^2 \quad (3.28)$$

Calcula-se de maneira simplificada a variância como sendo o produto do valor medido pela precisão do equipamento.

$$\sigma_w^2 = (\text{valor medido} \times \text{erro do equipamento})^2 \quad (3.29)$$

A distribuição Q a equação do rendimento (3.14), e aplicando na equação (3.27) tem-se:

$$\sigma_{n_{GMB}}^2 = \left(\frac{\partial \eta_{GMB}}{\partial Q}\right)^2 \sigma_Q^2 + \left(\frac{\partial \eta_{GMB}}{\partial Hamt}\right)^2 \sigma_{Hamt}^2 + \left(\frac{\partial \eta_{GMB}}{\partial P_{el}}\right)^2 \sigma_{P_{el}}^2 \quad (3.30)$$

Solucionando as derivadas parciais da função rendimento obtém-se em 3.31 a equação da incerteza combinada para o cálculo do rendimento da elevatória.

$$\sigma_{n_{GMB}}^2 = \left(\frac{\gamma Hamt}{P_{el}}\right)^2 \sigma_Q^2 + \left(\frac{\gamma Q}{P_{el}}\right)^2 \sigma_{Hamt}^2 + \left(\frac{\gamma Q Hamt}{P_{el}^2}\right)^2 \sigma_{P_{el}}^2 \quad (3.31)$$

3.8 Qualidade dos dados adquiridos

Além da avaliação da incerteza dos resultados, Alegre *et al.* (2000) propõe que a qualidade dos dados na avaliação de indicadores em sistemas de saneamento deve ser complementada com a indicação da confiabilidade da fonte de informação. Para isso, a autora adota uma classificação por estrelas, de acordo com o Quadro 3.2.

Quadro 3.2 Bandas de confiabilidade da fonte de informação.

Banda de confiabilidade da fonte de informação	Conceito Associado
★	Dados baseados em estimativas ou extrapolações a partir de uma amostra limitada.
★★	Genericamente como a anterior, mas com algumas falhas não significativas nos dados, tais como parte da documentação estar em falta, os cálculos serem antigos, ou ter-se confiado em registros não confirmados, ou ainda terem-se incluído alguns dados por extrapolação.
★★★	Dados baseados em medições exaustivas, registros fidedignos, procedimentos, investigações ou análises adequadamente documentadas e reconhecidas como o melhor método de cálculo.

Fonte: Alegre *et al.* (2000, p. 50)

Alegre *et al.* (2000) cita que as entidades gestoras (empresas do setor) devem ser encorajadas a atingir um grau não inferior a 5-10% de incerteza nos resultados e ★★ para qualquer das variáveis de entrada no cálculo dos indicadores.

Uma relação desta classificação qualitativa com diagnósticos energéticos em sistemas de bombeamento foi apresentada por Hagiuda (2019) que citou em seu trabalho que a metodologia adotada pelo ProEESA preconiza a medição do consumo de energia e a possibilidade de utilização da estimativa de até duas das demais grandezas (volume de água e altura manométrica) adotando uma classificação para o grau de confiabilidade dos seus valores obtidos com o uso de estrelas, conforme o Quadro 3.3.

Quadro 3.3 Critérios de avaliação da qualidade dos dados aplicado a diagnósticos em sistemas de bombeamento.

Qualidade dos dados	Grandezas medidas	Grandezas estimadas
★★★	Volume de água (m ³) Altura Manométrica (mca) Energia Elétrica (kWh)	
★★	Volume de água (m ³) Energia Elétrica (kWh)	Altura Manométrica (mca)
★	Energia Elétrica (kWh)	Volume de água (m ³) Altura Manométrica (mca)

Fonte: Haguiuda (2019, p. 4)

Dessa maneira, é possível na comparação entre diferentes diagnósticos de sistemas de bombeamento classificar a qualidade e precisão dos dados de entrada obtidos e, conseqüentemente, dos resultados calculados para os índices e indicadores.

4 METODOLOGIA

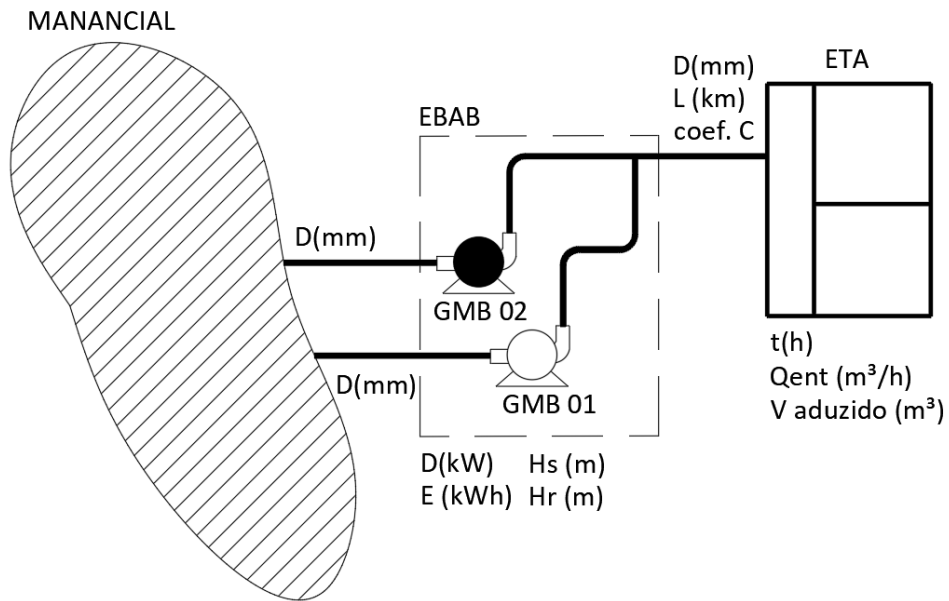
A metodologia proposta em questão é pautada no cálculo de índices e indicadores de desempenho operacional e compara os valores diagnosticados com referências de desempenho relativos a bombas, motores e tubulações para o cálculo do benefício energético. Ela propõe a seleção de 3 possibilidades de AEE (AEE-01 substituição apenas do motor, AEE-02 substituição ou reabilitação do grupo motobomba e AEE-03 substituição do grupo motobomba potencializada com a melhoria da tubulação) de acordo com os resultados obtidos para os índices e indicadores e pode ser dividida em três etapas:

- Etapa de pré medição e estudo do sistema;
- Diagnóstico operacional do sistema pela avaliação dos indicadores;
- Determinação do potencial de redução de energia e ações de eficiência adotadas;

Ressalta-se que antes de aplicá-la, deve-se verificar o histórico de alterações dos equipamentos da elevatória analisada no período de coleta dos dados, bem como de novos projetos já existentes que possam influenciar na operação desses sistemas a curto/médio prazo.

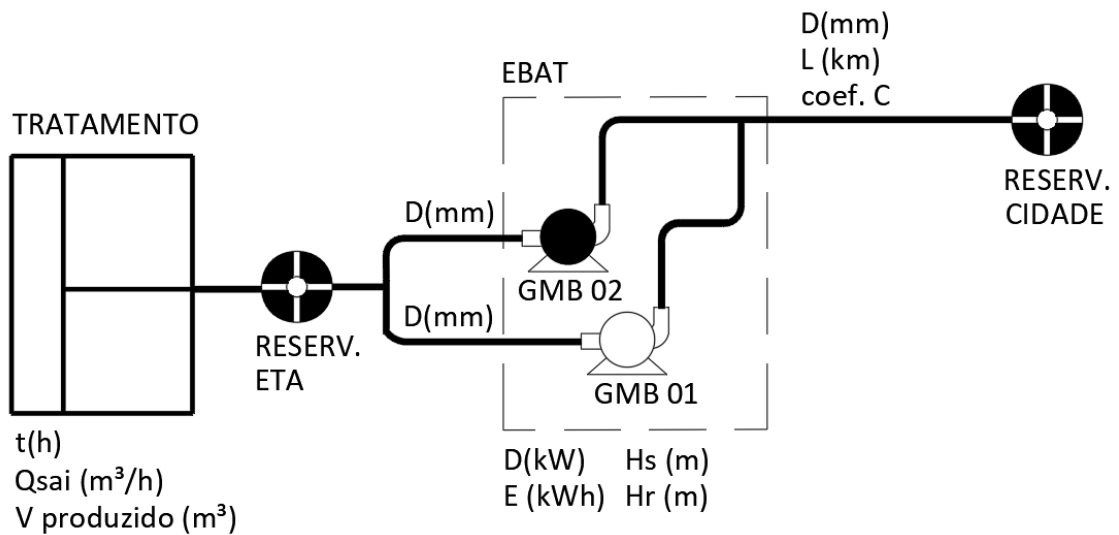
Sua elaboração foi baseada em algumas topologias específicas de sistemas de bombeamento. Contudo, caso o sistema não reflita exatamente algumas dessas topologias, é possível através de simplificações (cálculo de diâmetro equivalente para adutoras em paralelo, por exemplo) aproximar o sistema real a elas. As Figura 4.1, Figura 4.2, Figura 4.3 e Figura 4.4 ilustram as configurações para quais a metodologia foi elaborada.

Figura 4.1 Primeira configuração, referente a um sistema de bombeamento de água bruta com operação de um GMB apenas.



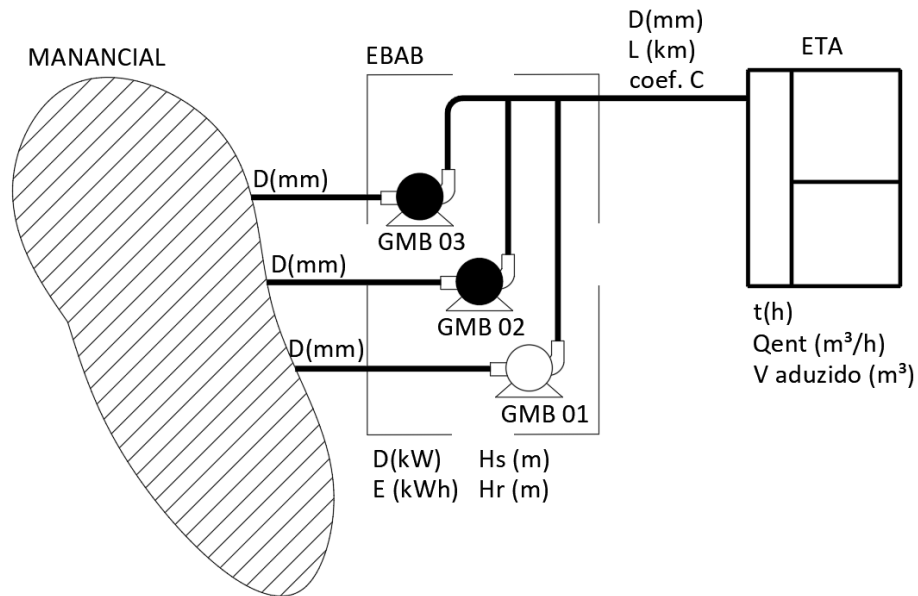
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 4.2 Segunda configuração, referente a um sistema de bombeamento de água tratada com a operação de 1 GMB apenas.



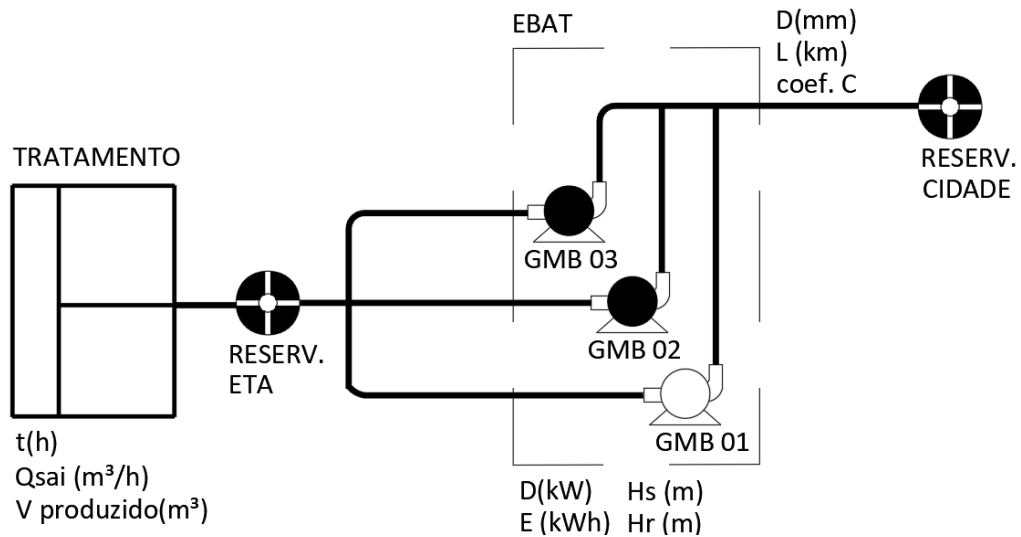
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 4.3 Terceira configuração referente a um sistema de bombeamento de água bruta com dois GMB operando em paralelo.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 4.4 Quarta configuração referente a um sistema de bombeamento de água tratada com dois GMB operando em paralelo.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.1.1 Etapa de pré medição e estudo do sistema

Esta etapa é dividida em 4 processos e 17 itens a serem atendidos. Objetiva-se com ela caracterizar de maneira completa a elevatória e possibilitar a elaboração do plano de medição hidroenergético da etapa de diagnóstico operacional onde serão feitas as medições simultâneas. A caracterização consiste em levantar os dados necessários para determinar a potência do sistema de bombeamento e, com a posterior medição da energia e potência elétrica no local, o seu rendimento.

A altura manométrica é o resultado da soma da altura geométrica com os valores da perda de carga (ao longo da canalização e de pontos localizados), sendo relacionada com o desnível a ser vencido e com as características das tubulações de sucção e recalque.

Assim, esta etapa busca de maneira preliminar dimensionar a potência dos grupos motobombas da elevatória analisada e, para isso, levantar os parâmetros necessários para o cálculo da potência: vazão, de acordo com o histórico de volumes aduzidos na elevatória analisada e altura manométrica, de acordo com projetos existentes disponíveis.

Para a obtenção desses dados, a etapa de pré medição sugere a seguinte sequência de processos e itens:

Processo 01: Elaboração do diagrama hidráulico para o diagnóstico operacional.

1. Área interna da elevatória:

- a) Determinar a posição dos grupos motobombas na elevatória, desenhando o traçado das tubulações internas (sucção e descarga);
- b) Determinar o diâmetro das tubulações internas de sucção e descarga;
- c) Determinar o comprimento das tubulações de sucção.

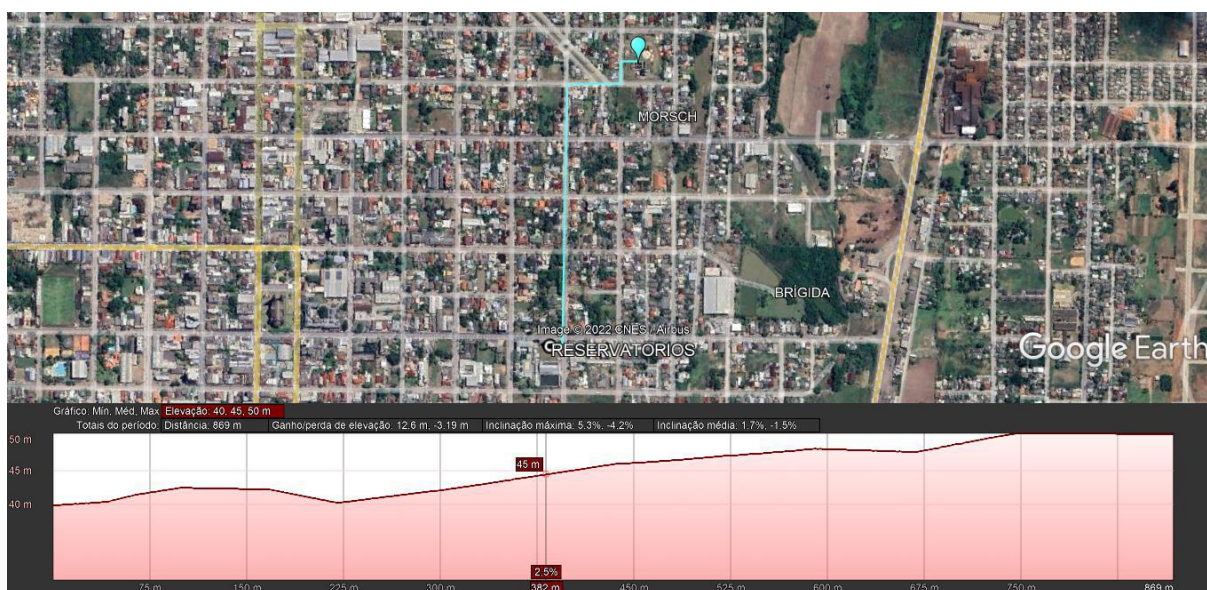
2. Linha da tubulação de sucção:

- a) Determinar as singularidades existentes na sucção, ou seja, válvulas, reduções, etc.;
- b) Determinar a altura entre o eixo da bomba e o nível de água mínimo da superfície de sucção (H_{gs}).

