

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

DANIEL ROCHA STEFFENS

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS:
DIAGNÓSTICO HIDROENERGÉTICO DE UMA INSTALAÇÃO FORNECEDORA
DE ÁGUA BRUTA PARA POSTERIOR TRATAMENTO E DISTRIBUIÇÃO DE
ÁGUA TRATADA PARA DOIS MUNICÍPIOS**

**SÃO LEOPOLDO
2019**

DANIEL ROCHA STEFFENS

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS:
DIAGNÓSTICO HIDROENERGÉTICO DE UMA INSTALAÇÃO FORNECEDORA DE
ÁGUA BRUTA PARA POSTERIOR TRATAMENTO E DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA
TRATADA PARA DOIS MUNICÍPIOS

Dissertação apresentada como requisito parcial
para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica, pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica da
UNISINOS.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha.

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Wander.

Banca Examinadora:

Prof. 1: Dra. Flávia Schwarz Franceschini Zinani

Prof. 2: Dr. João Batista Dias

Prof. 3: Dr. Luiz Augusto Magalhães Endres

SÃO LEOPOLDO

2019

FICHA CATALOGRÁFICA

S817e	<p>Steffens, Daniel Rocha</p> <p>Eficiência energética em estações elevatórias: diagnóstico hidroenergético de uma instalação fornecedora de água bruta para posterior tratamento e distribuição de água tratada para dois municípios / Daniel Rocha Steffens. – 2019.</p> <p>165 f. : il.</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, São Leopoldo, RS, 2019.</p> <p>“Orientador: Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha.”</p> <p>1. Engenharia Mecânica. 2. Diagnóstico hidroenergético. 3. Estação de tratamento de água. I. Título.</p> <p>CDU 621</p>
-------	--

Catálogo na Fonte:

Mariana Dornelles Vargas – CRB 10/2145

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo avaliar a situação operacional/financeira atual de uma estação elevatória de água bruta, que faz parte de um sistema integrado de abastecimento de água tratada para dois grandes municípios do sul do Brasil – diagnóstico hidroenergético. A instalação é composta de cinco conjuntos motobombas, potência nominal 560 kW cada, que são acionados em função das sazonalidades operacionais. Na configuração de projeto, dois conjuntos motobombas eram reservas operacionais e, portanto, até três equipamentos eram acionados de maneira paralela, conectados em um mesmo barrilete. A partir de janeiro de 2016, por uma necessidade operacional de maior vazão disponibilizada ao sistema de abastecimento, um dos dois equipamentos reservas foi colocado em operação totalizando, portanto, até quatro equipamentos acionados de maneira conjunta.

Com esse aumento do volume captado de água bruta, no qual o quarto equipamento foi colocado em operação sem uma análise mais detalhada do impacto dessa atividade frente às perdas de carga e, em função dos valores relativamente elevados das faturas de energia elétrica, decidiu-se por realizar um estudo multidisciplinar (hidráulica, mecânica, elétrica, operação e simulação) visando a diminuição dos valores pagos à companhia de energia elétrica. O diagnóstico hidroenergético se concentrou, basicamente, na busca de informações cadastrais (projeto e campo) dos equipamentos e instalações; nos ensaios de desempenho e nos testes em sequenciamentos dos conjuntos motobombas; e na compilação e na análise dos dados anuais operacionais.

O estudo realizado permitiu que se chegassem a diferentes resultados, tais como: determinação dos rendimentos de cada um dos conjuntos motobombas e da instalação como um todo, bem como dos sequenciamentos mais eficientes frente às configurações operacionais aplicáveis; compilação de informações operacionais durante o período de um ano e que resultaram na determinação de indicadores de desempenho da instalação; avaliação das perdas de carga e das velocidades operacionais do sistema; construção de um modelo em *software* de simulação hidráulica, calibrado em campo, que permitiu analisar o enquadramento tarifário da instalação frente à resolução normativa nº 414, de 09 de setembro de 2010, da ANEEL e simulação de cenários operacionais para o estabelecimento de possíveis ganhos operacionais/financeiros com e/ou sem investimentos.

Como exemplos de resultados facilmente alcançáveis, de cunho apenas administrativo/contratual, entre outros, pode-se destacar: 52.327,00 R\$ ano⁻¹ (-0,96 % do

consumo energético total) – apenas realizando o desacionamento do quarto equipamento no horário de ponta; 201.312,00 R\$ ano⁻¹ (-18,60 % da demanda contratada) – ao se alterar a demanda contratada no horário de ponta de 2.150 kW para 1.750 kW; e, 156.728,52 R\$ ano⁻¹ (-2,89 % do consumo energético total) – ao se realizar a escolha otimizada dos grupos motobombas para as combinações mais eficientes.

Partindo para a área dos investimentos significativos, ficou diagnosticado que a instalação possui uma considerável parcela de energia desperdiçada em perdas de carga nas tubulações, que vão bem além do considerado inevitável/econômico. Isso é explicado, pois o diâmetro equivalente das adutoras do sistema possui um valor de 931,2 mm frente a um ótimo/econômico, provável, obtido através da equação de *Bresse*, de 1.350 mm. Além disso, também, os valores inadequados de rugosidade das tubulações, em função dos anos de uso, impactam significativamente nos valores de perdas de carga. Dessa maneira, com R\$ 289.036,23 (substituição das sucções dos cinco grupos motobombas, usinagem de quatro rotores de bombas e recuperação da rugosidade das adutoras, com o uso de *pigs*), 449.685,45 R\$ ano⁻¹, ou então, 8,28 % do consumo total da instalação são estimados como sendo possíveis de serem economizados, mantendo-se os valores de vazão atuais do sistema e com um retorno de investimento inferior a um ano.

Já com relação aos equipamentos eletromecânicos, esses possuem os rendimentos dentro do esperado. No entanto, os tipos de bombas instaladas atualmente nunca atingem a condição de rendimento máximo em nenhum dos pontos operacionais. Ao se propor a substituição dos grupos motobombas por outros modelos, os rendimentos, nos valores de alturas manométricas médias estabelecidas via diagnóstico hidroenergético estariam, nas diferentes condições operacionais, sempre muito mais próximos aos máximos possíveis. Para essas alterações, o retorno do investimento foi estimado em, aproximadamente, cinco anos considerando a substituição de três bombas e de três motores elétricos, sendo isso, viável economicamente.

PALAVRAS-CHAVE: *Best Efficiency Point*. Diagnóstico hidroenergético. Simulação hidráulica.

ABSTRACT

This work aims to evaluate the operational/financial current situation of a raw water lift station, which is part of an integrated treated water supply system for two big cities in south of Brazil – hydropower diagnosis. The facility is composed of five motor-pump sets, 560 kW rated power each, which are triggered according to the operational seasonality. In the project setup, two motor-pump sets were operational reserves and, therefore, even three machines were actionated in parallel, connected to the same output pipe. Since January 2016, because of a higher flow operational need available to the supply system, one of the two standby equipment was put into operation thus totaling up to four jointly operated equipment.

With the increase of raw water captured volume, in which the fourth equipment was put in operation without a detailed analysis of this activity impact facing to the head losses and, according to the relatively high electric power bills values, it was decided to carry out a multidisciplinary (hydraulic, mechanics, electric, operation and simulation) study aiming the decrease of the electric power bills. The hydropower analysis was focused, basically, looking for cadastre informations (project and field) of the equipment and facilities; in the performance tests and in the motor-pump sets sequencing tests; and in the compilation and in the operational annual data analysis.

The study has made it possible to find distinct results, such as: performance determinations of each motor-pump sets and the facility as a whole, as well as the most effective sequencing according to the applicable operational configurations; operational data collection during a period of one year that resulted in the determination of the facility performance indicators; valuation of head losses and the system operational speed; the construction of a hydraulic simulation model in software, calibrated in field, which allowed the taxes framework analysis as provided by the normative resolution nº 414, from September, the ninth, 2010, according to ANEEL and the operational scenario simulations to establish possible operational/financial gains with and/or without investments.

As examples of easily reachable results, only administrative/contractual ones, among others, can be highlighted: 52.327,00 R\$ year⁻¹ (-0,96 % of the total energy consumption) – just switching off the fourth equipment at the high peak period; 201.312,00 R\$ year⁻¹ (-18,60 % of the contracted demand) – when the contracted demand is changed at the high peak period from 2.150 kW for 1.750 kW; and, 156.728,52 R\$ year⁻¹ (-2,89 % of the total energy

consumption) – by the optimized selection of the motor-pump sets for the more efficient combinations.

Talking about the significant investments, it was diagnosed that the facility has a considerable portion of wasted power, caused by head losses in the pipes, that go much beyond what is considered inevitable/economic. This is explained because the equivalent diameter of the system adductors has a value of 931,2 mm facing an optimal/economic, probable, obtained through the Bresse equation, of 1.350 mm. Moreover, the roughness inadequate values of the pipes, after years of usage, has significant impact in the head losses values too. Therefore, with R\$ 289.036,23 (substitution of the five motor-pump sets suction, four pump rotors machining and the adductor roughness repairs, using pigs), 449.685,45 R\$ year⁻¹, or 8,28% of the total facility consumption are estimated to be saved, maintaining the current system flow rates and with a return on investment less than one year.

Regarding to the electromechanical devices, the performances occurred as expected. However, the pump types currently installed never reach the maximum sustainable yield conditions at any operational points. Proposing the replacement of the motor-pump sets for another models, the performances, in the manometric heights average values established through hydropower diagnosis would be, in different operational conditions, always closer to the maximum viable. For those alterations, the expected return has been estimated in, approximately, five years considering the replacement of three pumps and three electrical motors, which is economically viable.

PALAVRAS-CHAVE: *Best Efficiency Point*. Hydropower diagnosis. Hydraulic simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Plano de carga hidráulica.....	20
Figura 3.2 – Triângulo de potências (carga indutiva).....	36
Figura 3.3 – Curva característica bomba dinâmica ou turbobomba (existente na EBAB-01).....	39
Figura 3.4 – Ponto de trabalho do conjunto motobomba.....	43
Figura 3.5 – Bombas iguais associadas em paralelo, com curvas estáveis.....	46
Figura 3.6 – Bombas diferentes associadas em paralelo, com curvas estáveis.....	47
Figura 4.1 – Diagrama da instalação em estudo.....	55
Figura 4.2 – Instrumento de medição da pressão de sucção das bombas.....	59
Figura 4.3 – Instrumento de medição da pressão de recalque das bombas.....	60
Figura 4.4 – Instrumento de medição da pressão após o barrilete da instalação.....	60
Figura 4.5 – Instrumento de medição das grandezas elétricas dos conjuntos motobombas.....	61
Figura 4.6 – Instrumento de medição da rotação dos conjuntos motobombas.....	61
Figura 4.7 – Instrumento de medição da vazão de chegada à ETA.....	62
Figura 4.8 – Instrumento de medição do nível do reservatório da ETA (R-01).....	62
Figura 4.9 – Maleta para medição de parâmetros hidráulicos.....	63
Figura 5.1 – Válvula de sucção danificada do conjunto motobomba 01.....	71
Figura 5.2 – Indicador de desempenho Ph_4 da EBAB-01 – dia crítico.....	84
Figura 5.3 – Exemplificação padrão de consumo (segundas-feiras, verão).....	91
Figura 5.4 – Dia crítico da instalação em estudo – análise tarifária.....	93
Figura 5.5 – Padrão de consumo do dia crítico da instalação em estudo – análise tarifária.....	94
Figura 5.6 – Tarifas do Grupo A, vigentes a partir de 21/12/2017, em R\$ sem impostos.....	94
Figura 5.7 – Análise do desacionamento de equipamentos no horário de ponta, com quatro grupos motobombas acionados fora do horário de ponta.....	97
Figura 5.8 – Análise do desacionamento de equipamentos no horário de ponta, com sequenciamento dos grupos motobombas acionados de acordo com o dia crítico.....	98
Figura 5.9 – Curva da $Pot_{absmotor}$ versus carga para os rotores de 19.3/16” em 60 Hz.....	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Perdas energéticas em sistemas de bombeamento.....	11
Tabela 2.2 – Oportunidades de ganhos de eficiência em sistemas de bombeamento.....	12
Tabela 3.1 – Acréscimo dos custos energéticos em função da rugosidade das tubulações.....	23
Tabela 3.2 – Exclusão do horário de ponta, de acordo com a resolução normativa nº 414, de 09 de setembro de 2010.....	29
Tabela 3.3 – Classe de consumo, serviço público, de acordo com a resolução normativa nº 414, de 09 de setembro de 2010.....	31
Tabela 5.1 – Características técnicas das bombas da EBAB-01.....	67
Tabela 5.2 – Características técnicas dos motores elétricos da EBAB-01.....	68
Tabela 5.3 – Características técnicas das tubulações e acessórios entre a EBAB-01 e a ETA.....	69
Tabela 5.4 – BEP – <i>Best Efficiency Point</i> – GMB 03.....	77
Tabela 5.5 – Eficiência das combinações possíveis dos GMB's da EBAB-01.....	79
Tabela 5.6 – Dados operacionais (vazão, volumes produzidos, horas operacionais e sequenciamento de grupos) do sistema em análise.....	80
Tabela 5.7 – Dados relativos ao consumo de energia elétrica da EBAB-01.....	81
Tabela 5.8 – Indicadores de desempenho do sistema em análise – resumo.....	81
Tabela 5.9 – Indicador de desempenho $SEC_{\Delta h}$ da EBAB-01.....	87
Tabela 5.10 – Velocidades de sucção e recalque bombas EBAB-01.....	90
Tabela 5.11 – Comandos software EPANET 2.0 para controle dos grupos motobombas.....	96
Tabela 5.12 – Comparativo de custos da energia elétrica, em função das alterações operacionais e/ou contratuais.....	99
Tabela 5.13 – Comparativo entre os resultados de simulação do modelo atual calibrado <i>versus</i> alterações de diâmetro dos rotores, limpeza das adutoras e substituição das sucções.....	110
Tabela 5.14 – Comparativo entre os resultados de simulação do modelo calibrado <i>versus</i> alterações de diâmetro dos rotores, limpeza das adutoras, substituição das sucções e alterações da rotação do GMB 04.....	113
Tabela 5.15 – Custos de materiais para substituição dos equipamentos eletromecânicos da EBAB-01 (830,00 L/s).....	120

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMT	Altura Manométrica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEP	<i>Best Efficiency Point</i>
BHP	<i>Break Horse Power</i>
CWSS	<i>Conventional Water Supply System</i>
DNAEE	Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica
EBAB	Estação de Bombeamento de Água Bruta
ETA	Estação de Tratamento de Água
FVP	Fator de Valor Presente
GMB	Grupo Motobomba
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IWA	<i>International Water Association</i>
NBR	Norma Brasileira de Regulação
NPSH	<i>Net Positive Suction Head</i>
PAT	<i>Pump as Turbine</i>
PCWP	<i>Per Capita Water Production</i>
SEC	<i>Specific Energy Consumption</i>
SNIS	Sistema Nacional de Informação sobre o Saneamento
TAP	<i>Test Access Point</i>
UNWWAP	<i>United Nations World Water Assessment Programme</i>
VRP	Válvula Reguladora de Pressão
WSS	<i>Water Supply System</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Nomenclatura

- B – coeficiente de *Bresse* [-]
 C – coeficiente de rugosidade de *Hazen-Williams* [-]
 $CMEE$ – custo médio de energia elétrica [R\$ MWh⁻¹]
 D – diâmetro [m]
 e – taxa de aumento anual de energia [%]
 FS – fator de serviço [-]
 FVP – fator de valor presente [-]
 g – aceleração gravitacional [m s⁻²]
 H – carga [m] ou carga real da bomba [m]
 Hz – frequência [Hz]
 i – taxa de juros anual [%]
 I – corrente elétrica [A]
 J – perda de carga unitária [m m⁻¹]
 k – coeficiente de perda de carga localizada/singular [-]
 K – rugosidade absoluta [mm]
 L – comprimento [m]
 n – período de amortização [anos]
 N – rotação [rpm]
 p – preço pago pela energia [R\$ kWh⁻¹]
 P – pressão [Pa]
 $Ph4$ – utilização da capacidade de bombeamento [%]
 $Ph5$ – consumo específico de energia normalizado [kWh m⁻³ 100 m⁻¹]
 $Ph6$ – consumo de energia reativa [%]
 Pot – potência [W]
 Q – vazão volumétrica [m³ s⁻¹]
 S – potência elétrica aparente [VA]
 SEC – consumo específico de energia [kWh m⁻³]
 U – tensão elétrica [V]
 V – velocidade [m s⁻¹]
 z – cota do eixo do conduto em relação ao nível de referência [m]

Símbolos Gregos

- ρ – massa específica [kg m⁻³]
 γ – peso específico [N m⁻³]
 f – coeficiente de atrito do tubo [-]
 φ – ângulo de defasagem entre a tensão e corrente elétricas [rad]
 $\cos\varphi$ – fator de potência [-]

Sub-índices

$C_{implantação}$ – custo de implantação [R\$]

$C_{MEE_{mc}}$ – custo médio de energia elétrica por metro cúbico bombeado [R\$ 1.000 m⁻³]

$C_{operacional}$ – custo operacional [R\$]

C_{total} – custo de implantação mais o operacional [R\$]

$D_{econômico}$ – diâmetro ótimo ou econômico [m]

D_{fd} – diâmetro do flange da descarga [m]

D_{fs} – diâmetro do flange da sucção [m]

I_f – corrente elétrica de cada fase [A]

I_{CHD} – indicador da altura manométrica fornecida – perda de carga [%]

I_{OOBC} – indicador de operação otimizada de bombeamento – consumo [%]

h_d – altura manométrica da descarga [m]

h_s – altura manométrica da sucção [m]

h_{Ld} – perda de carga da linha da descarga [m]

h_{Ls} – perda de carga da linha da sucção [m]

L_{TOTAL} – comprimento tubulação determinado pelo método do comprimento equivalente [m]

N_b – número de horas de bombeamento [h]

$NPSH_d$ – “net positive suction head” disponível [m]

$NPSH_r$ – “net positive suction head” requerido [m]

P_a – pressão atmosférica local [Pa]

P_d – pressão do reservatório da descarga [Pa]

P_{fd} – pressão no flange da descarga [Pa]

P_{fs} – pressão no flange da sucção [Pa]

Pot_a – potência elétrica ativa [W]

$Pot_{absmotor}$ – potência elétrica absorvida da rede elétrica pelo motor elétrico [W]

$Pot_{absbomba}$ – potência mecânica absorvida do acionador pela bomba; potência motriz da bomba [W]

Pot_{mmotor} – potência mecânica na saída do motor elétrico [W]

Pot_{mbomba} – potência mecânica na saída da bomba, cedida ao fluido; potência hidráulica ou útil [W]

P_s – pressão do reservatório da sucção [Pa]

P_v – pressão de vapor na temperatura de trabalho [Pa]

Q_R – potência elétrica reativa [VAR]

SEC_L – consumo específico de energia por comprimento de adutora [kWh m⁻³ km⁻¹]

$SEC_{\Delta h}$ – consumo específico de energia por comprimento de adutora, com relação às perdas de carga [kWh m⁻³ km⁻¹]

U_f – tensão elétrica de cada fase [V]

V_{fd} – velocidade média no flange da descarga [m s⁻¹]

V_{fs} – velocidade média no flange da sucção [m s⁻¹]

z_d – altura geométrica da descarga [m]

z_s – altura geométrica da sucção [m]

Δh – perda de carga total [m]

Δh_D – perda de carga distribuída ou normal [m]

Δh_L – perda de carga localizada [m]

η – rendimento global [-]

η_{bomba} – rendimento da bomba [-]

η_{motor} – rendimento do motor elétrico [-]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVO	3
1.1.1 Objetivo Geral	3
1.1.2 Objetivos Específicos.....	3
1.2 JUSTIFICATIVA	4
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
3.1 ABASTECIMENTO DE ÁGUA	16
3.1.1 Manancial.....	16
3.1.2 Captação.....	17
3.1.3 Estação Elevatória.....	17
3.1.4 Adutora	17
3.1.5 Estação de Tratamento de Água	18
3.1.6 Reservatório	18
3.1.7 Rede de Distribuição	18
3.2 CONSIDERAÇÕES HIDRÁULICAS SOBRE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO	19
3.2.1 Diferentes Tipos de Pressões nos Sistemas de Bombeamento.....	19
3.2.2 Perda de Carga	20
3.2.2.1 Perda de Carga Distribuída ou Normal.....	21
3.2.2.1.1 <i>Fórmula Universal</i>	21
3.2.2.1.2 <i>Fórmula de Hazen-Williams</i>	22
3.2.2.2 Perda de Carga Localizada	23
3.2.2.2.1 <i>Método Direto</i>	23
3.2.2.2.2 <i>Método do Comprimento Equivalente</i>	24
3.2.2.3 Perda de Carga Total	24
3.2.3 Determinação do Diâmetro da Tubulação	25
3.2.3.1 Velocidades de Escoamento Aplicáveis	27
3.3 FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	28
3.3.1 Definições Iniciais.....	28
3.3.2 Classe de Consumo - Serviço Público.....	30
3.3.3 Grupos Tarifários.....	31

3.3.4 Modalidades Tarifárias.....	32
3.4 CONJUNTOS MOTOBOMBAS	33
3.4.1 Motores Elétricos.....	34
3.4.1.1 Potência Elétrica	34
3.4.1.2 Fator de Potência em Sistemas Elétricos	35
3.4.1.3 Potência de Motores Elétricos	36
3.4.2 Bombas	37
3.4.2.1 Curvas Características das Bombas Dinâmicas ou Turbobombas.....	38
3.4.2.2 Potência de Bombas.....	39
3.4.2.3 Modificação das Curvas Características das Bombas Dinâmicas ou Turbobombas	40
3.4.2.3.1 <i>Variação da Rotação x Curvas Características das Bombas Dinâmicas ou Turbobombas.....</i>	<i>40</i>
3.4.2.3.2 <i>Variação do Diâmetro Externo do Rotor x Curvas Características das Bombas Dinâmicas ou Turbobombas.....</i>	<i>40</i>
3.4.3 Determinação do Ponto de Trabalho em Função do Sistema	41
3.4.3.1 Altura Manométrica Total	41
3.4.3.2 Curva do Sistema	42
3.4.3.3 Ponto de Trabalho	43
3.4.4 Associação de Tubulações.....	43
3.4.4.1 Tubulações em Série.....	44
3.4.4.2 Tubulações em Paralelo	44
3.4.5 Associação de Bombas	45
3.4.5.1 Associação de Bombas em Série	45
3.4.5.2 Associação de Bombas em Paralelo	45
3.4.6 Cavitação.....	47
3.5 INDICADORES DE DESEMPENHO.....	48
3.5.1 Utilização da Capacidade de Bombeamento.....	49
3.5.2 Consumo Específico de Energia.....	49
3.5.3 Consumo Específico de Energia Normalizado.....	50
3.5.4 Consumo Específico de Energia por Comprimento de Adutora	51
3.5.5 Consumo de Energia Reativa	51
3.5.6 Custo Médio da Energia Elétrica.....	52
3.5.7 Custo Médio da Energia Elétrica por Metro Cúbico Bombeado.....	52

3.5.8 Indicadores Centrados na Comparação da Situação Atual com a Otimizada	52
3.5.8.1 Indicador de Operação Otimizada de Bombeamento	53
3.5.8.2 Indicador da Altura Manométrica Fornecida.....	53
4 MATERIAIS E MÉTODOS	54
4.1 APRESENTAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO	54
4.1.1 Diagnóstico Hidroenergético – Lista de Verificação	55
4.1.2 Diagnóstico Hidroenergético – Medições em Campo	58
4.1.3 Diagnóstico Hidroenergético – Software de Simulação Hidráulica	65
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
5.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS EQUIPAMENTOS ELETROMECAÑICOS, TUBULAÇÕES E ACESSÓRIOS	67
5.2 ENSAIOS DE DESEMPENHO	69
5.3 ENSAIOS EM CONJUNTO – SEQUENCIAMENTO DE GRUPOS	74
5.4 COMPILAÇÃO DE INFORMAÇÕES OPERACIONAIS	79
5.5 DETERMINAÇÃO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO.....	81
5.6 AVALIAÇÃO DA CAVITAÇÃO E VELOCIDADES OPERACIONAIS	88
5.7 DEFINIÇÃO DO MODELO E SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS PARA ANÁLISE TARIFÁRIA	91
5.7.1 Análise da Modalidade Tarifária	92
5.7.1.1 Definição dos Possíveis Cenários.....	95
5.7.1.2 Simulação dos Cenários – Análise Tarifária	96
5.7.2 Resultados Obtidos ou Possíveis de Serem Facilmente Obtidos em Função do Diagnóstico	101
5.7.2.1 Avaliação Quanto às Ações Operacionais.....	101
5.7.2.1.1 <i>Sistema Supervisório</i>	101
5.7.2.1.2 <i>Resultados das Correções Básicas e do Sequenciamento Eficiente dos Grupos</i>	103
5.7.2.2 Definição e Calibração do Modelo gerado e Simulação de Cenários para Melhorias Estruturais.....	105
5.7.2.2.1 <i>Definição e Calibração do Modelo Gerado</i>	105
5.7.2.2.2 <i>Avaliação Quanto às Ações Estruturais</i>	106
5.7.3 Resultados Possíveis de Serem Obtidos Através das Alterações Estruturais	114
6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	121

1 INTRODUÇÃO

O crescimento constante do número de habitantes nos centros urbanos é resultado do natural aumento populacional, também chamado de crescimento vegetativo, e, principalmente, do êxodo rural, que é um fenômeno social bem conhecido, ainda presente na sociedade brasileira e que se intensificou na segunda metade do século XX. No Brasil, segundo dados do censo 2000¹, foi evidenciada uma diminuição da população rural, com a taxa de urbanização passando de 75,59 %, em 1991, para 81,23 %, em 2000, e, de acordo com dados do censo 2010², neste ano, o indicador chegou aos 84,36 %. Os municípios de mais de 100.000 habitantes, que, somados possuíam 70,8 milhões de pessoas em 1991, passaram para 86,5 milhões em 2000, bem como os municípios de mais de 500.000 habitantes, que contavam com 38,8 milhões de habitantes, chegaram aos valores de 46,9 milhões em 2000.

A vida em cidades urbanizadas carece muito mais de, entre outras necessidades, saneamento básico, com atendimento de sistemas de água e de esgoto. Na questão do fornecimento de água para a população, é natural que, com a utilização das mesmas tecnologias de bombeamento e tratamento, consolidadas há anos, e a manutenção dos mesmos níveis de reparos nas redes de distribuição, a quantidade de água necessária para atender a demanda das populações aumente ano após ano.

Segundo Tsutiya (2014), o crescimento vertiginoso das cidades ocasionado pela concentração populacional, em decorrência do êxodo rural, torna cada vez mais escasso o recurso água. Essa escassez é resultado, além do aumento populacional, da poluição dos recursos hídricos, implicando na diminuição da disponibilidade de água com a qualidade necessária para os diversos tipos de usos.

A crescente demanda por abastecimento de água nos grandes centros urbanos, decorrente dessa dinâmica populacional, acarreta, por exemplo, na questão de insumos diretos, numa maior retirada de água bruta dos mananciais, bem como numa maior quantidade necessária de produtos químicos para tratamento dessa água, tornando-a potável para posterior distribuição. Na questão de insumos indiretos, a energia elétrica é um fator que merece enorme atenção, visto que as tarifas cobradas pelas concessionárias possuem valores relativamente altos e que estão sofrendo seguidos reajustes definitivos ou temporários, sendo

¹ O censo de 2000 do IBGE pode ser acessado através deste link: <https://ww2.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/11122001onu.shtm>.

² O censo de 2010 pode ser acessado pelo link <https://serieestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?vcodigo=POP122>.

esse último em função também dos níveis dos reservatórios de água dos sistemas hidroelétricos que estabelecem o acionamento de um maior número de usinas termoelétricas.

Gomes (2005) salienta que, apesar dos custos de implantação serem da ordem dos milhares de reais, em regra geral, os custos operacionais em estações elevatórias de água e/ou esgoto são os mais destacados. Assim, nos últimos anos, é notável a elevação da parcela referente aos custos operacionais em virtude do aumento dos gastos energéticos associados. O autor destaca que esses custos vêm crescendo, pois subsídios anteriores fornecidos, principalmente nas tarifas de energia elétrica, não estão mais sendo aplicados pelo poder público, elevando-se consideravelmente os custos energéticos das empresas de saneamento. Destaca, também, que os custos energéticos, em muitas companhias, representam o segundo item das despesas de exploração, ficando atrás apenas dos gastos com folha de pagamento.

Além da questão monetária, que está onerando cada vez mais os caixas das companhias de abastecimento de água, existe a questão ambiental, visto que os insumos estão se esgotando rapidamente em níveis insustentáveis em longo prazo. Segundo Gomes e Carvalho (2012), o uso racional da água e da energia é indispensável para o desenvolvimento econômico e social mundial contemporâneo, visto a necessidade de preservação do meio ambiente e a minimização dos custos operacionais, sendo o setor do saneamento, talvez, o mais representativo no que tange à racionalização do uso da água e da energia. Segundo Valente (2011), é assunto corrente a necessidade da preservação ambiental e, atualmente, até mesmo as licitações em empresas públicas, reguladas pela Lei 8.666 de 21 de junho de 1993, podem ser balizadas nesse aspecto para escolha dos fornecedores, com amparo legal em artigos da Constituição Federal.

Com o intuito de operacionalizar a preservação energética, ambiental e econômica, existem algumas ferramentas consolidadas. No entanto, qualquer uma depende de estudos para definição de ações. Segundo Gomes (2012), um diagnóstico hidroenergético de um sistema de abastecimento de água consiste na determinação dos possíveis ganhos em eficiência, através de estudos multidisciplinares, cujo resultado é uma lista de possíveis intervenções com suas respectivas estimativas de redução no consumo de energia elétrica e, conseqüentemente, dos gastos associados, bem como leva em consideração a redução das perdas de água. Como não existe uma metodologia universalmente aceita para determinação dos ganhos pela redução das perdas de água, a economia com o volume bombeado é transformada em redução do consumo de energia.

1.1 OBJETIVO

Em função do contínuo crescimento e desenvolvimento social, que acarreta a necessidade de crescentes demandas por energia elétrica dedicada aos sistemas de abastecimento de água tratada e frente à exponencial taxa de esgotamento dos recursos naturais, este estudo está centrado no diagnóstico hidroenergético de estações elevatórias de água.

1.1.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo que avalie parâmetros hidráulicos, mecânicos, elétricos e operacionais de uma instalação de recalque de água – existente e operacional, de um sistema de abastecimento de água.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para se chegar ao resultado do diagnóstico hidroenergético, é necessário que sejam condensadas diversas informações técnicas sobre a instalação, bem como a determinação de parâmetros característicos do seu funcionamento (atual maneira que ela é operada). Essas atividades são consideradas no presente trabalho como objetivos específicos e são divididas em:

- Condensar informações cadastrais (projeto e campo) dos equipamentos e instalações, que são muito dispersas e/ou inexistentes;
- Condensar informações operacionais do sistema, tais como: consumo de energia elétrica, vazões produzidas, níveis dos reservatórios, número de conjuntos motobombas acionados, sequenciamento dos conjuntos em operação, horas de funcionamento, comparando com as sazonalidades climáticas e temporais;
- Determinar a curva de consumo de água/carga dos reservatórios do sistema em função das sazonalidades temporais e climáticas, estabelecendo-se tendências operacionais históricas;
- Estabelecer possíveis cenários operacionais que resultem em ganhos de eficiência energética, utilizando *software* de simulação (com calibração em testes de campo);
- Avaliar o presente enquadramento tarifário, frente à resolução normativa n° 414, de 09 de setembro de 2010, da ANEEL, com o intuito de redução dos valores pagos à

companhia de distribuição de energia elétrica através, especificamente, de duas alternativas: contratação de nova modalidade tarifária e/ou redução do número de conjuntos motobombas acionados durante o horário de ponta (com ou sem alterações da demanda contratada);

- Qualificar a instalação frente a indicadores de desempenho.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os custos energéticos em muitos dos sistemas de abastecimento de água, segundo Vilanova e Balestieri (2014), são os mais destacados nos custos operacionais. Acrescido a isso, as médias mundiais de perdas de água oscilam entre 30 e 40 %. Os mesmos autores afirmam, ainda, que 30 % da energia consumida pelas bombas hidráulicas pode ser evitada por meio do uso de melhores projetos e/ou equipamentos mais adequados. Assim, o ponto de máxima eficiência de consumo pode ser alcançado através da correta seleção desses equipamentos em função das necessidades dos sistemas, obtidas através de um projeto, de acordo com as condições de trabalho e com a concepção estabelecida.

Segundo Gomes (2012), a maioria dos sistemas de bombeamento existentes no Brasil foram concebidos sobre o critério da minimização dos custos de implantação apenas. A razão disso está ligada, basicamente, ao fato de que o governo subsidiava o valor da energia elétrica às companhias de saneamento, fazendo com que o custo operacional não fosse avaliado de maneira tão criteriosa quanto hoje se exige em função dos constantes aumentos das faturas de energia elétrica e seus respectivos impactos sobre os caixas das empresas de saneamento.