3. Linha da adutora de recalque:

- a) Determinar o traçado e o perfil topográfico da adutora (caso não haja projetos disponíveis para consulta utilizar ferramentas como o *Google Earth*), conforme exemplo ilustração da Figura 3.3

Figura 4.5 Imagem do software Google Earth como alternativa a definição do desnível geométrico por projetos existentes.

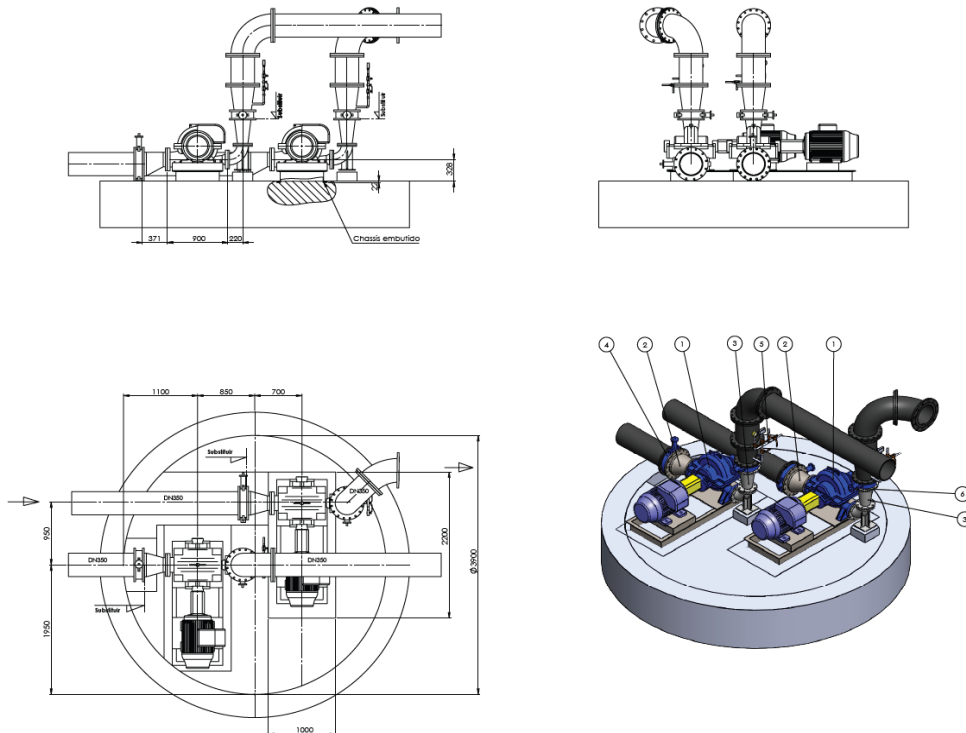


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

- b) Determinar o diâmetro equivalente da adutora;
- c) Determinar as singularidades existentes ao longo da adutora;
- d) Determinar o material e idade aproximada da adutora atribuindo um valor teórico para o coeficiente C de acordo com a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**;
- e) Determinar a altura entre o eixo da bomba e o nível de chegada final da adutora (H_{gr}).
4. Cálculo das perdas concentradas:
- a) Calcular as perdas concentradas em termos de comprimento equivalente e diâmetro, tanto nos trechos de sucção como de recalque.
5. Elaborar diagrama hidráulico reunindo os dados levantados. O diagrama pode ser desde um modelo tridimensional que representa em detalhes todos os elementos levantados no processo 01, como uma representação

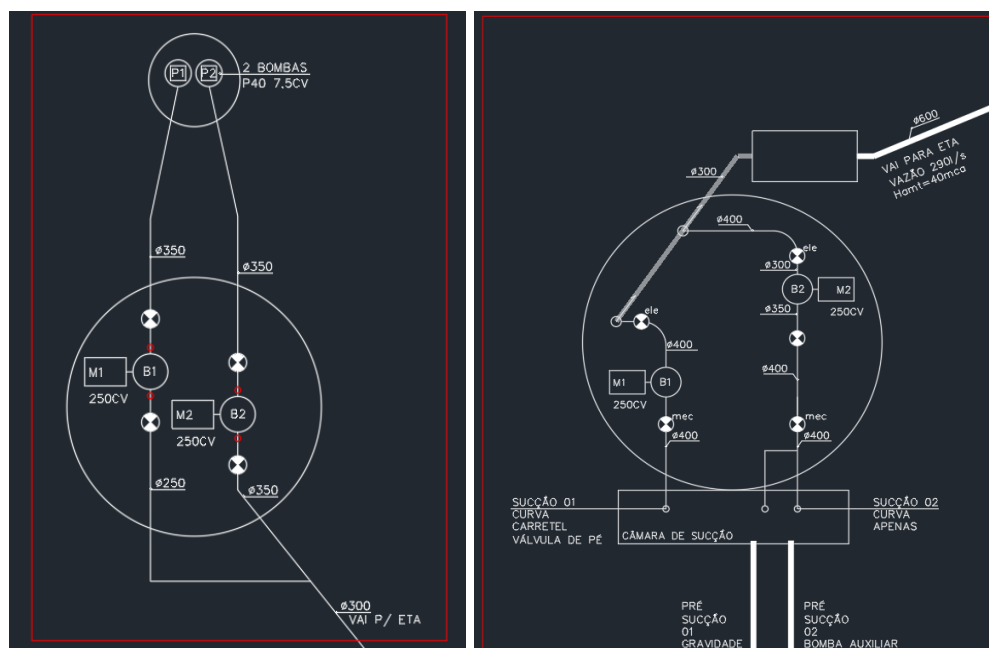
simplificada desses elementos em planta. As figuras abaixo ilustram dois exemplos de representação pelos dois modos.

Figura 4.6 Modelagem em CAD dos GMBs da elevatória.



Fonte: Elaborado pela empresa Vitalux.

Figura 4.7 Diagramas hidráulicos elaborados.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Processo 02: Dados dos motores, acionamentos e demais cargas da unidade analisada.

6. Dados dos motores de cada grupo motobomba da elevatória:
 - a) Potência nominal de placa de cada motor;
 - b) Fator de serviço;
 - c) Rendimento nominal de placa;
 - d) Fator de potência;
 - e) Histórico de rebobinagens;
 - f) Idade de operação de cada motor;
7. Dados dos acionamentos de cada grupo motobomba:
 - a) Método de acionamento de cada grupo motobomba;
 - b) Rendimento nominal de cada um dos acionamentos;
8. Levantamento do diagrama elétrico unifilar da elevatória
 - a) Com base no diagrama é possível definir posteriormente onde deverá ser instalado o equipamento para medição da potência da elevatória, como também, caso haja algum redimensionamento das cargas, se haverá necessidade de aumento ou adequação da subestação de energia.

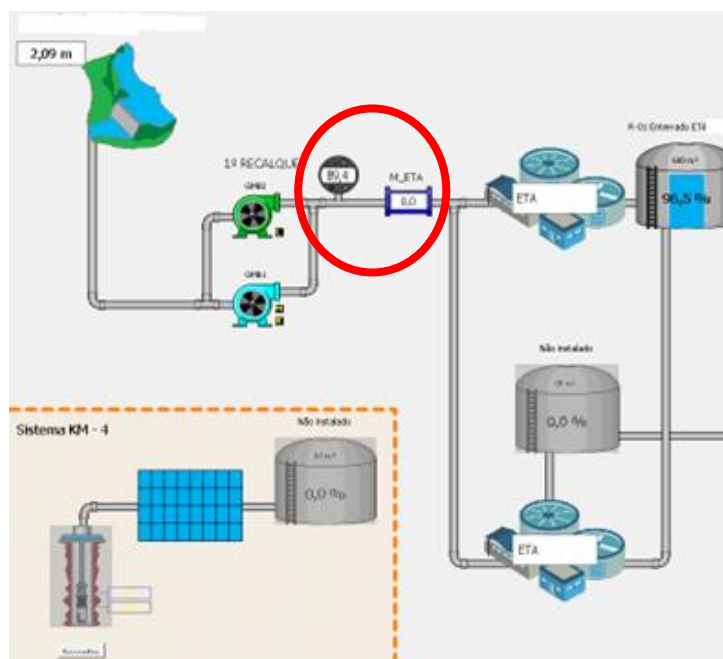
Processo 03: Dados de operação da unidade consumidora.

9. Definição do período de análise do diagnóstico.
 - a) Idealmente deve ser de um ano ou maior. Caso tenha havido alguma mudança recente na elevatória ou na operação, deve-se atentar para o período que represente o sistema no momento atual, sem mudanças nas configurações dos equipamentos. Com a coleta dos dados no período de um ano é possível identificar se ocorre o fenômeno de sazonalidade, ou seja, variações significativas de vazão e pressão para os diferentes meses do ano. Caso haja sazonalidade a operação pode alterar significativamente, tanto por modulação de carga no grupo (para sistemas com conversor de frequência ou estrangulamento de válvula), como pela entrada de um ou mais grupos associados em paralelo. Além disso, para os indicadores Ph5 (consumo específico normalizado) e Ph4 (utilização da capacidade de bombeamento) utilizados pelo método, recomenda-se que os cálculos sejam feitos para períodos de pelo menos

um ano, a fim de evitar possíveis erros de interpretação devido aos fatores mencionados (ALEGRE *et al.*, 2000).

- 10.** Definição dos modos de operação da elevatória durante o período analisado. Caso esteja disponível, verificar o sistema supervisorio que representa a elevatória para levantamento da frequência de cada um dos modos durante os meses típicos de operação (inverno e verão). Em linhas gerais, deve-se definir como a elevatória opera e por quanto tempo em cada período do ano. Por exemplo, sistemas que apresentam alturas manométricas médias mensais que, em relação a registros de valores médios e de desvio padrão nos últimos anos, variem de maneira significativa, podem ser classificados como sazonais, contando com uma análise diferenciada subdividida em períodos menores. A Figura 4.8 ilustra um exemplo de sistema supervisorio capaz de subsidiar as informações necessárias para essa etapa, em que se tenham pelo menos um sensor de pressão e um medidor de vazão registrando continuamente os dados do processo de bombeamento.

Figura 4.8 Exemplo de sistema supervisorio com medição de vazão por macromedidor e pressão na adutora.



Fonte: Sistema supervisorio SAA CORSAN.

11. Dados dos períodos de operação da elevatória (h/mês) para cada um dos modos verificados.
 - a) É possível obter esses dados tanto pelos registros dos horímetros existentes nas estações de tratamento de água, quanto pelo relato dos operadores ou registros de sistemas supervisórios existentes.
12. Dados de energia mensal e demandas registradas das faturas (kWh/mês):
 - a) Obter os dados do consumo total de energia de cada mês durante o período analisado pelas faturas de energia, bem como do consumo no horário de ponta e das demandas na ponta e fora ponta. É possível solicitar a memória de massa para a concessionária a fim de obter dados mais precisos sobre a demanda da unidade ao longo do tempo.
13. Dados do volume total bombeado ($m^3/mês$):
 - a) Registros dos volumes bombeados acumulados no mês (aferidos por calha Parshall, macromedidores, etc.);
 - b) Registro pela vazão de bombeamento média da elevatória informado pela equipe de operação local;

Processo 04: Estratégia de medição dos grupos motobombas da elevatória analisada:

14. Divisão do plano de medição para cada modo de operação identificado, detalhando os seguintes aspectos:
 - a) Nº de grupos instalados e a informação de quantos operam, se operam em paralelo e quantos são reservas;
 - b) Se existe controle automático na estação ou se a operação é feita manualmente;
 - c) Se há alteração do modo de operação ao longo do dia. Caso positivo, como é realizada essa alteração.
15. Definição dos pontos de medição de pressão:
 - a) Verificar previamente a existência de conexões auxiliares nos flanges de cada GMB para instalação dos vacuômetros e manômetros;
16. Definição dos pontos de medição de vazão:
 - a) Verificar a existência de TAP para pitometria na adutora;
 - b) Verificar a existência de trecho reto na tubulação, sem interferências, para medição de vazão ultrassônico na adutora;
17. Definição dos pontos de medição das grandezas elétricas:

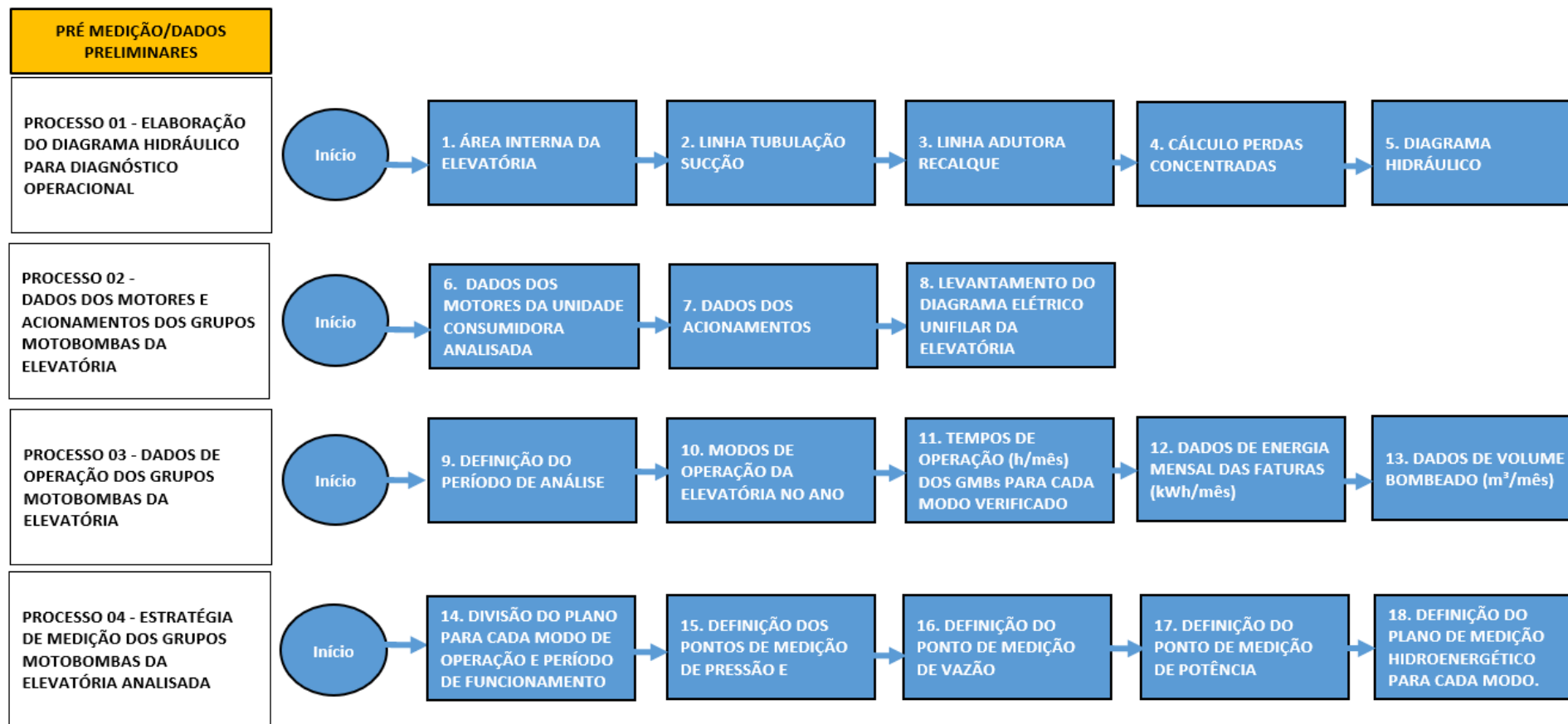
- a) Verificar possibilidade de instalação nos quadros de acionamento de cada GMB;
- b) Caso somente seja possível instalar em um quadro geral, consultar o diagrama unifilar elétrico da unidade;

18. Definição do plano de medição hidroenergético para cada modo:

- a) Determinar quais os instrumentos de medição que serão utilizados e o erro associado a cada um deles;
- b) Determinar qual o tempo de integração para cada equipamento instalado e o intervalo de medição;
- c) Para levantamento da curva do sistema, determinar quantos pontos serão registrados e como o sistema será variado (se por fechamento de válvula ou modulação dos conversores de frequência).