Tendo em vista essas características de mau gerenciamento dos recursos dos sistemas de saneamento do país, existem ferramentas consolidadas, com ou sem investimentos, para a melhoria do consumo energético e de todos os outros impactos correlatados, tais como, econômicos e ambientais. No entanto, todas as ações dependem de estudos prévios – diagnóstico hidroenergético – para a determinação dos possíveis ganhos em eficiência e cujo resultado é uma lista de possíveis intervenções com suas respectivas estimativas de redução no consumo de energia elétrica e, conseqüentemente, dos gastos associados.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

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

- Capítulo 2: revisão bibliográfica de artigos, que tratam de assuntos atuais com relação à eficiência e à conservação da energia hidráulica e elétrica em *Conventional Water Supply Systems* (CWSS's), *Water Supply System* (WSS's) e/ou apenas sistemas de bombeamento. As publicações fazem correlação com a necessidade de preservação dos recursos naturais e financeiros por meio de técnicas (com ou sem investimentos) como o uso de fontes renováveis, o gerenciamento operacional, o investimento em equipamentos e instalações mais eficientes, dentre outras. É apresentada a situação do Brasil dentro do contexto do abastecimento de água e, também, a ideia de utilização do diagnóstico hidroenergético (com estudos de casos de sucesso) como ferramenta de direcionamento à tomada de decisão;
- Capítulo 3: fundamentação teórica, focada em CWSS's, com detalhamento dos assuntos relacionados às estações de bombeamento de água e aos sistemas de abastecimento de água. O intuito é dar subsídios técnicos para a realização das medições em campo e a determinação, dentre outros, dos parâmetros hidráulicos e elétricos, das perdas envolvidas, do enquadramento tarifário e dos indicadores de desempenho que possam qualificar a instalação em estudo frente aos conceitos de eficiência hidroenergética, bem como direcionar nos estudos multidisciplinares aplicáveis;
- Capítulo 4: materiais e métodos, onde a instalação e o estudo são apresentados. São definidos os tipos e as etapas das análises a serem aplicadas, tais como, por exemplo, o levantamento do histórico das vazões aduzidas, níveis dos reservatórios, sequenciamentos operacionais dos equipamentos, bem como são definidos os testes de campo a serem aplicados ao estudo de caso proposto. Nessa etapa, a fundamentação teórica subsidia fortemente a aplicação da técnica estabelecida para obtenção dos resultados esperados;
- Capítulo 5: neste capítulo, Resultados e Discussão, são demonstrados os resultados obtidos durante os trabalhos do estudo de caso proposto e, ainda, é discutida a eficiência do método utilizado de maneira a tentar fomentar novas práticas para a utilização desta metodologia, visando a sua aplicação em outros estudos de caso;
- Capítulo 6: o referido capítulo, Conclusões e Considerações Finais, se destina às conclusões resultantes do processo de estudo, da análise e dos testes do sistema, objetos do presente trabalho, qualificando a instalação frente aos conceitos de eficiência hidroenergética (através de indicadores de desempenho) e explorando as melhorias já efetivadas, bem como as possíveis de serem implantadas, com base

nos resultados colhidos. Além disso, sugestões de trabalhos futuros são apresentadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

VILANOVA e BALESTIERI (2014): apresentam uma ampla revisão da literatura selecionada referente à eficiência e à conservação da energia elétrica e hidráulica – eficiência hidroenergética – em CWSS's. Estabelecem que, em função da necessidade crescente do uso da energia elétrica para a produção de água potável, assim como de técnicas cada vez mais dependentes energeticamente – dessalinização – em função das mudanças climáticas, está se tornando indispensável a promoção do uso racional e eficiente da eletricidade em WSS's. No entanto, os CWSS's são os sistemas mais tradicionais e que possuem o maior potencial de aplicação de ações, principalmente no bombeamento, sendo os sistemas convencionais a delimitação do artigo.

Por meio de uma ampla revisão da literatura, o artigo defende como principais alternativas para a obtenção de uma melhor eficiência energética e hidráulica: (1) uso de fontes de energia renováveis para o bombeamento, especialmente eólica e solar, que se destacam por serem tecnologias muito mais utilizadas em sistemas reduzidos – pequena e média escala (11 kW ou menos) – e que possuirão atrativos econômicos com a redução dos custos de implantação, em decréscimo contínuo; (2) recuperação de energia hidroelétrica, cujo acentuado desnível geométrico, juntamente com o uso de turbinas, em vez de Válvulas Reguladoras de Pressão – VRP's –, regulará a vazão e a pressão da água distribuída aos consumidores e produzirá energia elétrica para o uso nos WSS's; (3) o gerenciamento da pressão do sistema, o que impacta na diminuição das perdas de água por vazamentos já existentes e também na diminuição da incidência de rupturas em tubulações, sendo o uso de VRP's o mais difundido em WSS's; (4) otimização operacional, em que, conceitualmente, o problema da otimização operacional de um CWSS, quando focado no gerenciamento e na conservação de energia, visa minimizar o consumo de energia e a demanda. Quando realizada via simulação em computador, a otimização operacional pode ser dividida em quatro etapas: (a) estabelecimento do problema a ser otimizado; (b) construção do modelo computacional do sistema; (c) calibração e validação do modelo e (d) realização da simulação e da otimização; (5) uso de conjuntos motobombas eficientes, a partir do qual até 30 % da energia consumida por bombas hidráulicas poderia ser evitada através de melhores projetos, seleção dos equipamentos mais adequados e escolha otimizada do modo de operação; (6) uso de inversores de frequência nos conjuntos motobombas para controle da rotação; (7) otimização da capacidade de reservação e da operação dos reservatórios, quando em horários de ponta, por exemplo; (8) tubos e instalações otimizadas, cujas avaliações classicamente ocorrem pela

minimização dos custos das instalações (tubos, motobombas e acessórios), frente aos custos operacionais (energia elétrica principalmente).

Referente, especificamente aos tubos e instalações otimizadas, na avaliação clássica, a eficiência do sistema é analisada em segundo plano, pois qualquer redução do uso energético é resultado da otimização dos custos operacionais (energia de bombeamento, em especial). Na prática, a otimização deveria ser composta de dois componentes: a) minimização dos investimentos frente aos custos operacionais; b) simulação hidráulica, baseada nas equações de conservação de massa e energia, frente às restrições para a otimização do sistema, tais como: demanda, pressões e perdas de carga, sendo o *software* EPANET um dos sistemas mais testados e comuns aplicados à simulação hidráulica. O artigo conclui afirmando que as técnicas aplicáveis para o aumento da eficiência energética e para a conservação da energia em CWSS's são tecnologias conhecidas e fartamente estabelecidas na literatura, mas que não são utilizadas suficientemente. São sugeridas algumas razões para a ineficiência hidroenergética: os custos são repassados aos usuários; a água bruta é frequentemente obtida sem custo pelas companhias distribuidoras de água; e a disponibilidade de água é frequentemente satisfatória, sendo a importância dos insumos somente considerada durante cenários de escassez.

COELHO E ANDRADE-CAMPOS (2014): realizam uma revisão dos métodos existentes para se aumentar a eficiência dos WSS's, através da comparação entre várias publicações. Apresentam ações com ou sem investimentos que reduzem os custos e o consumo energético. O artigo explora assuntos tais como: (1) o uso de energias renováveis, que permite utilizar turbinas como forma de aproveitar a redução de pressão causada pelas VRP's; (2) a simulação hidráulica, através do *software* EPANET, de acesso livre, desenvolvido pela *U.S. Environmental Protection Agency*, que é considerado robusto por muitos usuários no mundo e suporta as comumente usadas fórmulas de perda de carga de *Darcy-Weisbach*, *Hazen-Williams* e *Chezy-Manning*; (3) a otimização, pois os autores defendem a tese de que o desenvolvimento de WSS's sem o uso dessa ferramenta produz sistemas ineficientes (projetos e operação), baseados apenas no imediato aumento da demanda por água em função do crescimento populacional. Nesse trabalho, os pesquisadores também defendem que, apesar de a simulação hidráulica reproduzir as características do sistema, ela não reproduz a melhor condição de projeto ou operação, ficando com a otimização esse papel, por meio das tentativas e erros, ou então com algoritmos que minimizam ou maximizam certa variável.

Reforçam, ainda, que a questão da otimização se baseia em achar a melhor estratégia de projeto/operacional, que minimiza os custos operacionais enquanto satisfaz os consumidores em relação à vazão e à pressão. Isso pode ser obtido por: (1) otimização do projeto, que tem como base encontrar as características do sistema que minimizam os custos sem afetar a operação e as necessidades dos usuários; (2) otimização operacional, mediante ações voltadas a: (a) otimização do funcionamento das motobombas; (b) utilização de operação monitorada (supervisório); (c) previsão da demanda de água, um requisito importante para o projeto/operação otimizado; (d) otimização com o uso de sistemas produtores de energia, tais como, as PAT's (*pump as turbine*).

Por fim, os autores concluem que WSS's têm por característica a possibilidade de aplicação de uma grande variedade de ações de melhorias econômicas/energéticas, com muito pouco ou quase nada de investimentos. Afirmam que a simulação hidráulica é essencial durante a aplicação dessas medidas e, apesar da grande quantidade de *softwares* existentes no mercado, o uso do EPANET (gratuito) resulta em bons resultados. Além disso, defendem que os trabalhos são mais voltados para a otimização dos projetos, estando ainda carentes as análises voltadas para a otimização operacional.

VILANOVA e BALESTIERI (2015a): defendem a tese de que os indicadores de desempenho presentes na literatura abordam a questão única da situação energética atual do sistema, mas sem levar em consideração o quanto o sistema poderia ser eficiente, ou seja, não comparam a situação real com a ideal – potencial. Os autores apresentam alguns dos mais usuais indicadores que expressam o uso de eletricidade em WSS's, propostos pela *International Water Association* (IWA) e pelo Sistema Nacional de Informação sobre o Saneamento (SNIS).

Em seguida, são estabelecidos três novos indicadores: indicador da energia hidráulica recuperada – aplicável a sistemas que possuem diferenças topográficas que possibilitem a geração de energia; indicador da operação otimizada de bombeamento – que faz a comparação entre o consumo energético otimizado da instalação com o mesmo parâmetro real; e o indicador da altura manométrica fornecida – que seria uma comparação entre a situação real da carga fornecida pela bomba frente à necessidade, em função das pressões mínimas e máximas estabelecidas na legislação, nas condições de pico de consumo ou estagnação do consumo, respectivamente. No caso do indicador da altura manométrica fornecida, ele pode ser também interpretado como sendo a razão entre as perdas de carga reais

pelas perdas de carga ideais/otimizadas. Os autores validam os indicadores em estudos de caso subsequentes.

VILANOVA e BALESTIERI (2015b): avaliam o uso da eletricidade para produção e distribuição de água no Brasil, mediante análise das informações disponíveis em bancos de dados e nos órgãos oficiais de energia e saneamento do país, tendo como base o ano de 2012. São abordadas cinco categorias de indicadores: indicadores *per capita*, indicadores de perdas de água, indicadores energéticos, indicadores de gases do efeito estufa e indicadores financeiros/econômicos.

Por meio da avaliação das informações obtidas, tratamento dos dados e análise estatística, dezoito indicadores são apresentados, sendo que, entre as principais informações têm-se, por exemplo: $200,7 \pm 3,8 \text{ L hab}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ é o indicador PCWP (*per capita water production*); $29,0 \pm 0,7 \%$ a média de perdas municipais de água no Brasil; $0,862 \pm 0,046 \text{ kWh m}^{-3}$ a média SEC (*Specific energy consumption*) dos WSS's brasileiros, o que impacta em um consumo de $1,9 \%$ da eletricidade do país para esses sistemas; $0,050 \pm 0,004 \text{ kgCO}_2 \text{ m}^{-3}$ a emissão de gases do efeito estufa pelos WSS's municipais brasileiros; e $0,14 \pm 0,01 \text{ US\$ m}^{-3}$ a despesa das empresas municipais de abastecimento de água com energia elétrica, o que representa $16,8 \pm 0,7 \%$ dos custos operacionais e $12,9 \pm 0,5 \%$ dos custos totais.

KALAISELVAN et al. (2016): defendem que, devido ao constante crescimento da demanda por energia, são as ações com foco no aumento da eficiência que farão diminuir a quantidade de energia utilizada para realização dos processos, bem como possivelmente mitigar os impactos ambientais. Sendo as bombas, especialmente as centrífugas, as consumidoras de até 20% da energia produzida no mundo, políticas globais de aumento da eficiência devem ser estabelecidas. Em uma abordagem não centrada necessariamente em WSS's, por meio de revisão bibliográfica, são tratados diversos assuntos referentes a conceitos de eficiência energética em sistemas de bombeamento, que se iniciam com valores de perdas energéticas em cada um dos elementos que compõem tais sistemas, conforme Tabela (2.1).

Tabela (2.1) – Perdas energéticas em sistemas de bombeamento.

Componente do sistema de bombeamento	Rendimento [%]	Perdas [%]
1 Tubulações	---	40 - 50
2 Bombas	85 - 90	10 - 15
3 Acoplamentos	≈ 99	≈ 1
4 Motores	> 90	< 10
5 Cabeamento	---	≈ 2
6 Conversores de frequência	95 - 98	2 - 5
7 Transformadores	≈ 99	≈ 1

Fonte: adaptado de KALAISELVAN et al. (2016)

O artigo ainda define três oportunidades de aumento da eficiência energética em sistemas que trabalham com bombas centrífugas: seleção dos componentes – 1°; dimensionamento do sistema de bombeamento – 2°; e o uso de controles/ajustes – 3°. Primeiramente, é realizada uma revisão dos componentes dos sistemas de bombeamento (*component design*) – bombas, motores e acoplamentos. Sequencialmente, definem-se valores de energia perdida e métodos que podem ser utilizados para evitá-las com o uso de sistemas adequados de bombeamento – redes de bombeamento – destacando que, em média, o dimensionamento adequado das bombas e do sistema de tubulação pode reduzir de 15 a 25 % da energia utilizada. A terceira abordagem é referente ao uso de controles/ajustes, tais como: conversores de frequência; uso de bombas em paralelo e a otimização do sistema pela avaliação do potencial energético de diminuição da energia consumida em sistemas de bombeamento, através de avaliações e modelagens em diferentes condições operacionais e que permitem o desenvolvimento de ações de redução do consumo energético e econômico.

A terceira abordagem reforça a tese de que a instalação de conversores de frequência, juntamente com a automação para o controle do acionamento/desacionamento e a mudança de rotação dos grupos instalados em paralelo são as ações mais eficazes para redução do consumo energético em sistemas de bombeamento em paralelo. Nesses sistemas, a variável de controle é a vazão, sendo, portanto, o melhor indicador para determinação da performance da instalação a energia específica consumida – energia total consumida pelo volume bombeado de todas as bombas (kWh m^{-3}).

Ao otimizar a eficiência do sistema usando várias estratégias de controle, surge o fato de que manter a eficiência do sistema no máximo não significa consumo mínimo de energia a uma vazão específica. A região preferencial de operação da bomba é estimada com base na

detecção dos parâmetros de bombeamento do sistema. O artigo é finalizado com a demonstração de oportunidades de aumento da eficiência dos sistemas, de acordo com o existente na literatura, como se pode ver na Tabela (2.2).

Tabela (2.2) – Oportunidades de ganhos de eficiência em sistemas de bombeamento.

Categoria da melhoria de eficiência energética	Medida de melhoria da eficiência energética	Economia de energia [%]
Controle e ajuste	Substituição de válvulas de estrangulamento por acionamentos de velocidade variável (conversores de frequência).	5 – 50
	Reduzindo a velocidade ao aparar o impulsor e reduzindo as relações de transmissão.	5 – 40
Otimização do projeto do sistema de bombeamento	Instalação de sistemas de bombeamento paralelos.	10 – 30
	Eliminação de sistemas de recirculação do recalque para a sucção.	10 – 20
	Aumento do diâmetro do sistema de tubulação para reduzir o atrito.	5 – 20
	Redução durante o projeto das “margens de segurança” e das “não linearidades das tubulações – acessórios” do sistema.	5 – 10
Seleção eficiente de componentes	Substituição do motor convencional por um motor com maior eficiência energética.	1 – 3
	Substituição da bomba convencional por uma bomba com maior eficiência energética.	1 – 2
	Substituição de acionamentos por correia por acoplamentos mecânicos diretos.	≈ 1
Operação e manutenção	Substituição dos rotores, tubos e acoplamentos danificados.	1 – 5

Fonte: adaptado de KALAISELVAN et al. (2016).

MORENO et al. (2007): desenvolveram um modelo para a análise da eficiência energética em instalações de bombeamento de água, que permite a determinação da sequência de acionamento dos grupos motobombas que minimiza os custos frente à demanda necessária, ou seja, melhores procedimentos operacionais. A calibração do modelo é realizada via medições elétricas e hidráulicas, em um estudo de caso aplicado à estação de bombeamento de Torazona de La Mancha (Espanha) – estação de bombeamento para irrigação – composta por dez bombas, sendo uma reserva; apenas dois conjuntos com conversor de frequência; reservatório de 23.000 m³; e sistema de distribuição via tubulações para os pontos de consumo.

A análise é iniciada com a medição dos parâmetros elétricos: corrente, tensão, potência, fator de potência e etc., em cada um dos conjuntos motobombas e em diferentes condições de carga. Concomitantemente, são realizadas medições das grandezas hidráulicas: pressão e vazão. Os mesmos dados foram obtidos para a condição de sequenciamento dos grupos. O modelo de simulação foi construído e calibrado através de dados operacionais em

dois passos: comparação dos dados de vazão e pressão calculados com os medidos e posterior ajuste dos parâmetros iniciais com base nas relações teóricas para melhorar a adaptação dos valores medidos aos calculados. Os autores destacam que um modelo é usual para o estabelecimento do melhor ponto de trabalho da instalação e, também, para avaliação da eficiência e do efeito do envelhecimento dos conjuntos motobombas sobre o sistema. O artigo conclui defendendo a tese de que apenas a medição e o posterior gerenciamento das grandezas elétricas e hidráulicas da instalação – com avaliação entre demanda necessária e conhecimento entre a maneira otimizada de acionamento dos conjuntos motobombas – podem trazer reduções dos custos energéticos, sendo que no estudo de caso proposto a redução do custo energético foi de 16 %.

OLIVEIRA FILHO et al. (2011): desenvolveram uma metodologia para diagnosticar energeticamente sistemas de captação de água. A metodologia foi validada em um estudo de caso de uma estação de bombeamento para 70.000 habitantes – estação de captação de água de Viçosa (MG), composta por três conjuntos motobombas de 75 cv, sendo dois operativos em paralelo e um reserva. O estudo se inicia com a avaliação da qualidade da energia elétrica fornecida pela concessionária em relação ao nível de desbalanceamento da rede e com o estabelecimento das características das cargas: potência nominal e em uso; tensão nominal e de fornecimento; corrente em função da carga e da tensão de fornecimento (que se resume em tensão, corrente, potência ativa, potência reativa, potência aparente e fator de potência); horas de funcionamento; regime de trabalho; forma e frequência das partidas e potência hidráulica útil.

Após essa etapa, foram realizados os dimensionamentos das bombas e dos motores elétricos, além da simulação – com o programa Agribombas – do consumo e da demanda de energia elétrica para o sistema proposto. Foram calculados os gastos com energia elétrica (consumo e demanda), em comparação com o sistema atual. Esse estudo permitiu a avaliação da classificação tarifária da instalação, bem como a determinação do desempenho de cada conjunto motobomba, o que permite tomar melhores decisões frente às informações obtidas, visando o uso mais eficiente da energia elétrica em sistemas de captação de água. Como resultado, situações diferentes foram propostas, que vão desde a substituição dos três conjuntos motobombas (2 operando e 1 reserva) por três conjuntos motobombas mais eficientes (2 operando e 1 reserva), até a substituição da situação atual por apenas dois conjuntos motobombas (1 operando e 1 reserva). Juntamente com a adequação/otimização

tarifária, estimou-se uma economia proposta com energia elétrica de 52,25 % na segunda situação.

CABRERA et al. (2016): defendem que é essencial diminuir a enorme quantidade de energia utilizada nos sistemas pressurizados de transporte de água, que resultam em impactos econômicos e ambientais negativos, situação que só é possível pelo aumento da eficiência energética dos sistemas. O artigo identifica e descreve oito estratégias práticas diferentes para economia energética, com as respectivas margens de economia estimadas, sendo a etapa de bombeamento incluída dentro desse estudo, e afirma que, na seleção dessas, 60 % ou mais de economia energética pode ser obtida. Defende que a máxima economia de energia poderá somente ser alcançada por uma avaliação global do sistema (seguindo um roteiro), formada de diferentes etapas e composta de seis estágios: pré-avaliação, diagnóstico, análises/auditorias, exploração de ações com avaliação do custo benefício – foco central do artigo –, decisão e certificação energética do sistema, cuja energia requerida/consumida para o sistema é comparada com a sua topografia, o que pode impactar ou não no uso de turbinas e/ou VRP's. Como o objetivo principal do artigo é a apresentação de estratégias que aumentam a eficiência energética do sistema, ele segue com a descrição dessas, que totalizam oito e são divididas em quatro operacionais (sem necessidade de investimentos): operar a estação de bombeamento no BEP (*Best Efficient Point*) – (10 % de economia); evitar excedentes de energia através do controle do sistema, com conversores de frequência, por exemplo (10 a 15 % de economia); minimizar os vazamentos pelo controle de pressões (até 33 % de economia); minimizar as perdas por fricção, forçando uma distribuição mais uniforme do fluxo (até 10 % de economia). Além disso, as quatro estratégias estruturais (com necessidade de investimentos) são: o uso de bombas mais eficientes (20 a 30 % de economia); recuperação energética com o uso de turbinas ou modificação do *layout*, setorizando as regiões com o uso de diferentes bombas de acordo com o necessário para cada setor (até 15 % de economia); modificação dos *layouts*, sem a necessidade de determinar a construção do reservatório no ponto mais alto da cidade para manter a pressão no ponto mais crítico dentro do estabelecido, pois talvez o abastecimento sem reservação possa suprir esse ponto crítico com muita economia energética (até 30 % de economia); entre outras (acima de 50 % de economias).

Por fim, são realizados dois estudos de casos: no primeiro (hipotético) a energia necessária em uma instalação de irrigação era de apenas 24,67 % da consumida pelo sistema e, através de ações operacionais/estruturais (como a instalação de VRP's e controles operacionais sobre os períodos de bombeamento), foi obtida uma redução no consumo

energético de 50,71 %. No segundo caso (real) através de alterações estruturais na sucção e no recalque da instalação localizada em Jávea – Espanha, a economia com energia chegou aos 56 % e o retorno do investimento foi previsto para 2,5 anos.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No presente capítulo, é apresentada a Fundamentação Teórica de assuntos referentes objetivamente ao estudo da eficiência energética e do diagnóstico hidroenergético em estações elevatórias pertencentes a sistemas de abastecimento de água. O propósito é de se estabelecer critérios e conceitos que permitam a determinação, entre outros muitos fatores, da eficiência dos equipamentos e instalações já construídos e em uso e, com isso, ter embasamento técnico para a qualificação de uma instalação elevatória de água frente a critérios de eficiência hidroenergética, bem como determinação de ações que potencializem esse aspecto.

3.1 ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Um sistema de abastecimento de água tem por objetivo fornecer água tratada de boa qualidade, na quantidade adequada e com a pressão suficiente (TSUTIYA, 2014). Segundo Gomes (2012), os sistemas de abastecimento de água e tratamento de esgoto são responsáveis por 3 % da energia elétrica consumida no mundo, sendo que no Brasil de 2 a 3 % (10 bilhões de kWh ano⁻¹) de energia elétrica são consumidos pelas companhias prestadoras de serviços de abastecimento de água e tratamento de esgoto, segundo dados obtidos do Programa Nacional de Conservação de Energia para o Setor de Saneamento – PROCEL SANEAR. A *Alliance to Save Energy* (2002 apud COELHO; ANDRADE-CAMPOS, 2014) estima em 7 % o consumo mundial de energia para distribuição de água.

Sequencialmente, são apresentados os principais componentes que dão forma a um sistema convencional de fornecimento de água potável. Na literatura, sistemas tradicionais de abastecimento de água são denominados de CWSS's.

3.1.1 Manancial

É de onde é retirada a água bruta, que é o nome dado à água captada em rios, barragens, poços e etc., e que, após todos os processos aplicáveis do tratamento em um sistema de abastecimento de água, será distribuída à população (TSUTIYA, 2014). A maneira como essa água bruta é retirada do manancial pode ser superficial ou subterrânea. Dessa forma, um manancial será classificado como fornecedor de água superficial quando esse for um rio, uma represa, ou um lago, por exemplo. Já quando o manancial for um poço, a água será classificada como subterrânea.

3.1.2 Captação

A captação é o conjunto de estruturas e equipamentos construídos e instalados junto ao manancial e que tem a função de captar a água bruta destinada ao sistema de abastecimento (NBR 12213, 1992). Em sistemas tradicionais, após a captação, vem a etapa de tratamento na estação de tratamento de água.

Segundo Vilanova e Balestieri (2015a), no Brasil, o consumo de energia para WSS's, estabelecida através de informações disponíveis em bancos de dados e nos órgãos oficiais de energia e saneamento do país – base ano 2012, varia de 0,25 kWh m⁻³ até 4,5 kWh m⁻³, dependendo da maneira de retirada da água bruta (superficial ou subterrânea), respectivamente, e tendo uma média de 0,862 +/- 0,046 kWh m⁻³. Já para Vilanova e Balestieri (2014), por meio dos dados obtidos do SNIS, 0,69 kWh m⁻³ é a média das maiores companhias de abastecimento de água no país.

3.1.3 Estação Elevatória

Conjunto de obras e equipamentos destinados a transportar a água entre os diferentes pontos do sistema. Normalmente, a estação elevatória recalca a água de um nível geométrico mais baixo para um reservatório que esteja em um nível superior. A partir de dados obtidos pela *Alliance to Save Energy* (2002 apud VILANOVA; BALESTIERI, 2014), estima-se que de 2 a 3 % do consumo de energia elétrica no mundo seja utilizado para bombeamento em WSS's, sendo que 80 a 90 % da energia é absorvida pelos conjuntos motobombas.

3.1.4 Adutora

Tubulação utilizada para transporte de água bruta ou tratada entre as diferentes instalações do sistema de abastecimento de água. A adutora não tem por objetivo o fornecimento final de água tratada para os consumidores, pois essa é a finalidade das redes de distribuição (TSUTIYA, 2014). Segundo a NBR 12214 (1992), barrilete é definido como o conjunto de tubulações que une as saídas das bombas associadas em paralelo à tubulação de recalque.

3.1.5 Estação de Tratamento de Água

Conjunto de estruturas e equipamentos destinados a adequar as características da água dentro dos parâmetros legais de potabilidade (NBR 12216, 1992). Após receber o tratamento adequado, a água bruta passa a ser chamada de água tratada. É usual que a estação de tratamento de água seja chamada apenas como ETA. Segundo Vilanova e Balestieri (2014, p. 702), CWSS's são "sistemas em que o tratamento é realizado por coagulação convencional, floculação, sedimentação e filtração"³ e cujo consumo da energia é mais atribuído ao bombeamento (para captação, adução e distribuição de água).

3.1.6 Reservatório

É a estrutura destinada a armazenar a água, além de condicionar as vazões e pressões nas redes de distribuição. A reservação de água se faz necessária, pois existem oscilações operacionais no sistema, tais como paradas não programadas de equipamentos. A regularização das vazões e pressões ocorre, pois, normalmente, os reservatórios distribuem, por gravidade, a água tratada para as diferentes regiões atendidas, sendo que o par vazão/pressão ficará oscilando sempre entre níveis mínimos e máximos, de acordo com o nível do reservatório. A NBR 12217 (1994) não fixa valores de reservação de acordo com o número de usuários, deixando aos projetistas o papel de estabelecerem a necessidade volumétrica em função de fatores tais como: clima, hábitos, desenvolvimento socioeconômico e etc.

3.1.7 Rede de Distribuição

De acordo com Tsutiya (2014), as redes de distribuição são as tubulações e acessórios destinados a realizar o fornecimento da água potável para os consumidores. Isso deve ocorrer de maneira contínua, em quantidade e pressão recomendadas. A NBR 12218 (1994) estabelece, para tubulações distribuidoras, em 100 kPa a pressão dinâmica mínima – sob condição de consumo não nulo – e em 500 kPa a pressão estática máxima – sob condição de consumo nulo. Com relação às tubulações principais, que são as não dedicadas ao abastecimento direto dos consumidores, as pressões não são condicionadas em limites máximos e mínimos.

³ Tradução nossa. No original em inglês: "CWSSs are systems in which the treatment is carried out by conventional coagulation, flocculation, settling and filtration".

3.2 CONSIDERAÇÕES HIDRÁULICAS SOBRE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

3.2.1 Diferentes Tipos de Pressões nos Sistemas de Bombeamento

A Equação (3.1) apresenta a interação entre os diferentes tipos de pressões presentes em um fluido ideal em escoamento. O termo P é a pressão estática, $\rho \frac{V^2}{2}$ a pressão dinâmica e $\rho g z$ a pressão hidrostática. A soma das pressões estática, dinâmica e hidrostática é chamada de pressão total.

$$P + \rho \frac{V^2}{2} + \rho g z = \text{constante} \quad (3.1)$$

onde P é a pressão, ρ a massa específica, V a velocidade média, g a aceleração gravitacional e z a cota do eixo do conduto em relação ao nível de referência.

De acordo com Mattos e Falco (1998), ao se dividir os três termos da Eq. (3.1) pelo produto da massa específica e aceleração gravitacional, que resulta no peso específico, obtêm-se esses termos (cargas) em unidade de comprimento. A Eq. (3.2) – Teorema de *Bernoulli* – representa o anteriormente definido.

$$\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + z = \text{constante} \quad (3.2)$$

onde γ é o peso específico do fluido.

Da maneira apresentada, cada um dos três termos da Eq. (3.2) representa, em unidade de comprimento, uma parcela da linha de carga do fluido em escoamento. Sendo assim, P/γ representa a carga da pressão, o que é definido como a altura que um fluido deve estar para produzir a pressão estática P ; $V^2/2g$ representa a carga de velocidade ou cinética, que é a altura que um fluido tem que estar para produzir a velocidade V , quando em queda livre sem atrito; e z representa a carga da elevação ou de posição, que nada mais é que a energia potencial do fluido (MATTOS; FALCO, 1998).

O traçado da linha piezométrica surge durante os somatórios, ao longo da tubulação, da carga de pressão com a de elevação. O somatório da carga de pressão, de elevação e de velocidade, ao longo da tubulação, gera a linha de carga. A linha que leva em consideração apenas a carga de altura é chamada de trajetória e surge, igualmente, ao longo da tubulação quando apenas esse termo é considerado na avaliação.

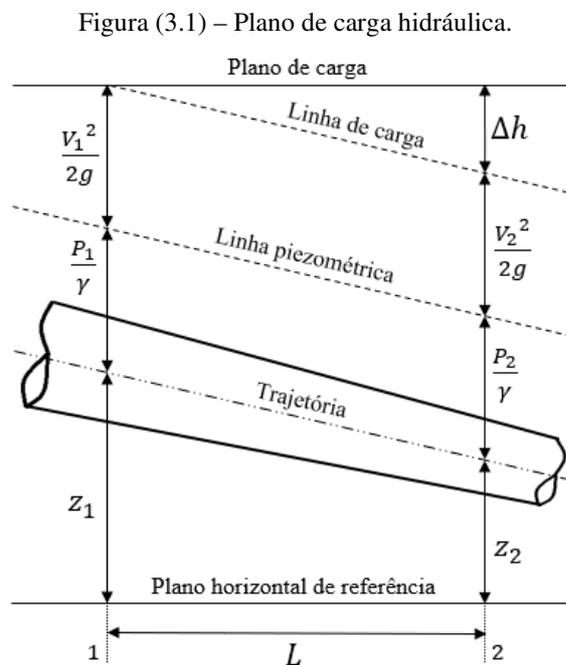
3.2.2 Perda de Carga

Para que seja possível realizar o equacionamento em um sistema real, é necessário que seja incluído na equação do balanço da energia mecânica o conceito de perda de energia. Dessa maneira, a equação entre dois pontos do sistema fica com o formato da Eq. (3.3).

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + \Delta h \quad (3.3)$$

onde Δh é a perda de carga total.

A representação desses termos, que igualmente foi realizada no caso de trabalho com fluido ideal, fica de acordo com a Figura (3.1). Agora, toda a energia perdida, devido a ser considerado um fluido real é representada pelo termo Δh que é a perda de energia, chamada de perda de carga total. Nota-se que, na Figura (3.1), o somatório de todos os termos da Eq. (3.3), menos a parcela da perda de carga, ao longo da tubulação, gera a linha de carga e, ao se acrescentar no somatório, ao longo da tubulação, a parcela Δh , surge o plano de carga (TSUTIYA, 2014).



Fonte: adaptado de Tsutiya (2014).

3.2.2.1 Perda de Carga Distribuída ou Normal

Diferentemente da perda de carga distribuída ou normal que, segundo Mattos e Falco (1998), pode ser obtida para o regime laminar de maneira totalmente teórica, no caso do regime turbulento, é necessária uma análise teórico-experimental. Dessa forma, existem na literatura diferentes análises realizadas com diferentes condições operacionais para os condutos forçados, de maneira que várias tabelas surgem com resultados teórico-experimentais de correção (correlações empíricas), que são os coeficientes aplicáveis aos cálculos da perda de carga.