O fluxograma representado pela Figura 4.9 resume os processos da etapa de pré medição.

Figura 4.9 Processos da etapa de pré medição.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.1.2 Etapa de diagnóstico operacional do sistema

Esta etapa é dividida em 3 processos e 14 itens a serem atendidos. Objetiva-se com ela verificar a coerência dos dados obtidos pela etapa anterior através de medições hidroenergéticas e calcular os indicadores selecionados pelo método, para assim realizar o diagnóstico operacional do sistema de bombeamento.

As medições realizadas devem apresentar um erro padrão associado, decorrente da precisão do equipamento utilizado na instrumentação. Assim, é necessário que se defina os diferentes modos de medição para cada variável selecionada (quando necessário registrar a medição no local), bem como as fontes para aquisição desses dados em sistemas já automatizados.

Sugere-se para a metodologia adotar determinados valores de erro para cada uma das variáveis que compõe a equação do rendimento (equação 3.14). A Tabela 4.1 apresenta os erros máximos admissíveis para as medições das pressões (para o cálculo da altura manométrica), a Tabela 4.2 para o valor do volume ou vazão, a Tabela 4.3 para o valor da energia ou potência e a Tabela 4.4 para o valor do período de operação da elevatória.

Tabela 4.1 Erros máximos admissíveis para os equipamentos medidores de pressão.

MEDIÇÃO DE PRESSÃO (ABNT NBR 14105-1)		
CLASSE DE EXATIDÃO DO EQUIPAMENTO	ERRO MÁXIMO ADMISSÍVEL	FE (kgf/cm²)
VACUOMETROS		
VACUOMETRO A4	0,10%	200
VACUOMETRO A3	0,25%	200
VACUOMETRO A2	0,50%	200
VACUOMETRO A1	1,00%	200
VACUOMETRO A	1,60%	200
VACUOMETRO B	3,00%	200
VACUOMETRO C	4,00%	200
VACUOMETRO D	5,00%	200
MANÔMETROS		
MANOMETRO A4	0,10%	200
MANOMETRO A3	0,25%	200
MANOMETRO A2	0,50%	200

MANOMETRO A1	1,00%	200
MANOMETRO A	1,60%	200
MANOMETRO B	3,00%	200
MANOMETRO C	4,00%	200
MANOMETRO D	5,00%	200

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 14105-1 (2013, p.)

Os valores dos erros máximos admissíveis para os equipamentos de medição de vazão foram obtidos por meio de catálogos de alguns desses equipamentos. Esses valores são os sugeridos pela metodologia e podem ser reavaliados para o caso particular do equipamento utilizado. A Tabela 4.2 apresenta os valores de erros por equipamento e a referência para a determinação do valor.

Tabela 4.2 Erros máximos admissíveis para os equipamentos medidores de vazão.

MEDIÇÃO DE VAZÃO/VOLUME		
EQUIPAMENTO	ERRO MÁXIMO	REFERÊNCIA
CALHA PARSHALL SENSOR ULTRASSÔNICO	3,25%	HIDROMETER CALHA PARSHALL E SISTEMA ULTRASSÔNICO PARA MEDIÇÃO DE VAZÃO AUTOMÁTICO
MEDIDOR DE VAZÃO ULTRASSÔNICO	1%	MEDIDOR DE VAZÃO ULTRASSÔNICO FIXO MODELO CALMP FLOW SANESOLUTI
MEDIDOR DE VAZÃO ELETROMAGNÉTICO	0,50%	FMG606 2" COM FLANGES
MALETA DE PITOMETRIA	0,15%	MDH-600-300C+ LAMON

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os valores dos erros máximos admissíveis para os equipamentos de medição de potência e energia foram obtidos por meio de catálogos de alguns desses equipamentos. Esses valores são os sugeridos pela metodologia e podem ser reavaliados para o caso particular do equipamento utilizado. A Tabela 4.3 apresenta os valores de erros por equipamento e a referência para a determinação do valor.

Tabela 4.3 Erros máximos admissíveis para os equipamentos medidores de potência e energia.

MEDIÇÃO DE ENERGIA E POTÊNCIA		
EQUIPAMENTO	ERRO MÁXIMO	REFERÊNCIA
FATURA DE ENERGIA	0%	MEDIDOR DA CONCESSIONÁRIA
ANALISADOR DE ENERGIA	0,5%	RE6001 EMBRASUL
IHM DO CONVERSOR DE FREQUENCIA	5,0%	SCHNEIDER ATV61

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A medição da energia em toda a instalação pode ser feita pelos medidores da concessionária. Os dados dos medidores da concessionária são considerados 100% precisos para a determinação da economia, porque definem o pagamento da energia. As regulamentações comerciais relativas à comercialização de produtos energéticos habitualmente determinam a precisão dos dados dos medidores da concessionária (EVO, 2012).

Tabela 4.4 Valor do erro para o caso da medição do tempo com horímetros.

MEDIÇÃO DO PERÍODO DE TEMPO	
MEDIÇÃO DO TEMPO	ERRO MÁXIMO
HORÍMETROS	0%

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Para o caso de dados não medidos e baseados em estimativas, como no caso de ★, atribui-se um valor de erro de 10%, o que já é o suficiente para requerer uma medição mais precisa para o desenvolvimento da metodologia.

Para a obtenção dos resultados dos indicadores, esta etapa sugere a seguinte sequência de processos e itens a serem atendidos:

Processo 05: Medições simultâneas hidroenergéticas dos grupos motobombas.

19. Instalação dos equipamentos e medição simultânea dos parâmetros conforme plano de medição elaborado hidroenergético elaborado no processo anterior. Deve-se sincronizar as medições realizadas.

20. Variação das configurações dos parâmetros para cada modo de operação da elevatória (variação pela frequência de operação, no caso de uso de

conversores de frequência ou pela entrada de um grupo motobomba a mais em paralelo).

21. Aplicação dos pontos medidos na curva do sistema obtida através dos cálculos de perda de carga aplicados pela equação de *Hazen Williams* conforme sugerido pela metodologia de Gomes e Carvalho (2012), que propõe registrar um ponto de vazão medido e os valores de 0%, 20%, 60%, 120% e 140% deste valor, aplicando-o na equação para cálculo de sua altura manométrica correspondente.
22. Verificação da H_{amt} obtida em campo pela calculada através dos valores do modelo hidráulico gerado pelos dados levantados na etapa de pré medição. Assim é possível verificar se a equação obtida para a curva do sistema está coerente com os valores medidos simultaneamente em campo.
 - a) Caso os valores estejam coerentes, deve-se prosseguir com a utilização da equação da curva do sistema proposta na etapa de pré medição. O valor da altura manométrica para cada valor mensal será calculado pela equação da curva do sistema obtida. Prosseguir também com o cálculo da perda de carga para cada vazão e altura manométrica registrada para cada um dos meses;
 - b) Caso os valores estejam discrepantes, deve-se reavaliar os parâmetros inseridos para cálculo da curva do sistema através dos dados obtidos nos registros e projetos;

Processo 06: Elaboração da matriz energética da unidade:

23. Levantamento estimado das demais cargas relevantes existentes na unidade consumidora.
24. Consumo de energia para cada GMB em análise pelo diagnóstico:
 - a) Com os dados de potência/energia medidos diretamente nos GMBs, verificar a representatividade do consumo de energia desses equipamentos frente a totalidade da unidade consumidora;
25. Elaborar matriz energética para a unidade consumidora partindo dos dados obtidos pelo item 12 (faturas de energia dos últimos 12 meses).
26. Caso necessário, ajustar a parcela de energia da fatura a ser considerada no diagnóstico operacional, uma vez que a maior representatividade da variável dependente energia na análise da metodologia deve ser atribuída aos grupos motobombas, foco das ações de eficiência energética;

27. Verificação estatística do modelo matemático da equação linear da energia em função do volume:

- a) Caso os dados de energia e volume de água bombeada apresentem correlação, ou seja, deve-se calcular os índices estatísticos para avaliação do modelo. Caso o critério de boa adesão seja atendido ($R^2 > 75\%$) prossegue-se com a análise.
- b) Caso não apresente correlação válida, deve-se reavaliar a parcela atribuída às bombas para que a correlação mínima do modelo seja atendida. Caso os grupos representem uma parcela muito pequena do consumo da unidade, os dados de energia deverão ser estimados com a medição da potência e dos períodos de operação para cada um dos modos, incidindo em um erro maior no resultado final do rendimento global. Outras alternativas são: aumentar o número de meses da amostra e rever os dados medidos, a fim de diminuir a sua imprecisão. É importante mencionar que a correlação está diretamente ligada a qualidade do cálculo do indicador *CEN* uma vez que ele propõe ser uma métrica de eficiência para estações elevatórias de recalque.

Processo 07: Diagnóstico operacional e análise dos indicadores:

28. Cálculo e análise do rendimento e da sua incerteza:

- a) Calcular o rendimento global da elevatória pela média dos rendimentos obtidos para cada mês durante o período de análise;
- b) Calcular a incerteza combinada do rendimento pela equação 3.31;
- c) Caso a incerteza calculada para o rendimento seja superior a 10%, sugere-se que as medições devam ser refeitas, pois tal valor aumentará a linha de corte para definição das ações de eficiência energética e estará em desacordo com a prática adotada pelas entidades gestoras das empresas de saneamento da IWA, que devem ser encorajadas a atingir um grau inferior a 10% de precisão para cada variável de entrada necessária para o cálculo dos indicadores (ALEGRE *et al.*, 2000).
- d) Se for menor, continua-se com a análise;
- e) Utilizar a classificação por estrelas da **Erro! Fonte de referência não encontrada.** para determinar a qualidade dos dados obtidos.

29. Cálculo e análise do indicador *CEN* através da classificação qualitativa proposta pela Tabela 3.4 e Tabela 3.5.

- a) Verificar o efeito da sazonalidade no sistema pelo cálculo do desvio padrão dos registros de altura manométrica aferida para cada mês. Caso o desvio padrão supere 10% do valor da média dos valores de altura manométrica, considerar o cálculo do indicador como uma composição de subdivisões para diferentes períodos de ocorrência no ano;
- b) Classificar o indicador qualitativamente dentro das faixas de insuficiente, mediano ou bom;

30. Cálculo e análise do indicador de perda de carga unitária ou i_{ED} :

- a) Classificar o valor obtido de acordo com o diâmetro insatisfatório, aceitável ou bom;

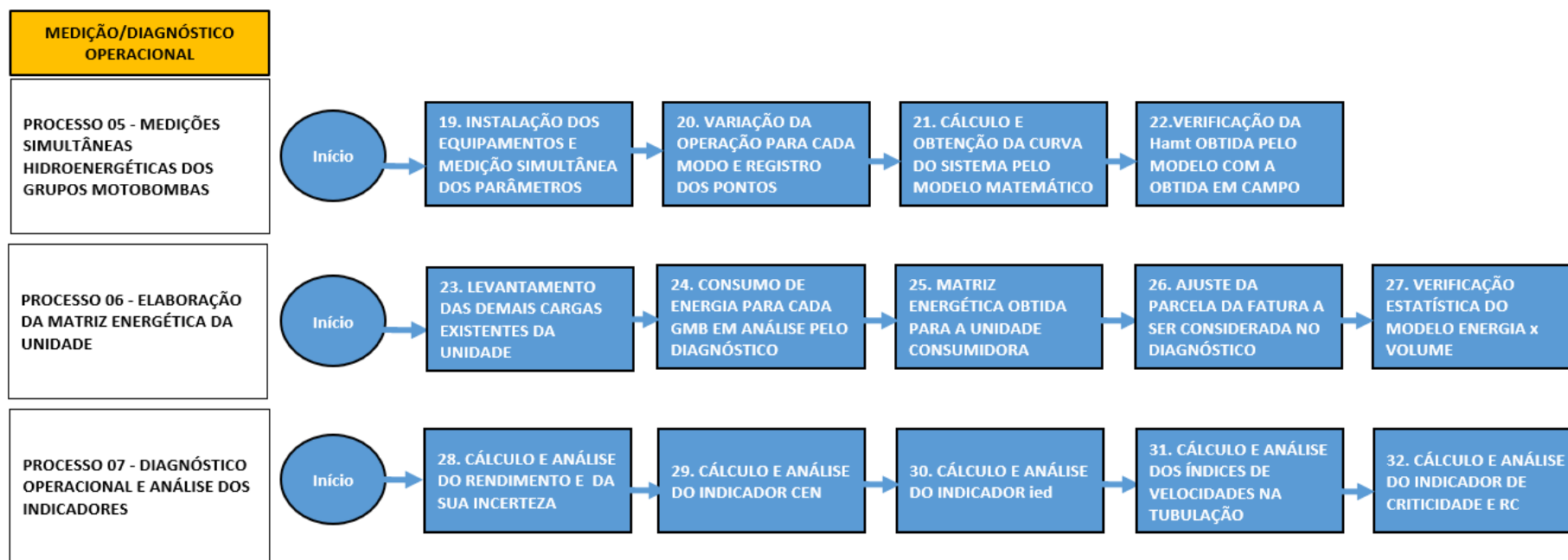
31. Cálculo e análise dos índices de velocidade na tubulação:

- a) Classificar o valor obtido para a tubulação de sucção em adequado e inadequado;
- b) Classificar o valor obtido para a tubulação de recalque em adequado, inadequado ou com indicativo de perdas (caso a velocidade supere 2 m/s);

32. Cálculo e análise do indicador de criticidade e RC.

- a) Valores do indicador RC considerados altos (por exemplo, acima de 90%) apontam para sistemas de bombeamento com pouca margem para modulação de carga, uma vez que o bombeamento opera com alta demanda no horário de ponta;
- b) Valores altos do indicador Ph4 indicam um elevado grau de criticidade ao sistema, uma vez que para o dia de maior consumo energia, a demanda remanescente da demanda máxima a ser utilizada é muito pequena. Isso pode indicar uma necessidade de expansão do sistema. Valores baixos indicam haver sobra na capacidade dos grupos, podendo sinalizar um ganho em eficiência pela modulação de carga dos grupos motobombas.

Figura 4.10 Processo da etapa de medição / diagnóstico operacional



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.1.3 Etapa de determinação do potencial de redução de energia

Esta etapa é dividida em 3 processos e 16 itens a serem atendidos. Objetiva-se com ela verificar quais ações de eficiência energética são as mais apropriadas para cada sistema diagnosticado. A seleção de cada uma das ações dependerá do benefício energético alcançado com a sua implementação. Esse benefício somente será considerado viável pelo método se ele demonstrar ser significativo em relação à incerteza combinada do rendimento calculado para o sistema analisado.

Com os indicadores e índices calculados e analisados na etapa anterior, deve-se verificar quais deles ficaram insatisfatórios ou acima dos limites máximos considerados adequados.

Na condição de referência, a metodologia proposta adota os seguintes critérios:

- Para o novo rendimento global do GMB, o valor do rendimento de 74,90% (valor próximo ao considerado conservador, de acordo com a Tabela 2.4);

- Para o i_{ED} o valor abaixo de 2 m/km (limite do considerado bom para essa referência) para adutoras de diâmetros acima de 400mm, e de maneira alternativa, adotar o critério de até 10 m/km para adutoras de diâmetro menor que 300 mm (conforme Tabela 3.6);

- Para as velocidades os limites máximos de 1,5 m/s para a sucção e 2,0m/s para o recalque, e os limite mínimo de 0,5 m/s para ambos os trechos;

- Para o coeficiente de rugosidade de *Hazen-Williams*, C , o valor de referência de 120;

- Para novos motores, no caso de haver diminuição da potência nominal, carregamentos sempre na faixa de 70% a 80%;

Para que se cheguem a esses limites, o método propõe uma combinação de até 4 possíveis ações de eficiência energética a serem adotadas, todas elas associadas à etapa do processo que concentra as maiores oportunidades de ganho em eficiência energética a serem exploradas. As ações de eficiência energética propostas pelo método consistem em:

AEE 01: substituição apenas do motor elétrico;

AEE 02: reabilitação ou substituição de grupos motobomba;

AEE 03: substituição GMB potencializada com melhoria na sucção e adutora;

Processo 08: Melhoria conforme a seleção da AEE 01:

- 33.** Verificar o carregamento, idade e nº de rebobinagens do motor existente;
- Se o carregamento estiver abaixo de 45% ou acima de 100% (conforme referência da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**) ele está em uma zona de baixa eficiência;
 - Se o motor possuir mais de 10 anos e for rebobinado uma ou mais vezes, aplicar a redução percentual de rendimento de 1% pela idade e 2% se já for rebobinado. Caso se conheça a temperatura utilizada no processo de rebobinagem, diminuir conforme a Tabela 2.1.
- 34.** Selecionar um novo motor com potência nominal que resulte em um carregamento entre 70 e 80%;
- Caso haja redução ou manutenção da potência nominal do motor, projeto é elegível ao programa Bônus Motor da ANEEL.
- 35.** Definir novo rendimento em função da potência e carregamento;
- Para isso, é possível utilizar uma ferramenta de auxílio que calcula o rendimento do motor em função do seu carregamento, denominada BD Motor, disponível no site da CEPEL;
- 36.** Recalcular a energia e demanda com o novo motor instalado;
- A energia é calculada pelo produto do tempo de operação do grupo motobomba com a nova potência elétrica ativa obtida com a melhoria de rendimento do novo motor instalado.

$$P_{ele\ novo} = P_{ele} \frac{n_{motor\ atual}}{n_{motor\ novo}} \quad (4.1)$$

- 37.** Verificar a viabilidade da ação de eficiência em relação a incerteza combinada calculada para o rendimento;

Processo 09: Melhoria conforme a seleção da AEE 02:

- 38.** Selecionar novo GMB com rendimento global de 74,9%;
- 39.** Calcular a energia e demanda consumida pela elevatória;
- A energia é calculada pelo produto do tempo de operação do grupo motobomba com a nova potência elétrica ativa obtida com a melhoria de rendimento do novo grupo motobomba instalado. A demanda é a própria potência elétrica obtida.

$$P_{ele\ novo} = P_{ele} \frac{n_{GMB\ atual}}{n_{GMB\ novo}} \quad (4.2)$$

- 40.** Selecionar nova potência do GMB com carregamento entre 70 e 80%;
- a) Caso haja redução da potência nominal do motor, projeto é elegível para PROPEE da ANEEL;
- 41.** Verificar os indicadores de criticidade e RC para definir a utilização do conversor de frequência;
- 42.** Verificar a viabilidade da ação de eficiência em relação a incerteza;

Processo 10: Melhoria conforme a seleção da AEE 03:

- 43.** Selecionar nova tubulação com resultado i_{ED} bom e velocidades aceitáveis;
- a) Para isso, alterar o diâmetro da adutora e o coeficiente característico C, tanto na tubulação de sucção quanto na tubulação de recalque, até que o i_{ED} fique dentro da faixa aceitável e a velocidade na linha de recalque fique abaixo do limite estabelecido, de 2,0 m/s
- 44.** Configurar novo rendimento do GMB para 74,9%;
- 45.** Recalcular a energia consumida pela elevatória;
- a) Para isso, recalcular os valores da perda de carga pela equação de *Hazen Williams* (equação 3.6), considerando os novos valores de diâmetro e coeficiente de rugosidade obtidos para ajuste dos indicadores;
- b) Recalcular a potência hidráulica pela equação 3.9, tendo em vista os novos valores obtidos de altura manométrica e a nova potência elétrica considerando o rendimento conservador do novo grupo motobomba de 74,9%.
- 46.** Selecionar a nova potência do GMB e carregamento entre 70 e 80%;
- 47.** Verificar a viabilidade da ação de eficiência em relação a incerteza;
- 48.** Verificar o benefício da ação em relação a AEE 02;
- a) Pelo alto custo de obras que envolvam adutoras em relação a obras de substituição de grupos motobombas, é necessário que a seleção da AEE 03 somente ocorra caso o seu benefício seja expressivamente maior em relação às demais.

Figura 4.11 Processo de determinação do potencial de eficiência energética.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

5 ESTUDO DE CASO

Para demonstrar a aplicação da metodologia proposta de diagnóstico energético, calcularam-se os resultados do potencial de redução de energia para oito (8) sistemas de bombeamento do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. A escolha desses sistemas se deu pela grande disponibilidade de dados presentes para análise, como medições e projetos, e pela diferença de características físicas, como altura geométrica, comprimento da adutora e estágio de recalque. A metodologia foi integralmente seguida com informações de projetos existentes (etapa de pré medição) e medições em campo (etapa de medição/diagnóstico operacional). Para fins de validação dos cálculos realizados pela metodologia, o resultado do potencial de redução de energia referente ao cenário de intervenção proposto pela AEE 02 (melhoria pela substituição do GMB) foi calculado também por outras duas metodologias existentes apresentadas neste trabalho: *ECAM Methodology* (GIZ; IWA, 2017) e a metodologia PROEESA (FERREIRA; DE OLIVEIRA, 2017). Isso possibilitou a comparação dos resultados obtidos entre as três ferramentas diferentes, para então, na última etapa, ampliar o cálculo do potencial de redução referente aos cenários da AEE1 e AEE3, calculados pela metodologia própria adotada.

5.1 Características das elevatórias diagnosticadas

As oito (8) elevatórias de água selecionadas apresentam diferentes características, quanto ao estágio de bombeamento dentro do sistema de abastecimento (três delas de água tratada a jusante do bloco hidráulico de tratamento e os demais de água bruta, no manancial de captação), quanto as características topográficas (diferenças de alturas geométricas, a menor de 10 m e a maior de 263,63 m), extensão física das adutoras (a menor de 900 m e a maior de 8520 m) e quanto as suas capacidades (vazão bombeada dentro da faixa de 56,49 a 277,90 l/s). Em comum, os sistemas apresentam a característica operacional de operação com um grupo motobomba apenas (configurações das figuras Figura 4.1 e Figura 4.2, de maneira a possibilitar a associação direta das variáveis independentes (volume e altura manométrica) e dependentes (energia) medidas a cada mês durante o ano com a operação de um grupo motobomba em específico.

Importante observar que para a EA3 não foi possível coletar os dados para o período de um ano, uma vez que a elevatória passou por uma reforma significativa recentemente (instalação de um novo grupo motobomba de maior potência em adição aos demais do recalque), passando a operar com esse novo grupo de maneira exclusiva. Assim, para o período de referência selecionaram-se os últimos 6 meses de registro com essa nova condição existente. Isso foi adotado como válido, uma vez que foi demonstrado haver correlação dos dados de energia com os dados de volume medidos também para esse caso (coeficiente R^2 acima de 97,59%).

Atribuiu-se ao coeficiente de rugosidade de *Hazen- Williams*, C , o valor de acordo com a idade e material da adutora (dados de projeto), não sendo feita quaisquer medições para o seu cálculo. Apesar de ser uma estimativa, para esse parâmetro não se atribuiu um valor de precisão para posterior cálculo da incerteza combinada do rendimento.

As características gerais de cada sistema de bombeamento analisado são mostradas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Características gerais de cada sistema de bombeamento analisado.

Características gerais de cada sistema analisado								
Característica	EA 01	EA 02	EA 03	EA 04	EA 05	EA 06	EA 07	EA 08
TIPO	ÁGUA BRUTA	ÁGUA BRUTA	ÁGUA BRUTA	ÁGUA TRATADA	ÁGUA TRATADA	ÁGUA TRATADA	ÁGUA BRUTA	ÁGUA BRUTA
Período analisado (meses)	12	12	6	12	12	12	12	12
Correlação R ² Energia e VI.	99,80%	89,09%	97,59%	75,55%	99,26%	92,42%	87,00%	98,79%
Modo de operação do sistema	(1+1R)+PRE	(1+1R)+PRE	(1+2R)+PRE	(1+1R)	(1+1R)	(1+1R)	(1+1R)	(1+1R)+PRE
Vazão média de operação (l/s)	277,90	142,33	233,96	148,74	60,52	264,13	94,98	56,49
Desnível geométrico (m)	25,00	53,69	10,00	30,00	16,00	26,50	120,33	263,63
Altura manométrica média (mca)	31,31	98,90	32,38	37,07	53,56	31,31	217,16	289,51
Comprimento da adutora (m)	1440,00	2100,00	1240,00	900,00	12300,00	1000,00	8520,00	2375,00
Diâmetro da adutora (mm)	600,00	300,00	400,00	400,00	350,00	600,00	300,00	250,00
Coefficiente rugosidade C	81,00	97,00	87,00	87,00	78,00	87,00	91,00	91,00
Potência nominal do GMB (kW)	185 (250 CV)	185 (250 CV)	262 (350 CV)	90 (125 CV)	110 (150 CV)	150 (200 CV)	375 (500 CV)	375 (500 CV)
Potência ativa calculada (kW)	159,99	201,80	134,82	80,41	114,70	141,44	382,43	316,50

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

5.2 Comparação entre as metodologias

Para os sistemas de bombeamento selecionados, calcularam-se de acordo com as metodologias de diagnóstico ECAM e PROEESA a variação da altura manométrica média registrada para cada mês, o consumo específico normalizado, o rendimento global da elevatória analisada e a sua incerteza as velocidades na sucção e descarga, a perda de carga unitária e o potencial de redução de energia acumulado no período de um ano pela instalação de um grupo motobomba com rendimento global de 74,90%.

Pela variação da altura manométrica média obtida para cada mês no período analisado, constatou-se que a EA3 apresentou 10,06% de variação, apresentando possivelmente característica sazonal por ter superado o valor dos demais sistemas (maior que 10%), se enquadrando na necessidade de ser subdividida em mais de um período para o cálculo do indicador.

Com a variação da altura manométrica calculada, partiu-se para o cálculo do indicador *CEN*. Para os três métodos, ele apresentou valores similares. Por se tratar de um indicador que é calculado com valores de entrada definidos pelo usuário (energia e volume acumulados no período de um ano e altura manométrica média) não houve variações significativas entre os resultados.

Para o valor do rendimento, a metodologia proposta calcula o rendimento como a média dos rendimentos obtidos para cada mês, enquanto a metodologia PROEESA faz a conversão do valor do *CEN* pela equação 2.2 e a metodologia ECAM utiliza como valor de cálculo do rendimento a corrente elétrica fornecida ao GMB. Pelos resultados obtidos, conclui-se não ter havido diferenças significativas entre os métodos.

As velocidades de sucção e recalque somente foram calculadas pela metodologia proposta, sendo objeto de análise qualitativa.

Para o índice de perda de carga unitária da adutora, verificou-se na comparação entre os métodos que o cálculo do método proposto e da metodologia ECAM apresentaram valores diferentes. O cálculo da perda de carga unitária, ou índice *ied* pelo método proposto, ocorreu pela aplicação da equação de *Hazen Williams* (equação 3.6), em que a perda de carga linear é função da vazão, do diâmetro, do comprimento e do coeficiente *C*. Adotou-se para a perda de carga que compõe o cálculo do índice o valor médio calculado entre todos os meses de análise.

Para obtenção da perda de carga unitária, dividiu-se o valor médio obtido pelo comprimento total da adutora. Pela metodologia da ferramenta ECAM, o índice foi calculado pela diferença entre a altura manométrica média, inserida como dado de entrada, e o desnível geométrico médio, sobre o comprimento total da adutora da linha de recalque (ver equação 2.1). Neste sentido, a vantagem do método proposto foi poder calcular o potencial de redução energética a partir da situação existente já calculada, em que para se definir a situação de referência (ou de maior eficiência) alteram-se apenas os parâmetros do diâmetro interno do conduto e de seu coeficiente de rugosidade característico até o indicador apresentar um valor dentro da faixa considerado como bom, sendo o coeficiente C da nova adutora fixado em um valor de referência teórico de 120. Como a ferramenta ECAM não calcula o potencial de redução pela melhoria da adutora na linha de recalque, apenas classifica o desempenho da adutora, esse fator não interferiu nos resultados do método. O método PROEESA não calcula índices para o desempenho da adutora.

Para o cálculo do potencial de redução de energia pela reabilitação ou substituição do GMB (AEE 02), adotou-se como rendimento global do novo GMB ($n_{GMB\ novo}$) o valor de 74,90% para os três métodos. Como mencionado, esse foi o único potencial de redução calculado nesta etapa de comparação, uma vez que os outros métodos selecionados não calculam melhorias referentes a substituição apenas de motores (AEE 01) e nem de adutoras (AEE 03). O cálculo do potencial de redução de energia com a substituição ou reabilitação do GMB apresentou também valores similares para as três metodologias, validando a sequência de cálculos efetuados pela metodologia proposta.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 Resultados dos métodos aplicados nos estudos de caso (condição atual).

Diagnóstico operacional com as três metodologias									
Indicadores \ Sistema	Metodologia	EA 01	EA 02	EA 03	EA 04	EA 05	EA 06	EA 07	EA 08
Varição Hamt	x	1,03%	2,65%	10,06%	1,85%	5,59%	6,86%	2,54%	0,69%
Potência hidráulica desenvolvida (kW)	PROPOSTA	85,66	139,58	72,63	54,23	56,06	83,06	201,90	175,95
	ECAM	85,33	138,10	72,18	54,21	55,96	83,04	202,40	175,90
	PROEESA	x	x	x	x	x	x	x	x
CEN (kWh / m ³ .100mca)	PROPOSTA	0,51	0,40	0,51	0,41	0,56	0,46	0,52	0,49
	ECAM	0,51	0,40	0,51	0,40	0,56	0,46	0,52	0,49
	PROEESA	0,51	0,40	0,51	0,41	0,56	0,46	0,52	0,49
Rendimento e Incerteza (%)	PROPOSTA	53,54 ± 6,38	69,14 ± 4,27	53,61 ± 6,65	67,43 ± 4,78	48,88 ± 9,81	58,72 ± 11,77	52,90 ± 1,92	55,60 ± 4,07
	ECAM	53,35	68,34	53,50	67,23	48,86	58,71	52,92	55,61
	PROEESA	53,40 ± 7	68,63 ± 5	53,50 ± 3%	67,30 ± 4%	48,70 ± 7%	59,60 ± 9%	52,70 ± 2%	55,60 ± 3%
Velocidades na linha de sucção/ recalque (m/s)	PROPOSTA	2,21 / 0,98	1,48 / 2,01	1,20 / 1,87	1,18 / 1,18	1,52 / 0,78	3,25 / 1,00	0,99 / 1,34	1,26 / 1,26
	ECAM	x	x	x	x	x	x	x	x
	PROEESA	x	x	x	x	x	x	x	x
Perda de carga unitária (m/km)	PROPOSTA	3,89	21,80	17,50	7,88	4,80	3,37	11,41	12,63
	ECAM	4,38	20,55	21,11	7,94	4,79	4,97	11,37	12,56
	PROEESA	x	x	x	x	x	x	x	x
Redução de energia AEE2(MWh/ano)	PROPOSTA	318,2 (24,2%)	91,3 (7,3%)	180,8 (28,7%)	58,16 (9,9%)	261,0 (18,3%)	266,0 (3,3%)	800,1 (29,8%)	525,0 (25,8%)
	ECAM	319,37	103,79	179,90	59,90	259,27	266,56	786,94	524,85
	PROEESA	318,76	99,20	180,23	59,53	260,76	266,14	796,37	525,70

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

5.3 Classificação operacional dos sistemas

Após a fase de cálculo dos índices e indicadores pela metodologia proposta e pelas metodologias de referência, fez-se a classificação qualitativa do desempenho operacional de cada elevatória pelos índices e indicadores previstos pela metodologia.