3.2.2.1.1 Fórmula Universal

A fórmula de *Darcy* e *Weisbach* ou Universal é a recomendada pela NBR 12218 (1994) para a determinação da perda de carga. O equacionamento está definido na Eq. (3.4).

$$\Delta h_D = f \frac{L v^2}{D 2g} \quad (3.4)$$

onde Δh_D é a perda de carga distribuída ou normal, f o coeficiente de atrito do tubo, L o comprimento da tubulação e D o diâmetro interno do tubo.

Como a perda de carga aumenta com o aumento da vazão que escoar em uma tubulação e diminui com o aumento do diâmetro interno desse conduto forçado, é importante o conhecimento da Eq. (3.5), obtida de Gomes e Carvalho (2012), que é deduzida a partir da Eq. (3.4). Ela demonstra a relação exponencial entre os termos perda de carga distribuída ou normal, vazão volumétrica e diâmetro da tubulação.

$$\Delta h_D = \frac{8fLQ^2}{\pi^2 g D^5} \quad (3.5)$$

onde Q é a vazão volumétrica do fluido.

O coeficiente de atrito do tubo é dependente do número de *Reynolds*, da rugosidade absoluta e do diâmetro interno da tubulação. A divisão da rugosidade absoluta pelo diâmetro interno da tubulação recebe o nome de rugosidade relativa. O coeficiente de atrito do tubo, para tubos rugosos, com $Re > 4.000$, independe do número de *Reynolds* – regime turbulento rugoso – e pode ser determinado, por exemplo, pela Eq. (3.6), de *Karman-Pradtl* (TSUTIYA,

2014). A condição de regime turbulento rugoso será sempre a situação encontrada nas avaliações em sistemas elevatórios de água.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,14 + 2 \log \frac{D}{K} \quad (3.6)$$

onde K é a rugosidade absoluta da tubulação.

Um ábaco também permite que se estabeleça o fator de atrito, sendo esse chamado de ábaco ou diagrama de *Moody*. Ele estabelece que, a partir da determinação do número de *Reynolds* e da rugosidade relativa, chegue-se ao valor do coeficiente de atrito do tubo (GOMES, 2012). O valor da rugosidade absoluta tabelado para diferentes tipos de tubulações é apresentado no Anexo (01) e no Anexo (02) é demonstrado um ábaco para determinação da rugosidade relativa e do coeficiente de atrito do tubo em função dos diâmetros e materiais das tubulações.

3.2.2.1.2 *Fórmula de Hazen-Williams*

A fórmula de *Hazen-Williams* é de uso corrente, mas em termos de engenharia sanitária. Ela foi obtida empiricamente e, segundo Tsutiya (2014), tem como resultado uma perda de carga unitária, que seria a carga pelo comprimento linear da tubulação. Essa está representada na Eq. (3.7).

$$J = 10,65Q^{1,85}C^{-1,85}D^{-4,87} \quad (3.7)$$

onde J é a perda de carga unitária e C o coeficiente de rugosidade de *Hazen-Williams*.

De maneira a facilitar, a fórmula de *Hazen-Williams* pode ser reescrita, levando em consideração a explicitação da vazão e da velocidade (TSUTIYA, 2014). Na Eq. (3.8) a vazão volumétrica é o termo a ser encontrado e na Eq. (3.9) é a velocidade média a incógnita. O valor do coeficiente de rugosidade de *Hazen-Williams* tabelado para diferentes tipos de tubulações é apresentado no Anexo (03-A) e, no Anexo (03-B), são apresentados valores do coeficiente “C” em função dos diâmetros e idades das tubulações de ferro fundido centrifugados.

$$Q = 0,279CD^{2,63}J^{0,54} \quad (3.8)$$

$$V = 0,355CD^{0,63}J^{0,54} \quad (3.9)$$

Segundo Tsutiya (1997 apud COELHO; ANDRADE-CAMPOS, 2014), a rugosidade dos tubos impacta enormemente o custo energético. Dessa maneira, conforme Tabela (3.1), quando o coeficiente de rugosidade de *Hazen-Williams* passa de 130 para 90, por exemplo, haverá um acréscimo de 97 % nos custos energéticos anuais. Por essa razão, em sistemas já existentes, a limpeza e o estado do revestimento dos tubos são importantíssimos para minimização dos gastos energéticos.

Tabela (3.1) – Acréscimo dos custos energéticos em função da rugosidade das tubulações.

Coeficiente de <i>Hazen-Williams</i>	120	110	100	90	80	70	60	50
Acréscimo dos custos energéticos [%]	16	36	62	97	145	214	318	486

Fonte: adaptado de Coelho e Andrade-Campos (2014).

3.2.2.2 Perda de Carga Localizada

As perdas de carga localizadas devem-se aos acessórios instalados nas tubulações, tais como: válvulas, conexões, derivações, instrumentos de medição e etc. De acordo com Mattos e Falco (1998), nas tubulações de grande extensão, as perdas de carga localizadas podem ser insignificantes em relação às perdas de carga normais. No entanto, por exemplo, em tubulações de sucção de um sistema de bombeamento, elas podem ser bem destacadas em relação à perda de carga normal.

A perda de carga localizada pode ser estabelecida através da utilização de dois métodos distintos: método direto e método do comprimento equivalente.

3.2.2.2.1 Método Direto

Segundo Santos (2007), a determinação do valor da perda de carga localizada, no caso específico do método direto, é dada pela Eq. (3.10).

$$\Delta h_L = k \frac{v^2}{2g} \quad (3.10)$$

onde Δh_L é a perda de carga localizada e k o coeficiente de perda de carga localizada ou singular.

São diferentes as formas de representação utilizadas nos acessórios de tubulações para estabelecer relações que forneçam o valor de k em função das suas características. No Anexo (04), são apresentados valores de k para acessórios de uso comum em sistemas elevatórios de água.

3.2.2.2.2 *Método do Comprimento Equivalente*

No método da determinação da perda de carga pelo comprimento equivalente, 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; FALCO, 1998).

Novamente, nesse caso, são variadas as formas de apresentação existentes para se chegar ao valor da perda de carga pelo método do comprimento equivalente. No Anexo (05), são apresentados valores para acessórios de uso comum em sistemas elevatórios de água.

3.2.2.3 Perda de Carga Total

Segundo Santos (2007), após determinadas as perdas de carga distribuídas ou normais e as perdas de carga localizadas, a perda de carga total do sistema será o somatório dessas duas. No entanto, a maneira de interpretação pode ser realizada de duas formas:

- Se a perda de carga localizada for obtida pelo método direto, a perda de carga total será o simples somatório dessa com a perda de carga distribuída ou normal;
- Já se a perda de carga localizada for determinada pelo método do comprimento equivalente, o valor obtido de tubulação equivalente deve ser somado ao comprimento linear da tubulação e, após isso, deve-se realizar o cálculo conforme a Eq. (3.11).

$$\Delta h = f \frac{L_{TOTAL} V^2}{D 2g} \quad (3.11)$$

onde L_{TOTAL} é o comprimento da tubulação determinado pelo método do comprimento equivalente.

3.2.3 Determinação do Diâmetro da Tubulação

Na etapa de projeto, o diâmetro de uma tubulação, para uma mesma vazão, possui valor hidráulicamente indeterminado. Isso significa que são inúmeras as possibilidades de configurações onde, ao se aumentar o diâmetro da tubulação, diminui-se o valor da potência dos equipamentos de recalque e, ao se diminuir o valor do diâmetro da tubulação, aumenta-se a necessidade de potência fornecida ao fluido (TSUTIYA, 2014).

Segundo Santos (2007), os custos de implantação e de operação são antagônicos, pois, quando um aumenta, o outro diminui. Ao se escolher um diâmetro maior de tubulação, tem-se redução da perda de carga e, conseqüentemente, redução da potência da bomba, com conseqüente diminuição do custo operacional, mas o custo da linha será maior, com conseqüente aumento do custo de implantação. Já com o uso de uma tubulação de diâmetro menor, haverá menor investimento na implantação, mas será obtido um aumento na perda de carga e, portanto, na necessidade por equipamentos mais potentes para o recalque, assim como aumento do custo operacional. Dessa maneira, existe um diâmetro chamado de ótimo ou econômico “ $D_{econômico}$ ”, obtido quando os custos de implantação (aquisição e montagem/assentamento dos tubos, conexões, conjuntos motobombas e etc.) são comparados frente aos custos operacionais (predominantemente de energia elétrica).

O método das tentativas consiste na determinação do diâmetro ótimo ou econômico a partir da obtenção dos custos de implantação e operacionais calculados para os diversos diâmetros comerciais escolhidos em função da vazão de projeto. A Eq. (3.12) – equação de *Bresse* – estabelece um provável diâmetro ótimo/econômico, que não necessariamente coincidirá com os diâmetros comerciais existentes no mercado, sendo o diâmetro adotado o imediatamente superior ao calculado. É recomendável adotar-se o valor do coeficiente de *Bresse* igual a 1,0 ou 1,1 e, também, uma seqüência de cinco diâmetros nominais comerciais, cujo valor central coincide com o diâmetro nominal do tubo encontrado através da fórmula de *Bresse*. O diâmetro ótimo/econômico será aquele que minimiza o custo total e correspondente à soma dos custos de implantação e operacionais (GOMES, 2012).

$$D_{econômico} = B\sqrt{Q} \quad (3.12)$$

onde $D_{econômico}$ é o diâmetro ótimo ou econômico e B o coeficiente de *Bresse*.

Os custos referentes à implantação são mais fáceis de serem determinados do que os custos referentes à operação, visto que os custos de implantação são determinados na fase de

projeto e tomados como base para o cálculo. Já nos custos operacionais, se esses forem analisados nos pormenores, devem levar em consideração, por exemplo, custos de manutenção, muitas vezes difíceis de serem determinados. Além disso, os custos operacionais nunca cessam durante a operação da instalação e devem, portanto, para ser possível a realização da análise, terem o valor presente estabelecido (SANTOS, 2007).

Gomes (2012) define como sendo o custo de implantação, para efeito de determinação do diâmetro ótimo ou econômico, resumidamente, o custo de implantação da tubulação de recalque, sendo os custos relativos aos equipamentos de bombeamento (conjuntos motobombas, estação elevatória e etc.) comuns a todas as alternativas, não variando significativamente com o diâmetro a ser determinado. Os custos operacionais, maiormente presentes nos custos da energia elétrica, são obtidos através da Eq. (3.13). Para a análise dos custos totais, é necessário que os custos operacionais, que são ininterruptos, sejam trazidos ao valor presente, através da aplicação do Fator de Valor Presente (FVP) – Eq. (3.14) – à Eq. (3.13), para a determinação do custo total, que resulta na Eq. (3.15).

$$C_{operacional} = \frac{9,81QH}{\eta} N_b p \quad (3.13)$$

onde $C_{operacional}$ é o custo operacional, H é a carga, η o rendimento global, N_b o número de horas de bombeamento e p o preço pago pela energia.

$$FVP = \left[\frac{(1+e)^n - (1+i)^n}{(1+e) - (1+i)} \right] \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right] \quad (3.14)$$

onde FVP é o fator de valor presente, e a taxa de aumento anual de energia, i a taxa de juros anual e n período de amortização.

$$C_{total} = C_{implantação} + \left(\frac{9,81QH}{\eta} N_b p \right) FVP \quad (3.15)$$

onde C_{total} é o custo de implantação mais o operacional e $C_{implantação}$ o custo de implantação.

Segundo Gomes (2012), a maioria dos sistemas de bombeamento de água bruta ou potável atualmente existentes no Brasil foram concebidos sobre o critério da minimização dos custos de implantação apenas, sem preocupação com o custo operacional. Isso se deve, pois, ao fato de que o governo subsidiava o valor da energia elétrica às companhias de saneamento,

o que impactava no custo energético, fazendo com que essa não fosse uma despesa tão destacada quanto atualmente é.

Segundo Vilanova e Balestieri (2014), mesmo que o custo da eletricidade seja o parâmetro mais relevante em termos de otimização operacional dos sistemas de abastecimento de água no que diz respeito à minimização dos custos operacionais, conforme apontam Carrijo e Reis (2006), as regras operacionais são usadas para garantir a continuidade do suprimento sem considerar a economia de energia nos equipamentos. Para Gellings (2009 apud COELHO; ANDRADE-CAMPOS, 2014), a otimização dos tubos pode economizar de 5 a 20 % da energia de bombeamento.

3.2.3.1 Velocidades de Escoamento Aplicáveis

De acordo com a equação da continuidade para fluido incompressível, a vazão volumétrica em um conduto forçado é diretamente proporcional à velocidade média do fluido em escoamento e à área da seção transversal. Dessa maneira, uma velocidade maior impactará na necessidade de uma área menor – menor diâmetro – de tubulação para que a mesma vazão de fluido seja transportada. Assim, portanto, um custo menor referente aos custos das tubulações.

No entanto, valores altos de velocidade podem impactar em desgastes prematuros de componentes, bem como comprometimento da segurança operacional da instalação, frente aos Golpes de Aríete, por exemplo. Além disso, o custo operacional se eleva com o aumento da velocidade de escoamento, visto se ter maiores perdas de carga e maior necessidade, portanto, de potência de equipamentos de recalque. Sendo assim, existem valores de velocidade normatizados, ou então recomendados em função da experiência adquirida.

De acordo com Tsutiya (2014), a velocidade econômica em adutoras de recalque tem sido normalmente empregada entre valores de 1,0 a 1,5 m s⁻¹. Já a NBR 12218 (1994), estabelece a velocidade de dimensionamento de condutos em valores entre 0,6 m s⁻¹ (mínimo) e 3,5 m s⁻¹ (máximo). De acordo com Telles e Barros (1998), as velocidades recomendadas para tubulações que trabalham com água doce e tubos de aço carbono, em cidades, devem ser de 1,0 a 2,0 m s⁻¹ e para a sucção de bombas as velocidades devem estar entre 1,0 e 1,5 m s⁻¹.

3.3 FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA

A ANEEL é a agência reguladora no Brasil que normatiza a classificação dos consumidores de energia elétrica em classes de consumo e grupos tarifários, bem como determina a maneira como as cobranças serão efetuadas, através das modalidades tarifárias (CARVALHO, 2017). É essencial para uma eficaz gestão de um WSS, que os valores pagos às distribuidoras de energia elétrica ocorram dentro do melhor enquadramento tarifário possível, de maneira a não serem pagos valores referentes, por exemplo, às multas por ultrapassagens de demanda. Além disso, é possível evitar o pagamento de valores relativos à energia reativa, com ações simples de correção do fator de potência. Segundo Tsutiya (1997 apud COELHO; ANDRADE-CAMPOS, 2014), modificações na modalidade tarifária da energia elétrica podem trazer reduções de até 50 % nos custos energéticos. Isso pode ocorrer, por exemplo, pois o usuário da energia elétrica poderá, de acordo com a normatização estabelecida, contratar uma modalidade tarifária horária que diferencia a quantidade de demanda contratada no horário de ponta e no fora de ponta, o que poderá impactar, portanto, em significativas reduções nas faturas de energia elétrica.

3.3.1 Definições Iniciais

A resolução normativa n° 414, de 09 de setembro de 2010, da ANEEL, define todos os critérios utilizados no estabelecimento do enquadramento tarifário dos consumidores. É necessário, primeiramente, para um pleno entendimento da forma como são estabelecidos os pagamentos referentes à energia elétrica, que sejam detalhados alguns conceitos iniciais, retirados da referida resolução, excetuando-se o que explicitamente estabelecido:

No Artigo 2, parte XXXVI, define-se fatura, por exemplo, como

um documento comercial que apresenta a quantia monetária total que deve ser paga pelo consumidor à distribuidora, em função do fornecimento de energia elétrica, da conexão e uso do sistema ou da prestação de serviços, devendo especificar claramente os serviços fornecidos, a respectiva quantidade, tarifa e período de faturamento de modo a possibilitar ao consumidor o acompanhamento de seu consumo mensal (ANEEL, 2010, p. 4).

Já a demanda é a média das potências elétricas ativas ou reativas, solicitadas ao sistema elétrico “pela parcela da carga instalada em operação na unidade consumidora, durante um intervalo de tempo especificado, expressa em *quilowatts* (kW) e *quilovolt-ampère-reactivo* (kvar), respectivamente” (ANEEL, 2010, p. 3). Segundo Carvalho (2017), o intervalo adotado pelas concessionárias de energia elétrica é definido pelo DNAEE

(Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica) e medido através de aparelho integrador, em intervalos de 15 minutos.

A demanda contratada é aquela de potência ativa que deve ser obrigatória e continuamente disponibilizada pela distribuidora, no ponto de entrega, conforme valor e período de vigência fixados em contrato, “e que deve ser integralmente paga, seja ou não utilizada durante o período de faturamento, expressa em *quilowatts* (kW)” (ANEEL, 2010, p. 3). A demanda de ultrapassagem, por outro lado, é a parcela da demanda que ultrapassou a valor da demanda contratada, sendo expressa em *quilowatts* (kW) (CARVALHO, 2017).

A ANEEL também define o horário de ponta e o horário fora de ponta. O primeiro é o período de 3 horas diárias consecutivas definidas pela distribuidora considerando a curva de carga de seu sistema elétrico, aprovado pela ANEEL para toda a área de concessão, com exceção feita aos sábados, domingos, terça-feira de carnaval, sexta-feira da Paixão, *Corpus Christi* e os seguintes feriados, conforme Tabela (3.2) (ANEEL, 2010).

Tabela (3.2) – Exclusão do horário de ponta, de acordo com a resolução normativa nº 414, de 09 de setembro de 2010.

Dia e mês	Feridos nacionais	Leis federais
01 de janeiro	Confraternização Universal	10.607, de 19/12/2002
21 de abril	Tiradentes	10.607, de 19/12/2002
01 de maio	Dia do Trabalho	10.607, de 19/12/2002
07 de setembro	Independência	10.607, de 19/12/2002
12 de outubro	Nossa Senhora Aparecida	6.802. de 30/06/1980
02 de novembro	Finados	10.607, de 19/12/2002
15 de novembro	Proclamação da República	10.607, de 19/12/2002
25 de dezembro	Natal	10.607, de 19/12/2002

Fonte: ANEEL (2010, p. 7).

O horário fora de ponta é o período composto pelas horas diárias consecutivas e complementares àquelas definidas no horário de ponta (ANEEL, 2010).

Há ainda o período úmido, que compreende 5 (cinco) ciclos de faturamento consecutivos, referente aos meses de dezembro de um ano a abril do ano seguinte e o período seco, que são 7 ciclos de faturamentos consecutivos, referente aos meses de maio a novembro (ANEEL, 2010).

A ANEEL (2010) também estabelece a tarifa, um valor monetário fixado em R\$ (Reais) por unidade de energia elétrica ativa ou da demanda de potência ativa, que forma a base para a definição do preço a ser pago pelo consumidor e explicitado na fatura de energia elétrica. Assim, ela se divide em:

- a) tarifa de energia (TE), “valor monetário unitário determinado pela ANEEL, em R\$/MWh, utilizado para efetuar o faturamento mensal referente ao consumo de energia”;
- b) tarifa de uso do sistema de distribuição (TUSD), “valor monetário (...), em R\$/MWh ou em R\$/kW, utilizado para efetuar o faturamento mensal de usuários do sistema de distribuição de energia elétrica pelo uso do sistema”.
- tarifa binômia de fornecimento: “aquela que é constituída por valores monetários aplicáveis ao consumo de energia elétrica ativa e à demanda faturável” (ANEEL, 2010, p. 10);
 - tarifa monômia de fornecimento, aquela constituída por valor monetário aplicável unicamente “ao consumo de energia elétrica ativa, obtida pela conjunção da componente de demanda de potência e de consumo de energia elétrica que compõem a tarifa binômia” (ANEEL, 2010, p. 10).

A partir do ano de 2015, mediante a resolução normativa nº 547, de 16 de abril de 2013, foi estabelecido um acréscimo no valor da energia elétrica devido à condição de sua geração no país, sendo esse valor repassado ao consumidor final. Esse acréscimo reflete os custos operacionais momentâneos de produção da energia elétrica e é fortemente definido em função do maior ou menor uso de fontes termoeletricas. As Bandeiras Tarifárias são faturadas por meio das contas de energia e, dessa forma, todos os consumidores das distribuidoras pagam o mesmo valor, proporcional ao seu consumo, não importando qual é a sua classe de consumo. A lógica do sistema se define por cores, onde a variação dessas vai desde a bandeira verde, que representa a condição de não necessidade de pagamento de adicionais de energia elétrica, passando pela amarela – R\$ 1,00 por 100 kWh (ou suas frações), vermelha-patamar I – R\$ 3,00 por 100 kWh (ou suas frações), até gerar a condição de vermelha-patamar II, sendo essa a de maior custo ao consumidor – 5,00 por 100 kWh (ou suas frações) (ANEEL, 2017)⁴.

3.3.2 Classe de Consumo - Serviço Público

“As unidades consumidoras classificadas na subclasse água, esgoto e saneamento, conforme disposições do Decreto nº 7.891, de 2013, têm direito ao benefício tarifário de redução nas tarifas aplicáveis, nos percentuais da tabela a seguir” (ANEEL, 2010, p. 48).

⁴ Essas informações, referentes às bandeiras tarifárias, podem ser vistas no site da ANEEL, através do link <http://www.aneel.gov.br/bandeiras-tarifarias>.

Tabela (3.3) – Classe de consumo, serviço público, de acordo com a resolução normativa n° 414, de 09 de setembro de 2010.

Grupo	TUSD RS/kW	TUSD RS/MWh	TE RS/MWh	Tarifa para aplicação da redução
A	15%	15%	15%	tarifas das modalidades tarifárias azul e verde
B	---	15%	15%	B3

Fonte: ANEEL (2010, p. 48).

3.3.3 Grupos Tarifários

Até o ano de 1981, as instalações de alta tensão no Brasil eram faturadas sem diferenciação com relação ao período do ano (seco ou úmido) ou à hora do dia (ponta ou fora de ponta). Entre os anos 1980 e 1981, foi realizado um estudo que resultou na subsídio da decisão política de aplicação de tarifas diferenciadas para os consumidores conectados em Alta Tensão (ANEEL, Nota Técnica n° 271/2009).

A partir de 1982, com a concentração de cargas existentes no período entre 17:30 e 20:30, o DNAEE implantou a estrutura tarifária horo-sazonal. Com isso, fica estabelecido um agrupamento dos consumidores em função do nível de tensão abastecida e, conseqüentemente, da demanda necessária. No Brasil surgiram dois grupos tarifários: Grupo A (Alta tensão) e Grupo B (Baixa tensão) (CARVALHO, 2017). De acordo com a resolução normativa n° 414, de 09 de setembro de 2010, a diferenciação ocorre da seguinte maneira:

- Grupo A: composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou atendidas a partir de sistema subterrâneo de distribuição em tensão secundária, caracterizado pela tarifa binômia. É subdividido nos seguintes subgrupos:
 - a) subgrupo A1 – tensão de fornecimento igual ou superior a 230 kV;
 - b) subgrupo A2 – tensão de fornecimento de 88 kV a 138 kV;
 - c) subgrupo A3 – tensão de fornecimento de 69 kV;
 - d) subgrupo A3a – tensão de fornecimento de 30 kV a 44 kV;
 - e) subgrupo A4 – tensão de fornecimento de 2,3 kV a 25 kV;
 - f) subgrupo AS – tensão de fornecimento inferior a 2,3 kV, a partir de sistema subterrâneo de distribuição (ANEEL, XXXVII, 2010, p. 4 e 5).
- Grupo B: composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão inferior a 2,3 kV, caracterizado pela tarifa monômia. É subdividido nos seguintes subgrupos:

- a) subgrupo B1 – residencial;
- b) subgrupo B2 – rural;
- c) subgrupo B3 – demais classes; e
- d) subgrupo B4 – Iluminação Pública (ANEEL, XXXVIII, 2010, p. 5).

3.3.4 Modalidades Tarifárias

Conjunto de tarifas aplicáveis aos componentes de consumo de energia elétrica e demanda de potência ativas. De acordo com a resolução normativa n° 414/10, são diferenciadas da seguinte maneira:

- a) modalidade tarifária convencional monômnia: “aplicada às unidades consumidoras do grupo B, caracterizada por tarifas de consumo de energia elétrica, independentemente das horas de utilização do dia” (ANEEL, 2010, p. 6).

A ANEEL estabelece que a modalidade tarifária convencional é aplicada sem distinção horária, considerando-se, para o grupo B, na forma monômnia, tarifa única aplicável ao consumo de energia (R\$/MWh) (ANEEL, Art. 54, II, 2010, p. 52)⁵.

- b) modalidade tarifária convencional binômnia: “aplicada às unidades consumidoras do grupo A caracterizada por tarifas de consumo de energia elétrica e demanda de potência, independentemente das horas de utilização do dia” (ANEEL, 2010, p. 6).

A modalidade tarifária convencional é aplicada sem distinção horária, para o grupo A, na forma binômnia e constituída por: “(a) tarifa única para a demanda de potência (R\$/kW); e (b) tarifa única para o consumo de energia (R\$/MWh)” (ANEEL, Art. 54, I, 2010, p. 52).

- 1) modalidade tarifária horária verde: “aplicada às unidades consumidoras do grupo A, caracterizada por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia, assim como de uma única tarifa de demanda de potência” (ANEEL, 2010, p. 6).

A modalidade tarifária horária verde é aplicada considerando-se: (I) a tarifa única para a demanda de potência (R\$/kW); e (II) para o consumo de energia (MWh):

- a) uma tarifa para o posto tarifário ponta em período úmido (R\$/MWh);
- b) uma tarifa para o posto tarifário fora de ponta em período úmido (R\$/MWh);
- c) uma tarifa para o posto tarifário de ponta em período seco (R\$/MWh); e
- d) uma tarifa para o posto tarifário fora de ponta em período seco (R\$/MWh).” (ANEEL, Art. 56, 2010, p. 53).

⁵ A modalidade tarifária horária branca também é aplicada ao grupo B, exceto para o subgrupo B4 e para as subclasses Baixa Renda do subgrupo B1. Ela é caracterizada por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia, não sendo aplicável aos WSS’s.

2) modalidade tarifária horária azul: “aplicada às unidades consumidoras do grupo A, caracterizada por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência, de acordo com as horas de utilização do dia” (ANEEL, 2010, p. 6).

A modalidade tarifária horária azul é aplicada considerando-se: (I) para a demanda de potência (kW): “(a) uma tarifa para o posto tarifário ponta (R\$/kW); e (b) uma tarifa para o posto tarifário fora de ponta (R\$/kW)” (ANEEL, Art. 55, 2010, p. 52); e (II) para o consumo de energia (MWh):

- a) uma tarifa para o posto tarifário ponta em período úmido (R\$/MWh);
- b) uma tarifa para o posto tarifário fora de ponta em período úmido (R\$/MWh);
- c) uma tarifa para o posto tarifário ponta em período seco (R\$/MWh); e
- d) uma tarifa para o posto tarifário fora de ponta em período seco (R\$/MWh).” (ANEEL, Art. 55, 2010, p. 52).

A mesma resolução normativa, no seu artigo número 57, define a modalidade tarifária a ser utilizada nas unidades consumidoras em função das classes de consumo e grupos tarifários. Sequencialmente, são apresentados os enquadramentos utilizados nos sistemas de abastecimento de água, dispensando de apresentação àqueles destinados a outras classificações, tais como: residencial, rural e etc. Assim, as unidades consumidoras devem ser enquadradas conforme os seguintes critérios:

§ 1º Pertencentes ao grupo A:

I – na modalidade tarifária horária azul, aquelas com tensão de fornecimento igual ou superior a 69 kV;

II – na modalidade tarifária horária azul ou verde, de acordo com a opção do consumidor, aquelas com tensão de fornecimento inferior a 69 kV e demanda contratada igual ou superior a 300 kW; e

III – na modalidade tarifária convencional binômia, ou horária azul ou verde, de acordo com a opção do consumidor, aquelas com tensão de fornecimento inferior a 69 kV e demanda contratada inferior a 300 kW.

§ 2º Pertencentes ao grupo B:

I – na modalidade tarifária convencional monômia, de forma compulsória e automática para todas as unidades consumidoras [...] (ANEEL, Art. 57, 2010, p. 53).

3.4 CONJUNTOS MOTOBOMBAS

Segundo Vilanova e Balestieri (2014) – a partir de dados obtidos em estudos de Gomes (2009), Savar, Kozmar e Sutlovic (2009) e Kaya et al. (2008) –, os principais causadores da perda da eficiência energética dos conjuntos motobombas usados nos CWSS’s são: superdimensionamento por levar em conta incertezas relativas à deterioração e/ou crescimento dos sistemas; a regulação da vazão através do estrangulamento de válvulas; operação fora do ponto de máxima eficiência (BEP); bombas e motores ineficientes;

cavitação; vibrações excessivas em eixos e mancais; superaquecimento dos rolamentos e enrolamentos do motor; vazamentos generalizados em bombas e desgaste e corrosão nos rotores e carcaças das bombas.

3.4.1 Motores Elétricos

Motores elétricos são máquinas operatrizes que têm por função converter a energia elétrica em energia mecânica. Dividem-se, basicamente, em motores elétricos com operação em corrente contínua (cc) e em corrente alternada (ca). Motores de corrente contínua são de alto custo e necessitam de uma fonte para conversão da corrente alternada fornecida pela rede de alimentação em corrente contínua, sendo específicos para casos onde o excelente controle da rotação do motor compense o custo desses. Dessa maneira, os motores de uso mais comum acabam sendo os motores de corrente alternada (TSUTIYA, 2014).

Uma segunda classificação, que vem dentro da divisão dos motores elétricos de corrente alternada, é com relação à velocidade de rotação do eixo em relação ao campo eletromagnético girante do estator. Surge então o conceito de síncrono – que nada mais é que um motor que não possui escorregamento, ou seja, a velocidade de rotação do rotor se mantém inalterada em relação à velocidade do campo girante do estator – e assíncrono ou de indução – onde estará sempre presente uma variação da velocidade de rotação do rotor em relação ao estator (WEG, 2016).

3.4.1.1 Potência Elétrica

Em sistemas trifásicos, a potência elétrica pode ser entendida como o somatório das respectivas potências de cada fase, ou seja, na situação de cargas iguais, ela seria três vezes a potência elétrica de um sistema monofásico na mesma situação. No entanto, existe um fator multiplicador aplicável ao cálculo, que surge devido às maneiras como são realizadas as conexões das fases às cargas, que ocorrem em configurações chamadas de delta ou triângulo, e Y ou estrela (WEG, 2016).

Em ambos os casos, a potência elétrica deve ser multiplicada pelo fator raiz de três, visto que, nas ligações em delta ou triângulo e Y ou estrela ocorrem variações nos valores da corrente e da tensão, conforme definido na Eq. (3.16) e na Eq. (3.17), respectivamente. A potência elétrica total das três fases é, portanto, conforme a Eq. (3.18), destacando-se que não

é levado ainda em consideração o ângulo de fase existente entre a corrente e a tensão (WEG, 2016).

$$I = \sqrt{3}I_f \therefore U = U_f \quad (3.16)$$

$$U = \sqrt{3}U_f \therefore I = I_f \quad (3.17)$$

$$Pot = \sqrt{3}UI \quad (3.18)$$

onde U é a tensão elétrica, I a corrente elétrica, Pot a potência elétrica, U_f é a tensão elétrica de cada fase e I_f a corrente elétrica de cada fase.

3.4.1.2 Fator de Potência em Sistemas Elétricos

Um indutor – típica construção dos motores elétricos de indução – tem como característica atrasar fasorialmente a corrente em relação à tensão. Surgem com isso os conceitos de potência elétrica aparente (S), potência elétrica ativa (Pot_a) e potência elétrica reativa (Q_R). A potência elétrica aparente é a potência que o circuito elétrico utilizaria da rede elétrica se as cargas fossem apenas resistivas e não indutivas ou capacitivas. A reativa é a potência que não realiza trabalho no circuito elétrico, provocada pelas cargas indutivas e capacitivas. A potência elétrica ativa é a potência efetiva utilizada pelo motor elétrico para produção de trabalho (WEG, 2016).

Nas Eq. (3.19), Eq. (3.20) e Eq. (3.21), são demonstradas as formas de obtenção das potências elétricas aparente, reativa e ativa, respectivamente. Já na Figura (3.2), um triângulo de potências indutivo detalha as relações entre as potências elétricas.

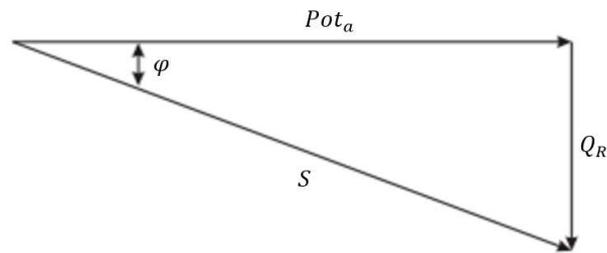
$$S = \sqrt{3}UI \quad (3.19)$$

$$Q = \sqrt{3}UI \text{sen}\varphi = S \text{sen}\varphi \quad (3.20)$$

$$Pot_a = \sqrt{3}UI \text{cos}\varphi = S \text{cos}\varphi \quad (3.21)$$

onde φ é o ângulo de defasagem entre a tensão e corrente elétricas.

Figura (3.2) – Triângulo de potências (carga indutiva).



Fonte: adaptado de WEG (2016).

Da Figura (3.2), a relação entre a potência elétrica ativa e a aparente resulta no fator de potência ($\cos\varphi$), Eq. (3.22). Quanto mais próximo esse ângulo estiver de 0 rad, menos defasados estarão a corrente e a tensão e maior, portanto, é o valor da potência elétrica ativa utilizada, que é a que realmente interessa para a produção de trabalho no eixo.

$$\cos\varphi = \frac{Pot_a}{S} \quad (3.22)$$

onde $\cos\varphi$ é o fator de potência.

A resolução normativa nº 414, de 09 de setembro de 2010, no seu artigo número 95, define o seguinte com relação ao fator de potência: “O fator de potência de referência ‘fR’, indutivo ou capacitivo, tem como limite mínimo permitido, para as unidades consumidoras do grupo A, o valor de 0,92” (ANEEL, 2010, Art. 95, p. 70).

3.4.1.3 Potência de Motores Elétricos

Tsutiya (2014) destaca quatro aspectos relevantes no estudo das potências envolvidas em motores elétricos:

- Potência mecânica do motor elétrico: é a potência mecânica efetivamente fornecida pelo eixo do motor elétrico à carga. Ela é totalmente dependente do valor dessa, sendo que o motor irá fornecer apenas o que for solicitado;
- Potência nominal do motor elétrico: é a potência mecânica que um motor elétrico pode fornecer continuamente, sob tensão e frequência nominais e, geralmente, no seu

melhor ponto de trabalho – rendimento e fator de potência maiores possíveis – sem que a temperatura operacional ultrapasse o aceitável do isolante dos enrolamentos;

- Potência admissível do motor elétrico: é a potência mecânica que pode ser solicitada de um motor continuamente, acima da potência mecânica nominal, sem que a vida útil do sistema isolante seja comprometida, em termos práticos, em uma redução maior que 10 a 20 %. Isso ocorre quando as solicitações de correntes operacionais são da ordem de 5 a 10 % acima da corrente nominal;
- Potência absorvida pelo motor elétrico: é a potência elétrica solicitada pelo motor elétrico à rede elétrica de alimentação, ou seja, a potência elétrica ativa. Ela será sempre maior que a potência mecânica, que é a fornecida pelo eixo do motor à carga e, dessa diferença, surge o conceito do rendimento do motor elétrico.

Em motores elétricos, o rendimento é dado pela relação entre a potência mecânica e a potência absorvida. A Eq. (3.23) define o rendimento mencionado.

$$\eta_{motor} = \frac{Pot_{mmotor}}{Pot_{absmotor}} = \frac{Pot_{mmotor}}{\sqrt{3}UI\cos\varphi} \quad (3.23)$$

onde η_{motor} é o rendimento do motor elétrico, Pot_{mmotor} a potência mecânica na saída do motor elétrico e $Pot_{absmotor}$ a potência elétrica absorvida da rede elétrica pelo motor elétrico.

3.4.2 Bombas

Bombas são máquinas operatrizes que fornecem energia ao fluido de trabalho com a finalidade de transportá-lo entre os diferentes pontos do sistema. Esse processo é realizado, pois as bombas recebem energia mecânica de uma fonte qualquer (motores de combustão interna, motores elétricos e etc.) e convertem parte dessa em energia de pressão, cinética, ou ambas, que são cedidas ao fluido de trabalho, o que aumenta a sua pressão, velocidade ou ambas (MATTOS; FALCO, 1998).

Bombas ineficientes, combinação ineficiente de bombas e superdimensionamento de bombas são três dos principais problemas encontrados em estações de bombeamento. Em WSS's, as despesas com bombeamento representam, usualmente, o principal custo das empresas de abastecimento de água (COELHO; ANDRADE-CAMPOS, 2014). Kaya et al. (2008 apud KALAISELVAN et al., 2016) fazem considerações, às quais, muito provavelmente, levam em conta a ausência de mínimas manutenções, onde a eficiência das

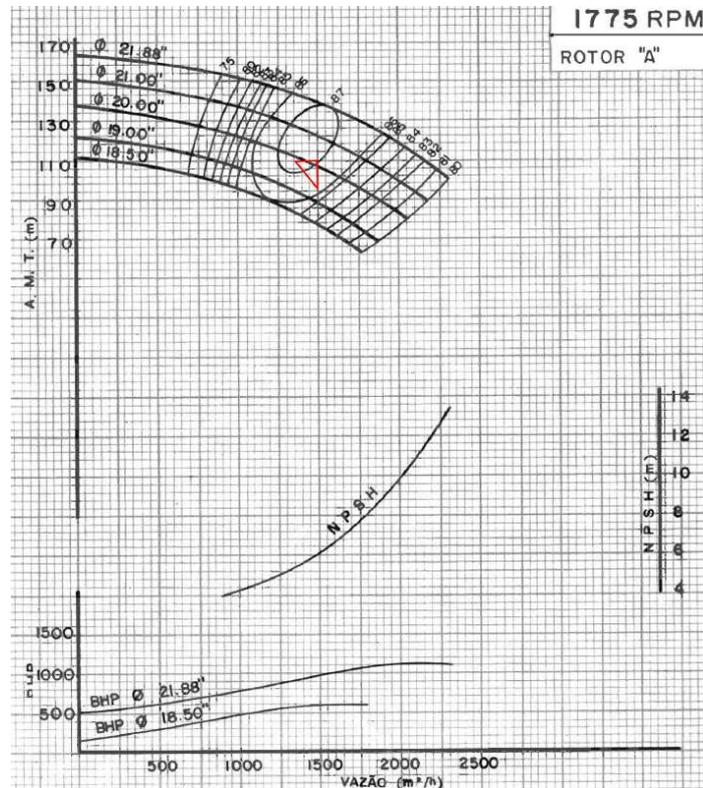
bombas provavelmente se reduzirá de 10 a 25 % quando elas são operadas durante toda sua vida útil.

3.4.2.1 Curvas Características das Bombas Dinâmicas ou Turbobombas

A curva característica de uma bomba apresenta informações referentes, na sua condição mais completa, ao par carga e vazão, potência mecânica absorvida pela bomba (motriz) e vazão, rendimento da bomba e vazão e *Net Positive Suction Head*, requerido ($NPSH_r$) e vazão. Segundo Mattos e Falco (1998), a curva característica teórica é obtida matematicamente, através da aplicação da Teoria do Impelidor, que é o estudo teórico através da resolução analítica de sistemas de vetores arranjados em maneira de triângulo de velocidades. Já a curva real, de fornecimento do fabricante, é obtida através de testes em bancada, normalmente com água como fluido de trabalho, e é o resultado da curva teórica com subtração das perdas envolvidas.

A Figura (3.3) representa a forma mais completa utilizada pelos fabricantes de se apresentar as curvas até agora citadas. Nela, o par carga e vazão, potência mecânica absorvida pela bomba (motriz) e vazão, rendimento da bomba e vazão e $NPSH_r$ e vazão são representados em um único formato, que é construído frente à rotação que o equipamento está trabalhando, ao tipo de construção do rotor e também com relação às opções de diâmetros de rotores utilizáveis no referido equipamento. Dessa forma, fica claro que, alterando-se o diâmetro externo do rotor, que no exemplo da Figura (3.3) tem uma classificação do tipo “A”, várias curvas com diferentes vazões, cargas, potências mecânicas absorvidas pela bomba e rendimentos das bombas são geradas.

Figura (3.3) – Curva característica bomba dinâmica ou turbobomba (existente na EBAB-01).



Fonte: curva característica da bomba fornecida pelo fabricante (Flowserve Corporation, 2017).

3.4.2.2 Potência de Bombas

A potência mecânica absorvida pela bomba (motriz), que é a recebida do acionador, é estabelecida conforme Eq. (3.24) e Eq. (3.25).

$$Pot_{absbomba} = \frac{\rho Q H}{\eta_{bomba}} \quad (3.24)$$

$$Pot_{absbomba} = \frac{\gamma Q H}{\eta_{bomba}} \quad (3.25)$$

onde η_{bomba} é o rendimento da bomba e $Pot_{absbomba}$ a potência mecânica absorvida do acionador pela bomba; potência motriz da bomba.

É importante fazer uma distinção entre a potência mecânica na saída da bomba (Pot_{mbomba}), que é a fornecida ao fluido de trabalho – potência hidráulica ou útil – e a potência mecânica absorvida pela bomba ($Pot_{absbomba}$), ou seja, a potência mecânica

requerida do acionador – potência motriz da bomba –, normalmente um motor elétrico. Na Eq. (3.26) essa diferenciação é evidenciada.

$$\eta_{bomba} = \frac{Pot_{mbomba}}{Pot_{absbomba}} \quad (3.26)$$

3.4.2.3 Modificação das Curvas Características das Bombas Dinâmicas ou Turbobombas

É muito usual, em sistemas elevatórios de água, a utilização de conversores de frequência em determinados períodos do dia para alteração da rotação do conjunto motobomba e, por consequência, variação da vazão de bombeamento. Além disso, em situações em que grandes companhias de abastecimento de água são responsáveis por operar vários sistemas, em diferentes municípios, muitas vezes o ponto ideal de operação, que é obtido com um rotor de diâmetro externo específico, fica comprometido quando da ausência de rotores de mesmo diâmetro externo sobressalentes, quando da necessidade de manutenções emergenciais, visto o grande parque de máquinas, com diferentes tamanhos de rotores, que normalmente essas companhias possuem. Dessa maneira, é essencial o conhecimento de como se comporta uma bomba dinâmica ou turbobomba quando alguns parâmetros, tais como rotação e diâmetro externo do rotor, são variados.

3.4.2.3.1 *Variação da Rotação x Curvas Características das Bombas Dinâmicas ou Turbobombas*

Segundo Tsutiya (2014), as relações que propiciam o entendimento dos efeitos da variação da rotação e do diâmetro externo do rotor são conhecidas como Leis de Semelhança. Uma primeira análise pode ser feita se forem mantidas constantes as características do fluido de trabalho (massa específica e viscosidade) e, também, o diâmetro externo do rotor. A variável será, portanto, a rotação e, assim, a relação de semelhança é dada pela Eq. (3.27).

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} = \sqrt{\frac{H_1}{H_2}} = \sqrt[3]{\frac{Pot_{absbomba1}}{Pot_{absbomba2}}} \quad (3.27)$$

onde N é a rotação do conjunto motobomba.

3.4.2.3.2 *Variação do Diâmetro Externo do Rotor x Curvas Características das Bombas Dinâmicas ou Turbobombas*

A mudança do diâmetro externo do rotor impacta na obtenção de diferentes curvas características das bombas. Conforme já mencionado, essas curvas são obtidas dos fabricantes e apresentam, entre outros fatores, o diâmetro mínimo e o máximo aplicável aos rotores do equipamento em questão.

Na ausência de curvas características fornecidas pelos fabricantes, existem relações de semelhança dadas para a condição de alteração apenas no diâmetro externo do rotor, mantendo-se todos os outros parâmetros constantes, inclusive a rotação que foi o parâmetro anteriormente alterado. Segundo Tsutiya (2014), nessa condição a Eq. (3.28) é a válida para as análises.

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{H_1}{H_2}} = \sqrt[3]{\frac{Pot_{absbomba1}}{Pot_{absbomba2}}} \quad (3.28)$$

3.4.3 Determinação do Ponto de Trabalho em Função do Sistema

A energia por unidade de peso, frente à vazão necessária que o sistema irá exigir da bomba, será chamada de altura manométrica do sistema. Portanto, para cada valor de vazão recalçada pela bomba, essa deverá vencer a altura geométrica, diferença de pressões e compensar as perdas de carga. O somatório desses termos recebe o nome de altura manométrica do sistema. O conceito de carga é referente à bomba e representa a altura manométrica que uma bomba é capaz de vencer sob certa vazão (MATTOS; FALCO, 1998).

3.4.3.1 Altura Manométrica Total

A altura manométrica total do sistema será a diferença entre a altura manométrica da descarga e a da sucção, sendo assim, a equação geral para o cálculo é conforme a Eq. (3.29).

$$H = h_d - h_s = (z_d - z_s) + \left(\frac{P_d - P_s}{\gamma}\right) + (h_{Ls} + h_{Ld}) \quad (3.29)$$

onde h_d é a altura manométrica da descarga e h_s a da sucção; z_d é a altura geométrica da descarga e z_s a da sucção; P_d é a pressão do reservatório da descarga e P_s o da sucção e h_{Ld} é a perda de carga da linha de descarga e h_{Ls} a da sucção.

Operacionalmente, a maneira de se determinar a carga da bomba, que coincide com a altura manométrica do sistema no ponto de trabalho, conforme Mattos e Falco (1998) pode ser realizada por medições de vazão e aplicação da Eq. (3.30), para encontrar a velocidade média

do fluido de trabalho na sucção e na descarga da bomba. Juntamente, é necessário realizar medições de pressão no flange de sucção e de descarga da bomba para que, com o uso dos valores de velocidade média e de pressão obtidos, a aplicação desses na Eq. (3.31) conduza ao valor da carga/altura manométrica existente na condição em análise.

$$V_{fs} = \frac{4Q}{\pi D_{fs}^2} \therefore V_{fd} = \frac{4Q}{\pi D_{fd}^2} \quad (3.30)$$

$$H = \left(\frac{P_{fd} - P_{fs}}{\gamma} \right) + \frac{(V_{fd}^2 - V_{fs}^2)}{2g} \quad (3.31)$$

onde D_{fd} é o diâmetro do flange da descarga e D_{fs} o da sucção; V_{fd} é a velocidade média no flange da descarga e V_{fs} no da sucção, e P_{fd} é a pressão no flange da descarga e P_{fs} no da sucção.

3.4.3.2 Curva do Sistema

De acordo com a Eq. (3.4), referente à perda de carga, está claro que, mantendo-se o sistema elevatório, onde o diâmetro da tubulação permanece constante, ao se aumentar a vazão, obrigatoriamente, a velocidade irá aumentar e, portanto, também o valor da perda de carga distribuída. O mesmo raciocínio pode ser utilizado para a perda de carga localizada, de acordo com a Eq. (3.10).

A curva do sistema é, de acordo com Tsutiya (2014), uma relação entre a altura manométrica total do sistema, obtida em função de uma faixa de vazões aplicáveis. Na Eq. (3.29) os termos “ $z_d - z_s$ ” e “ $(P_d - P_s)/\gamma$ ” não variam em função da alteração nos valores de vazão, mas “ $h_{Ls} + h_{Ld}$ ” é um termo que irá variar e, com isso, é possível representar a curva do sistema, de acordo com o exemplificado na Figura (3.6).

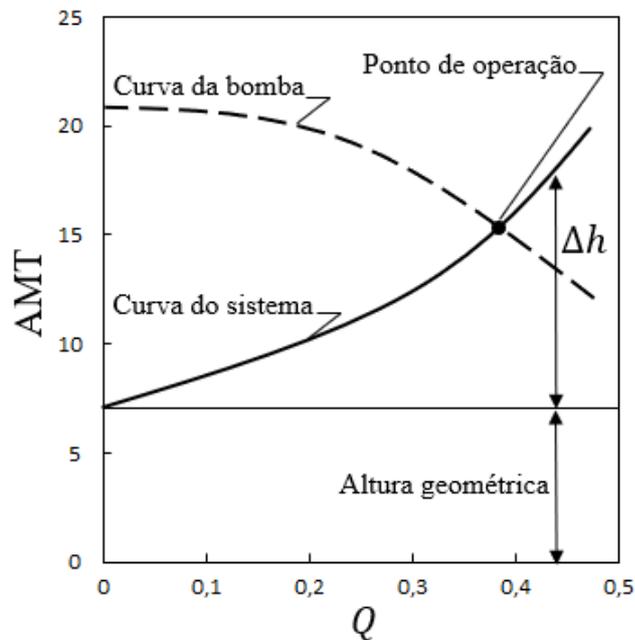
Em WSS's, na maioria dos casos, os reservatórios de sucção e de recalque estão ao nível da pressão atmosférica. Dessa maneira, a curva do sistema é obtida conforme Eq. (3.32) (VILANOVA; BALESTIERE, 2015a).

$$H = (z_d - z_s) + \sum f \frac{L}{D} \frac{\left(\frac{4Q}{\pi D^2} \right)^2}{2g} + \sum K \frac{\left(\frac{4Q}{\pi D^2} \right)^2}{2g} \quad (3.32)$$

3.4.3.3 Ponto de Trabalho

No ponto onde a curva característica da bomba ($H \times Q$) cruza a curva característica do sistema se estará obtendo o ponto de trabalho do conjunto motobomba. É interessante notar que o envelhecimento do sistema provoca mudanças nas características de rugosidade das tubulações e, portanto, alterações nos valores da perda de carga (TSUTIYA, 2014). A Figura (3.4) correlaciona a curva característica da bomba ($H \times Q$) com a do sistema e, com isso, o ponto de operação é visualizado, juntamente com a parcela referente à perda de carga e à altura geométrica.

Figura (3.4) – Ponto de trabalho do conjunto motobomba.



Fonte: adaptado de Tsutiya (2014).

3.4.4 Associação de Tubulações

Em um sistema de recalque de água, muitas vezes ocorre das tubulações apresentarem alterações nos seus diâmetros internos ou então o fluido de trabalho ser bombeado por ramificações, em vez de um único conduto. É possível que essas alterações nas tubulações sejam quantificadas de modo que uma tubulação equivalente seja obtida, que irá apresentar,

consequentemente, a mesma vazão e a mesma perda de carga presentes no sistema de tubulações original.

3.4.4.1 Tubulações em Série

Segundo Gomes (2012), na condição de associação de tubulações em série, o problema consiste em determinar qual seria o comprimento da tubulação equivalente que, permanecendo constante o valor de diâmetro interno da tubulação, possuiria a mesma vazão e a mesma perda de carga do sistema real em estudo. Como em um sistema de tubulações em série a vazão no trecho “1” é igual à vazão no trecho “2”, devido ao princípio da conservação de massa, e a perda de carga total do sistema é o somatório da perda de carga no trecho “1” com a perda de carga no trecho “2”, a Eq. (3.33) e a Eq. (3.34) são determinadas.

$$\Delta h = \Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_n \quad (3.33)$$

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_n \quad (3.34)$$

Levando em consideração um regime turbulento rugoso, o que implica o fator de atrito poder assumir independência do número de *Reynolds* e a tubulação no trecho “1” ter um diâmetro interno próximo a do trecho “2”, o que resulta nas rugosidades relativas serem próximas entre si, surge, segundo Mattos e Falco (1998), a Eq. (3.35) como válida para a associação de tubulações em série.

$$\frac{L}{D^5} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{L_i}{D_i^5} \quad (3.35)$$

3.4.4.2 Tubulações em Paralelo

Na condição de tubulações em paralelo, o raciocínio para se chegar à tubulação equivalente é o mesmo aplicado na condição de tubulações em série, ou seja, uma tubulação de diâmetro constante prefixado e que assume um comprimento equivalente, que possibilitará o transporte da mesma vazão e provocará a mesma perda de carga que o sistema em paralelo em estudo. Aplica-se o princípio da conservação de massa, só que agora a vazão total é o somatório das vazões individuais de cada trecho; e a perda de carga total do sistema é a mesma para cada segmento de tubulação (GOMES, 2012). As Equações (3.36) e (3.37) demonstram essas relações.

$$\Delta h = \Delta h_1 = \Delta h_2 = \Delta h_n \quad (3.36)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_n \quad (3.37)$$

Levando novamente em consideração regime turbulento rugoso e diâmetros internos semelhantes dos tubos nos trechos, Mattos e Falco (1998) determinam a Eq. (3.38) para a condição de associação de tubulações em paralelo.

$$\sqrt{\frac{D^5}{L}} = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{D_i^5}{L_i}} \quad (3.38)$$

3.4.5 Associação de Bombas

No que tange às instalações elevatórias de água em sistemas de abastecimento de água potável, é muito comum a associação de bombas. Existem duas maneiras possíveis de associação de bombas, sendo essas em série ou em paralelo.

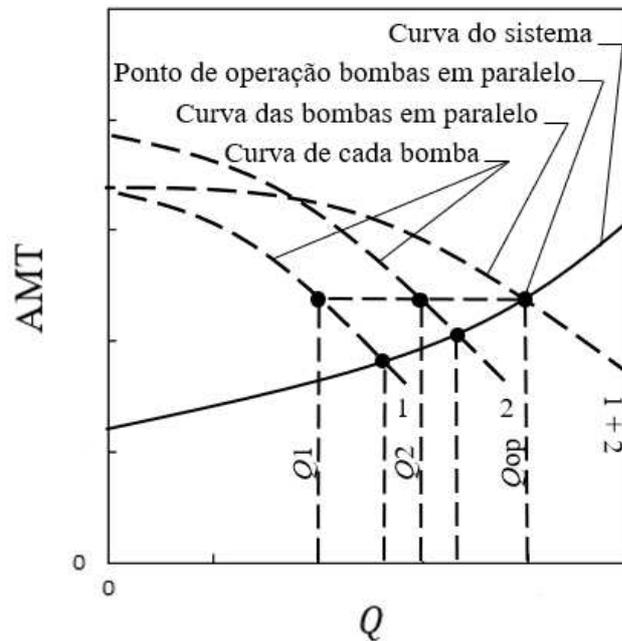
3.4.5.1 Associação de Bombas em Série

Na associação em série, a vazão do sistema permanece constante, mas a carga fornecida pelas bombas será o somatório da carga de cada uma das bombas na vazão de trabalho do sistema. É interessante notar que existe a possibilidade de as duas bombas serem iguais ou diferentes, sendo que, se forem iguais, a carga será multiplicada por dois e, se forem diferentes, cada uma contribuirá com a sua respectiva parcela de carga na vazão operacional (SANTOS, 2007).

3.4.5.2 Associação de Bombas em Paralelo

Segundo Gomes (2012), a associação em paralelo é necessária devido à maior demanda por água em sistemas elevatórios. Nessa configuração, portanto, a vazão é o somatório das vazões individuais e a carga das bombas montadas em paralelo permanece, basicamente, constante. Além disso, bombas são montadas em paralelo com a finalidade de garantir segurança operacional, pois se um equipamento estiver danificado outro entrará em operação. Também pode ser utilizada a configuração em paralelo para que a vazão varie em função da necessidade. Dessa forma, se a demanda de fluido de trabalho for pequena, apenas

Figura (3.6) – Bombas diferentes associadas em paralelo, com curvas estáveis.



Fonte: adaptado de Mattos e Falco (1998).

3.4.6 Cavitação

A cavitação é um fenômeno entendido classicamente como o surgimento de bolhas no líquido bombeado quando, em qualquer parte do sistema de bombeamento, a pressão nesse ponto atinge valores menores que a pressão de vapor do fluido bombeado na temperatura de operação. Após isso, em uma região em que a pressão do sistema supera novamente a pressão de vapor do líquido bombeado na temperatura de trabalho, ocorre a mudança de fase novamente, com a conseqüente geração de microjatos que danificam os materiais metálicos (MATTOS; FALCO, 1998).

Em sistemas de bombeamento, a maneira de se evitar a cavitação é garantindo que a energia pela massa ou peso do fluido de trabalho no flange de sucção da bomba – que é dependente do sistema de sucção apenas e é denominada de $NPSH_d$ – seja superior ao $NPSH_r$ da bomba – que é característica de cada projeto de bomba, de fornecimento do fabricante do equipamento. Na Eq. (3.39) é demonstrada a maneira de se determinar o $NPSH_d$ via projeto do sistema de bombeamento, e na Eq. (3.40) via medição no mesmo em operação.

$$NPSH_d = \left(\frac{P_s}{\gamma} \pm z_s - h_{Ls} \right) + \left(\frac{P_a - P_v}{\gamma} \right) \quad (3.39)$$

$$NPSH_d = \left(\frac{P_{fs}}{\gamma} + \frac{V_{fs}^2}{2g} \right) + \left(\frac{P_a - P_v}{\gamma} \right) \quad (3.40)$$

onde $NPSH_d$ é o “*net positive suction head*” disponível, P_a a pressão atmosférica local e P_v a pressão de vapor na temperatura de trabalho.

A literatura determina vários valores de $NPSH_d$ superiores ao $NPSH_r$ considerados como seguros para operação sem cavitação. Segundo Tsutiya (2014), a recomendação tradicional é de 0,5 m ou 20 % de diferença, podendo chegar até a 1,5 m ou 35 %. Mattos e Falco (1998) recomendam uma diferença de 0,6 m como aceitável.

Para o caso de bombas iguais com curvas estáveis e possibilidade de operação em paralelo, o $NPSH_d$ será menor e $NPSH_r$ maior para a situação de bomba operando sozinha. Isso ocorre, pois na condição de operação de um equipamento somente, maior é a vazão atingida por esse, sendo essa, portanto, a situação mais crítica para a condição de cavitação (MATTOS; FALCO, 1998).

3.5 INDICADORES DE DESEMPENHO

Um bom planejamento e tomada de decisão dependem da quantificação das características operacionais do sistema e sua posterior qualificação – que podem incluir, além da medição, estudos de engenharia, com modelagem energética e hidráulica, simulação e otimização. Através desses estudos, é possível comparar um sistema com outro de iguais características ou então estabelecer o que pode ser economizado (potencial do sistema) e, por exemplo, determinar a viabilidade econômica de possíveis alterações necessárias no sentido da diminuição das perdas energéticas.

As técnicas para determinação da eficiência hidráulica e energética dos WSS's (ou partes desses) dependem de estudos que, em muitos casos, não são de conhecimento dos gestores dos sistemas de abastecimento de água. Dessa maneira, sistemas complexos podem ser demonstrados aos gerenciadores através de indicadores. Alguns indicadores, centrados no uso da eletricidade em WSS's, são propostos pela IWA e pelo SNIS (VILANOVA e BALESTIERE, 2015a).

3.5.1 Utilização da Capacidade de Bombeamento

É um indicador do IWA, definido como a razão entre o somatório da potência nominal dos conjuntos motobombas multiplicado pelas horas de funcionamento, no dia de maior consumo – com a sugestão de que o período de avaliação seja, no mínimo, de um ano – pela potência nominal utilizável de bombeamento multiplicada por 24 horas. De acordo com Alegre et al (2004), esse indicador mede a capacidade de bombeamento remanescente no dia de maior consumo energético. No cálculo deve-se excluir os conjuntos motobombas reservas, que não possam ser utilizados simultaneamente com os restantes. A Eq. (3.41) representa a maneira de obtenção do referido valor, que possui “%” como unidade.

$$Ph4 = \frac{\text{Consumo máximo diário de energia para bombeamento [kWh]}}{\text{Capacidade máxima de bombeamento das estações elevatórias [kW] x 24 h}} 100 \quad (3.41)$$

onde $Ph4$ representa a utilização da capacidade de bombeamento.

Segundo Vilanova e Balestiere (2015a), nesse indicador pode-se perceber se os conjuntos motobombas estão superdimensionados, com operação deficiente ou com baixa capacidade de armazenamento.

3.5.2 Consumo Específico de Energia

Representa a energia gasta para o bombeamento de 1 m³. O *SEC* (*Specific Energy Consumption*), semelhante ao indicador SNIS *IN058*, quantifica o consumo de energia através da unidade kWh m⁻³ (VILANOVA; BALESTIERE, 2015b). Não é um bom parâmetro para comparação, pois um sistema que possui um baixo valor de *SEC* não necessariamente apresentará uma alta eficiência, já que a diferença de altura manométrica deve ser levada em consideração. Dessa maneira, surge o consumo específico de energia normalizado (VILANOVA; BALESTIERE, 2015a). A Eq. (3.42) representa a maneira de obtenção do indicador *SEC*.

$$SEC = \frac{\text{Consumo de energia total do sistema de abastecimento (operacionais + administrativas) [kWh]}}{\text{Volume produzido no período [m}^3\text{]}} \quad (3.42)$$

onde *SEC* é o consumo específico de energia.

Segundo Vilanova e Balestiere (2015b), o indicador SNIS *IN058* representa a divisão entre quantidade anual de eletricidade consumida nos sistemas de abastecimento de água, incluindo todas as unidades que compõem os sistemas, do operacional ao administrativo (10^3 kWh ano⁻¹), pela soma do volume anual de água disponível para consumo (10^3 m³ ano⁻¹), com o volume anual de água tratada importada (10^3 m³ ano⁻¹).

Segundo Gomes (2012), o *SEC* reflete a eficiência do conjunto motobomba e do sistema hidráulico a jusante da bomba. É muito útil para acompanhar o desempenho de uma mesma instalação ao longo de sua vida útil, mas não é um bom comparativo entre sistemas, em função das diferentes alturas manométricas, que consomem naturalmente diferentes quantidades de energia, mesmo os equipamentos possuindo os mesmos rendimentos.

3.5.3 Consumo Específico de Energia Normalizado

Representa a quantidade de energia gasta para elevar um metro cúbico de água à altura manométrica de 100 (cem) metros, sendo um indicador do IWA. Difere do consumo específico de energia, *SEC*, na questão de levar em conta a altura manométrica nos cálculos e assim possibilitar a comparação entre diferentes sistemas. O resultado é expresso em kWh m⁻³ 100 m⁻¹ (ALEGRE et al., 2004). A Eq. (3.43) representa a maneira de obtenção do referido valor.

$$Ph5 = \frac{\text{Consumo de energia para bombeamento [kWh]}}{\text{Volume bombeado no período [m}^3\text{]} \left(\frac{\text{Altura manométrica [m]}}{100} \right)} \quad (3.43)$$

onde *Ph5* é o consumo específico de energia normalizado.

De acordo com Alegre et al (2004), o *Ph5* corresponde ao inverso da eficiência média de bombeamento do grupo. Sendo assim, 0,4 kWh m⁻³ para 100 m corresponde a uma eficiência média de bombeamento de 68 %, onde o valor mínimo teórico, correspondente a rendimentos do motor e da bomba de 100 %, é de 0,27 kWh m⁻³.

$$\left(\frac{9.810 \text{ N } 100 \text{ m}}{3.600 \frac{\text{J}}{\text{Wh}} 400 \text{ Wh}} \right) 100 = 68 \%$$

3.5.4 Consumo Específico de Energia por Comprimento de Adutora

É usado para determinar a quantidade de energia gasta para se bombear um metro cúbico de água por uma adutora de um quilômetro. Dessa maneira, representa uma quantificação das perdas de carga ou de energia presentes na tubulação de descarga. A Eq. (3.44) estabelece a relação dada, sendo que a unidade é expressa em kWh m⁻³ km⁻¹ (GOMES, 2012).

$$SEC_L = \frac{\text{Consumo de energia para bombeamento- útil [kWh]}}{\text{Volume bombeado no período [m}^3\text{]} \times \text{Comprimento adutora [km]}} \quad (3.44)$$

onde SEC_L é consumo específico de energia por comprimento de adutora.

Como um sistema elevatório de água trabalha com a diferença entre níveis geométricos, e a altura manométrica total do sistema é o somatório da altura geométrica com as perdas de carga totais, é necessário que, para ser mais bem realizada a comparação entre diferentes sistemas, um termo específico à altura geométrica seja acrescentado à Eq. (3.44). Dessa maneira, o termo referente à perda de carga é desmembrado, dando uma excelente ideia do impacto dessa no sistema elevatório, com resultado expresso em kWh m⁻³ km⁻¹, conforme Eq. (3.45) (GOMES, 2012).

$$SEC_{\Delta h} = \frac{\text{Consumo de energia para bombeamento- útil [kWh]}}{\text{Volume bombeado no período [m}^3\text{]} \times \text{Comprimento adutora [km]}} \left(1 - \frac{\text{Desnível geométrico [m]}}{\text{Altura manométrica [m]}}\right) \quad (3.45)$$

onde $SEC_{\Delta h}$ é consumo específico de energia por comprimento de adutora, com relação às perdas de carga.

3.5.5 Consumo de Energia Reativa

Segundo Alegre et al. (2004), o indicador do consumo da energia reativa representa o consumo de energia elétrica reativa no bombeamento no período de análise, frente à energia total consumida pelas instalações elevatórias, no mesmo período de análise. A Eq. (3.46) representa a maneira de obtenção do referido valor, que possui “%” como unidade.

$$Ph6 = \frac{\text{Consumo de energia reativa [kVarh]}}{\text{Consumo de energia para bombeamento [kWh]}} 100 \quad (3.46)$$

onde $Ph6$ é o consumo de energia reativa.

3.5.6 Custo Médio da Energia Elétrica

Segundo Gomes (2012), esse indicador é obtido através da soma das parcelas referentes ao consumo, demanda, multas por baixo fator de potência e/ou ultrapassagem de demanda, impostos e etc., que compõem a fatura da energia elétrica, dividida pelo consumo de energia elétrica no período em análise. A Eq. (3.47) representa a maneira de obtenção do referido valor, que possui “R\$ MWh⁻¹” como unidade.

$$CMEE = \frac{\text{Fatura da energia elétrica [R\$]}}{\text{Consumo de energia elétrica para bombeamento [MWh]}} \quad (3.47)$$

onde $CMEE$ é o custo médio de energia elétrica.