O primeiro valor analisado foi o indicador *CEN*. A classificação por este indicador está representada na Tabela 5.3

Tabela 5.3 Classificação de cada sistema de acordo com o indicador *CEN*.

Sistema	CEN (kWh/m ³ .100mca)	Classificação para as três metodologias
EA 01	0,51	INSUFICIENTE
EA 02	0,40	MEDIANO
EA 03	0,51	INSUFICIENTE
EA 04	0,41	MEDIANO
EA 05	0,56	INSUFICIENTE
EA 06	0,46	INSUFICIENTE
EA 07	0,52	INSUFICIENTE
EA 08	0,49	INSUFICIENTE

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Observa-se que foi obtida a mesma classificação qualitativa pelos três métodos para cada uma das elevatórias analisadas.

O segundo valor analisado foi o índice de perda de carga unitária, calculado pela metodologia proposta e pela metodologia ECAM. Como os valores calculados pela metodologia proposta apresentaram diferenças significativas em relação aos obtidos pela metodologia ECAM (para o caso E01 a diferença do valor obtido pela

metodologia proposta foi de 11,19% menor que o valor obtido pela metodologia ECAM, para o caso E03, 17,10% menor e para o caso E06 32,19% menor) houve diferença de classificação no desempenho das adutoras para duas das oito elevatórias analisadas, de acordo com os valores de referência estipulados para cada metodologia.

A Tabela 5.4 classifica cada elevatória analisada por cada um dos métodos para o índice de perda de carga unitária.

Tabela 5.4 Classificação das elevatórias pelo índice de perda de carga unitária.

Sistema	PROPOSTA		ECAM	
	Perda de carga unitária (m/km)	Classificação	Perda de carga unitária (m/km)	Classificação
EA 01	3,89	ACEITÁVEL	4,38	INSATISFATÓRIO
EA 02	21,8	INSATISFATÓRIO	20,55	INSATISFATÓRIO
EA 03	17,5	INSATISFATÓRIO	21,11	INSATISFATÓRIO
EA 04	7,88	INSATISFATÓRIO	7,94	INSATISFATÓRIO
EA 05	4,8	INSATISFATÓRIO	4,79	INSATISFATÓRIO
EA 06	3,37	ACEITÁVEL	4,97	INSATISFATÓRIO
EA 07	11,41	INSATISFATÓRIO	11,37	INSATISFATÓRIO
EA 08	12,63	INSATISFATÓRIO	12,56	INSATISFATÓRIO

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Quanto aos cálculos das velocidades nas tubulações de sucção e recalque, indicou-se nos casos das elevatórias EA 01 e EA 06 a necessidade de adequação do diâmetro da tubulação de sucção pelos altos valores de velocidade encontrados (acima de 1,5m/s). Quanto a problemas desse índice na adutora, apenas a EA-02

apresentou um valor alto, cuja avaliação quanto a perdas por ineficiência foi indicada (acima de 2 m/s).

Tabela 5.5 Análise das velocidades nas tubulações de sucção e recalque.

Sistema	PROPOSTA			
	v suc (m/s)	Classificação	v rec (m/s)	Classificação
EA 01	2,21	INADEQUADA	0,98	ADEQUADA
EA 02	1,48	ADEQUADA	2,01	VERIFICAR PERDAS
EA 03	1,20	ADEQUADA	1,87	ADEQUADA
EA 04	1,18	ADEQUADA	1,18	ADEQUADA
EA 05	1,50	ADEQUADA	0,78	ADEQUADA
EA 06	3,25	INADEQUADA	1,00	ADEQUADA
EA 07	0,99	ADEQUADA	1,34	ADEQUADA
EA 08	1,26	ADEQUADA	1,26	ADEQUADA

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O terceiro valor analisado foi a incerteza combinada calculada para o rendimento, conforme equação 3.25, e a qualidade dos dados adquiridos para o diagnóstico. Destaca-se que, dado algumas estimativas realizadas para os cálculos, os sistemas EA-05 e EA-06 apresentaram uma incerteza elevada ou uma má qualidade dos dados de entrada (acima de 10% ou de apenas ★). Isso sugere que algumas medições sejam refeitas para que as recomendações propostas pelo método sobre a precisão das medições e qualidade dos dados sejam atendidas. O valor da incerteza somada ao rendimento calculado vai definir o rendimento mínimo necessário para a elevatória após as intervenções de eficiência energética, uma vez que ele deve ser pelo menos maior que a incerteza. A Tabela 5.6 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 5.6 Análise da incerteza do rendimento calculado e da qualidade dos dados obtidos para o diagnóstico operacional.

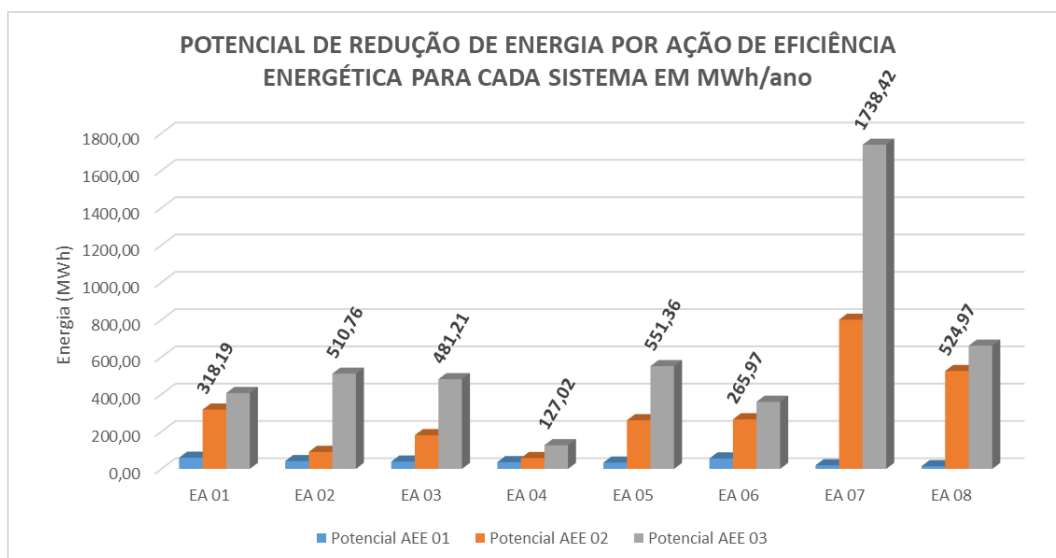
Sistema	PROPOSTA			
	Incerteza	Classificação	Qualidade	Classificação
EA 01	6,38%	ADEQUADA	★★	ADEQUADA
EA 02	4,27%	ADEQUADA	★★★	ADEQUADA
EA 03	6,65%	ADEQUADA	★★	ADEQUADA
EA 04	4,78%	ADEQUADA	★★★	ADEQUADA
EA 05	9,81%	ADEQUADA	★	INADEQUADA
EA 06	11,77%	INADEQUADA	★	INADEQUADA
EA 07	1,92%	ADEQUADA	★★★	ADEQUADA
EA 08	4,07%	ADEQUADA	★★★	ADEQUADA

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

5.4 Potenciais de redução obtidos pela metodologia proposta

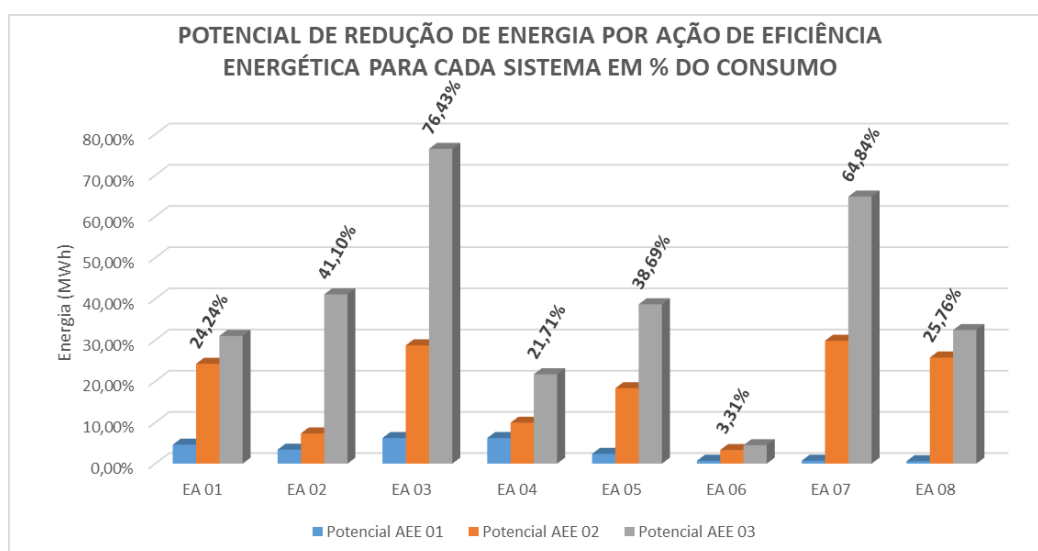
De posse dos resultados e da classificação operacional do sistema existente, calcularam-se os potenciais de redução de energia e demanda em função de cada AEE prevista pelo método proposto. Os valores são apresentados por gráficos nas Figura 5.1 e Figura 5.2, e de maneira discriminada na Tabela 5.7.

Figura 5.1 Potencial de redução absoluta de energia calculada para cada elevatória e cada cenário da AEE, em que os potenciais de redução destacados foram aqueles adotados pela análise.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 5.2 Potencial de redução relativo ao consumo de energia (os resultados são dados em porcentagem da energia atualmente consumida). O gráfico apresenta em destaque os potenciais adotados pela análise.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 5.7 Resultados obtidos pela metodologia proposta com as três AEEs.

Indicadores \ Sistema	EA 01	EA 02	EA 03	EA 04	EA 05	EA 06	EA 07	EA 08
Potência do GMB existente (CV)	250 CV	250 CV	350 CV	125 CV	150 CV	200 CV	500 CV	500 CV
Rendimento mínimo calculado	59,92%	73,41%	60,26%	72,21%	58,69%	70,49%	54,82%	59,67%
RESERVAÇÃO HORÁRIO PONTA (RC)	69,04%	95,49%	25,84%	72,56%	67,90%	94,14%	97,65%	66,01%
led referência (m/km)	1,88	1,23	1,34	1,46	0,74	1,86	1,68	1,47
v rec referência (m/s)	0,98	0,76	1,06	0,80	0,48	0,87	0,77	0,68
v suc referência (m/s)	0,98	1,19	1,06	1,25	1,24	1,25	1,00	1,33
Potencial de Demanda reduzida AEE 01 (kW)	8,69	7,17	8,38	5,00	5,22	6,50	3,87	2,29
Potencial de Demanda reduzida AEE 02 (kW)	45,62	15,45	37,84	8,01	27,60	31,79	111,47	80,03
Potencial de Demanda reduzida AEE 03 (kW)	58,49	86,97	102,93	17,48	82,38	41,33	215,00	102,69
Potencial de Energia reduzida AEE 01 (MWh/ano)	60,32 (4,60%)	42,10 (3,39%)	39,14 (6,22%)	36,38 (6,22%)	33,94 (2,38%)	56,10 (0,70%)	19,41 (0,72%)	14,75 (0,59%)
Potencial de energia reduzida AEE 02 (MWh/ano)	318,19 (24,24%)	91,25 (7,34%)	180,82 (28,72%)	58,16 (9,94%)	260,99 (18,32%)	265,97 (3,31%)	800,09 (29,84%)	524,97 (25,76%)
Potencial de energia reduzida AEE 03 (MWh/ano)	407,07 (31,01%)	510,76 (41,10%)	481,21 (76,43%)	127,02 (21,71%)	551,36 (38,69%)	359,95 (4,48%)	1738,42 (64,84%)	660,92 (32,44%)
Potência do novo GMB para AEE 02 (CV)	250 CV	350 CV	250 CV	150 CV	150 CV	200 CV	500 CV	450 CV
Potência do novo GMB para AEE 03 (CV)	250 CV	200 CV	60 CV	125 CV	60 CV	200 CV	300 CV	450 CV
AEE adotadas	AEE 2	AEE 3	AEE 3	AEE 3	AEE 3	AEE 2	AEE 3	AEE 2

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

De acordo com as Figura 5.1 e Figura 5.2, foi possível concluir que, em termos de valores absolutos, o maior potencial de economia ocorreu na EA7 com a adoção da AEE-03. A redução calculada foi de 1738,42 MWh/ano (64,84%) no consumo de energia da unidade e está associada ao alto valor da perda de carga, devido a condição de uma adutora subdimensionada ao longo de uma significativa extensão de 8 km e um desnível geométrico de 120,33 m. Para obtenção desses resultados, a ação de eficiência energética propôs aumentar o diâmetro interno da adutora de 300 para 400mm e o coeficiente de rugosidade C de 91 para 120. Além disso, propôs aumentar o rendimento médio da elevatória de 52,90% para 74,90%, acima do rendimento mínimo calculado devido à incerteza associada ao rendimento, de 54,82%. Para essa elevatória, o potencial de economia de consumo pela AEE-02 foi de 800 MWh/ano (29,84%), ou seja, menos da metade do potencial obtido pela AEE-03. Neste caso, sugere-se prosseguir com a concepção de substituição ou melhoria da adutora potencializada com a melhoria do GMB, elaborando um estudo de viabilidade econômica para tanto.

A mesma estratégia de análise que adota a AEE-03 é aderente aos casos das elevatórias EA2, EA3, EA4 e EA5, cujos ganhos estimados com a adoção da AEE-03 resultaram ser, pelo menos, 2 vezes maior que aqueles estimados para a AEE-02.

Já para os casos da EA1, EA6 e EA8 percebe-se não haver uma diferença tão expressiva entre os potenciais de redução com as diferentes ações de eficiência. Toma-se como exemplo o caso da EA8, em que o potencial de economia obtido com a AEE-02 foi de 524,97 MWh/ano (25,76%), enquanto com a AEE-03 foi de 660,92 MWh/ano (32,44%). Dada a pequena diferença dos benefícios calculados entre as ações e a grande diferença do custo e do período de implantação de cada uma dessas ações, é possível indicar uma maior vantagem ao se adotar a AEE-02, apesar do maior benefício alcançado com a AEE-03.

Importante destacar também o caso da EA2, em que se verificou um alto valor de energia dissipada na adutora (510,76 MWh/ano ou 41,10%), apesar de uma boa condição do rendimento eletromecânico do grupo motobomba (condição mediana pela análise do *CEN*). Com isso, um diagnóstico energético incompleto pode induzir a entidade gestora ao erro, por concluir não haver ação de eficiência energética viável para o recalque, uma vez que o potencial de economia da AEE-02 é de apenas 91,25 MWh/ano ou 7,34%.

No caso da EA-06 verificaram-se os menores resultados com ações de eficiência energética relativos ao consumo de energia no local. Ainda, pelo alto valor da incerteza calculada para o rendimento, esses resultados podem variar para valores menores ainda. Dado essa situação desfavorável, sugere-se que as medições sejam refeitas de maneira mais precisa para, assim, diminuir o valor da incerteza e reavaliar os potenciais calculados.

No caso da EA4, observou-se um potencial de economia bastante relevante da AEE-01 em relação a AEE-02. Neste caso, a substituição apenas do motor resultaria em um ganho de 36,38 MWh/ano (6,22%), enquanto o ganho com a substituição do grupo motobomba resultaria em 58,16 MWh/ano (9,94%). Nesta situação, pode ser vantajoso substituir apenas o motor, dado o custo e simplicidade da ação de eficiência energética, frente a uma substituição completa do grupo motobomba, que pode exigir adequação de base, peças mecânicas como tubulações, entre outros fatores.