3.5.7 Custo Médio da Energia Elétrica por Metro Cúbico Bombeado

É obtido pela divisão entre o somatório das parcelas que compõem a fatura da energia elétrica, como foi definido no indicador do custo médio da energia elétrica, pelo fator de 1.000 m³ de água bombeada. Trata-se de um indicador útil para estimativa de cenários, pois, por exemplo, o próprio reenquadramento tarifário pode refletir nesse parâmetro, mesmo sem ações operacionais realizadas. A Eq. (3.48) representa a maneira de obtenção do referido valor, que possui “R\$ 1.000 m⁻³” como unidade (GOMES, 2012).

$$CMEE_{mc} = \frac{\text{Custo médio da energia elétrica [R\$]}}{1000 \text{ m}^3 \text{ de volume bombeado [1000 m}^3\text{]}} \quad (3.48)$$

onde $CMEE_{mc}$ é o custo médio de energia elétrica por metro cúbico bombeado.

3.5.8 Indicadores Centrados na Comparação da Situação Atual com a Otimizada

Vilanova e Balestiere (2015a) propõem novos indicadores para qualificação hidráulica/energética dos WSS's. Tais indicadores são gerados com a premissa de comparação entre a situação atual do sistema frente àquela que seria chamada de “alvo”, ou seja, a situação ideal, em que há a maior eficiência hidráulica/energética possível no sistema. Uma das maneiras de se chegar a essa situação ideal é o uso de ferramentas de simulação e otimização.

3.5.8.1 Indicador de Operação Otimizada de Bombeamento

Esse indicador é obtido através de um problema de otimização direcionado a minimizar o consumo de energia frente à demanda e à altura manométrica do sistema. Ele é obtido pela divisão entre o parâmetro referente ao consumo otimizado, através da minimização da potência necessária para vencer a carga do sistema dentro do período de análise, pelo consumo na condição atual do sistema, no mesmo período de análise. A Eq. (3.49) apresenta a maneira de interpretação do indicador.

$$I_{OOBC} = \frac{\text{Consumo de energia otimizado ou ideal [kWh]}}{\text{Consumo de energia atual ou real [kWh]}} 100 \quad (3.49)$$

onde I_{OOBC} é o indicador de operação otimizada de bombeamento – consumo.

Quando o valor do I_{OOBC} é menor que 100 %, alguns dos principais fatores causadores podem ser: sistemas de bombeamento desgastados; manutenção ineficiente; operação inadequada; conjuntos motobombas trabalhando com diferentes curvas características.

3.5.8.2 Indicador da Altura Manométrica Fornecida

Esse indicador tem como característica fazer uma comparação entre a altura manométrica real do sistema frente ao mesmo parâmetro otimizado. A otimização da altura manométrica do sistema e, conseqüentemente, da carga para a bomba é obtida quando, na condição de maior consumo, o usuário que esteja em um ponto de maior altura geométrica seja abastecido com a pressão mínima, conforme estabelece a legislação. Da mesma maneira, a otimização deve levar em consideração que o usuário que esteja na cota mais baixa seja abastecido com a pressão máxima, de acordo com a legislação, no período de menor consumo.

No caso específico de instalações de recalque de água, é aplicável a avaliação com relação às perdas de carga (parcela cinética da altura manométrica), sendo que, dessa maneira, o indicador é obtido pela divisão entre as perdas de carga reais pelas perdas de carga otimizadas. A Eq. (3.50) apresenta a maneira de interpretação do indicador.

$$I_{CHD} = \frac{\text{Perdas de carga atual ou real [m]}}{\text{Perdas de carga otimizada ou ideal [m]}} 100 \quad (3.50)$$

onde I_{CHD} é o indicador da altura manométrica fornecida – perda de carga.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

As ações de eficiência energética a serem implantadas em um determinado sistema de saneamento só podem ser determinadas após a execução de um diagnóstico hidroenergético preliminar. Apenas após a realização desse estudo é que será possível se estabelecer, efetivamente, o que é viável de ser realizado com o intuito de se melhorar ou modernizar o sistema em estudo (GOMES; CARVALHO, 2012).

Neste capítulo, Materiais e Métodos, é apresentada a metodologia implantada para obtenção dos resultados esperados durante o diagnóstico proposto. Ele é composto da apresentação do objeto de estudo, bem como das etapas, formadas por atividades multidisciplinares, realizadas durante as avaliações, com a finalidade de tornar a instalação em estudo mais eficiente quanto ao consumo de energia elétrica.

4.1 APRESENTAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

Neste trabalho, é proposta a realização de um estudo focado na avaliação hidroenergética de uma instalação existente e operacional de um sistema de abastecimento de água de duas grandes cidades. A estação elevatória EBAB-01 está localizada no município “A” e tem como objetivo a adução de água bruta até a ETA dessa cidade. Essa estação atende também, com água bruta para posterior tratamento, o município “B”, em quase sua totalidade (90 %). Segundo dados do censo IBGE⁶ (2017), a população estimada para a cidade “A” no ano de 2017 é de, aproximadamente, 208.000 pessoas. Já para o município “B”, o número de habitantes obtidos da mesma fonte de pesquisa está estimado em, aproximadamente, 253.000⁷.

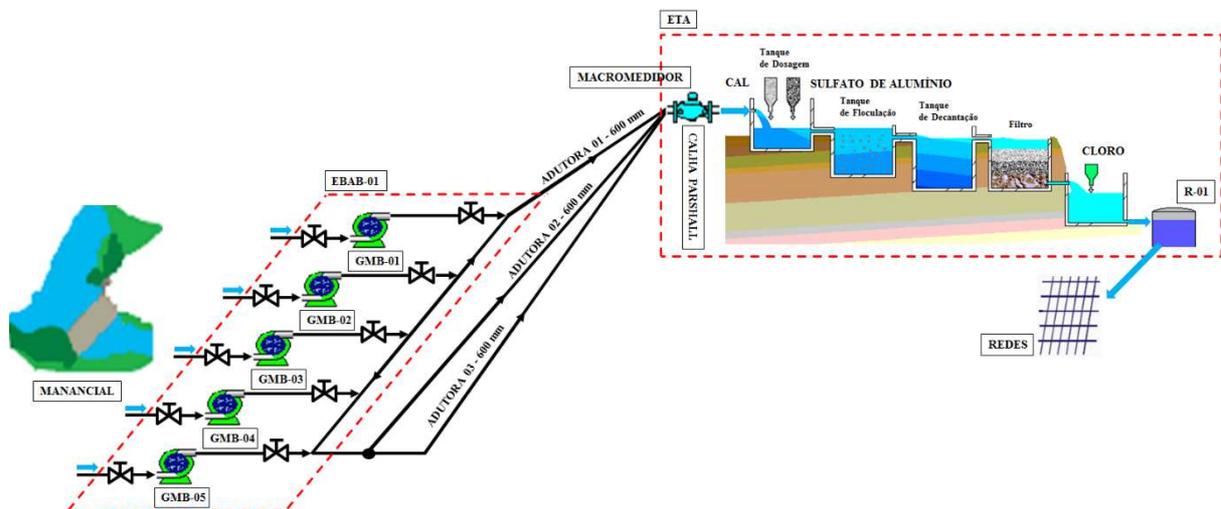
O projeto inicial da elevatória de água bruta, concebido no início da década de 1970, previu a execução de uma linha adutora no diâmetro de 600 mm e a instalação de dois conjuntos motobombas, sendo um operando e outro reserva. No final da década de 1970, ocorreu a ampliação da elevatória com a implantação de uma segunda adutora de 600 mm e a instalação de mais um grupo, resultando, portanto, em dois conjuntos operantes e um reserva. No final de década de 1990, foi implantada a terceira adutora de 600 mm, quando mais dois equipamentos foram instalados, ficando três operando e dois reservas. Até o ano de 2015, a estação elevatória estava operando com vazões máximas de, aproximadamente, 1.300,00 L/s,

⁶ Os dados de população aproximada do município “A” foram obtidos do site do IBGE. Não foi autorizada pela companhia de saneamento a divulgação dos dados operacionais da instalação em estudo, motivo pelo qual as duas cidades serão sempre tratadas como “A” e “B”.

⁷ Essas informações populacionais também foram obtidas através do site do IBGE.

com três equipamentos acionados em paralelo no mesmo barrilete, valor já considerado insuficiente para atender a demanda do sistema em situações sazonais críticas. Em janeiro de 2016, por uma necessidade de maior vazão de água disponibilizada ao sistema, mais um grupo foi acionado de maneira paralela, resultando em quatro equipamentos operando e um reserva, sendo que, dessa vez, chegou-se em vazões girando em torno dos 1.500,00 L/s. Na ETA, a reservação é realizada via reservatórios de mesmas cotas, que totalizam 16.000 m³ de água tratada armazenada quando o nível está em 100 %. Não existe macromedição na saída da ETA, apenas na entrada de água bruta. O sistema em estudo é ilustrado conforme a Figura (4.1).

Figura (4.1) – Diagrama da instalação em estudo.



4.1.1 Diagnóstico Hidroenergético – Lista de Verificação

De acordo com Gomes (2012), é evidente a importância das medições elétricas e hidráulicas em campo, mas, anteriormente à realização dessas, as seguintes etapas devem ser realizadas:

- 1) Levantamento do diagrama simplificado eletro-hidráulico do sistema – esse item tem como objetivo a rápida visualização das unidades consumidoras (estações elevatórias, ETA's e etc.), bem como caracterização dessas com a indicação dos quantitativos e características elétricas e hidráulicas dos conjuntos motobombas; com a caracterização

das adutoras (diâmetro, comprimento e material); dos tipos (enterrado, apoiado e elevado) e características geométricas dos reservatórios; a definição das cotas dos pontos notáveis da área de estudo (cota do eixo das bombas, por exemplo); níveis operacionais dos tanques de sucção e do ponto de chegada de água na ETA; a localização dos equipamentos de medição de grandezas hidráulicas e etc.

- 2) Levantamento das contas de energia elétrica e análise tarifária – em que a atividade de análise das contas de energia elétrica é, geralmente, complementada pela avaliação do enquadramento em outras possibilidades existentes na resolução normativa vigente. Cabe lembrar que, após a definição de novas condições operacionais, simulações devem ser executadas para a reavaliação do enquadramento tarifário.
- 3) Levantamento do diagrama unifilar elétrico, que é fundamental para análise das condições operacionais, tais como, por exemplo: sub ou superdimensionamento dos sistemas de proteção e partida e etc.
- 4) Levantamento do cadastro dos equipamentos, características técnicas das adutoras, acessórios e perfil topográfico, obtidos através de: levantamento das características elétricas e hidráulicas dos conjuntos motobombas; das curvas de desempenho das bombas; da consulta do diâmetro e material das tubulações, barriletes e conexões até o início da adutora e da(s) própria(s) adutora(s); da planta baixa da instalação permitindo a determinação das conexões hidráulicas, para estimativa das perdas de carga; da planta e do perfil topográfico da(s) adutora(s), de maneira a fazer uma estimativa das perdas de carga e etc.
- 5) Levantamento dos equipamentos de medições elétricas e hidráulicas, que são necessários, pois permitem determinar, além do rendimento e consumo específico dos conjuntos, indicadores de desempenho, que caracterizam a eficiência do sistema como um todo ou de um subsistema.
- 6) Levantamento dos procedimentos de operação e manutenção, a partir do qual se observa, em muitos casos, que o desperdício de energia na operação de um sistema decorre da inexistência de procedimentos operacionais previamente estabelecidos, em função das sazonalidades climáticas e horárias. É indispensável nessa etapa a determinação dos volumes bombeados, com séries históricas de dados, mais extensas possíveis, com a preferência de um ano ou mais.
- 7) Levantamento dos recursos auxiliares de gestão, onde produtos tecnológicos, inclusive com versões de *software* livre, tal como, por exemplo, o EPANET, permitem a simulação de condições operacionais diversas e a otimização da operação.

Levando em consideração a sistemática estabelecida por Gomes (2012), os sete itens descritos anteriormente na lista de verificação foram tratados da seguinte maneira:

- a) Em relação ao levantamento do diagrama simplificado eletro-hidráulico da instalação em análise, existem documentações que permitiram a construção de um diagrama, com suficiente fidelidade com as características elétricas e hidráulicas do sistema: existem projetos que permitiram a clara descrição das três adutoras de diâmetro 600 mm, com os seus comprimentos e materiais, bem como documentações que garantiram a caracterização dos reservatórios da ETA e a definição das cotas dos pontos notáveis da área de estudo. Níveis operacionais dos tanques de sucção e do ponto de chegada de água na ETA também foram possíveis de se obter por meio de documentação existente, e a localização dos equipamentos de medição de grandezas hidráulicas foi definida em função das necessidades dos testes de campo, visto que as únicas instrumentações instaladas atualmente são para a medição da água bruta que chega à ETA, via calha Parshall com sensor de vazão do tipo ultrassônico e, para a medição do nível do reservatório da ETA (R-01), via sensor de pressão hidrostática, sendo essa atividade de registro das informações executada de hora em hora pelos operadores da instalação. O diagrama eletro-hidráulico construído está apresentado no Apêndice (11).
- b) Em relação ao levantamento das contas de energia elétrica e à análise tarifária, não existe controle formal dessas contas, além da simples análise mensal, e não há registros históricos das eventuais ultrapassagens de demanda, bem como dos reativos excedentes. Foi necessário fazer, portanto, a compilação dos dados existentes das faturas de energia elétrica em um período de, no mínimo, um ano. Isso permitiu qualificar a instalação com relação aos indicadores de desempenho apresentados, bem como utilizando os dados de vazão e níveis existentes na ETA, avaliar a possibilidade de reenquadramento tarifário.
- c) O diagrama unifilar elétrico já está documentado com relação à instalação em estudo, estando esse apresentado no Anexo (09).
- d) Para a construção do diagrama simplificado, estabelecido no item (a), foi necessário que a maior parte das solicitações abrangidas pelo item (d) – levantamento do cadastro dos equipamentos, características técnicas das adutoras, acessórios e perfil topográfico, em análise, já tenham sido obtidas. Dessa maneira, esse item foi complementado pelas curvas características das bombas, obtidas dos fabricantes; pela

planta baixa da instalação, permitindo determinação das conexões hidráulicas, para estimativa das perdas de carga; e pelo perfil topográfico das adutoras, de maneira a se estabelecer uma estimativa das perdas de carga. Nessa fase, foi indispensável a comparação entre os dados de projetos com os existentes em campo.

- e) O levantamento dos equipamentos de medições elétricas e hidráulicas tem uma relação muito próxima com o descrito em (a) e (d), sendo que a execução das atividades de (a) e (d) impactou na finalização desta análise (e).
- f) Ainda não existem procedimentos operacionais formais com relação à operação da instalação em análise. No entanto, existem séries históricas de vazões aduzidas e dos níveis do reservatório da ETA, bem como do sequenciamento dos grupos acionados na EBAB-01. Sendo assim, um dos objetivos desse trabalho foi comparar essas séries históricas com as sazonalidades climáticas/temporais, de maneira a se definir procedimentos focados na redução dos gastos energéticos, incluindo desde o desacionamento de um conjunto motobomba no horário de ponta, por exemplo, na definição de horários de acionamento e desacionamento de equipamentos, até um possível reenquadramento tarifário. Isso ocorreu em conjunto com o item (g).
- g) Por fim, através de *software* de simulação (neste item – levantamento dos recursos auxiliares de gestão), foi construído um modelo do sistema em análise, onde foi possível realizar um grande número de simulações, que propiciaram a avaliação de diferentes cenários voltados à melhoria da eficiência hidroenergética da instalação em análise.

4.1.2 Diagnóstico Hidroenergético – Medições em Campo

Para que as medições elétricas e hidráulicas em campo sejam confiáveis, é fundamental que sigam a simultaneidade, com a correta localização dos medidores e garantia da precisão das medições. Considerando que as grandezas elétricas a serem determinadas serão, obrigatoriamente, tensão, corrente, potência (ativa, reativa e aparente), e que as grandezas hidráulicas a serem medidas são as vazões e pressões: em casos onde não ocorram variações das condições operacionais, tais como, por exemplo, vazões e cargas constantes, o uso de multímetros de alicates pode ser suficiente para viabilização de um projeto básico para futuras alterações, devendo-se sempre dar preferência a analisadores de grandezas elétricas, quando disponíveis; já no caso das medições hidráulicas, em condições operacionais constantes, o uso de manômetros analógicos pode ser suficiente; por fim, com relação às

vazões, principalmente da água bruta proveniente da captação, é frequente o uso de leituras horárias via calha Parshall, na entrada da ETA, e da variação dos níveis dos reservatórios, para se atribuir volumes bombeados da captação (GOMES, 2012).

Na instalação em estudo, existem cinco conjuntos motobombas montados em paralelo, dos quais, em função das sazonalidades existentes, de dois até quatro equipamentos trabalham simultaneamente. Essa instalação recalca água bruta desde o manancial até a ETA, através de três adutoras de diâmetro nominal 600 mm e que percorrem um caminho praticamente idêntico entre os pontos de coleta no rio e disponibilização de água para tratamento, conforme a Figura (4.1). Não existem alterações operacionais, além do acionamento e desacionamento dos conjuntos motobombas, que são executados via operadores do sistema dedicados a essa tarefa. Dessa forma, as condições operacionais se mantêm em função da quantidade de grupos acionados no instante analisado, ressaltando que todos os equipamentos trabalham sem restrição de vazão via válvula de recalque.

Levando em consideração essa avaliação preliminar do modo operativo da instalação, é possível que, de maneira satisfatória, a seguinte instrumentação seja utilizada para avaliação dos parâmetros elétricos e hidráulicos:

- 1) Medição da pressão de sucção das bombas, através de manovacuômetro instalado na conexão de serviço do flange de sucção das bombas e que possui as características conforme Figura (4.2).

Figura (4.2) – Instrumento de medição da pressão de sucção das bombas.

Descrição: manovacuômetro

Fabricante: SALCAS

Modelo: FSI 62/1

Faixa de medição: -49.033,25 a +49.033,25 [Pa]

Divisão da escala: 980,665 [Pa]

Classe do manômetro: A

Exatidão: 1,6 % do fundo de escala



Fonte: dados técnicos obtidos através do certificado de calibração do instrumento e do Catálogo Técnico de Produto⁸.

⁸ Este catálogo pode ser acessado através do site <http://www.salcas.com.br/pdf/manometro-standard-FSI-FSIG-41-52-62-salcas.pdf>, acessado em 31/07/2018 às 16:34. Imagem: próprio autor.

- 2) Medição da pressão de recalque das bombas, através de manômetro instalado na conexão de serviço do flange de descarga das bombas e que possui as características conforme Figura (4.3).

Figura (4.3) – Instrumento de medição da pressão de recalque das bombas.

Descrição: manômetro	
Fabricante: Salvi	
Modelo: -	
Faixa de medição: 0 a 1.961.330 [Pa]	
Divisão da escala: 98.066,5 [Pa]	
Classe do manômetro: A-1	
Exatidão: 1,00 % da faixa	

Fonte: dados técnicos obtidos através do certificado de calibração do instrumento e a imagem ilustrativa obtida através do Catálogo do Fabricante⁹.

- 3) Medição da pressão após o barrilete da instalação, através de manômetro instalado em caixa de manobras de válvulas, após a saída da instalação e que possui as características conforme Figura (4.4).

Figura (4.4) – Instrumento de medição da pressão após o barrilete da instalação.

Descrição: manômetro	
Fabricante: Salvi Casagrande	
Modelo: Salvpress 100B	
Faixa de medição: 0 a 3.922.660 [Pa]	
Divisão da escala: 9.806,65 [Pa]	
Classe do manômetro: A-3	
Exatidão: 0,25 % da faixa	

Fonte: dados técnicos obtidos através do certificado de calibração do instrumento e a imagem ilustrativa obtida através do Catálogo do Fabricante¹⁰.

- 4) Medição das grandezas elétricas dos conjuntos motobombas, através de analisador de qualidade de potência trifásica instalado na saída dos quadros de comando dos conjuntos motobombas, no trecho entre o painel elétrico e o motor elétrico, que possui as características conforme Figura (4.5).

⁹ Este catálogo pode ser acessado através do site <http://catalogo.salvicasagrande.com.br/down/catalogo-salvicasagrande-pressao.pdf>.

¹⁰ Catálogo também está disponível em <http://catalogo.salvicasagrande.com.br/down/catalogo-salvicasagrande-pressao.pdf>.

Figura (4.5) – Instrumento de medição das grandezas elétricas dos conjuntos motobombas.

Descrição: analisador de qualidade de potência trifásica

Fabricante: Fluke Industrial B.V.

Modelo: Fluke 434

Intervalo de medição (VA, VAR): 1,0 a 20,00 [MW] – dependendo da escala da pinça, escala de volt 1:1

Intervalo de medição (Fator de potência): 0 a 1 [-]

Resolução (VA, VAR): 0,1 a 1 [kW] – dependendo da escala da pinça, escala de volt 1:1

Resolução (Fator de potência): 0,01

Precisão (VA, VAR): $\pm 1,5 \% \pm 10$ pontos – adicionar precisão da pinça

Precisão (Fator de potência): $\pm 0,03$ – adicionar precisão da pinça



Fonte: dados técnicos obtidos através do Guia do Usuário¹¹.

- 5) Medição da rotação dos conjuntos motobombas, através de tacômetro e fita reflexiva instalada no eixo de acoplamento entre motor elétrico e bomba, que possui as características conforme Figura (4.6):

Figura (4.6) – Instrumento de medição da rotação dos conjuntos motobombas.

Descrição: tacômetro, foto/contato digital

Fabricante: Minipa

Modelo: MDT-2238A

Faixa de medição (foto): 2,5 ~ 99.999 [rpm]

Resolução (foto): 0,1 rpm (2,5 ~ 999,9 rpm) e 1 rpm (≥ 1.000 rpm)

Precisão: $\pm (0,05 \% + 1$ dígito)



Fonte: dados técnicos e a imagem ilustrativa obtidos através de Proposta Técnica¹².

¹¹ Guia do usuário disponível em http://assets.fluke.com/manuals/434_435_umpor0100.pdf. Imagem: próprio autor.

¹² A proposta técnica pode ser acessada através do acesso ao seguinte endereço eletrônico: https://www.eletopecas.com/uploads/ProdutoDownload/produto_458.pdf.

- 6) Medição da vazão dos conjuntos motobombas, através de calha Parshall e medidor de vazão do tipo ultrassônico existente e localizado na entrada da ETA, contemplando a vazão de todas as três adutoras, que possui as características conforme Figura (4.7):

Figura (4.7) – Instrumento de medição da vazão de chegada à ETA.

Descrição: medidor de nível ultrassônico	
Fabricante: SIEMENS	
Modelo: HydroRanger 200	
Faixa de medição: 0,3 a 15 [m]	
Resolução: 0,1 % da faixa de medição ou 2 mm, o que for maior	
Precisão: $\pm 0,25$ % da faixa de medição ou 6 mm, o que for maior	

Fonte: dados técnicos obtidos através do Catálogo do Fabricante¹³.

- 7) Medição do nível do reservatório da ETA (R-01), através de sensor de pressão existente e localizado na adutora de saída por gravidade do reservatório, que possui as características conforme Figura (4.8):

Figura (4.8) – Instrumento de medição do nível do reservatório da ETA (R-01).

Descrição: transmissor de nível do tipo hidrostático	
Fabricante: Nivetec	
Modelo: Série 780	
Faixa de medição: 0 a 2.941.995 [Pa]	
Resolução: -	
Precisão: $\pm 0,5$ % da faixa de medição	

Fonte: dados técnicos e a imagem ilustrativa obtidos através de Catálogo do Fabricante¹⁴.

- 8) Medição da vazão de cada adutora, através de três maletas para medição de parâmetros hidráulicos instaladas simultaneamente nas três adutoras de 600 mm, 50 m

¹³ O catálogo do fabricante pode ser encontrado no seguinte website: https://w3app.siemens.com/mcims/infocenter/dokumentcenter/sc/pi/InfocenterLanguagePacks/Catalog%20sheet%20HydroRanger%20200/sitransl_hydro200_fi01_en.pdf. Imagem: próprio autor.

¹⁴ O catálogo do fabricante pode ser encontrado aqui: https://nivetec.com.br/wp-content/uploads/2018/07/NT_CT_Nivetec_S780.pdf.

antes da chegada à ETA, com conexões “TAP’s” – test access point –, que possuem as características conforme Figura (4.9):

Figura (4.9) – Maleta para medição de parâmetros hidráulicos.

Descrição: maleta para medição de parâmetros hidráulicos – Pitometria – diferencial de pressão	
Fabricante: LAMON	
Modelo: MDH600-300C	
Faixa de medição: 0 a 200 mca	
Resolução: - 5.000 a + 5.000 mmca	
Precisão: $\pm 0,15$ % da faixa de medição.	

Fonte: dados técnicos e imagem ilustrativa obtidos através de Catálogo do Fabricante¹⁵.

As medições em campo foram executadas em todos os conjuntos motobombas, de maneira individual e, também, de forma paralela: dois, três e quatro equipamentos em conjunto. Quando as medições foram executadas de maneira individual, em cada um dos cinco equipamentos, a curva das bombas foi obtida via restrição da válvula de descarga, onde todos os outros conjuntos motobombas restantes estiveram desligados e a vazão da única bomba em operação foi enviada pelas três adutoras existentes entre a EBAB-01 e a ETA, sendo medida via calha Parshall na ETA, com medidor de vazão do tipo ultrassônico.

Segundo Gomes e Carvalho (2012), o levantamento em campo das curvas características das bombas, ensaio de desempenho, tem por objetivo verificar o rendimento individual de cada conjunto motobomba. Esse ensaio pode ser obtido com o estrangulamento da válvula de recalque, de maneira a se obter cinco pontos operacionais distintos: vazão plena, 75 %, 50 % e 25 % da vazão plena e *shut-off*. Em cada um desses cinco pontos foi realizada a medição dos parâmetros elétricos e hidráulicos que foram, posteriormente, inseridos em planilhas de *Excel* e permitiram a geração de curvas: carga e vazão, potência mecânica absorvida do acionador pela bomba (potência motriz da bomba) e vazão e rendimento da bomba e vazão.

¹⁵ O catálogo do fabricante pode ser encontrado aqui: <http://www.lamon.com.br/produtos/pitometria/diferencial-de-pressao/mdh-600-300c-maleta-p-medicao-de-parametros-hidraulicos-pitometria-diferencial-de-pressao>.

Essas informações permitiram a comparação entre as curvas definidas pelo fabricante e a efetivamente obtida em testes operacionais. Como são cinco conjuntos motobombas instalados, foi necessária a realização de cinco ensaios de desempenho.

Com relação ao sequenciamento em campo dos conjuntos motobombas operando em paralelo, sob as condições das regras operacionais vigentes (que no caso da instalação em estudo são: dois, três e quatro equipamentos operando simultaneamente em função das sazonalidades), Gomes e Carvalho (2012) definem que esses ensaios possuem o objetivo de verificar o rendimento das diferentes combinações praticadas. Nessa condição, não foram realizadas alterações de vazão via estrangulamento das válvulas de recalque e, apenas, a vazão plena foi o ponto de medição das respectivas grandezas elétricas e hidráulicas. Como são cinco conjuntos motobombas instalados, e as combinações possíveis são entre dois, três e quatro equipamentos em conjunto, via combinação simples, vinte e cinco ensaios na condição de grupos operativos em paralelo seriam necessários.

Em virtude de somente estarem disponíveis para uso instrumentos de medições de grandezas elétricas e hidráulicas – manômetros e analisadores de energia – que permitissem a obtenção dos valores instantâneos de apenas um equipamento por vez e, levando em consideração que as alterações operacionais são obtidas apenas a partir do acionamento e desacionamento dos grupos motobombas pelos operadores, a sequência de medições, quando das associações dos grupos, foi realizada de maneira individual.

Dessa forma, se o grupo motobomba número 01, por exemplo, estivesse trabalhando em paralelo com o número 02, primeiramente foram obtidos os valores das grandezas elétricas e hidráulicas do grupo número 01, através dos instrumentos instalados nele e, após isso, os instrumentos foram todos retirados e instalados no grupo número 02, sem alterações do estado dos equipamentos (ligado/desligado) nem alterações que pudessem comprometer o ponto operacional (estrangulamento da válvula de recalque, por exemplo).

Gomes e Carvalho (2012) recomendam que as medições elétricas e hidráulicas na condição de operação única de conjuntos motobombas sejam realizadas a cada cinco segundos, durante cinco minutos e totalizando, portanto, sessenta registros para cada um dos cinco pontos de vazão propostos. Também recomenda que, no caso da operação com conjuntos em paralelo, o período de medição seja de vinte e quatro horas, de maneira a se obter o valor de todas as condições possíveis de paralelismo.

Como não estavam disponíveis *data logger* em quantidade suficiente para a condição de sequenciamento de grupos, não era possível realizar o registro dos valores das pressões das bombas em conjunto com a memória do analisador de energia existente e, levando em

consideração que a medição de vazão foi realizada via calha Parshall na ETA com medidor de vazão do tipo ultrassônico, sem registro eletrônico parametrizado até o momento, a maneira de registro dos dados simultâneos foi alterada. Foram utilizadas, portanto, planilhas que registraram de maneira manual os parâmetros hidráulicos e elétricos a cada trinta segundos, durante um período de cinco a dez minutos por equipamento e/ou ponto de medição de vazão, observando sempre a estabilização das medidas instantâneas que estavam sendo obtidas. Como não existiu alteração da condição operacional, pois no momento do teste, nenhum grupo foi acionado ou desacionado, essa maneira de realização foi considerada satisfatória para a obtenção das informações necessárias tanto nos ensaios de desempenho quanto no sequenciamento de grupos.

4.1.3 Diagnóstico Hidroenergético – Software de Simulação Hidráulica

Com a compilação das informações características do sistema em estudo, através dos resultados obtidos em função das etapas realizadas anteriormente – “Lista de Verificação” e “Medições em Campo” – foi possível utilizar um *software* de simulação hidráulica para análise de cenários. As avaliações executadas foram tanto de cunho operacional, como por exemplo, a criação do modelo calibrado em campo do sistema atual para análise da maneira como ele se comporta e a consequente proposição de alterações operacionais visando economia energética; bem como avaliações de cunho estrutural, propondo-se realização de alterações físicas na instalação e a correção de falhas de concepção do sistema, objetivando a redução dos valores pagos nas faturas de energia elétrica.

O EPANET permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e da qualidade da água em redes de distribuição pressurizadas. Com relação especificamente às funções utilizadas no diagnóstico hidroenergético, o EPANET possibilita se obter valores de vazão em cada uma das tubulações inseridas no modelo, da pressão em cada um dos nós criados para possibilitar a conexão dos diferentes componentes (tubo, bomba, válvula, reservatório e etc.) e da altura de água em cada reservatório de nível variável analisado. Segundo Lewis (2000), o EPANET foi concebido como uma ferramenta de apoio (estratégias de gestão) à análise de sistemas de distribuição, podendo ser utilizado em diversas situações onde seja necessário efetuar simulações, como por exemplo: calibração de modelos hidráulicos; alterações operacionais do funcionamento de sistemas de bombeamento; e a definição de tubulações para limpeza ou substituição.

O *software* realiza o cálculo da perda de carga utilizando as fórmulas de *Darcy-Weisbach*, *Hazen-Williams* e *Chezy-Manning*. Ele permite a inserção dos coeficientes para o cálculo da perda de carga singular nos acessórios, bem como a variação da rotação dos conjuntos motobombas, simulando o uso de acionamento por conversores de frequência, por exemplo. A modelagem de reservatórios de nível variável é possível de ser realizada com a obtenção de curvas de volume em função da altura da água, bem como se estabelecer padrões de consumo em nós, cada um com um padrão próprio ao longo do tempo. Regras operacionais, com comandos de programação, podem ser inseridas também no *software* para o controle do acionamento e desacionamento de conjuntos motobombas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS EQUIPAMENTOS ELETROMECAÑNICOS, TUBULAÇÕES E ACESSÓRIOS

Nas Tabelas (5.1) e (5.2) são apresentadas, respectivamente, as características técnicas estabelecidas em projetos e/ou análises de campo das cinco bombas e dos cinco motores elétricos que fazem parte do estudo. Conforme se pode observar, boa parte dos dados técnicos das bombas são desconhecidos (placas de identificação das características inexistentes e/ou não fidedignas aos equipamentos), em virtude de falhas nos registros de manutenções que correlacionem as condições iniciais dos projetos e as alterações realizadas ao longo da vida útil dos equipamentos, tais como, por exemplo, a mudança do tamanho dos rotores. Dessa maneira foi necessário, como atividade essencial ao estudo em andamento, a definição dos parâmetros desconhecidos via materiais dos fabricantes e confirmações dessas características por meio de visitas ao campo e aplicações de medições operacionais, que serão detalhadas posteriormente.

Tabela (5.1) – Características técnicas das bombas da EBAB-01.

	BOMBA 01	BOMBA 02	BOMBA 03	BOMBA 04	BOMBA 05
Q [m³ h⁻¹]	---	---	---	1.500	---
H [m]	---	---	---	110,0	---
N [rpm]	---	---	---	1775	---
$Pot_{absbomba}$ [hp]	---	---	---	692,2	---
η_{bomba} [%]	---	---	---	87,0	---
D_{fs}	14" (0,3556m)	14" (0,3556m)	14" (0,3556m)	14" (0,3556m)	14" (0,3556m)
D_{fd}	10" (0,254m)				
Diâmetro Rotor ["]	19.3/16	20	20.3/8	20.1/4	---
Tipo Rotor	A	A	A	A	A

Tabela (5.2) – Características técnicas dos motores elétricos da EBAB-01.