A flexibilidade de cenários de ações de eficiência energética é algo importante para os gestores desses sistemas, uma vez que há uma ampla gama de programas de eficiência disponíveis que tem como objeto diferentes diretrizes (ex. Bônus Motor da ANEEL, que prevê apenas a substituição de motores antigos por modelos de alto rendimento, PROPEE ANEEL que prevê substituição de equipamentos por novos de alto rendimento preferencialmente de menor potência e financiamento de instituições internacionais, que contempla projetos mais abrangentes podendo incluir adutoras ou até mesmo novos reservatórios).

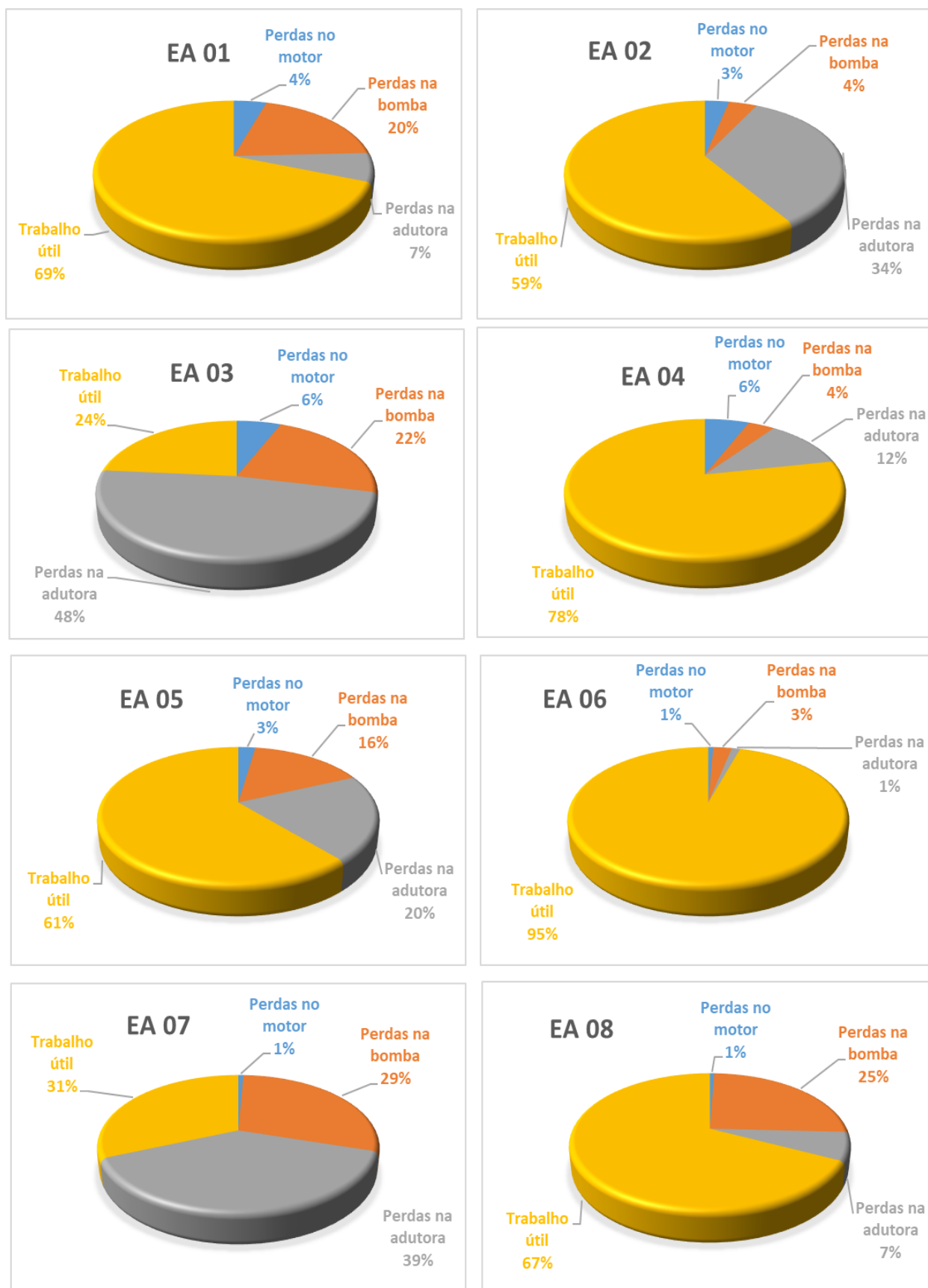
Para o caso do PROPEE da ANEEL, por exemplo, os projetos mais adequados seriam os que adotaram a AEE-02 como mais vantajosa, ou seja, EA1, EA6 e EA8, uma vez que contempla apenas a substituição do grupo motobomba com possíveis adaptações mecânicas em pequena escala nas tubulações. Para o programa de incentivo a substituição de motores, como o Bônus Motor por exemplo, o projeto da EA4 torna-se bastante adequado, por possuir bons resultados na adoção da AEE-01 sem comprometer grandes ganhos na AEE-02.

Por fim, cabe mencionar que nas intervenções com foco em eficiência energética, a avaliação da condição da sucção também deve ser feita. Para resultados em eficiência, a substituição de peças mecânicas na sucção não tem tanto efeito, por ser um trecho de comprimento curto em que a energia dissipada é bastante reduzida em relação a outros elementos como longas adutoras. Contudo, condições desfavoráveis na sucção, como no caso diagnosticado da EA6 podem gerar

problemas de cavitação nas bombas, diminuindo a vida útil dos equipamentos e aumentando os custos com manutenção, o que deve sempre ser levado em consideração.

De maneira simplificada, é possível representar os resultados por um balanço de energia para cada sistema analisado, em que são apresentadas as parcelas de perdas referente a cada componente analisado na Figura 5.3.

Figura 5.3 Balanço de energia por elevatória de acordo com cada componente.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

6 CONCLUSÕES

A metodologia proposta, ao reunir boas práticas de diagnósticos energéticos existentes e propor uma sequência de etapas composta por coleta de dados disponíveis, medições e estimativas, consegue quantificar e comparar o potencial de redução energética a ser alcançado em múltiplos sistemas de bombeamento de água. Além disso, permite pelos valores de referência dos indicadores *CEN*, *vsuc*, *vrec*, *ied* e *incerteza do rendimento*, qualificar cada sistema analisado (e o próprio diagnóstico realizado) quanto ao atendimento ou não dos valores considerados mínimos ou adequados preconizados na literatura.

Através dela, é possível realizar um pré-filtro de um grande conjunto de sistemas de bombeamento para então selecionar as prioridades de melhoria em eficiência energética de cada um deles, apontando as possíveis ações a serem tomadas e estimando o benefício proporcionado por cada uma delas. Pela sua praticidade e flexibilidade na obtenção de resultados, mesmo em cenários de escassez de dados nas elevatórias, é possível aplicá-la a um grande volume de sistemas, indicando quais deles deverão ser estudados de maneira mais aprofundada (seja pelo uso de simuladores hidráulicos computacionais ou por medições hidroenergéticas mais complexas) e otimizando os recursos dispendidos para elaboração de diagnósticos energéticos mais aprofundados. Uma pré-seleção embasada por indicadores tende a melhorar os resultados financeiros de uma companhia neste quesito, uma vez que a elaboração de diagnósticos energéticos mais complexos demonstrará sempre viabilidade técnica.

Também através da metodologia é possível adaptar a ação de eficiência proposta à realidade da empresa ou da região, tendo em vista que alguns fatores determinantes para o êxito do projeto podem variar em cada caso, entre eles o recurso financeiro disponível para o projeto, as licenças ambientais requeridas, o tempo de implementação necessário, entre outros. Também se destaca a capacidade que o método tem de atender a diferentes programas de incentivo de eficiência energética, o que é atribuído às possíveis ações de eficiência contempladas por ele.

Pela escassez de dados dos sistemas de bombeamento das empresas brasileiras ser ainda uma realidade, o método encontra limitações em sua aplicação, uma vez que para apresentação de resultados conclusivos é necessário se dispor de diversos dados de múltiplas variáveis ao longo do período de um ano. Contudo,

conforme Ferreira (2021), são poucas as instalações de média e alta tensão responsáveis pela maioria dos consumos energéticos das empresas de saneamento. Somado a isso, o custo de aquisição de medidores de vazão, pressão e energia são insignificantes face ao valor da instalação, não sendo mais aceitável que esses sistemas não possuam uma instrumentação adequada para monitoramento de todas suas variáveis.

A metodologia proposta apresenta algumas fragilidades e oportunidades de melhoria. Entre elas, podemos citar:

- Falta de um critério objetivo para definição do que é boa adesão do modelo matemático energia x volume bombeado;

- Falta da inclusão dos indicadores RC e Ph5 na tomada de decisões para as ações de eficiência energética (possível AEE-04). Eles podem funcionar como indicativos de melhoria nos resultados de redução de demanda no horário de ponta e apontar para uma ação de melhoria em automação, como instalação de conversores de frequência. Esta é uma oportunidade de continuidade deste trabalho.

- Falta de um fator que considere a degradação dos componentes ao longo do tempo para uma análise de melhoria de eficiência a longo prazo. A metodologia considera os resultados do período do 1º ano de implementação de projeto como constantes. Funções de degradação para o valor do coeficiente característico de *Hazen-Williams* e para o desgaste das bombas e motores ao longo de suas vidas úteis podem ser adotadas para melhorar a análise. Esta é uma oportunidade de continuidade deste trabalho.

- Falta aplicar a metodologia para sistemas mais complexos (configurações 3 e 4), para assim realizar os ajustes necessários na planilha de cálculo;

- Falta incluir no diagnóstico apresentado pela metodologia uma análise de viabilidade financeira associada a cada uma das ações de eficiência energética propostas. A viabilidade será, portanto, uma condição em que necessariamente sejam atendidas as viabilidades técnica e financeira da ação proposta. Esta é uma oportunidade de continuidade deste trabalho.

7 REFERÊNCIAS

_____. **NBR 12214 Projeto de sistema de bombeamento de água para abastecimento público**. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

_____. **NBR 14105-1: Medidores de pressão. Parte 1: Medidores analógicos de pressão com sensor de elemento estático - Requisitos de fabricação, classificação, ensaios e utilização**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2013.

ALEGRE, Helena *et al.* **Indicadores de desempenho para serviços de abastecimento de água**. Alliance House, 12 Caxton Street, London SW1H0QS, Reino Unido: 2000 IWA Publishing International, 2000. v. 1

ASSOCIADOS, G O Brazil. Manual for performance-based contracting by water utility companies in Brazil. **International Finance Corporation (IFC)**, [s. l.], 2013.

BALBINOT, Alexandre. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. [S. l.: s. n.], 2019.

BRASIL. **Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento–SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: 25º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos–2019**. [S. l.]: SNS/MDR Brasília, 2020.

BYLKA, J.; MROZ, Tomasz. A review of Energy Assessment Methodology for Water Supply Systems. **IEEE AFRICON Conference**, [s. l.], v. 2019-Septe, 2019.

CABRERA, Enrique *et al.* Calculating the economic level of friction in pressurized water systems. **Water (Switzerland)**, [s. l.], v. 10, n. 6, 2018.

CLIMÁTICAS, IPCC PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS. Aquecimento global de 1, 5 C. **Relatório especial do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC)**, [s. l.], 2018.

DE LA ORDEN, Raquel; DE CALONJE, Ignacio. Sustainability-Linked Finance. [s. l.], 2022.

DISCLOSURE - CORSAN WATER. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <https://disclosures.ifc.org/project-detail/SII/43626/corsan-water>.

ENERGIA-MME, MINISTÉRIO D E MINAS E. Plano Nacional de Eficiência Energética. *In:* , 2011. **Anais [...]**. [S. l.]: MME Brasília, 2011.

EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021 ano base 2020. **Rio de Janeiro: EPE**, [s. l.], 2021.

EVO. **Conceitos básicos - Protocolo Internacional de Medição e**

Verificação de Performance. [S. l.]: Efficiency Valuation Organization, 2017.

EVO. Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance. Volume I - BR. Conceitos e Opções para a Determinação de economias de energia e de água. [s. l.], v. 1, 2012.

EVO INTERNACIONAL, PIMVP. Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance Estatística e Incerteza para o PIMVP Preparado pela Efficiency Valuation Organization. [s. l.], v. 2014, 2014.

FERREIRA, Rita Cavaleiro. **Propostas para abordar a EFICIÊNCIA ENERGÉTICA em Normas de Referência Nacionais de Saneamento.** [S. l.: s. n.], 2021.

FERREIRA, Rita Cavaleiro de; DE OLIVEIRA, André Lopes. **Manual Cálculo do Consumo Energético Normalizado e do Potencial de Economia em Instalações de Bombeamento.** [S. l.: s. n.], 2017.

FERREIRA, Rita Cavaleiro de; FINGER, Fernando; MENDES, Rebecca. **Diagnóstico Digital 2020 do Setor de Saneamento no Brasil - Abastecimento de Água e Esgotamento Sanitário - versão 2Brasil, Ministério do Desenvolvimento Regional.** [S. l.: s. n.], 2021.

FERREIRA, Rita Cavaleiro; GONÇALVES, Jonas. **Guia auxiliar para os Procedimentos do Programa de Eficiência Energética - PROPEE da ANEEL.** [S. l.: s. n.], 2019.

GIZ; IWA. Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring (ECAM) Tool. [s. l.], n. August, 2017. Disponível em: http://wacclim.org/ecam/help_pdf/ECAM_V2_Methodology_Aug2017.pdf<http://wacclim.org/ecam/index.php>.

GOMES, Heber P. **Abastecimento de Água.** [S. l.: s. n.], 2021.

GOMES, Heber Pimentel *et al.* **Desenvolvimento de indicadores de desempenho hidroenergético em redes de distribuição de água** Congresso ABES FENASAN. João Pessoa: [s. n.], 2017.

GOMES, Heber P. **Sistemas de bombeamento.** [S. l.: s. n.], 2012.

GOMES, H P; CARVALHO, P S O de. Manual de sistemas de bombeamento: eficiência energética. **João Pessoa: Editora da UFPB**, [s. l.], 2012.

GONÇALVES, Jonas; FERREIRA, Rita Cavaleiro. **Guia Auxiliar para os Procedimentos do Programa de Eficiência Energética - PROPEE da ANEEL.** [S. l.: s. n.], 2019. v. 45

HAGUIUDA, Celso. 04-Avaliação da Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento de Água da SABESP. **30º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente**, [s. l.], p. 1–6, 2019.

HASHEMI, Saeed; FILION, Yves R.; SPEIGHT, Vanessa L. Examining the Energy Performance Associated With Typical Pipe Unit Head Loss Thresholds. **Journal - American Water Works Association**, [s. l.], v. 110, n. 9, p. 15–27, 2018.

LIMA, Gustavo Meirelles *et al.* Classification of water supply systems based on energy efficiency. **Water Science and Technology: Water Supply**, [s. l.], v. 15, n. 6, p. 1193–1199, 2015.

MATTOS, EDSON EZEQUIEL DE; FALCO, Reinaldo de. **Bombas Industriais**. 2ª Ediçãoed. Rio de Janeiro: [s. n.], 1998.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Plano Nacional de Eficiência Energética. **Premissas e Diretrizes Básicas**, [s. l.], p. 156, 2011. Disponível em: www.mme.gov.br.

NICOLA, Alexandre De *et al.* Eficiência energética - Ações de Assistência técnica em Redução e Controle de Perdas de Água e Uso Eficiente de Energia Elétrica. **Ministério das Cidades**, [s. l.], p. 63, 2018.

PASSETO, E. Custo de ciclo de vida (LCC) de sistemas de bombeamento. **Saneas**, [s. l.], v. 1, p. 20–24, 2001.

PEDRAZA, Arturo; ROSAS, Ramón. **Avaliação de sistemas de bombeamento de água: Manual de eficiência energética**. [S. l.]: Inter-American Development Bank, 2012.

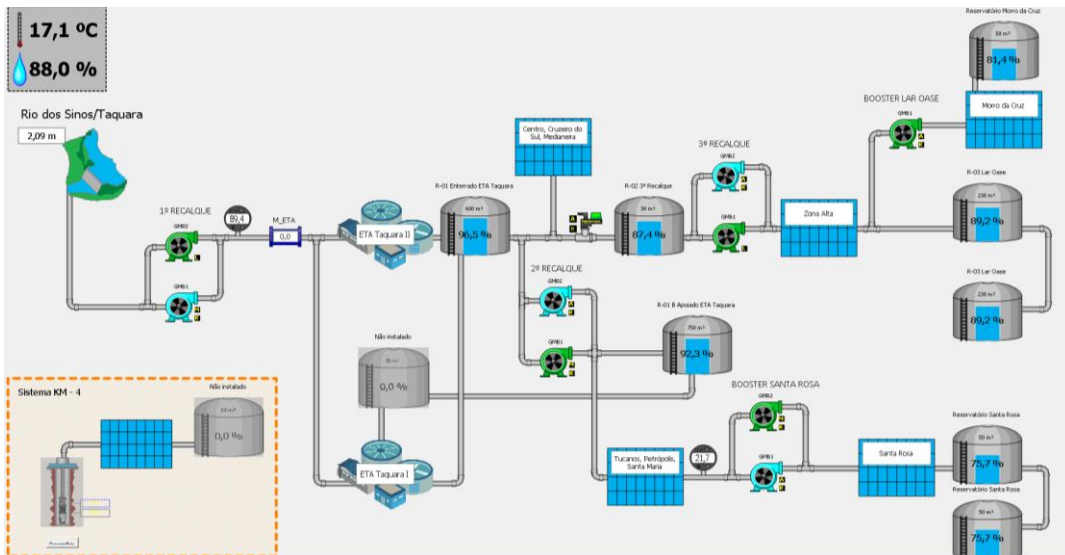
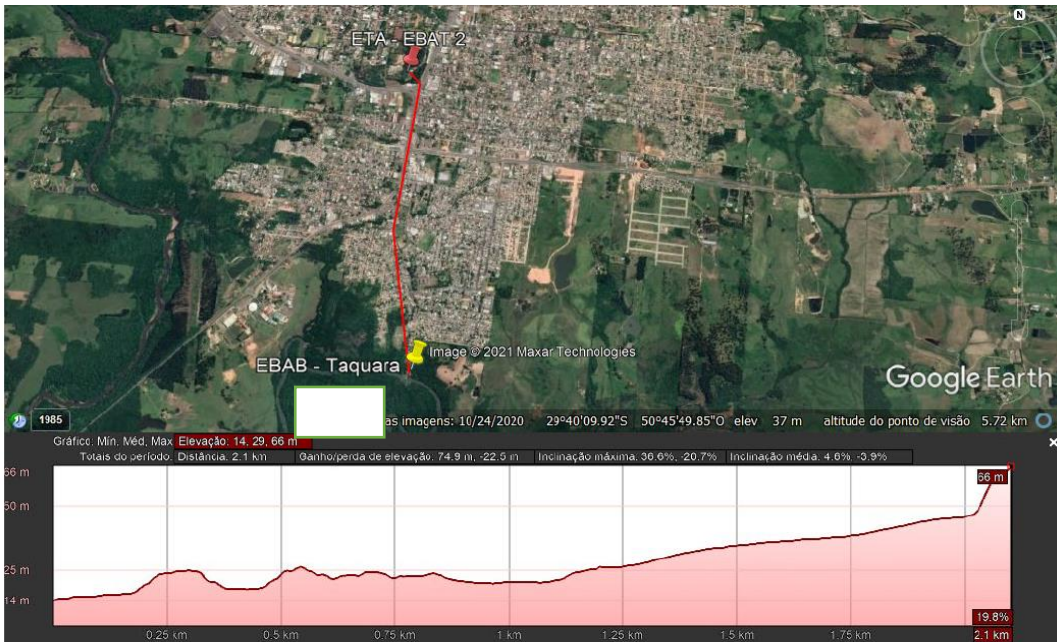
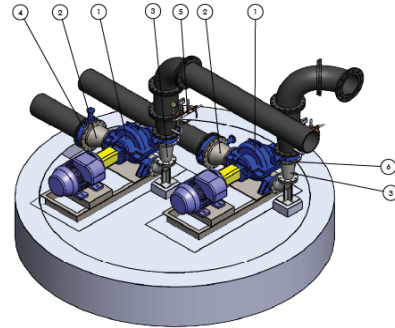
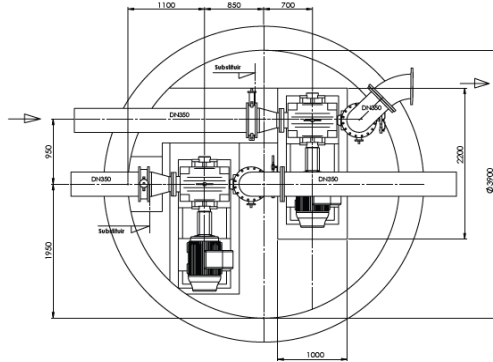
PEREIRA, José Almir Rodrigues. **Abastecimento de água: informação para eficiência hidroenergética**. [S. l.]: Editora Universitária – UFPB, 2014., 2014.

TSUTIYA, Milton Tomoyuki. Abastecimento de água. [s. l.], 2004.

VILANOVA, Mateus Ricardo Nogueira. **Desenvolvimento e avaliação de indicadores de eficiência hidráulica e energética para sistemas de abastecimento de água como ferramenta de suporte à tomada de decisões**. 2012. 316 f. - Universidade Estadual Paulista, [s. l.], 2012.

WEG. **No Title**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.weg.net/institucional/BR/pt/solutions/energy-efficiency/industrial-applications/pumping-systems>. Acesso em: 8 jul. 2022.

APÊNDICE (1) – FIGURAS DE APOIO DA ABA ‘DIAGRAMA HIDRÁULICO’ DA PLANILHA DE CÁLCULO DA METODOLOGIA – REFERENTE AO ATENDIMENTO DOS ITENS DO PROCESSO 01



**APÊNDICE (2) – TABELAS DE APOIO DA ABA ‘DIAGRAMA HIDRÁULICO’ DA
PLANILHA DE CÁLCULO DA METODOLOGIA – REFERENTE AO
ATENDIMENTO DOS ITENS DO PROCESSO 01**

ALTURAS	Altura geométrica de recalque Hgr (m)	Desnível geométrico de sucção Hgs (m)				
		52,00	-1,69			
LINHA DE RECALQUE	DN rec (mm)	Material	Idade	Comprimento adutora L (m)	Coefficiente C	Leq Singularidades (m)
		300	FoFo	20	2100	97
LINHA DE SUÇÃO	DN suc (mm)	Material	Idade	Comprimento adutora L (m)	Coefficiente C	Leq Singularidades (m)
		350	AÇO CARBONO	20	5	97

TABELA 2 - cálculo de comprimentos equivalentes

SINGULARIDADES NA SUÇÃO	Comprimento expresso em quantidade de diâmetros	informe o diâmetro em m: quant de peças	0,35 Lequiv (m)
Cotovelo de 90	45,00		0,00
Cotovelo de 45	20,00		0,00
Curva de 90	30,00		0,00
Curva de 45	15,00		0,00
Entrada normal em conduto	17,00		0,00
Entrada de borda	35,00		0,00
Ampliação gradual (considere o maior diâmetro)	12,00		0,00
Redução gradual (usar o maior diâmetro)	6,00	1	2,10
Registro de gaveta aberto	8,00		0,00
Registro tipo globo aberto	350,00		0,00
Válvula borboleta aberta	30,00	1	10,50
Saída de canalização	35,00		0,00
Tê, passagem direta	20,00		0,00
Tê, saída de lado	50,00		0,00
Tê, saída bilateral	65,00		0,00
Válvula de pé com crivo	250,00		0,00
Válvula de retenção	100,00		0,00
TOTAL			12,6

TABELA 2 - cálculo de comprimentos equivalentes

SINGULARIDADES NO RECALQUE	Comprimento expresso em quantidade de diâmetros	informe o diâmetro em m: quant de peças	0,3 Lequiv (m)
Cotovelo de 90	45,00		0,00
Cotovelo de 45	20,00		0,00
Curva de 90	30,00	2	18,00
Curva de 45	15,00		0,00
Entrada normal em conduto	17,00		0,00
Entrada de borda	35,00		0,00
Ampliação gradual (considere o maior diâmetro)	12,00		0,00
Redução gradual (usar o maior diâmetro)	6,00		0,00
Registro de gaveta aberto	8,00		0,00
Registro tipo globo aberto	350,00		0,00
Válvula borboleta aberta	30,00	1	9,00
Saída de canalização	35,00		0,00
Tê, passagem direta	20,00		0,00
Tê, saída de lado	50,00		0,00
Tê, saída bilateral	65,00		0,00
Válvula de pé com crivo	250,00		0,00
Válvula de retenção	100,00	1	30,00
TOTAL			57,00

**APÊNDICE (3) – INFORMAÇÕES DE APOIO DA ABA ‘MOTORES E PARTIDAS’
DA PLANILHA DE CÁLCULO DA METODOLOGIA – REFERENTE AO
ATENDIMENTO DOS ITENS DO PROCESSO 02**

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS											
PARTIDA 1	MÉTODO	RENDIMENTO	GMB 1	Potência Nominal GMB (cv)	Maior que 10 anos	Já Rebobinado	Rendimento Nominal (%)	FATOR DE SERVIÇO	Rendimento Nominal Corrigido (%)	FATOR DE POTÊNCIA	DEMANDA MÁXIMA
		SF		98%		250,00	SIM	SIM	95,3	1	92,3
PARTIDA 2	MÉTODO	RENDIMENTO	GMB 2	Potência Nominal GMB (cv)	Maior que 10 anos	Já Rebobinado	Rendimento Nominal (%)	FATOR DE SERVIÇO	Rendimento Nominal Corrigido (%)	FATOR DE POTÊNCIA	DEMANDA MÁXIMA
		SF		98%	250,00	SIM	SIM	95,3	1	92,3	0,85

MODO DE OPERAÇÃO

DEFINIÇÃO	MODO
X	1GMB OP + 1 RESERVA
	2GMB OP + 1 RESERVA
	3GMB OP + 1 RESERVA



**APÊNDICE (4) – INFORMAÇÕES DE APOIO DA ABA ‘DADOS DE OPERAÇÃO’
DA PLANILHA DE CÁLCULO DA METODOLOGIA – REFERENTE AO
ATENDIMENTO DOS ITENS DO PROCESSO 03**

MÊS/ANO	DADOS OPERACIONAIS DE ENERGIA					VOLUME		
	MÉDIA DE HORAS TRABALHADA MÊS	HORAS DECIMAL	CONSUMO TOTAL (kWh)	CONSUMO PONTA (kWh)	DEMANDA PONTA (kW)	DEMANDA FORA PONTA (kW)	VOLUME BOMBEADO (m³)	VAZÃO MÉDIA MÊS (m³/h)
jan/22	518:19:00	518,32	105303,00	11870,00	213,00	220,00	257124	496,075115
dez/21	490:16:00	490,27	103775,00	13494,00	214,00	224,00	256555	523,296845
nov/21	457:39:00	457,65	98890,00	11064,00	213,00	214,00	242294	529,430788
out/21	459:47:00	459,78	100051,00	10816,00	217,00	218,00	248491	540,452387
set/21	444:10:00	444,17	95731,00	11640,00	217,00	219,00	232682	523,861914
ago/21	488:20:00	488,33	103637,00	13081,00	214,00	218,00	248204	508,267577
jul/21	491:00:00	491,00	104236,00	12590,00	214,00	218,00	246938	502,928717
jun/21	481:31:00	481,52	102704,00	12276,00	217,00	218,00	246026	510,939739
mai/21	507:40:00	507,67	106913,00	11525,00	214,00	214,00	258067	508,339462
abr/21	522:40:00	522,67	107922,00	11927,00	207,00	208,00	262698	502,610969
mar/21	528:59:00	528,98	111437,00	13504,00	208,00	209,00	275260	520,356659
fev/21	488:18:00	488,30	102223,00	11231,00	209,00	210,00	243636	498,947368
jan/21	535:45:00	535,75	108966,00	11542,00	208,00	208,00	275458	514,15399

APÊNDICE (6) – INFORMAÇÕES DE APOIO DA ABA 'ELABORAÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA DA UNIDADE' DA PLANILHA DE CÁLCULO DA METODOLOGIA – REFERENTE AO ATENDIMENTO DOS ITENS DO PROCESSO 06

Uso Final	Quant. Total	Carga Instalada (kW)	Carga Inst Total (kW)	Demanda por unidade inverno (kW)	Demanda por unidade verão (kW)	Soma Energia Total (kWh)
GMB 01 250 CV	1,00	184,00	204,15	204,15	204,15	600.063,20
GMB 02 250 CV	1,00	184,00	201,87	201,87	201,87	593.361,54
GMB PRÉ 10 CV	1,00	7,36	7,36	7,36	7,36	41.301,73
ILUMINAÇÃO	1,00	2,00	2,00	2,00	2,00	9.504,00
ADMINISTRATIVO	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL	5,00		415,38			

GMB 01 250 CV		GMB 02 250 CV		GMB PRÉ 10 CV		ILUMINAÇÃO		ADMINISTRATIVO	
h/mês	Potência	h/mês	Potência	h/mês	Potência	h/mês	Potência	h/mês	Potência
259,16	204,15	259,16	201,87	0	7,36	372	4	0	0
245,13	204,15	245,13	201,87	479,0711957	7,36	360	2	0	0
228,83	204,15	228,83	201,87	711,7491168	7,36	372	2	0	0
229,89	204,15	229,89	201,87	813,9110734	7,36	360	2	0	0
222,08	204,15	222,08	201,87	654,4463315	7,36	372	2	0	0
244,17	204,15	244,17	201,87	510,3872283	7,36	372	2	0	0
245,50	204,15	245,50	201,87	521,4796196	7,36	360	2	0	0
240,76	204,15	240,76	201,87	571,6442255	7,36	372	2	0	0
253,83	204,15	253,83	201,87	425,4877717	7,36	360	2	0	0
261,33	204,15	261,33	201,87	145,576087	7,36	372	2	0	0
264,49	204,15	264,49	201,87	458,708356	7,36	336	2	0	0
244,15	204,15	244,15	201,87	319,1870924	7,36	372	2	0	0
600063,1988		593361,5378		41301,73		9504		0	

DADOS DE VOLUME E VAZAO									
V.I VOLUME ADUZIDO (m³/mês)	ORIGEM DOS DADOS DE VOLUME	PRECISÃO DO EQUIPAMENTO	ERRO PADRÃO DO VOLUME ADUZIDO (m³)	VAZÃO MEDIDA (m³/h)	ORIGEM DOS DADOS DE VAZÃO	PRECISÃO DO EQUIPAMENTO	ERRO PADRÃO DA VAZÃO MEDIDA	VAZÃO DE OPERAÇÃO SISTEMA (l/s)	VAZÃO DE OPERAÇÃO CALCULADA (m³/h)
257.124	CALHA PARSHALL SENSOR ULTRASSÔNICO	3,25%	8356,53					137,80	496,08
256.555	CALHA PARSHALL SENSOR ULTRASSÔNICO	3,25%	8338,04					145,36	523,30
242.294	CALHA PARSHALL SENSOR ULTRASSÔNICO	3,25%	7874,56					147,06	529,43
248.491	CALHA PARSHALL SENSOR ULTRASSÔNICO	3,25%	8075,96					150,13	540,45
232.682	CALHA PARSHALL SENSOR ULTRASSÔNICO	3,25%	7562,17					145,52	523,86
248.204	CALHA PARSHALL SENSOR ULTRASSÔNICO	3,25%	8066,63					141,19	508,27
246.938	CALHA PARSHALL SENSOR ULTRASSÔNICO	3,25%	8025,49					139,70	502,93
246.026	CALHA PARSHALL SENSOR ULTRASSÔNICO	3,25%	7995,85					141,93	510,94
258.067	CALHA PARSHALL SENSOR ULTRASSÔNICO	3,25%	8387,18					141,21	508,34
262.698	CALHA PARSHALL SENSOR ULTRASSÔNICO	3,25%	8537,69					139,61	502,61
275.260	CALHA PARSHALL SENSOR ULTRASSÔNICO	3,25%	8945,95					144,54	520,36
243.636	CALHA PARSHALL SENSOR ULTRASSÔNICO	3,25%	7918,17					138,60	498,95
				495,55	MALETA DE PITOMETRIA	0,15%	0,74	137,65	