MOTORES ELÉTRICOS 01 ao 05	
Pot_{motor} [hp]	750
Hz [Hz]	30 - 60
V nominal [V]	440
I nominal [A]	877
N nominal [rpm]	895 - 1790
η_{motor} em 100 % [%]	96,0
η_{motor} em 75 % [%]	95,8
η_{motor} em 50 % [%]	95,0
$cos\phi$ em 100 % [-]	0,87
$cos\phi$ em 75 % [-]	0,83
$cos\phi$ em 50 % [-]	0,75
FS [-]	1,15
Carcaça	355 A

onde Hz é a frequência e FS o fator de serviço.

A linha de centro da sucção das bombas, na EBAB-01, está na cota -0,4 m e a altura geométrica da chegada da água bruta à ETA, na calha Parshall (onde se realiza a medição da vazão via sensor ultrassônico), é de 61,4 m, totalizando, portanto, 61,8 m de diferença de altura geométrica entre a coleta da água bruta no rio e a entrega dessa na ETA. O sistema é composto por três adutoras de diâmetro nominal 600 mm, material ferro fundido dúctil revestido por argamassa (centrifugado), sendo que cada uma possui um comprimento aproximado de 3.480 m e essas percorrem trajetos paralelos e praticamente iguais entre a EBAB-01 e a ETA.

As sucções das cinco bombas também possuem características iguais a todos os conjuntos motobombas, sendo que, o diâmetro nominal dessas é de 400 mm. No recalque das bombas, um barrilete de diâmetro nominal 800 mm recebe a vazão de todos os conjuntos e direciona para as três adutoras existentes. A reservação na ETA ocorre através de quatro reservatórios de mesmas cotas de níveis mínimas e máximas e que são vaso-comunicantes tanto na entrada da água para armazenamento, quanto na saída para distribuição. Os volumes desses reservatórios totalizam 16.000 m³ e a cota de fundo de todos eles é de 52,3 m e a de topo 57,3 m. A medição do nível é realizada via sensor de pressão na adutora de saída por

gravidade. Na Tabela (5.3) estão estabelecidas as características técnicas das tubulações e acessórios entre a EBAB-01 e a ETA.

Tabela (5.3) – Características técnicas das tubulações e acessórios entre a EBAB-01 e a ETA.

	TUBOS			COMPRIMENTO EQUIVALENTE - CONEXÕES E ACESSÓRIOS								
	Diâmetro Nominal [mm]	Comprimento [m]	Rugosidade "C" - (Hazen-Williams)	Entrada de borda [m] ⁴	Curva 90° [m] ⁴	Curva 45° [m] ⁴	Tê, saída lateral [m] ⁴	Tê, passagem direta [m] ⁴	Válvula de retenção [m] ⁴	Válvula Borboleta aberta [m] ⁵	Redução / Ampliação Gradual [m] ⁶	L-TOTAL [m]
Sucção Bombas	400	1,95	76 ¹	35 D 35 0,4 = 14	30 D 30 0,4 = 12	---	---	---	---	15,24	---	43,19
Recalque Bombas	500	1,5	93 ³	---	---	---	65 D 65 0,5 = 32,5	---	---	19,51	10" → 20" ⁷ 9,15	62,66
Barrilete	800	11,28	94 ³	---	---	---	---	---	---	30,49 ⁸	---	41,77
Barrilete (lado adutora 45 anos)	600	4	93 ³	---	30 D (2 pç) 2 30 0,6 = 36	---	---	---	---	---	---	40
Barrilete (lado adutora 25 anos)	800	4	94 ³	---	30 D (2 pç) 2 30 0,8 = 48	15 D 15 0,8 = 12	---	---	---	---	---	64
Barrilete (adutoras 40 e 25 anos)	800	47	94 ³	---	---	2 15 D 2 15 0,8 = 24	65 D 65 0,8 = 52	20 D 20 0,8 = 16	100 D 100 0,8 = 80	30,49 ⁸	---	249,49
Adutora 01	600	3.480	78 ¹	---	---	15 D (3 pç) 3 15 0,6 = 27	65 D 65 0,6 = 39	20 D 20 0,6 = 12	100 D 100 0,6 = 60	(2 pç) 2 23,78 = 47,56	---	3.665,56
Adutora 02	600	3.480	81 ²	---	---	15 D (4 pç) 4 15 0,6 = 36	65 D (2 pç) 2 65 0,6 = 78	20 D (2 pç) 2 20 0,6 = 24	100 D 100 0,6 = 60	(2 pç) 2 23,78 = 47,56	---	3.725,56
Adutora 03	600	3.433	93 ³	---	---	15 D (2 pç) 2 15 0,6 = 18	65 D 65 0,6 = 39	---	---	(2 pç) 2 23,78 = 47,56	---	3.537,56

¹ Rugosidade referente à tubulação com 45 anos, conforme Anexo 03-B;

² Referente à tubulação com 40 anos, conforme Anexo 03-B;

³ Referente à tubulação com 25 anos, conforme Anexo 03-B. Utilizado o valor para tubos de 30" para o "Barrilete (adutoras 40 e 25 anos)";

⁴ Comprimento equivalente obtido do Anexo 05;

⁵ Comprimento equivalente obtido do Anexo 06;

⁶ Comprimento equivalente obtido do Anexo 07;

⁷ Utilizado o valor para ampliação gradual de 12" → 20";

⁸ Utilizado o valor para tubos de 30".

Observação: entre todos os grupos motobombas existe 3,2 m de distância entre as tubulações de recalque, exceto entre os grupos 03 e 04, que possuem uma distância de 1,68 m.

5.2 ENSAIOS DE DESEMPENHO

Segundo Kaya et al. (2008 apud KALAISELVAN et al., 2016), a eficiência das bombas provavelmente se reduz de 10 a 25 % quando elas são operadas durante toda sua vida útil, fato esse que torna essencial, em uma instalação que possui bombas com mais de vinte anos de uso, que sejam realizados ensaios para avaliação do estado atual dos equipamentos. No entanto, essa afirmação deve ser adotada com um certo nível de restrição, pois, muito provavelmente, a informação leva em conta a ausência de mínimas manutenções nos equipamentos, que não é o caso do sistema em estudo. Na EBAB-01 todos os motores elétricos foram adquiridos e substituídos durante os anos de 2016 e 2017. Já as bombas não possuem um histórico confiável quanto à idade e às respectivas manutenções realizadas e, atualmente, a companhia de abastecimento de água realiza manutenções com a aplicação de resina para correção de espessura, tanto nos rotores, quanto nas carcaças das bombas sendo, portanto, dúvida a condição das bombas frente às curvas características do fabricante.

Apenas a bomba de número 04 possui todas as suas características técnicas conhecidas, pois esse equipamento foi recentemente adquirido/substituído (ano de 2017). Sendo assim, como maneira de se determinar/confirmar as curvas característica das bombas de número 01, 02, 03 e 05, deveriam ser realizados os ensaios de desempenho nesses equipamentos. Infelizmente no momento da realização dos testes, o grupo de número 05 estava fora de operação em virtude da necessidade de manutenção corretiva. Essa bomba foi retirada da instalação e levada para passar por uma reforma completa. Dessa maneira, foi possível realizar os ensaios de desempenho apenas nos conjuntos 01 ao 03.

Os testes foram realizados com o estrangulamento da válvula de recalque de cada bomba, em período noturno para ocorrer mínimo impacto sobre o abastecimento das cidades, mantendo-se apenas o grupo sob ensaio em operação. Os pontos escolhidos foram cinco distintos, que correspondem aproximadamente a: vazão plena, 75 %, 50 % e 25 % da vazão plena e *shut-off*. Em cada um desses cinco pontos foi realizada a medição dos parâmetros elétricos e hidráulicos que foram posteriormente inseridos em planilhas e possibilitaram a geração das curvas: carga e vazão, potência mecânica absorvida do acionador pela bomba (potência motriz da bomba) e vazão e rendimento da bomba e vazão. Essas informações permitiram a comparação entre as curvas definidas pelo fabricante e a efetivamente obtida em testes operacionais. Como o fabricante apresenta as curvas características para a rotação de 1.775 rpm e os motores operam a 1.790 rpm, foi necessária a correção, via leis de semelhança, aplicadas à efetiva rotação dos conjuntos motobombas. Nos Apêndices (01) ao (03), são demonstradas as curvas reais obtidas nos ensaios de desempenho para as bombas 01 a 03.

Conforme os apêndices citados anteriormente, é possível observar que, na condição de teste de desempenho em vazão plena, a altura manométrica média do sistema girou em torno dos 70 m. De acordo com as curvas características das bombas em teste, demonstradas nos Apêndices (01) ao (03), todas elas, nessa condição operacional aplicada, independentemente do diâmetro de rotor aplicado, apresentam deslocamento em relação à curva característica do fabricante. Dessa forma, por exemplo, se o par carga e vazão ficou deslocado completamente à direita da curva do fabricante, em um ponto de isorendimento menor que 80 %, qualquer valor de carga, vazão e rendimento de bomba são possíveis de serem obtidos nessa condição, visto que essas informações não são apresentadas nas curvas características para a condição operacional ilustrada.

Esse resultado foi obtido nos conjuntos motobombas 02 e 03. Na bomba de número 01, ocorreu também deslocamento do ponto medido em relação à curva do fabricante, no entanto, dessa vez, ao invés do deslocamento para a direita, houve um deslocamento para

baixo da curva do fabricante, em um ponto menor que o do menor rotor aceitável da bomba em teste, que é 18.1/2". Nesse caso, a condição de desconhecimento total do valor da carga, vazão e rendimento da bomba é aplicável novamente, sendo que isso ocorre, pois de novo as informações necessárias do equipamento não estão disponíveis nessa condição operacional aplicada.

Em função dessa diferenciação que ocorreu entre os pontos de vazão plena para os grupos 02 e 03 (deslocados à direita da curva do fabricante) em relação ao grupo 01 (deslocado abaixo da curva do fabricante), foi possível observar um erro básico de manutenção/operação. A válvula de sucção do conjunto motobomba 01 estava parcialmente fechada, em função do mecanismo de abertura da válvula borboleta (pinhão e cremalheira) não possuir um fim-de-curso, que limitasse a abertura.

Dessa maneira, a tubulação de sucção apresentava uma grande restrição. A perda de carga causada pela válvula borboleta estrangulada foi evidenciada também através da pressão manométrica da sucção, medida através de manovacuômetro instalado na conexão de serviço do flange de sucção da bomba. Enquanto as bombas 02 e 03 apresentavam uma pressão de sucção variando entre -0,9 m (grupo 03), e 0,4 m (grupo 02), a da bomba 01 apresentava valor menor que o fundo de escala do manovacuômetro, ou seja, pressão menor que -5,0 m. Na Figura (5.1), a necessidade de manutenção é evidenciada.

Figura (5.1) – Válvula de sucção danificada do conjunto motobomba 01.



Apenas com uma ação, sem investimento, de conserto da válvula de sucção danificada, foi possível aumentar a vazão instantânea de, aproximadamente, 1.261,00 L/s para 1.352,00 L/s, quando do sequenciamento entre os grupos 01, 02 e 03 em paralelo. Não foi quantificado o ganho energético/financeiro dessa atividade de manutenção, em função de não se ter dados

confiáveis que garantissem a plena confiança no resultado atingido: as medições das grandezas elétricas e hidráulicas do GMB 01 foram realizadas em data anterior à manutenção da válvula de sucção do mesmo grupo, sendo que, nesse intervalo de tempo houveram alterações no nível do manancial, por exemplo, o que não representaria, portanto, condição exata comparativa.

No entanto, é evidente que o conserto da válvula de sucção impactou na melhoria do rendimento da bomba 01, pela diminuição da perda de carga na linha de sucção e pelo consequente aumento do valor do $NPSH_d$ no flange de sucção da bomba. Além disso, quanto maior a vazão instantânea de água bruta aduzida por três grupos em operação, ao qual teve um acréscimo de 91,00 L/s no sequenciamento detalhado, menor é, em teoria, a necessidade de se colocar o 4º equipamento em operação, resultando, portanto, em menor consumo energético.

Os resultados dos ensaios de desempenho e a comparação às curvas do fabricante são demonstrados da seguinte maneira: no Apêndice (02-a), por exemplo, é apresentada a curva característica do fabricante, onde, ao se traçar o diâmetro de 20” nessa, chegam-se aos diferentes valores de carga *versus* vazão e rendimento para a bomba número 02 (garantidos pelo projetista/fabricante). Já no Apêndice (02-b) é demonstrada a curva real (carga *versus* vazão e rendimento *versus* vazão) obtida via ensaio de desempenho para esse mesmo equipamento. Ao se plotar os dados obtidos nos ensaios de desempenho Apêndice (02-b) na curva característica do fabricante Apêndice (02-a), foi possível realizar uma comparação entre os dados “teóricos” e os reais para a bomba 02 (rotor de 20”).

A análise segue a mesma lógica para o restante das bombas, conforme os Apêndices (01) e (03). A partir das curvas características das bombas, de fornecimento do fabricante, bem como das curvas reais obtidas através dos ensaios de desempenho para cada bomba, com a peculiaridade dos diferentes diâmetros de rotores aplicados, foi realizada uma análise comparativa, detalhada no Apêndice (04).

Os resultados apresentados no Apêndice (04) demonstram como é importante a realização dos ensaios de desempenho nos equipamentos, pois conforme mencionado, a instalação já possui muitos anos de operação e, como era de se esperar, existiam dúvidas quanto aos rendimentos das bombas 01, 02, 03 e 05 frente às suas respectivas curvas características.

No entanto, apesar de certa diferenciação entre os valores de vazão propostos pelo fabricante e os efetivamente encontrados nos testes de desempenho, desconsiderando a questão da bomba número 01 que estava com a válvula de sucção restringida no momento do ensaio (falha de manutenção), as bombas número 02 e 03 tiveram valores muito próximos ao

proposto pelo fabricante oscilando com uma vazão, no pior dos casos, de 92 % da esperada no GMB 02 na altura manométrica de 82,0 m (condição próxima a de dois grupos operando em paralelo, sendo que essa situação operacional representa apenas 9,83 % do tempo total de operação da instalação) e, no melhor dos casos, a vazão do GMB 03 atingiu 104 % da esperada na altura manométrica de 94,0 m (próxima à condição operacional de três grupos operando em paralelo, sendo essa uma situação muito usual da instalação – 38,09 % do tempo operacional). Além disso, na AMT de 104,0 m, correspondente à condição próxima ao valor de quatro grupos operando em paralelo, ao qual existe uma correlação ao período operacional de 50,80 %, a vazão encontrada para o GMB 02 e GMB 03 foram, respectivamente, 99 % e 100 % da proposta pelo fabricante.

Com relação aos rendimentos, a análise não pôde ser realizada na altura manométrica de 82,0 m (dois grupos operando em paralelo) para a bomba 03, em função do rotor de 20.3/8” impor um rendimento de bomba menor que 80 %, sendo esse o limite das curvas de isorendimentos do fabricante. Dessa maneira, as bombas 01 e 02 tiveram a análise realizada nos três pontos operacionais e a bomba 03 nos pontos de AMT de 94,0 e 104,0 m, apenas.

Os resultados encontrados foram, novamente, muito próximos aos propostos pela fabricante: o menor valor encontrado foi de 96 % do rendimento esperado para a bomba 03 na altura manométrica de 94,0 m, que corresponde a 38,09 % do tempo operacional da instalação, permanecendo os rendimentos das bombas 01 e 02 em 101 % e 102 %, respectivamente, do esperado nessa condição operacional. Quando da configuração de quatro equipamentos operando em paralelo (50,80 % do tempo de operação da instalação), os rendimentos encontrados para as bombas 01, 02 e 03 foram, respectivamente, 105 %, 101 % e 98 % do definido pelo fabricante.

Dessa maneira, é possível avaliar que, apesar dos vários anos de uso, as bombas de número 02 e 03 apresentam bons resultados frente ao proposto pelo fabricante no processo de aquisição, sendo, portanto, suficiente que, para realização de simulações no *software* EPANET, o modelo seja gerado utilizando as curvas características inicialmente propostas pela fábrica para as bombas. Isso é corroborado pelas seguintes restrições: como não foi possível realizar o ensaio de desempenho na bomba 05 (em manutenção), não foi necessário realizar esse na bomba 04 (recém adquirida/instalada) e a bomba 01 apresentou problemas durante os testes (válvula de sucção danificada), todas essas três terão a curva do fabricante (carga *versus* vazão) utilizada para geração do modelo no EPANET. Além disso, como no modelo a ser gerado no *software* EPANET serão avaliadas outras condições operacionais com diferentes tipos de rotores, que não estão instalados nas bombas atualmente e não se ter,

portanto, como gerar curvas reais dessas condições operacionais, esse seria mais um argumento para se manter as curvas características do fabricante como sendo as suficientes para a análise a ser realizada.

Os ensaios de desempenho também serviram para balizar o setor da manutenção quanto à efetividade das reformas/manutenções que estão sendo aplicadas nas bombas. De todas aquelas em operação, apenas a de número 03 está há mais de três anos sem sofrer uma reforma completa, com desmontagem total do conjunto e recuperação das partes danificadas em função de desgastes: substituição de peças e/ou reposição de espessuras com soldagem/resinagem.

Como as bombas de número 01 e 02 apresentaram rendimentos de, respectivamente, 98 % e 100 % para 82,0 m; 101 % e 102 % para 94,0 m; e 105 % e 101 % para 104,0 m; e a bomba 03 apresentou, respectivamente, rendimentos para a AMT de 94,0 m e 104,0 m de: 96 % e 98 % do determinado pelo fabricante, é evidente que as manutenções aplicadas aos equipamentos estão sendo efetivas para a manutenção das respectivas eficiências operacionais. Sendo assim, faz-se efetivo estender à bomba 03 os procedimentos de manutenção já utilizados nas bombas 01 e 02.

5.3 ENSAIOS EM CONJUNTO – SEQUENCIAMENTO DE GRUPOS

Após a realização dos ensaios de desempenho, foram realizadas medições elétricas e hidráulicas em cada um dos conjuntos motobombas nos pontos operacionais efetivos de cada sequenciamento real possível. Dessa maneira, foram realizados ensaios no qual, por exemplo, o grupo motobomba 01 foi avaliado em conjunto com o 02 (sequenciamento de dois equipamentos em paralelo); após, o mesmo grupo 01 foi avaliado em conjunto com o 02 e o 03 (sequenciamento de três equipamentos em paralelo); e, finalmente, o grupo 01 foi avaliado em conjunto com o 02, 03 e 04 (sequenciamento de quatro equipamentos em paralelo).

A análise continuou da mesma maneira para o restante dos equipamentos, novamente em período noturno para ocorrer mínimo impacto sobre o abastecimento das cidades, levando em consideração as possibilidades de sequenciamento por permutação simples e as particularidades temporárias referentes, por exemplo, ao grupo número 05, que estava em manutenção. No entanto, em função de no momento das medições, na condição de paralelismo dos grupos, não estarem disponíveis instrumentos suficientes em quantidade que permitissem determinar as pressões de sucção e descarga nas conexões de serviço dos flanges das bombas, juntamente, com a vazão instantânea, com os parâmetros elétricos e de rotação

de cada grupo, individualmente, então, o procedimento para obtenção da carga de cada bomba teve que utilizar valores médios.

Sendo assim, o termo relativo à parcela dinâmica $-\frac{(V_{fd}^2 - V_{fs}^2)}{2g}$ – da Equação (3.31), obtido via Eq. (3.30), foi determinado da seguinte maneira: se, por exemplo, a vazão da combinação dos equipamentos 01 com 02, medida na calha Parshall da ETA, estava na magnitude de $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, apesar dos equipamentos não estarem necessariamente bombeando a mesma quantidade de água, foi atribuída a vazão de $0,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para cada um dos equipamentos. Após, aplicando esse valor à Eq. (3.30), onde D_{fd} e D_{fs} serão os efetivos, que são iguais a todas as bombas, 0,254 m e 0,3556m, respectivamente, chega-se aos valores de V_{fd} e V_{fs} , que aplicados à Eq. (3.31) resultam na carga dinâmica média nessa condição de sequenciamento dos GMB's 01 e 02 em paralelo. Ao se repetir esse procedimento para todas as condições possíveis de sequenciamento de grupos e, ao se realizar uma média dos valores obtidos para cada uma das bombas em cada uma das situações possíveis de sequenciamento, foram obtidos os valores de AMT média: 82,05 m (sequenciamento de dois grupos); 95,00 m (sequenciamento de três grupos) e 104,07 m (sequenciamento de quatro grupos).

Assim como ocorreu durante os ensaios de desempenho dos GMB's 01 ao 03, onde foi evidenciado um erro básico de manutenção na válvula de sucção do conjunto motobomba 01, que comprometia o correto funcionamento desse, agora, nos ensaios em conjunto dos mesmos equipamentos, foi evidenciado um outro erro relativamente básico. O problema estava no GMB 03 e pode ser considerado, também, como tendo causa nas falhas no processo de manutenção e será descrito nos parágrafos seguintes.

Dependendo da condição operacional em que os GMB's estão trabalhando, a potência requerida pela bomba ao motor elétrico varia, sendo que, na condição de menor altura manométrica (dois equipamentos em paralelo, por exemplo), maior é a vazão bombeada por cada bomba e, conseqüentemente, conforme a curva característica da bomba, Figura (3.3), maior será a potência requerida do acionador e, portanto, maior será a corrente de trabalho do motor elétrico. Na condição inversa (quatro equipamentos em paralelo, por exemplo), maior é a altura manométrica do sistema, menor será a vazão bombeada por cada bomba e, portanto, menores serão a potência/corrente requeridas do acionador – motor elétrico.

Durante os ensaios em conjunto, foi observado que o grupo motobomba número 03 apresentava uma potência " $Pot_{absmotor}$ " relativamente alta para a condição operacional de quatro equipamentos em paralelo. O valor dessa potência, por exemplo, atingiu uma média de 604,6 kW para o sequenciamento dos grupos 02, 03 e 04 e, na condição de apenas os GMB's

02 e 03 acionados, o valor médio atingido foi de 620,9 kW. Consequentemente, os valores médios de corrente para as condições acima descritas foram elevados também, 884 A e 920 A, respectivamente.

Os dados de corrente medida apresentados aqui para o motor elétrico número 03 são apenas exemplos dos maiores encontrados em suas respectivas condições operacionais de paralelismo de grupos (dois e três equipamentos em paralelo), mas além desses, em todas as outras condições de sequenciamento de grupos, excetuando-se a de quatro equipamentos em paralelo, a corrente medida ficou acima do valor da corrente nominal que, conforme a Tabela (5.2), é de 877 A, sendo o fator de serviço do motor elétrico estabelecido em 1,15. Dessa maneira, portanto, excluindo a condição de paralelismo de quatro equipamentos, no restante das condições operacionais – dois e três equipamentos em paralelo – o motor elétrico 03 esteve trabalhando sempre acima da corrente nominal, mas dentro da faixa do fator de serviço desse.

Com o intuito de se ajustar os valores operacionais de potência/corrente para as condições de valores iguais e/ou abaixo da corrente nominal, o rotor da bomba 03 foi usinado do diâmetro 20.3/8” para 19.15/16”. Ao se realizar essa atividade, os novos valores médios de $Pot_{absmotor}$ e corrente do GMB 03 ficaram conforme se segue: (a) sequenciamento dos grupos 02, 03 e 04 em paralelo: 544,1 kW e 802 A e (b) sequenciamento dos grupos 02 e 03 em paralelo: 563,6 kW e 843 A. Já com relação à vazão média que anteriormente à usinagem, na condição dos grupos 02, 03 e 04 em paralelo, por exemplo, apresentava valores de 1.352,00 L/s, após a usinagem do rotor do GMB 03 começou a apresentar valores muito próximos, que foram 1.349,00 L/s. O somatório das $Pot_{absmotor}$ dos três motores elétricos (sequenciamento dos grupos 02, 03 e 04) antes da usinagem que era de 1.713,5 kW passou para 1.665,8 kW após a usinagem do rotor da bomba 03, ou seja, houve uma redução de aproximadamente 47,7 kW no sequenciamento operacional avaliado, mantendo-se a vazão, basicamente, no mesmo patamar anterior. Já no somatório das $Pot_{absmotor}$ para a condição dos grupos 02 e 03 em operação, a queda de potência chegou a valores da ordem de 60,1 kW, também mantendo-se a vazão, basicamente, nos mesmos níveis pré-usinagem.

O tamanho de rotor utilizado na bomba 03 é tratado como falha de manutenção, pois não existem históricos que ditem os tamanhos dos rotores a serem utilizados em cada uma das bombas instaladas. Ocorre que, muito seguidamente, as bombas passam por manutenções corretivas e, não existindo um bom histórico de dados que ditem o diâmetro do rotor a ser aplicado, bem como os valores de AMT, vazão e $Pot_{absmotor}$ a serem esperados, acontecem casos conforme aqui detalhados: de um lado, a válvula de sucção danificada restringia muito a

vazão da bomba 03, sendo que não existem históricos que podem dar uma direção de quanto tempo ela está nessa condição operacional e, de outro lado, o rotor da bomba 04 estava com um diâmetro inadequado para a condição operacional produzindo uma quantidade suficiente de água, mas que, conforme Tabela (5.4), impõe uma condição operacional ineficiente.

No momento em que o rotor do equipamento número 03 foi usinado, de 47,7 kW a 60,1 kW de $Pot_{absmotor}$ puderam ser economizados, mantendo-se valores muito próximos de vazão bombeados com uma redução significativa no consumo energético. A Tabela (5.4) faz um comparativo das situações até aqui descritas.

Tabela (5.4) – BEP – *Best Efficiency Point* – GMB 03.

ANTES USINAGEM	Q [L/s]	GMB 02	GMB 03	GMB 04 (57 Hz)	$Pot_{absmotor}$ – Total [kW]	$Pot_{absmotor}$ – Redução [kW]
GMB's 02 e 03	1.056	$Pot_{absmotor} =$ 596,5 kW	$Pot_{absmotor} =$ 620,9 kW	---	$Pot_{absmotor}$ = 1.217,4 kW	---
		$I = 880$ A	$I = 897$ A			
GMB's 02, 03 e 04	1.352	$Pot_{absmotor} =$ 583,2 kW	$Pot_{absmotor} =$ 604,6 kW	$Pot_{absmotor} =$ 525,7 kW	$Pot_{absmotor}$ = 1.713,5 kW	---
		$I = 870$ A	$I = 884$ A	$I = 853$ A		
APÓS USINAGEM	Q [L/s]	GMB 02	GMB 03	GMB 04 (57 Hz)	$Pot_{absmotor}$ – Total [kW]	$Pot_{absmotor}$ – Redução [kW]
GMB's 02 e 03	1.022	$Pot_{absmotor} =$ 593,7 kW	$Pot_{absmotor} =$ 563,6 kW	---	$Pot_{absmotor}$ = 1.157,3 kW	$Pot_{absmotor} =$ 60,1 kW ↓
		$I = 882$ A	$I = 843$ A			
GMB's 02, 03 e 04	1.349	$Pot_{absmotor} =$ 592,7 kW	$Pot_{absmotor} =$ 544,1 kW	$Pot_{absmotor} =$ 529,0 kW	$Pot_{absmotor}$ = 1.665,8 kW	$Pot_{absmotor} =$ 47,7 kW ↓
		$I = 885$ A	$I = 802$ A	$I = 865$ A		

A diminuição da $Pot_{absmotor}$ do GMB número 03 é explicada pela curva característica da bomba, conforme Figura (3.3): na condição de dois equipamentos operando em paralelo, a AMT média operacional é de 82,05 m e na condição de três equipamentos operando em paralelo, a altura manométrica média é de 95,00 m. Ao se traçar esses valores de AMT na curva característica da bomba, no momento em que esse traço atinge o rotor de 20.3/8", as curvas de isorendimentos ditam valores de < 80 % e 83 % para as condições operacionais de 82,05 m e 95,00 m, respectivamente. No entanto, no momento em que esse mesmo traço é direcionado para um rotor de 19.15/16", os rendimentos do equipamento alcançam valores da ordem de 83 % e 86 % para a mesma condição de AMT.

Sendo assim, é possível afirmar que, com relação às análises individuais e em conjunto realizadas nos GMB's, fica claro que o que dizem os autores nos itens sequenciais

(a) e (b) são afirmativas bem condizentes aos CWSS's e que, muito antes de se definir ações estruturais nas instalações, é necessária a realização de estudos – diagnóstico hidroenergético. Isso porque simples medições nos indicam grandes oportunidades de melhorias energéticas sem a necessidade de nenhum investimento, conforme segue: (a) Cabrera et al. (2016), afirmam que até 10 % de economia podem ser alcançados com ações sem investimentos de operação da instalação no melhor BEP possível; e (b) Vilanova e Balestieri (2014) – a partir de dados obtidos em estudos de Gomes, (2009), Savar, Kozmar e Sutlovic (2009) e Kaya et al. (2008) – afirmam que os principais causadores da perda da eficiência energética dos conjuntos motobombas usados nos CWSS's, são entre outros fatores, a operação fora do ponto de máxima eficiência (BEP).

Após a realização da usinagem do rotor da bomba número 03 e o conserto da válvula de sucção do GMB número 01, novos ensaios em conjunto foram realizados nos equipamentos e, com isso, foi possível determinar-se sequenciamentos operacionais mais econômicos. Isso foi realizado baseado, por exemplo, no que diz Moreno et al. (2007), o qual concluiu o seu artigo defendendo a tese de que apenas a medição e o posterior gerenciamento das grandezas elétricas e hidráulicas da instalação com o conhecimento entre a maneira otimizada de acionamento dos conjuntos motobombas podem trazer reduções dos custos energéticos que, em sua análise, chegou a 16 %.

Com o intuito de se realizar um comparativo entre a $Pot_{absmotor}$ de todos os grupos em operação pela vazão total bombeada nessa mesma condição, foi estabelecido um índice que divide o somatório das $Pot_{absmotor}$ de todos os grupos em operação no instante analisado pela vazão instantânea na mesma condição operacional. Quanto menor for o valor desse índice para o sequenciamento estabelecido, mais eficiente é a combinação escolhida. A Tabela (5.5) apresenta os resultados de eficiência das combinações possíveis dos GMB's da EBAB-01.

Tabela (5.5) – Eficiência das combinações possíveis dos GMB's da EBAB-01.

	$Pot_{absmotor}$ – GMB 01 [kW]	$Pot_{absmotor}$ – GMB 02 [kW]	$Pot_{absmotor}$ – GMB 03 [kW]	$Pot_{absmotor}$ – GMB 04 [57 Hz] [kW]	$Pot_{absmotor}$ – Total [kW]	Q [L/s]	$\frac{Pot_{absmotor}}{Q}$ [KW s L ⁻¹]
DOIS EQUIPAMENTOS EM PARALELO							
GMB's 01 e 02	499,7	593,3	---	---	1.093,0	1.000	1,093
GMB's 01 e 03	497,0	---	569,7	---	1.066,7	1.015	1,051
GMB's 01 e 04	500,1	---	---	552,5	1.052,6	1.011	1,041
GMB's 02 e 03	---	593,7	563,6	---	1.157,3	1.022	1,132
GMB's 02 e 04	---	608,4	---	549,5	1.157,9	1.004	1,153
GMB's 03 e 04	---	---	569,1	554,0	1.123,1	1.021	1,100
TRÊS EQUIPAMENTOS EM PARALELO							
GMB's 01, 02 e 03	481,7	586,9	542,9	---	1.611,5	1.293	1,246
GMB's 01, 03 e 04	483,0	---	553,5	531,6	1.568,1	1.329	1,180
GMB's 02, 03 e 04	---	592,7	544,1	529,0	1.665,8	1.349	1,235
GMB's 01, 02 e 04	484,9	588,0	---	529,7	1.602,6	1.295	1,238

Conforme se pode observar na Tabela (5.5), quando da operação de dois grupos em paralelo, o sequenciamento mais eficiente é o do GMB 01 com o 04. Ao se fazer um comparativo com o sequenciamento menos eficiente (GMB 02 com o 04), no momento em que os GMB's 01 e 04 estão trabalhando em conjunto, é consumida 90 % da energia que o sequenciamento dos grupos 02 e 04 consumiriam para a mesma vazão. Já para a condição de três equipamentos operando em paralelo, a combinação mais eficiente é a dos conjuntos motobombas de números 01, 03 e 04, sendo a menos eficiente a combinação dos grupos 01, 02 e 03. Novamente, ao se realizar a mesma comparação executada para a condição de dois grupos em paralelo, na condição de três equipamentos, o sequenciamento dos grupos 01, 03 e 04 consome 95 % da energia que os grupos 01, 02 e 03 consumiriam para a mesma vazão bombeada.

5.4 COMPILAÇÃO DE INFORMAÇÕES OPERACIONAIS

Com o objetivo de avaliação das condições atuais da instalação, visando o conhecimento da maneira como ela é operada, sendo isso obtido através de históricos operacionais que resultam em indicadores de desempenho, bem como vislumbrando possíveis alterações das condições de operação da mesma visando economia energética/monetária, foi realizada a compilação de dados operacionais históricos da instalação. Dessa forma, no período de junho de 2017 a maio de 2018, a vazão dos conjuntos motobombas, dos níveis de

reservação dos reservatórios da ETA e do sequenciamento dos conjuntos motobombas acionados foram tabelados em 24 medições diárias.