DADOS DE PRESSÃO NA SUÇÃO E DESCARGA E CALCULO DA ALTURA MANOMÉTRICA								MODELO DA ALTURA MANOMÉT.		
PRESSÃO MANOMÉTRICA NA DESCARGA (mca)	ORIGEM DOS DADOS	PRECISÃO DO EQUIPAMENTO	PRESSÃO MANOMÉTRICA NA SUÇÃO	ORIGEM DOS DADOS	PRECISÃO DO EQUIPAMENTO	ALTURA MANOMÉTRICA CALCULADA (mca)	ERRO PADRÃO DA ALTURA MANOMÉTRICA	PRECISÃO	ALTURA MANOMÉTRICA AJUSTADA (mca)	ERRO PADRÃO DO MODELO (mca)
		#N/D			#N/D		#N/D		96,71	1,55
		✔			✔		✔		101,21	1,63
		#N/D			#N/D		#N/D		102,25	1,64
		✔			✔		✔		104,16	1,67
		#N/D			#N/D		#N/D		101,31	1,63
		✔			✔		✔		98,70	1,59
		#N/D			#N/D		#N/D		97,82	1,57
		✔			✔		✔		99,14	1,59
		#N/D			#N/D		#N/D		98,71	1,59
		✔			✔		✔		97,77	1,57
		#N/D			#N/D		#N/D		100,71	1,62
		✔			✔		✔		97,18	1,56
93,33	MANOMETRO A	1,60%	-1,63	VACUOMETRO A	1,60%	95,05	1,4935	1,57%	90,05	1,5278

DADOS DE ENERGIA ELÉTRICA								
POTÊNCIA ATIVA MEDIDA (kW)	ORIGEM DADOS DE POTÊNCIA	PRECISÃO DO EQUIPAMENTO	ERRO PADRÃO DA POTÊNCIA (kW)	CONSUMO ENERGIA TOTAL (kWh/mês)	CONSUMO ENERGIA PONTA (kWh/mês)	DEMANDA HORÁRIO DE PONTA (kW)	ORIGEM DADOS DE ENERGIA	PRECISÃO DO EQUIPAMENTO
				105303,00	11870,00	213,00	MEDIDOR COMPARTILHADO	5,00%
				103775,00	13494,00	214,00	MEDIDOR COMPARTILHADO	5,00%
				98890,00	11064,00	213,00	MEDIDOR COMPARTILHADO	5,00%
				100051,00	10816,00	217,00	MEDIDOR COMPARTILHADO	5,00%
				95731,00	11640,00	217,00	MEDIDOR COMPARTILHADO	5,00%
				103637,00	13081,00	214,00	MEDIDOR COMPARTILHADO	5,00%
				104236,00	12590,00	214,00	MEDIDOR COMPARTILHADO	5,00%
				102704,00	12276,00	217,00	MEDIDOR COMPARTILHADO	5,00%
				106913,00	11525,00	214,00	MEDIDOR COMPARTILHADO	5,00%
				107922,00	11927,00	207,00	MEDIDOR COMPARTILHADO	5,00%
				111437,00	13504,00	208,00	MEDIDOR COMPARTILHADO	5,00%
				102223,00	11231,00	209,00	MEDIDOR COMPARTILHADO	5,00%
204,15	ANALISADOR DE ENERGIA	0,50%	1,02					

AJUSTE CONSUMO ENERGIA							
FATOR DE CORREÇÃO DA FRONTEIRA DE MEDIÇÃO	CONSUMO DE ENERGIA CALCULADO (kWh/mês)	POTÊNCIA ELÉTRICA ATIVA CALCULADA (kW)	ERRO PADRÃO DA POTÊNCIA (kW)	CONSUMO ENERGIA TOTAL AJUSTADO (kWh/mês)	ERRO PADRÃO DO MODELO (kWh)	POTÊNCIA ELÉTRICA ATIVA CALCULADA (kW)	ERRO PADRÃO DA POTÊNCIA (kW)
95%	100038	193,01	9,65	100621,06	5582,81	194,13	10,77
95%	98586	201,09	10,05	100432,88	5501,80	204,85	11,22
95%	93946	205,28	10,26	95716,37	5242,82	209,15	11,46
99%	99312	216,00	10,80	97765,89	5542,30	212,63	12,05
96%	91814	206,71	10,34	92537,41	5123,87	208,34	11,54
94%	97367	199,39	9,97	97670,97	5433,78	200,01	11,13
93%	97245	198,05	9,90	97252,27	5426,95	198,07	11,05
94%	96738	200,90	10,05	96950,64	5398,67	201,34	11,21
96%	102270	201,45	10,07	100932,94	5707,40	198,82	11,24
96%	103203	197,45	9,87	102464,54	5759,44	196,04	11,02
95%	106065	200,51	10,03	106619,14	5919,15	201,55	11,19
96%	98540	201,80	10,09	96160,20	5499,24	196,93	11,26

RENDIMENTO ATUAL			AEE 01			AEE 02		
POTÊNCIA HIDRÁULICA (kW)	RENDIMENTO DO SISTEMA (%)	INCERTEZA DO RENDIMENTO (%)	CONSUMO MOTOR ALTO RENDIMENTO (kWh)	DEMANDA MOTOR ALTO RENDIMENTO (kW)	RENDIMENTO AEE 01	CONSUMO GMB OTIMIZADO	DEMANDA GMB OTIMIZADO	RENDIMENTO AEE 02
130,73	67,736	4,184	96483,736	186,148	70,231	90470,600	174,547	74,899
144,32	71,772	4,433	95083,708	193,943	74,416	94469,541	192,690	74,899
147,52	71,864	4,439	90607,833	197,985	74,512	90138,808	196,960	74,899
153,40	71,018	4,386	95783,625	208,323	73,635	94165,994	204,805	74,899
144,62	69,961	4,321	88552,212	199,367	72,538	85759,982	193,081	74,899
136,70	68,561	4,234	93908,114	192,303	71,086	89126,928	182,512	74,899
134,06	67,691	4,181	93790,040	191,018	70,184	87885,484	178,993	74,899
138,03	68,707	4,244	93301,348	193,766	71,238	88740,061	184,293	74,899
136,74	67,876	4,192	98636,862	194,295	70,376	92679,734	182,560	74,899
133,91	67,818	4,189	99536,172	190,439	70,316	93444,922	178,785	74,899
142,81	71,224	4,399	102296,452	193,383	73,848	100859,887	190,667	74,899
132,12	65,471	4,044	95039,458	194,633	67,883	86136,279	176,400	74,899
	62,871	1,057						

AEE 03					AEE 2 + AEE 3			
PERDA CALCULADA NA SUÇÇÃO (m)	PERDA CALCULADA NO RECALQUE (m)	PERDA DE CARGA NA SUÇÇÃO OTIMIZADA	PERDA DE CARGA NO RECALQUE OTIMIZADA	Hamt ADUTORA OTIMIZADA	NOVA POTENCIA HIDRÁULICA	CONSUMO GMB POTENCIALIZADO (kWh)	DEMANDA GMB POTENCIALIZADO (kWh)	RENDIMENTO AEE 2 + 3
0,166	43,093	0,082	7,158	60,93	82,37	56998,49	109,97	74,90
0,183	47,575	0,090	7,903	61,68	87,96	57575,16	117,44	74,90
0,187	48,613	0,092	8,075	61,86	89,24	54528,48	119,15	74,90
0,195	50,503	0,096	8,389	62,18	91,57	56210,33	122,25	74,90
0,184	47,670	0,091	7,919	61,70	88,08	52231,21	117,59	74,90
0,174	45,075	0,086	7,488	61,26	84,85	55321,84	113,29	74,90
0,170	44,202	0,084	7,343	61,12	83,76	54907,90	111,83	74,90
0,175	45,515	0,086	7,561	61,34	85,40	54902,54	114,02	74,90
0,174	45,087	0,086	7,490	61,27	84,87	57522,05	113,31	74,90
0,170	44,150	0,084	7,334	61,11	83,69	58403,91	111,74	74,90
0,181	47,081	0,089	7,821	61,60	87,35	61689,78	116,62	74,90
0,168	43,556	0,083	7,235	61,01	82,95	54077,49	110,75	74,90
0,17	43,01							

APÊNDICE (8) – CONTINUAÇÃO DAS INFORMAÇÕES DE APOIO DA ABA ‘DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO’ DA PLANILHA DE CÁLCULO DA METODOLOGIA – REFERENTE AO ATENDIMENTO DOS ITENS DO PROCESSO 08, 09 E 10.

CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS									CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS						AEE ADOTADA (SELEÇÃO DO MOTOR)		
FLUIDO	Peso Específico água (N/m³)	Pressão atmosférica no local (kPa)	Pressão atmosférica (mca)	Temperatura do fluido (°C)	Pressão de vapor no local (mca)	ALTURAS	Altura geométrica de recalque Hgr (m)	Desnível geométrico de sucção Hgs (m)	AEE ADOTADA (SELEÇÃO DO MOTOR)								
	9,81	101,32	10,33	15,00	0,17401		52,00	-1,69	<input type="radio"/> AEE 01	<input checked="" type="radio"/> AEE 2	<input type="radio"/> AEE 3	2					
PARTIDA	PERÍODO	MÉTODO	RENDIMENTO	GMB	PERÍODO	Potência Ativa (kW)	Potência Nominal GMB (cv)	Maior que 10 anos	Já Rebobinado	Rendimento Nominal (%)	FATOR DE SERVIÇO	Rendimento Nominal Corrigido (%)	FATOR DE POTÊNCIA	CARREGAMENTO			
	EX ANTE	SF	98%		EX ANTE	204,15	250,00	SIM	SIM	95,30	1,00	92,30	0,85	111%			
	EX POST	CF	96%		EX POST	204,81	350,00	NÃO	NÃO	95,7	1,15	95,7	0,89	80%			
CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS																	
LINHA DE RECALQUE	PERÍODO	DN rec (mm)	Material	Idade	Comprimento adutora L (m)	Coefficiente C	Leq Singularidades (m)	LINHA DE SUÇÃO	PERÍODO	DN suc (mm)	Comprimento adutora L (m)	Coefficiente C	Leq Singularidades (m)				
	EX ANTE	300	FoFo	20	2100	97,000	57,00		EX ANTE	350	5	97	12,6				
	EX POST	400	FoFo	0	2100	120,000	57,00		EX POST	400	5	100	12,6				
RENDIMENTOS DOS NOVOS EQUIPAMENTOS	BOMBA	MOTOR	ACIONAMENTO	ACOPLAMENTO	GLOBAL	CONSERVADOR											
	80,00%	96,50%	98,00%	99,00%	74,90%	72%											

EX ANTE CONJUNTO DE INDICADORES PARA SISTEMAS DE BOMBEAMENTO			
INDICADOR			AValiação
Nº meses	12		
Ph4	77,48%		MANOBRA
Sazonalidade	4,42%		DESCONSIDERAR
CE	0,39	kWh/m ³	
EX ANTE ANÁLISE RENDIMENTO DO GMB			
CEN	0,39411	kWh/(m ³ x 100 mca)	ADEQUADO
n GMB médio	69,14%		
P hidráulica (kW)	139,58		
Incerteza do Rendimento	4,27%		★★★
RC	95,49%	UTILIZAÇÃO BOMBEAMENTO NO HORÁRIO PONTA	OPERAÇÃO
EX ANTE ANÁLISE PERDAS NA LINHA DE RECALQUE			
Vrec	2,01	m/s	AVALIAR PERDAS
Vrec (D ótimo)	1,13	m/s	ACEITAVEL
Perda linear	45,78	m	
led (cenário)	21,80	m/km	INSATISFATÓRIO
led (referência)	3,64	m/km	ACEITAVEL
EX ANTE ANÁLISE VELOCIDADE NA LINHA DE SUÇÃO			
Npshd	8,30	m	
Vsuc	1,48	m/s	ACEITAVEL
Vsuc (D ótimo)	1,13	m/s	ACEITAVEL
CONDIÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA ANÁLISE EX-POST			
RENDIMENTO MÍNIMO	73,41%		1x incerteza
Tarifa média	0,75469	R\$/kWh	

Desperdício ~	510755,12	kWh/ano	7,34%	Novo CEN (kWh/(m ³ x 100 mca))	Novo rendimento (%)	POTENCIAL DE ECONOMIA (kWh/ano)	ERRO DO POTENCIAL (kWh/ano)	REDUÇÃO EMISSÃO (kgCO ₂ /mês)	PORCENTAGEM Redução	PROGRAMA DE EFICIÊNCIA	Redução de Demanda Fora/Ponta (kW)	REDUÇÃO DE ENERGIA PONTA (kWh/ano)	TESTE DE VIABILIDADE
AEE adotada	instalação de conversores de frequência												
AEE 01	substituição apenas do motor elétrico			0,3801	71,69%	42104,73	± 3.886	12458,79	3,39%	BÔNUS MOTOR	7,17	4881,60	INVIÁVEL
AEE 02	reabilitação ou substituição de grupos motor bomba			0,3638	74,90%	91246,07	± 8.421	26999,71	7,34%	PROPEE	15,45	10516,39	VIÁVEL
AEE 03	substituição GMB potencializada com sucção e adutora			0,3638	74,90%	510755,12	± 8.410	151132,44	41,10%	RECURSO PRÓPRIO	86,97	59218,29	VIÁVEL

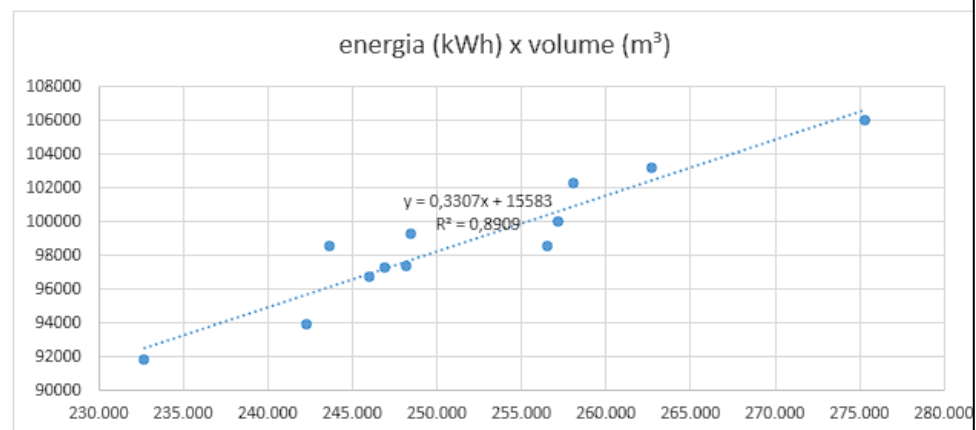
MODELAGEM MATEMÁTICA DA FUNÇÃO CONSUMO DE ENERGIA

MODELO PROPOSTO 01: VARIÁVEIS INDEPENDENTES VOLUME E ENERGIA

	M1	B	
Est t	9,04	1,69	t>=2
declividade	0,3307279	15582,98	coeficientes
±	0,04	9213,81	Ep dos coefs
r ²	0,89	1350,66	R ² e EP
F	81,64	10,00	F e GL
soma regr	148938014,51	18242934,97	
eq: E=M1*x1+B	x1=VOLUME		

$$E(kWh) = f(x) = f[V(m^3)]$$

CRITÉRIOS ESTATÍSTICOS		
resultados	E=M1*X+B	TESTES
0,8909	R ² >0,75	ok
1,37%	CV<20%	ok
9,04	t>2	ok
1,69	t>2	falso
	viés<5E-5	
ERRO PADRÃO	1350,66	



Nº variáveis indep.	1,00	
Nº de meses	12,00	
Graus de liberdade	10,00	
Nível de confiança	90%	
t	1,81	
Incerteza	2448,03	2,48%
	precisão abs	precisão relativa