Essas informações foram obtidas através dos dados de procedimentos operacionais da ETA (marcha de trabalho), onde o operador do turno anota os seguintes dados: vazão, obtida através de calha Parshall e medidor de vazão do tipo ultrassônico, localizado na entrada da ETA, que contempla a vazão de todos os conjuntos acionados na EBAB-01 e, portanto, das três adutoras; nível, obtido através de medições realizadas por um medidor de nível com sensor do tipo hidrostático, localizado na adutora de saída por gravidade dos reservatórios, sendo que, como os reservatórios são vaso-comunicantes, o nível indicado é representativo de todos eles; e sequenciamento dos grupos operativos, obtido através do registro em formulários específicos no momento em que houvesse alguma alteração dos conjuntos motobombas acionados na EBAB-01.

Na Tabela (5.6), são apresentados os dados referentes a essa análise operacional. Cabe ressaltar que de todas os dados obtidos, 1,24 % foram de valores não confiáveis (ilegíveis, erros e etc.) que, dessa maneira, não foram considerados na análise.

Tabela (5.6) – Dados operacionais (vazão, volumes produzidos, horas operacionais e sequenciamento de grupos) do sistema em análise.

	ERRO (1,24 %)	01 GMB (0,02 %)	02 GMB's (9,83 %)	03 GMB's (38,09 %)	04 GMB's (50,80 %)
Horas operacionais [h ano⁻¹]	109	2	862	3.340	4.454
Q [L/s] - média	1.297,0	464,0	936,0	1.218,0	1.421,0
Q [m³ h⁻¹] - média	86,0	1.670,0	3.369,0	4.386,0	5.115,0
Volume produzido [m³ ano⁻¹]	9.335,0	3.341,0	2.904.372,0	14.650.423,0	22.788.677,0

Os dados operacionais (vazão, nível e sequenciamento de grupos acionados) da instalação em estudo foram complementados pela compilação dos dados referentes ao consumo de energia elétrica. Dessa maneira, no mesmo período, anteriormente definido para análise, os dados referentes à utilização da energia elétrica foram agrupados. Na Tabela (5.7), são apresentados os dados referentes ao consumo de energia elétrica.

Tabela (5.7) – Dados relativos ao consumo de energia elétrica da EBAB-01.

MÊS	CONSUMO PONTA [kWh]		CONSUMO FORA PONTA [kWh]		Número Dias Faturados	kWh médio (FP+P / dias) [kWh dia ⁻¹]	Total Fatura [R\$]
	Quantidade [kWh]	Preço [R\$ kWh ⁻¹]	Quantidade [kWh]	Preço [R\$ kWh ⁻¹]			
Jun./17	122.727,00	0,468152	1.199.354,00	0,335370	30	44.069,37	654.526,34
Jul./17	129.019,00	0,462461	1.202.230,00	0,331293	30	44.374,97	619.039,19
Ago./17	125.227,00	0,464459	1.238.923,00	0,332725	31	44.004,84	655.794,38
Set./17	122.170,00	0,439781	1.253.352,00	0,315046	31	44.371,68	636.097,78
Out./17	121.169,00	0,439448	1.235.788,00	0,314807	32	42.404,91	616.697,12
Nov./17	111.453,00	0,442367	1.101.211,00	0,316898	29	41.816,00	584.484,92
Dez./17	126.898,00	0,445867	1.276.960,00	0,319406	29	48.408,90	684.438,23
Jan./18	122.893,00	0,563237	1.270.340,00	0,389907	33	42.219,18	755.279,66
Fev./18	125.749,00	0,614909	1.266.400,00	0,422707	30	46.404,97	791.540,95
Mar./18	136.919,00	0,604194	1.175.353,00	0,415342	28	46.866,86	747.412,35
Abr./18	130.499,00	0,614735	1.236.078,00	0,422588	30	45.552,57	753.014,38
Mai./18	119.610,00	0,586354	1.306.772,00	0,403078	32	44.574,44	773.536,19
Total	1.494.333,00	---	14.762.761,00	---	---	---	8.271.861,49

5.5 DETERMINAÇÃO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO

Com a compilação dos dados operacionais: vazão, nível e sequenciamento de grupos acionados, bem como dados relativos ao consumo de energia elétrica e, também, com a realização dos ensaios de campo, foi possível a determinação dos indicadores de desempenho. Conforme anteriormente definido, a obtenção desses índices depende de estudos que, em muitos casos, não são de conhecimento dos gestores dos sistemas de abastecimento de água e a finalidade deles é demonstrar aos gerenciadores de sistemas complexos, indicadores que possam quantificar/qualificar o estado operacional/financeiro da instalação em estudo. Na Tabela (5.8), são apresentados os resultados dos indicadores utilizados na análise.

Tabela (5.8) – Indicadores de desempenho do sistema em análise – resumo.

<i>Ph4</i> [%]	<i>SEC</i> [kWh m ⁻³]	<i>Ph5</i> [kWh m ⁻³ 100 m ⁻¹]	<i>SEC_L</i> [kWh m ⁻³ km ⁻¹]	<i>SEC_{Δt}</i> [kWh m ⁻³ km ⁻¹]	<i>Ph6</i> [%]	<i>CMEE</i> [R\$ MWh ⁻¹]	<i>CMEE_{mc}</i> [R\$ 1.000 m ⁻³]
100	0,403	0,406	0,078	02 GMB's » 0,019 03 GMB's » 0,027 04 GMB's » 0,032 Médio » 0,029	0,052	508,82	204,97

Na avaliação dos indicadores de desempenho propostos, deve-se levar em consideração as seguintes informações:

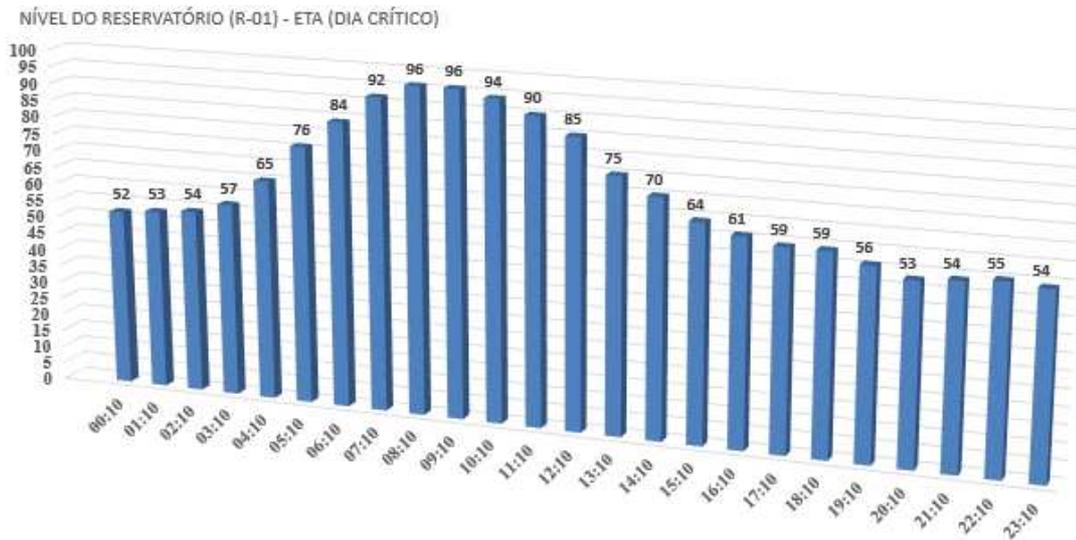
1) De acordo com Alegre et al (2004), na determinação do indicador “Utilização da Capacidade de Bombeamento – $Ph4$ ”, o cálculo é realizado pelo somatório para todos os grupos motobombas instalados (número de horas de funcionamento no dia de maior consumo energético durante o período de referência multiplicado pela potência nominal), que resulta no numerador do índice em análise, dividido pela potência nominal de bombeamento da instalação multiplicada por vinte e quatro horas, que resulta no denominador. A quantidade de horas de funcionamento dos grupos motobombas no dia de maior consumo é perfeitamente possível de se obter em função dos históricos operacionais, que no período em análise, foi em 11/03/2018 (24 horas com quatro equipamentos operando em paralelo), no entanto, com relação às potências nominais, devem-se ser realizadas algumas observações:

- Se for levado em consideração, na determinação do indicador de desempenho, fielmente, a potência nominal de cada grupo motobomba, ter-se-ia uma potência, por motor elétrico, de 750 hp (≈ 560 kW) para todos os cinco conjuntos motobombas instalados. No entanto, todos os equipamentos possuem diferentes diâmetros de rotores (o que impacta em diferentes valores de $Pot_{absmotor}$ para cada conjunto motobomba) e, inclusive, o grupo de número 04 opera, no máximo, em 54 Hz, quando do sequenciamento de quatro equipamentos operativos em paralelo, em função da ETA não possuir capacidade de tratamento muito superior aos 1.500,00 L/s, o que seria obtido se o grupo que possui conversor de frequência operasse em 60 Hz. Dessa maneira, como forma de se ter um cálculo com variáveis muito mais representativas da realidade, a potência a ser utilizada, ao invés da nominal, foi a estabelecida através de medições das grandezas elétricas em cada um dos grupos da instalação em análise, na condição de quatro grupos em paralelo. A potência total medida nessa condição resultou em 2.085,4 kW, ao qual como média, chega-se ao valor de 521,4 kW de potência por conjunto motobomba.
- No momento de realização das medições operacionais, o nível do manancial estava na marcação média de 2,82 m de profundidade. Essa condição é muito próxima da média anual do nível do rio, obtida no mesmo período em análise, que é de 2,57 m. Portanto, o impacto da variação do nível do manancial sobre a $Pot_{absmotor}$ dos conjuntos motobombas, onde a potência elétrica absorvida pelos conjuntos motobombas aumenta na condição de maior nível do rio, pois a carga da bomba diminui, em função

de se ter maior carga disponível na sucção e, ao contrário, na condição de menor nível do manancial, a carga da bomba aumenta, em função da menor carga disponível na sucção, é avaliada de uma maneira média satisfatória, bem representativa da realidade medida em campo. Como não foi possível realizar a medição operacional do grupo motobomba de número 05, pois ele estava em manutenção, mas levando em consideração que as vazões com o uso desse equipamento se mantêm próximas às medidas com os conjuntos de número 01 a 04 trabalhando em paralelo, será assumida a $Pot_{absmotor}$ como sendo, em média, também, 521,4 kW para o conjunto de número 05.

O valor obtido para o indicador $Ph4$, de 100 % no dia 11/03/2018 (domingo), apesar de parecer representar que o sistema se encontra praticamente em colapso, na verdade, é um indicativo de uma margem de trabalho possível para redução dos gastos energéticos via estabelecimento de procedimentos operacionais adequados. Segundo Vilanova e Balestiere (2015a), nesse indicador pode-se perceber que os conjuntos motobombas estão superdimensionados, com operação deficiente ou com baixa capacidade de armazenamento. Se forem avaliados os valores apresentados na Figura (5.2), referente aos dados operacionais do dia em análise, pode-se perceber que às 00h e 10min. a reservação na ETA estava em 52 % da capacidade e, às 23h e 10min. desse mesmo dia atingiu os 54 %.

Durante o dia, o nível do reservatório da ETA se manteve sempre acima dos 52 %, atingindo 96 % às 08h e 10min. e, mesmo assim, em nenhum momento houve o desacionamento de algum conjunto motobomba com o intuito de utilizar a capacidade de reservação existente, diminuindo o consumo energético. Dessa maneira, fica evidenciado que é bem possível a diminuição de consumo energético por meio de escolha de melhores procedimentos operacionais, pois, mesmo no dia mais crítico ao consumo, o nível de reservação na ETA não foi menor que a metade da sua capacidade de reservação.

Figura (5.2) – Indicador de desempenho *Ph4* da EBAB-01 – dia crítico.

2) O Consumo Específico de Energia Elétrica, *SEC*, foi obtido pela divisão do consumo total de energia elétrica para bombeamento no período entre junho de 2017 a maio de 2018 (horário de ponta somado ao fora de ponta), que representa o numerador e que resultou em $16.257,09 \cdot 10^3 \text{ kWh ano}^{-1}$, pelo volume anual de água disponível para consumo no mesmo período, que totalizou $40.356,15 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$ e representa o denominador.

Segundo Vilanova e Balestiere (2015b), $0,862 \pm 0,046 \text{ kWh m}^{-3}$ é a média *SEC* dos WSS's brasileiros, sendo que segundo esses mesmos autores, esse valor é muito maior que os apresentados pela *United Nations World Water Assessment Programme (UNWWAP)*, ao qual estabelecem em $0,37 \text{ kWh m}^{-3}$ e $0,48 \text{ kWh m}^{-3}$ o valor de *SEC* para captação superficial e subterrânea, respectivamente. O valor do indicador *SEC* encontrado para a instalação em análise de $0,403 \text{ kWh m}^{-3}$ é 46,75 % da média apresentada por Vilanova e Balestiere (2015b) para os municípios brasileiros e 8,92 % maior do que os valores apresentados pela UNWWAP. Levando em consideração os valores nacionais apresentados por Vilanova e Balestiere (2015b), a instalação em análise apresenta um valor de indicador de desempenho “*SEC*” satisfatório frente às características dos WSS's brasileiros.

No entanto, cabe ressaltar que a análise do indicador *SEC* com os valores de consumo de energia elétrica apenas da EBAB-01 é satisfatória para o município “A”, que possui mais de 80 % de sua distribuição via gravidade e quase nenhuma instalação posterior que impacte significativamente no consumo energético. Já para o abastecimento do município “B”, o

montante de energia elétrica utilizada é bem superior, visto que, a água tratada deve ser bombeada da ETA para esse município via instalações que, somadas, consomem quantias de energia elétrica próximas aos 50 % do consumo da EBAB-01. Sendo assim, o valor do indicador *SEC* para o município “B” é bem maior do que o até aqui apresentado. Portanto, necessário que, futuramente, a análise seja estendida a todas as instalações do sistema de abastecimento de água, de maneira que sejam encontrados valores mais reais de indicadores *SEC* ao objeto de estudo.

3) Na determinação do indicador “Consumo Específico de Energia Elétrica Normalizado – *Ph5*”, o numerador é o mesmo obtido no indicador “*SEC*”, no entanto, o denominador foi determinado da seguinte maneira:

- Como de dois a quatro equipamentos operam de maneira paralela na instalação e cada um deles apresenta uma altura manométrica diferente, que depende das configurações assumidas de sequenciamento de grupos operativos, o denominador do índice em análise foi obtido pelo somatório das seguintes parcelas: volume bombeado no período para dois equipamentos em paralelo ($2.904,37 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$) multiplicado pela altura manométrica média da condição de dois equipamentos em paralelo (82,05 m); volume bombeado no período para três equipamentos em paralelo ($14.650,42 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$) multiplicado pela altura manométrica média da condição de três equipamentos em paralelo (95,0 m); e o volume bombeado no período para quatro equipamentos em paralelo ($22.788,68 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$) multiplicado pela altura manométrica média da condição de quatro equipamentos em paralelo (104,07 m). Após isso, o somatório encontrado foi dividido por 100 m, visto ser essa a característica do indicador em análise, comparação com relação a uma altura manométrica de 100 m. Esse cálculo resultou no denominador do indicador em análise.

Segundo Gomes (2012), esse indicador pode ser entendido como a quantidade média de energia consumida por 1 m^3 de fluido a uma altura manométrica de 100 m. Utilizando a mesma metodologia exemplificada no item relativo às definições do indicador *Ph5* onde, por exemplo, se em $0,4 \text{ kWh m}^{-3} \cdot 100 \text{ m}^{-1}$ a eficiência média de bombeamento encontrada foi de 68 % então com o valor encontrado de $0,406 \text{ kWh m}^{-3} \cdot 100 \text{ m}^{-1}$ o valor ficou em:

$$\left(\frac{9.810 \text{ N } 100 \text{ m}}{3.600 \frac{\text{J}}{\text{Wh}} 406 \text{ Wh}} \right) 100 = 67,12 \%$$

De acordo com Gomes (2012), como referência, o indicador *Ph5* é, normalmente, da ordem de $0,5 \text{ kWh m}^{-3} \cdot 100 \text{ m}^{-1}$, o que resulta em uma eficiência média de bombeamento de 54 %. Com o valor encontrado de 67,12 % para a instalação em análise, tem-se um bom

resultado quanto à análise da eficiência dos conjuntos motobombas e, conseqüentemente, ao indicador *Ph5*.

4) Com relação à determinação do indicador “Consumo Específico de Energia Elétrica por Comprimento de Adutora – SEC_L ”, o numerador deve ser obtido através da potência útil da instalação. Como de dois a quatro equipamentos operam de maneira paralela no sistema e cada uma das bombas apresenta uma eficiência diferente em função da altura manométrica momentânea no ponto operacional, foi necessário se encontrar um valor médio de rendimento da instalação desde a chegada da energia elétrica até a entrega da energia mecânica ao fluido. O rendimento utilizado como médio foi o valor de 67,12 % encontrado no indicador *Ph5*. O numerador foi obtido, portanto, da multiplicação do consumo de energia elétrica no período ($16.257,09 \cdot 10^3 \text{ kWh ano}^{-1}$) pelo rendimento da instalação. O denominador foi obtido pela multiplicação do volume anual de água disponível para consumo no período, que totalizou $40.356,15 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$ pelo comprimento da adutora. Como o sistema possui três adutoras em paralelo, que percorrem trajetos praticamente iguais, sendo o comprimento e o diâmetro de cada uma, respectivamente, 3,48 km e 600 mm, deve-se obter um sistema equivalente para a análise do indicador. Utilizando-se a Equação (3.38), o diâmetro equivalente da tubulação em análise será de 0,9312 m e o comprimento equivalente será o mesmo das três adutoras em paralelo, ou seja, 3,48 km. O resultado encontrado para o indicador SEC_L foi de $0,078 \text{ kWh m}^{-3} \text{ km}^{-1}$, que resulta em $0,271 \text{ kWh m}^{-3}$ ao longo dos 3,48 km de adutoras, sendo que, de acordo com Alegre et al (2004), o valor mínimo teórico, correspondente a rendimentos do motor e da bomba de 100 %, é de $0,27 \text{ kWh m}^{-3}$, ratificando os valores encontrados para os indicadores *Ph5* e SEC_L .

5) Já em relação ao indicador “Consumo Específico de Energia Elétrica por Comprimento de Adutora, com Relação às Perdas de Carga – $SEC_{\Delta h}$ ”, para obtenção desse, o valor obtido no indicador “ SEC_L ” foi multiplicado por um termo que desmembra a perda de carga: $\left(1 - \frac{\text{Desnível geométrico [m]}}{\text{Altura manométrica [m]}}\right)$. Como o sistema opera com dois a quatro equipamentos em paralelo, é importante que o impacto da perda de carga seja conhecido para a média dos sequenciamentos operacionais, bem como para todas as condições operacionais de sequenciamento de grupos. Na Tabela (5.9) esses dados são demonstrados.

Tabela (5.9) – Indicador de desempenho $SEC_{\Delta h}$ da EBAB-01.

Sequenciamento dos grupos motobombas	AMT média [m]	Desnível geométrico [m]	Volume produzido no período [10^3 m^3]	Tempo operacional no período [%]	$SEC_{\Delta h}$ (sequenciamento) [$\text{kWh m}^{-3} \text{ km}^{-1}$]	Acréscimo da perda de carga em função do acionamento de mais 1 GMB [%]
2 grupos	82,05	61,8	2.904,372	9,83	0,019	---
3 grupos	95,00		14.650,423	38,09	0,027	13,63 ↑
4 grupos	104,07		22.788,677	50,80	0,032	8,72 ↑
Média ponderada	---		---	---	0,029	---

O valor médio encontrado para o indicador $SEC_{\Delta h}$ ($0,029 \text{ kWh m}^{-3} \text{ km}^{-1}$) comparado ao SEC_L ($0,078 \text{ kWh m}^{-3} \text{ km}^{-1}$) e aos tempos operacionais no período de cada sequenciamento de GMB's indica que 37,18 % da energia útil do sistema (a partir da saída da descarga das bombas) é consumida, em média, para vencer as perdas de carga. Se o sistema operasse mais, por exemplo, com três grupos em paralelo em vez de quatro, durante esse período, a energia consumida em perdas de carga teria uma queda de 8,72 %.

6) O indicador “Consumo de Energia Elétrica Reativa – $Ph6$ ” foi obtido pela divisão entre o somatório da energia reativa excedente no horário de ponta e fora de ponta dentro do período anual em análise ($8,44 \cdot 10^3 \text{ kVArh}$), que resulta no numerador do índice, pelo consumo total de energia elétrica para bombeamento no mesmo período (horário de ponta somado ao fora de ponta), que representa o denominador e que resultou em $16.257,09 \cdot 10^3 \text{ kWh}$. Essa divisão resultou em 0,052 %, sendo esse valor perfeitamente aceitável para o sistema em análise.

7) Na determinação dos indicadores “Custo Médio de Energia Elétrica – $CMEE$ ” e “Custo Médio de Energia Elétrica por Metro Cúbico Bombeado – $CMEE_{mc}$ ” as parcelas referentes ao consumo, demanda, multas por baixo fator de potência e/ou ultrapassagem de demanda, impostos e etc., que compõem a fatura da energia elétrica, no período em análise, resultaram em R\$ 8.271.861,49, que formaram o numerador dos indicadores. Ao se dividir pelo consumo de energia elétrica no mesmo período em análise (horário de ponta somado ao fora de ponta), que representa o denominador e que resultou em $16.257,09 \text{ MWh}$, foi obtido o resultado de $508,82 \text{ R\$ MWh}^{-1}$, que representa o indicador “ $CMEE$ ”. Já ao se dividir o mesmo numerador pelo volume bombeado no período ($40.356,15 \cdot 10^3 \text{ m}^3$), dividido por 1.000 m^3 , chega-se ao indicador “ $CMEE_{mc}$ ”, cujo resultado é $204,97 \text{ R\$ } 1.000 \text{ m}^{-3}$.

5.6 AVALIAÇÃO DA CAVITAÇÃO E VELOCIDADES OPERACIONAIS

A partir das medições operacionais realizadas, foi possível definir se uma ou mais bombas trabalham sob condição eventual de cavitação, bem como se as velocidades do fluido dentro das tubulações estão de acordo com o que dizem as normas e/ou recomendações operacionais. De acordo com Mattos e Falco (1998), para o caso de bombas iguais com curvas estáveis e possibilidade de operação em paralelo, o $NPSH_d$ será menor e $NPSH_r$ maior para a situação de bomba operando sozinha. Ou seja, quanto maior for a vazão da bomba em operação, maior é a possibilidade de ocorrer cavitação. Essa informação é corroborada pela curva característica da bomba em análise, Figura (3.3), onde o valor do $NPSH_r$ aumenta de maneira acentuada em função da vazão operacional do equipamento.

Como em nenhum momento ocorre de a condição operacional ser a de apenas uma bomba em operação, a análise foi definida para ser realizada com o sequenciamento de dois grupos operando em paralelo. Se nessa condição não fosse evidenciada a possibilidade de cavitação, então se assumiria que no sequenciamento de três e quatro equipamentos operando em paralelo, não haveria, também, cavitação. Já, se porventura, fosse evidenciada a presença/possibilidade de cavitação no sequenciamento de dois grupos em paralelo, a análise seria estendida para as outras duas condições operacionais de sequenciamento de grupos (três e/ou quatro equipamentos em paralelo).

Nesse primeiro momento, a análise das bombas número 01 e 05 não foram realizadas, pois a última encontra-se fora de operação – em manutenção – e a primeira apresentou falha na válvula de sucção, conforme ilustrado na Figura (5.1), o que não permitiu que se definisse, com absoluta certeza, que a bomba 01 não estivesse cavitando em momento algum, visto que, o manovacuômetro alcançou o fundo de escala, podendo a pressão manométrica, em realidade, ser diferente dos -5,0 m possíveis de serem visualizados no instante analisado. Mas, como a válvula de sucção foi consertada, o tamanho do rotor da bomba 01 é o menor de todos os grupos em operação (19.3/16”), frente aos diâmetros de 20” (bomba 02); 20.3/8” (bomba 3) e 20.1/4” (bomba 4); como as principais características dos equipamentos são iguais: mesmas bombas, mesmas tubulações e acessórios na sucção e, finalmente, como a vazão da bomba 01 é a menor de todos os equipamentos em análise – menor rotor –, a avaliação dos grupos 02, 03 e 04 nos forneceu uma boa ideia se a bomba 01 cavita ou não. Semelhantemente à análise da bomba 01, a bomba 05 foi avaliada, considerando-se um rotor a ser instalado menor que os das bombas 02, 03 e 04, o que foi satisfatório, portanto, para a análise aplicada.

O valor do $NPSH_d$, referente ao sistema, foi calculado via Equação (3.40). Nesse caso, o resultado definido para o termo P_{fs} foi a média dos valores medidos individualmente, obtida via sequenciamento dos grupos (dois a dois) que, excluindo as bombas 01 e 05, ficou em 0,0 m. O valor do termo V_{fs} é obtido através da Equação (3.30), sendo o valor do diâmetro do flange de sucção das bombas " D_{fs} " igual 0,3556 m e o valor da vazão volumétrica " Q ", obtido via valor instantâneo da vazão total dividido por dois, pois se está trabalhando com dois equipamentos em paralelo. Como resultado da Equação (3.30), " V_{fs} " teve como média o valor de $5,02 \text{ m s}^{-1}$.

A instalação está à altura geométrica de -0,4 m, onde a pressão atmosférica local " P_a " pode ser considerada como sendo 101.325 Pa e a temperatura do fluido de trabalho no momento da medição foi assumida em 20°C , onde, dessa maneira, o peso específico da água " γ " pôde ser considerado como sendo 9.810 N m^{-3} . Finalmente, a pressão de vapor na temperatura de trabalho " P_v " foi assumida como sendo a da água à 20°C (2.294,76 Pa). O resultado encontrado para $NPSH_d$ médio é representativo da carga no flange de sucção de cada uma das bombas, cujo valor ficou em 11,37 m.

Como a AMT média para a condição operacional de dois conjuntos motobombas apresentou um resultado de 82,05 m, ao se inserir esse valor na curva característica das bombas, no momento em que a AMT média atinge os diâmetros dos rotores dos grupos 02, 03 e 04, obtém-se valores de 10,2 m; 11,0 m e 10,6 m, respectivamente, para os valores de $NPSH_r$, indicando, portanto, ausência de cavitação na instalação em análise, no instante observado, visto que esses valores são todos menores que $NPSH_d$ (11,37 m).

No entanto, segundo Tsutiya (2014), a recomendação para o $NPSH_d$ é de 0,5 m ou 20 % de diferença, podendo chegar até a 1,5 m ou 35 %. Já Mattos e Falco (1998) recomendam uma diferença de 0,6 m como aceitável. Dessa forma, a bomba 03 estava com uma margem muito estreita para trabalho sem cavitação, pois a diferença entre a carga disponível e a requerida era de apenas 0,37 m na condição analisada. No entanto, como foi realizada a usinagem do rotor da bomba 03, do valor de 20.3/8" para 19.15/16" e a bomba número 02 apresenta um $NPSH_r$ de 10,2 m utilizando um rotor de 20", quanto à cavitação, as bombas possuem valores aceitáveis frente às recomendações técnicas.

Já com relação à análise realizada frente às velocidades do fluido dentro das tubulações de sucção e recalque, foi observada uma falha de concepção do sistema. As velocidades foram avaliadas frente às medições médias operacionais de vazão, bem como o sequenciamento de grupos motobombas e, assumindo os valores dos diâmetros nominais das

tubulações de sucção e recalque como sendo 0,4 m e 0,6 m, respectivamente, a Tabela (5.10) surgiu evidenciando valores elevados de velocidade nas tubulações de sucção das bombas.

Tabela (5.10) – Velocidades de sucção e recalque bombas EBAB-01.

Sequenciamento GMB's	Q média [m ³ s ⁻¹]	Velocidade média tubulação sucção – 400 mm [m s ⁻¹]	Velocidade média tubulação recalque – 600 mm [m s ⁻¹]
02 grupos	0,998	3,97	1,18
03 grupos	1,300	3,45	1,53
04 grupos	1,515	3,01	1,79

Conforme anteriormente estabelecido, os valores definidos como sendo econômicos/seguros pelas normas e/ou recomendações são variados e oscilam dentro das seguintes faixas: de acordo com Telles e Barros (1998), as velocidades recomendadas para tubulações que trabalham com água doce e tubos de aço carbono, em cidades, devem ser de 1,0 a 2,0 m s⁻¹ e para a sucção de bombas as velocidades devem estar entre 1,0 e 1,5 m s⁻¹; já para Tsutiya (2014), a velocidade econômica em adutoras de recalque tem sido normalmente empregada entre valores de 1,0 a 1,5 m s⁻¹; De acordo com a NBR 12218 (1994), a velocidade de dimensionamento de condutos deve estar em valores entre 0,6 m s⁻¹ (mínimo) e 3,5 m s⁻¹ (máximo).

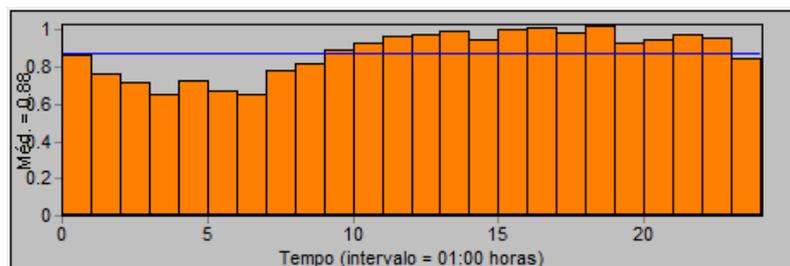
Conforme se pode observar, os valores operacionais de velocidade nas tubulações de sucção estão extremamente elevados. Isso impacta em se ter um aumento quadrático da perda de carga distribuída ou normal na tubulação de sucção – Equação (3.4) – e da localizada – Equação (3.10) – e, com isso, o valor do $NPSH_d$ do sistema diminui no flange de sucção de cada uma das bombas. Dessa maneira, faz-se necessário realizar a substituição das tubulações de sucção dos cinco conjuntos motobombas, que atualmente possuem o diâmetro de 0,4 m, por outras, cujo diâmetro faça com que as velocidades fiquem com valores máximos de 1,5 m s⁻¹ para a condição mais crítica operacional, que é a de dois equipamentos operando em paralelo. Ao se substituir as cinco sucções das bombas por tubulações e acessórios de 700 mm, a velocidade, na pior condição operacional, ficará em 1,3 m s⁻¹, sendo que esse valor irá decrescer continuamente, chegando a 0,98 m s⁻¹ na melhor condição operacional (quatro equipamentos operando em paralelo), que é, ainda, bem acima dos 0,6 m s⁻¹ estabelecidos pela NBR 12218 (1994) como valor mínimo.

5.7 DEFINIÇÃO DO MODELO E SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS PARA ANÁLISE TARIFÁRIA

Com a compilação das informações operacionais de vazão, nível de reservatórios, sequenciamento de grupos acionados, bem como com a definição das curvas características das bombas e das características técnicas das tubulações e acessórios de tubulação, foi possível construir um modelo no *software* EPANET com o objetivo de simulação de cenários. Primeiramente, com os dados operacionais colhidos de hora em hora pelos operadores do sistema, foi possível a criação de padrões de consumo onde, por exemplo, a estação do ano referente ao período do verão teve os valores dos dias da semana agrupados (todas os valores referentes às segundas-feiras, por exemplo) e isso permitiu a geração de um padrão de consumo médio.

Como a ETA não é macromedida em sua saída, o consumo do sistema foi estimado em relação à vazão bombeada pela EBAB-01 e à variação do nível do reservatório R-01. Dessa forma, por exemplo, se em um período de uma hora quatro equipamentos estiveram acionados na EBAB-01, o que impacta em um bombeamento real de 1.515,00 L/s (aproximadamente $5.400 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$), e, nesse mesmo período, houve uma queda de 10 % no nível do reservatório, que possui a capacidade de 16.000 m^3 , então o consumo do sistema nessa uma hora foi de 5.400 m^3 , referente ao bombeamento, somados aos 1.600 m^3 , que são relacionados à queda do nível de reservação, o que resulta, aproximadamente, em 7.000 m^3 de água consumida pelas duas cidades. A Figura (5.3) exemplifica o que foi realizado para cada dia da semana e estação do ano analisada. Os restantes dos padrões de consumo são mostrados nos Apêndices (05) ao (08).

Figura (5.3) – Exemplificação padrão de consumo (segundas-feiras, verão).



Fonte: obtido através do software EPANET 2.0.

Após a definição dos padrões de consumo, foi realizada a construção de um modelo do sistema. Em um primeiro momento, o modelo foi gerado com as principais características técnicas das tubulações e acessórios de tubulação conforme Tabela (5.3). No entanto, como esse primeiro modelo tinha como objetivo simular o comportamento real mais próximo possível do sistema frente, apenas, à vazão produzida, com o intuito de simulação de cenários, as curvas das bombas utilizadas foram as obtidas via ensaios de desempenho e a calibração ocorreu com ajustes de perdas de carga distribuídas de maneira que a vazão bombeada pela EBAB-01 ficasse a mais próxima possível da real medida.

Foi considerado, também, que nesse primeiro modelo, as manutenções/melhorias executadas nos GMB's 01 e 03 não estariam ainda efetivadas, fato que fez com que fosse mantido o rotor de 20.3/8" na bomba 03, bem como a válvula estrangulada na sucção do GMB número 01. Essa condição foi simulada através do acréscimo de perdas de carga distribuídas na tubulação de sucção até que fossem atingidos os respectivos valores reais de pressão manométrica negativa na sucção, condizentes com os valores reais medidos nos diferentes sequenciamentos de grupos testados.

No modelo construído foi estabelecido o método de *Hazen-Williams* para o cálculo das perdas de carga. Ao se realizar o comparativo entre as medições obtidas no campo e as geradas pela simulação, a maior diferença entre a vazão real e a simulada foi de - 0,19 % e, com relação à pressão estática, a maior diferença foi de -1,88 %, o que é representativo de um modelo relativamente bem calibrado.

5.7.1 Análise da Modalidade Tarifária

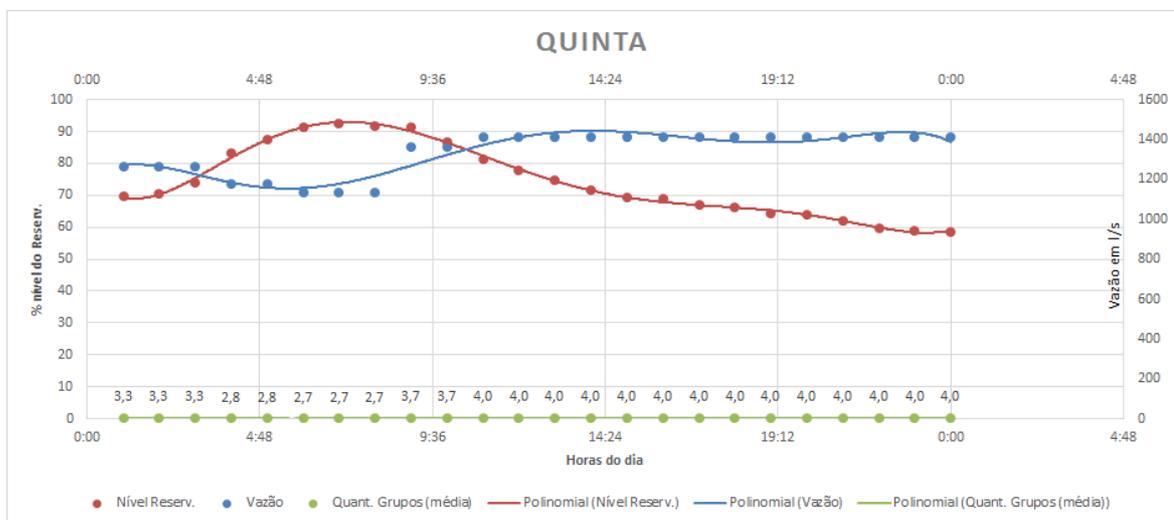
Com a criação do primeiro modelo em *software*, foi possível a definição de cenários que possam resultar em diminuição dos valores pagos à companhia de distribuição de energia elétrica, frente ao estabelecido na resolução normativa n° 414, de 09 de setembro de 2010, da ANEEL. Isso pode ser realizado, especificamente, por meio de duas alternativas: contratação de nova modalidade tarifária e/ou diminuição do número de conjuntos motobombas acionados durante o horário de ponta (com ou sem alterações da demanda contratada).

Para que seja possível a realização dessa análise, primeiramente, estabeleceu-se o período mais crítico ao sistema, sendo que esse foi definido a partir dos seguintes critérios: mês que teve a maior produção média diária de água; conjuntamente, que teve a menor reservação média mensal de água na ETA, reservatório R-01 – o que impacta, assim, em maior quantidade de água consumida pelo sistema. Além disso, esse mês foi o que teve a

menor reservação média mensal na ETA no início do horário de ponta e a menor reservação média mensal no final do horário de ponta. Dentro desses índices estabelecidos, o mês classificado como crítico e que foi utilizado para o restante das análises é o de abril de 2018.

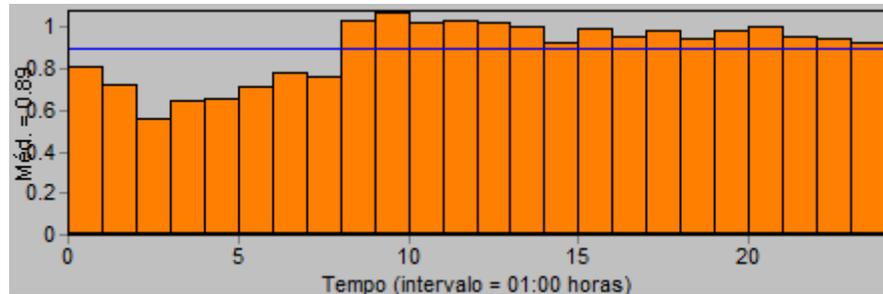
Após a análise mensal, essa foi estendida para a compilação de dados referentes aos dias, o que fez com que, por exemplo, todas as segundas-feiras tenham sido agrupadas e analisadas de maneira a se obter uma curva de carga do reservatório R-01 que contemple, também, as médias horárias das vazões da estação de água bruta e os grupos acionados na EBAB-01. Dentro dessa análise semanal, o dia considerado crítico ao abastecimento, em função de critérios similares aplicados à análise mensal, foi o sábado, seguido pelo domingo. Como o horário de ponta, conforme a resolução da ANEEL, é aplicado apenas aos dias da semana, excetuando-se sábados, domingos e os feriados nacionais, a análise foi concentrada no período de segunda-feira à sexta-feira, resultando no dia tipicamente mais crítico, a quinta-feira, que é representada na Figura (5.4).

Figura (5.4) – Dia crítico da instalação em estudo – análise tarifária.



A partir dessas informações, foi estabelecido o padrão de consumo do dia analisado, as quintas-feiras de abril de 2018, que está representado na Figura (5.5).

Figura (5.5) – Padrão de consumo do dia crítico da instalação em estudo – análise tarifária.



Fonte: obtido através do software EPANET 2.0.

Com relação ao enquadramento tarifário, a instalação em estudo pertence à classe serviço público (água, esgoto e saneamento), grupo A e subgrupo A4, sendo que ela está classificada na modalidade tarifária horária azul, a qual tem como característica a possibilidade de uma demanda contratada para o horário de ponta e outra para o horário fora de ponta. Apesar de a instalação estar enquadrada na modalidade tarifária horária azul, a demanda contratada no horário de ponta é igual à do horário fora de ponta: 2.150 kW. A Figura (5.6) demonstra as tarifas praticadas pela distribuidora de energia para a demanda e a energia.

Figura (5.6) – Tarifas do Grupo A, vigentes a partir de 21/12/2017, em R\$ sem impostos.

			A1 (230 kV)	A2 (138 kV)	A3 (69 kV)	A4 (13,8/25 kV)	A5 (220/217 V)
Modalidade Tarifária Horária Azul	Demanda Ponta	R\$/kW	6,07	17,55	17,09	41,94	54,59
	Demanda Fora Ponta	R\$/kW	6,19	14,76	10,99	20,21	15,83
	Energia Ponta	R\$/kWh	0,446810	0,455660	0,456830	0,466200	0,482980
	Energia Fora Ponta	R\$/kWh	0,301090	0,309940	0,311110	0,320480	0,337260
			A4 (13,8/25 kV)	A5 (220/217 V)			
Modalidade Tarifária Horária Verde	Demanda	R\$/kW	20,21	15,83			
	Energia Ponta	R\$/kWh	1,483610	1,807560			
	Energia Fora Ponta	R\$/kWh	0,320480	0,332760			

Fonte: CEEE, conforme Resolução Homologatória ANEEL no. 2.361/2017.

5.7.1.1 Definição dos Possíveis Cenários

A proposta foi realizar simulações de maneira a se verificar os seguintes cenários:

- 1) Possibilidade de desligamento de um ou mais conjuntos motobombas na EBAB-01 durante o horário de ponta (18h00min às 21h00min – aplicável ao período fora do horário de verão brasileiro), mantendo os valores das demandas contratadas no horário de ponta e fora de ponta. Para realizar essa simulação, foi aplicado o padrão de consumo definido na Figura (5.5), assumindo que o nível do reservatório R-01 iniciaria o dia mais crítico (quintas-feiras) às 00h00min com 40 % de reservação e que atingiria, no mínimo, o mesmo patamar às 23h59min. No horário de ponta, primeiramente, o conjunto motobomba número 04 foi desacionado, permanecendo sempre acionados os de números 01 a 03. Caso o nível do reservatório R-01 terminasse o dia acima dos 40 %, seria realizada uma nova simulação desacionando mais um conjunto motobomba (número 03) e seria avaliado se a reservação permaneceria ainda acima dos 40 % às 23h59min.
- 2) Possibilidade de mudança da demanda contratada, sendo aplicada a mesma lógica do item “1)”. Com isso, ela poderia ser diminuída para 1.750 kW (3 grupos acionados no horário de ponta) ou até mesmo 1.250 kW (2 grupos acionados no horário de ponta). Nesse caso, não existe mais a possibilidade de acionamento de quatro equipamentos durante o período de ponta, devido às multas aplicáveis em função das ultrapassagens de demanda contratada para o período. De acordo com o Seção II, Art. 93, da resolução normativa nº 414, de 09 de setembro de 2010, da ANEEL, as multas aplicáveis são definidas como a diferença entre o valor contratado e o medido, multiplicadas por um fator de duas vezes o valor de referência equivalente às tarifas de demanda de potência aplicadas, sendo que:

quando os montantes de demanda de potência ativa ou de uso do sistema de distribuição medidos excederem em mais de 5% (cinco por cento) os valores contratados, deve ser adicionada ao faturamento regular a cobrança pela ultrapassagem (ANEEL, 2010, p. 69).
- 3) Possibilidade de modificação do enquadramento tarifário da instalação (de azul para verde), mantendo-se a mesma demanda contratada na ponta e fora de ponta: 2.150 kW. Isso impactaria em uma grande redução sobre os valores pagos pela demanda. No entanto, os valores pagos pelo consumo da energia irão aumentar em 318 % no horário de ponta, conforme Figura (5.6), em função dessa modalidade ser mais vantajosa, no horário de ponta, nos valores relativos à demanda e muito mais onerosa na questão do consumo.

5.7.1.2 Simulação dos Cenários – Análise Tarifária

Foi realizada a primeira simulação com o desacionamento de apenas o grupo motobomba de número 04 no período de ponta, que é entre 18h00min e 21h00min. Conforme a Figura (5.4), no dia crítico analisado, no período entre as 00h00min e as 11h00min, em média, 3,1 grupos permanecem acionados na EBAB-01 e, no período entre as 11h00min e as 23h59min, em média, quatro equipamentos permanecem ligados na mesma instalação. A reservação do R-01, em média, inicia o dia com 70 % e finaliza, em média, com 60 %.

Com a proposta de desligamento de apenas um conjunto motobomba no horário de ponta, o período médio de permanência de quatro grupos acionados na estação elevatória de água bruta aumentará de 13 horas para 21 horas e o de permanência de apenas três grupos acionados na EBAB-01 diminuirá de, aproximadamente, 11 horas para 3 horas. Para realização dessa primeira simulação proposta, foram estabelecidos os comandos (RULE 1 e RULE 2), conforme Tabela (5.11).

Tabela (5.11) – Comandos *software* EPANET 2.0 para controle dos grupos motobombas.

Número da regra	Comando	Descrição do comando
RULE 1	IF SYSTEM CLOCKTIME <= 9 PM AND SYSTEM CLOCKTIME >= 6 PM THEN PUMP GMB04 STATUS IS CLOSED	Desliga o grupo motobomba número 04 no horário compreendido entre às 18h00min e às 21h00min (horário de ponta).
RULE 2	IF SYSTEM CLOCKTIME > 9 PM THEN PUMP GMB04 STATUS IS OPEN	Religa o grupo motobomba número 04 após às 21h00min (final do horário de ponta).
RULE 3	IF SYSTEM CLOCKTIME <= 9 PM AND SYSTEM CLOCKTIME >= 6 PM THEN PUMP GMB03 STATUS IS CLOSED	Desliga o grupo motobomba número 03 no horário compreendido entre às 18h00min e às 21h00min (horário de ponta).
RULE 4	IF SYSTEM CLOCKTIME > 9 PM THEN PUMP GMB03 STATUS IS OPEN	Religa o grupo motobomba número 03 após às 21h00min (final do horário de ponta).
RULE 5	IF SYSTEM CLOCKTIME <= 11 AM AND SYSTEM CLOCKTIME >= 0 AM THEN PUMP GMB04 STATUS IS CLOSED	Desliga o grupo motobomba número 04 no horário compreendido entre às 00h00min e às 11h00min.
RULE 6	IF SYSTEM CLOCKTIME > 11 AM THEN PUMP GMB04 STATUS IS OPEN	Religa o grupo motobomba número 04 após às 11h00min.

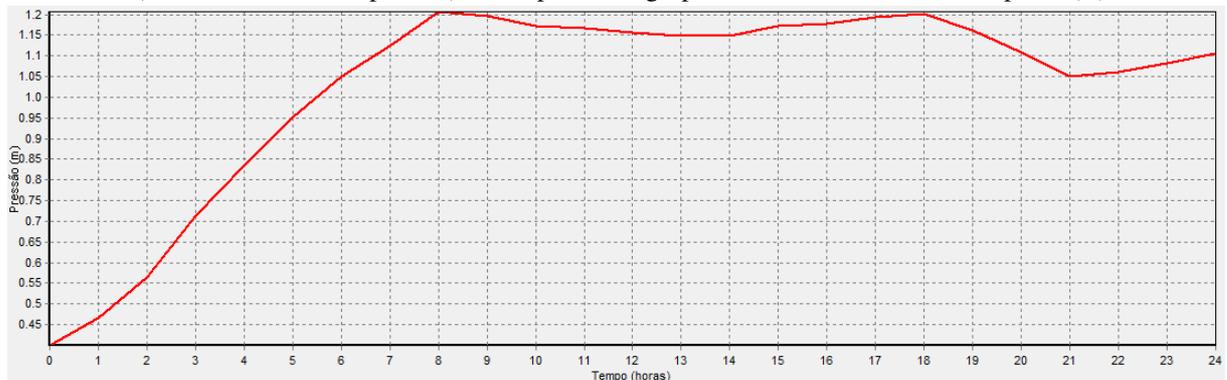
A situação analisada possui uma curva de consumo de acordo com a Figura (5.5) e, levando em consideração que a reservação irá iniciar, em todas as simulações, com 40 % às 00h00min, conforme a Figura (5.7-A), durante a simulação, no horário aproximado de 05h30min houve transbordamento do reservatório da ETA, chegando em 20 % de

transbordamento às 08h00min e às 18h00min e, no final do dia, às 23h59min, o nível finalizou em 110 %. A variação do nível do R-01 dentro do horário de ponta na condição de apenas um grupo desacionado foi de 15 %. Esses dados são indicativos da possibilidade de desacionamento de mais um grupo motobomba na EBAB-01 no horário de ponta.

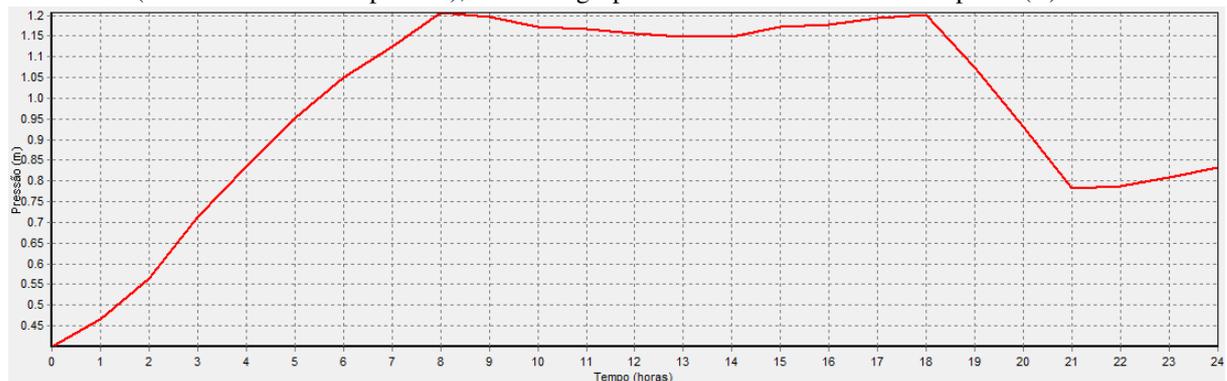
Foi realizada, portanto, uma nova simulação, agora com o desacionamento dos grupos de números 04 e 03 na EBAB-01. Nessa nova simulação, foi acrescentado ao *software* os comandos (RULE 3 e RULE 4), conforme Tabela (5.11). De acordo com a Figura (5.7-B), dessa vez, houve novamente o transbordamento do reservatório R-01 às 05h30min, com os níveis atingindo o patamar de 120 % às 08h00min e às 18h00min e o nível de reservação finalizou o dia em, aproximadamente, 83 %, sendo esse parâmetro acima do inicialmente estabelecido – 40 %. No entanto, a queda no horário de ponta foi de, aproximadamente, 42 %. Uma simulação com apenas um conjunto motobomba acionado no horário de ponta não é possível de ser realizada, pois a ETA não comporta o tratamento de água relativo à vazão aduzida por apenas um equipamento motobomba acionado na EBAB-01.

Figura (5.7) – Análise do desacionamento de equipamentos no horário de ponta, com quatro grupos motobombas acionados fora do horário de ponta.

Nível R-01 (coluna hidrostática - pressão), com apenas um grupo desacionado no horário de ponta (A)



Nível R-01 (coluna hidrostática - pressão), com dois grupos desacionados no horário de ponta (B)



Fonte: obtido através do software EPANET 2.0.

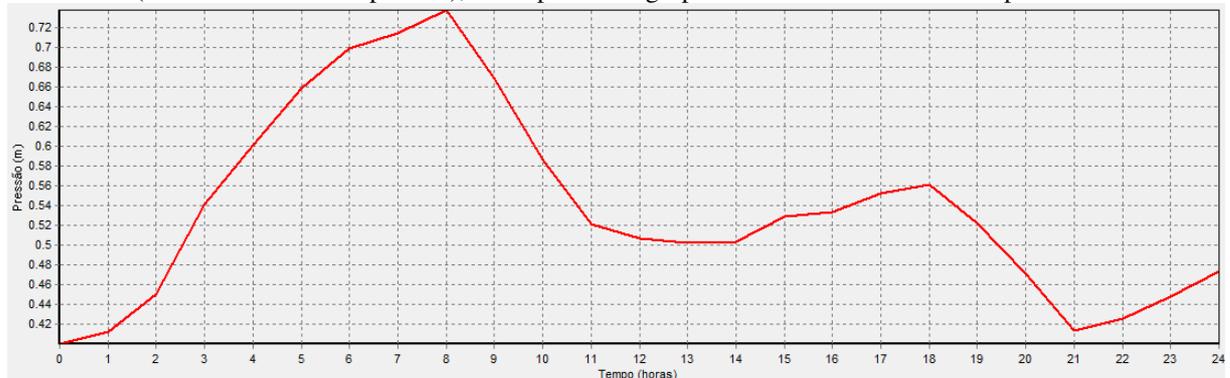
Com as simulações executadas até o momento, foi possível perceber que não é viável, por segurança operacional do sistema, uma queda de até 42 % da reservação em três horas do horário de ponta, quando da permanência de apenas dois conjuntos acionados na estação de bombeamento de água bruta. Sendo assim, a partir desse momento, as simulações foram executadas com o desligamento de apenas um conjunto motobomba no horário de ponta.

Como o nível do reservatório R-01 permanece acima dos 100 % entre às 05h30min e às 19h30min, quando quatros equipamentos permanecem acionados na EBAB-01 fora do horário de ponta (21 horas) e dois, apenas, durante as três horas do horário de ponta; e, levando em consideração que o dia mais crítico é o em análise, utilizando os dados da Figura (5.4), uma nova simulação foi gerada, com um sequenciamento de grupos muito similar ao do dia mais crítico em avaliação, onde: três equipamentos (01, 02 e 03) permanecerão acionados entre 00h00min e 11h00min. No restante do período do dia, quatro equipamentos permanecerão acionados na EBAB-01, excetuando-se o horário de ponta, que voltará a possuir três equipamentos acionados no sistema.

Para que seja possível realizar essa simulação, os comandos (RULE 5 e 6) foram acrescentados ao modelo gerado, estando esses descritos na Tabela (5.11). Nessa nova simulação, conforme a Figura (5.8), a queda da reservação durante o horário de ponta foi de, aproximadamente, 15 %. O nível do reservatório R-01 chegou em, aproximadamente, 41 % no final do horário de ponta e aos 47 % às 23h59min.

Figura (5.8) – Análise do desacionamento de equipamentos no horário de ponta, com sequenciamento dos grupos motobombas acionados de acordo com o dia crítico.

Nível R-01 (coluna hidrostática - pressão), com apenas um grupo desacionado no horário de ponta



Fonte: obtido através do software EPANET 2.0.

A partir das três simulações geradas, foi possível identificar que a instalação permite, com uma margem muito grande de segurança operacional, o desacionamento de um conjunto motobomba durante o horário de ponta. As simulações realizadas com quatro grupos motobombas acionados no horário fora de ponta (21 horas) e três ou até mesmo apenas dois acionados no horário de ponta (3 horas) revelaram que os reservatórios nem mesmo comportariam o volume de tanta água aduzida, permanecendo boa parte do dia acima das suas capacidades máximas, mesmo iniciando o dia com apenas 40 % de reservação. Mas, no caso de apenas dois equipamentos acionados no horário de ponta, apresentariam uma queda de 42 % em três horas de operação, fato esse que não garante segurança operacional.

Dessa maneira, uma nova simulação foi executada com o dia mais crítico frente ao consumo do sistema de abastecimento de água (quintas-feiras de abril de 2018), com uma análise estendida, além da curva consumo, para um sequenciamento de grupos acionados muito próximo ao real praticado no dia em análise, excetuando-se o horário de ponta, que na situação real possui, normalmente, quatro equipamentos acionados e, na situação analisada, permitirá apenas três. Na situação descrita, utilizando dados monetários que estão apresentados na Tabela (5.12), a economia, para 22 dias úteis no mês, chegou a valores próximos aos 4.360,58 R\$ mês⁻¹ (52.327,00 R\$ ano⁻¹) e o nível do reservatório R-01 permaneceu em 47 % às 23h59min.

Já com relação a análise da mudança de modalidade tarifária horária azul (atual) para verde, na Tabela (5.12) foi realizada uma avaliação monetária detalhada comparando os custos relativos à demanda e os custos relativos à energia. Os valores são conforme Resolução Homologatória ANEEL no. 2.361/2017, Figura (5.6).

Tabela (5.12) – Comparativo de custos da energia elétrica, em função das alterações operacionais e/ou contratuais.

DEMANDA											
Situação atual da instalação - Modalidade tarifária horária azul.				Avaliação de alteração da demanda contratada no horário de ponta para 1.750 kW - Modalidade tarifária horária azul e obrigatoriedade de apenas 3 grupos acionados no horário de ponta.				Avaliação de alteração da demanda contratada no horário de ponta para 1.250 kW - Modalidade tarifária horária azul e obrigatoriedade de apenas 2 grupos acionados no horário de ponta.			
Ponta	2.150	41,94	R\$90.171,00		1.750	41,94	R\$73.395,00		1.250	41,94	R\$52.425,00
	kW	R\$/kW			kW	R\$/kW			kW	R\$/kW	
Fora Ponta	2.150	20,21	R\$43.451,50		2.150	20,21	R\$43.451,50		2.150	20,21	R\$43.451,50
	kW	R\$/kW			kW	R\$/kW			kW	R\$/kW	
	TOTAL		R\$133.622,50		TOTAL		R\$116.846,50		TOTAL		R\$95.876,50
Avaliação de alteração para modalidade tarifária horária verde (como nessa modalidade não existe distinção entre a demanda contratada no horário de ponta e no horário fora de ponta, essa deverá permanecer em 2.150 kW)											
Ponta	2.150	20,21	R\$43.451,50		2.150	20,21	R\$43.451,50		2.150	20,21	R\$43.451,50
	kW	R\$/kW			kW	R\$/kW			kW	R\$/kW	
Fora Ponta	2.150	20,21	R\$43.451,50		2.150	20,21	R\$43.451,50		2.150	20,21	R\$43.451,50
	kW	R\$/kW			kW	R\$/kW			kW	R\$/kW	
	TOTAL		R\$86.903,00		TOTAL		R\$86.903,00		TOTAL		R\$86.903,00

ENERGIA									
Até 4 equipamentos acionados no horário de ponta - Situação atual			Até 3 equipamentos acionados no horário de ponta - Situação proposta 1			Até 2 equipamentos acionados no horário de ponta - Situação proposta 2			
Situação atual da instalação - Modalidade tarifária horária azul.									
Ponta	2.085,4 kW (consumo medido em campo - 4 equipamentos em paralelo).	0,4662 R\$/kWh	R\$972,21	1.632,0 kW (consumo medido em campo - 3 equipamentos em paralelo).	0,4662 R\$/kWh	R\$760,84	1.106,5 kW (consumo medido em campo - 2 equipamentos em paralelo).	0,4662 R\$/kWh	R\$515,85
Fora Ponta	2.085,4 kW (consumo medido em campo - 4 equipamentos em paralelo).	0,32048 R\$/kWh	R\$668,33	2.085,4 kW (consumo medido em campo - 4 equipamentos em paralelo).	0,32048 R\$/kWh	R\$668,33	2.085,4 kW (consumo medido em campo - 4 equipamentos em paralelo).	0,32048 R\$/kWh	R\$668,33
Avaliação - Modalidade tarifária horária verde.									
Ponta	2.085,4 kW (consumo medido em campo - 4 equipamentos em paralelo).	1,48361 R\$/kWh	R\$3.093,92	1.632,0 kW (consumo medido em campo - 3 equipamentos em paralelo).	1,48361 R\$/kWh	R\$2.421,25	1.106,5 kW (consumo medido em campo - 2 equipamentos em paralelo).	1,48361 R\$/kWh	R\$1.641,61
Fora Ponta	2.085,4 kW (consumo medido em campo - 4 equipamentos em paralelo).	0,32048 R\$/kWh	R\$668,33	2.085,4 kW (consumo medido em campo - 4 equipamentos em paralelo).	0,32048 R\$/kWh	R\$668,33	2.085,4 kW (consumo medido em campo - 4 equipamentos em paralelo).	0,32048 R\$/kWh	R\$668,33

Conforme indicado na Tabela (5.12), o custo de energia pago no horário fora de ponta é o mesmo para a modalidade verde e para a azul ($0,32048 \text{ R\$ kWh}^{-1}$), mas no horário de ponta o custo da energia paga na modalidade verde ($1,48361 \text{ R\$ kWh}^{-1}$) é 3,18 vezes maior que o da modalidade azul ($0,4662 \text{ R\$ kWh}^{-1}$). Dessa maneira, dependendo do consumo de energia elétrica, pode ser muito mais vantajoso ao usuário a aplicação da modalidade tarifária horária azul com a mesma demanda contratada para o período fora e em ponta, apesar da demanda contratada da modalidade tarifária horária azul ($41,94 \text{ R\$ kW}^{-1}$) ser 2,08 vezes maior que a verde ($20,21 \text{ R\$ kW}^{-1}$), na ponta, e igual ($20,21 \text{ R\$ kW}^{-1}$) no período fora de ponta.

Esse é o caso da instalação em análise, que diminuiria o custo pago em demanda contratada, no horário de ponta, de $90.171,00 \text{ R\$ mês}^{-1}$ (modalidade tarifária azul, contratado 2.150 kW) para $43.451,50 \text{ R\$ mês}^{-1}$ (modalidade tarifária verde, contratado 2.150 kW). No entanto, com um consumo de energia no horário de ponta podendo saltar, de acordo com os valores da Tabela (5.12) – 22 dias úteis no mês – de $64.166,00 \text{ R\$ mês}^{-1}$ (azul) para $204.199,00 \text{ R\$ mês}^{-1}$ (verde). Dessa maneira, é totalmente desaconselhável a mudança da modalidade tarifária horária azul para a verde.

As análises demonstraram que, em um horizonte de um ano de dados, mesmo no dia mais crítico ao consumo do sistema, que foi estabelecido como sendo as quintas-feiras do mês de maio de 2018, o reservatório R-01 inicia, em média, com aproximadamente 70 % de sua capacidade às 00h00min e finaliza o dia, em média, com 60 % de reservação. Na simulação

executada com a curva de carga do reservatório nesse dia crítico, com o sequenciamento dos grupos acionados muito similar ao praticado no dia em análise, excetuando-se o acionamento de quatro equipamentos no horário de ponta e, assumindo que o nível de reservação no R-01 passe de 70 % para 40 % às 00h00min, ocorreu que a reservação chegou em 47 % às 23h59min. Dessa maneira, pode-se concluir que a demanda contratada no horário de ponta permite, com segurança operacional, uma redução de 2.150 kW para 1.750 kW, onde se passaria a pagar, nesse período, um valor de 73.395,00 R\$ mês⁻¹ frente aos 90.171,00 R\$ mês⁻¹ pagos com a demanda atual.

É indispensável ressaltar que, com a alteração da demanda contratada de 2.150 kW para 1.750 kW no horário de ponta e a economia de valores pagos, somente pela demanda contratada, da ordem de 16.776,00 R\$ mês⁻¹ (201.312,00 R\$ ano⁻¹), é obrigatória a realização de uma gestão muito forte quanto ao desligamento programado do quarto equipamento antes da entrada no horário de ponta. Isso se deve aos valores altíssimos aplicados às ultrapassagens de demandas onde, por exemplo, se quatro equipamentos estiverem funcionando por apenas períodos ínfimos no horário de ponta, a multa por ultrapassagem de demanda chega a valores de duas vezes o preço da demanda regular, sem incidências de descontos, o que se aproxima dos R\$ 33.552,00.

Por fim, é necessário ressaltar que todas as estimativas de custos foram realizadas levando em consideração as informações da Figura (5.6). Ao se analisar essas informações, fica claro que os valores apresentados não levam em consideração os impostos e as eventuais incidências de bandeiras tarifárias, em função das condições climáticas atuais do país. Dessa forma, os valores aqui apresentados são, apenas, referentes ao custo da energia “R\$ kWh⁻¹” e da demanda “R\$ kW⁻¹”, não devendo ser comparados diretamente aos valores finais das faturas de energia elétrica.

5.7.2 Resultados Obtidos ou Possíveis de Serem Facilmente Obtidos em Função do Diagnóstico

5.7.2.1 Avaliação Quanto às Ações Operacionais

5.7.2.1.1 Sistema Supervisório

Com a construção do modelo em *software* do sistema em análise, sendo esse relativamente próximo à realidade do campo, com a compilação dos dados operacionais

anuais do período de um ano, que possibilitaram a definição dos padrões de consumo do sistema (Apêndices (05) ao (08)) e com a obtenção de indicadores de desempenho, tais como, por exemplo, o *Ph4*, que indicou um baixo uso da capacidade de reservação do sistema, ficou evidente que existe um farto espaço para a redução do consumo energético através de um melhor controle operacional. Vários autores, tais como, por exemplo, Coelho e Andrade-Campos (2014) e Vilanova e Balestieri (2014), destacam que o uso de sistemas supervisórios traz grandes economias que, segundo esses, podem ser obtidas através da otimização da capacidade de reservação e da operação dos reservatórios, quando em horários de ponta.

A instalação em análise já possui *software* supervisório. No entanto, as informações mostradas nos Apêndices (05) ao (08) indicam claramente que a operação é ineficiente. Isso fica evidente quando ao se analisar os dados anuais operacionais, apenas em valores próximos aos 5 % do período produtivo anual, a instalação operou com o reservatório R-01 abaixo dos 50 % do nível de reservação. Vale acrescentar que, ao se analisar os períodos em que o reservatório da ETA esteve abaixo dos 50 %, em praticamente todos os momentos, isso ocorreu não por decisões operacionais, mas sim em função de problemas no sistema: falta de energia elétrica, problemas eletromecânicos e etc.

Ao encontro da informação de operação ineficiente, quando são analisados os dados relativos ao consumo de energia elétrica, Tabela (5.7), comparando com os níveis médios de reservação mensal do reservatório R-01, por exemplo, para os meses de junho de 2017 e janeiro de 2018, fica ainda mais clara a necessidade de uma melhor operação via supervisório: no mês de inverno, o consumo de energia elétrica foi em média de 44.069,37 kWh dia⁻¹, com a reservação média diária do R-01 no patamar de 77 % e, no mês de verão, o consumo de energia elétrica médio foi de 42.219,18 kWh dia⁻¹, com o nível médio diário de reservação do R-01 em 79 %.

Ao analisar as informações do consumo de energia elétrica *versus* níveis de reservação e sazonalidades temporais, fica evidente que o campo para atuação de ações de cunho apenas operacional, visando economia energética, é muito amplo. Se, por exemplo, o *software* supervisório for melhor utilizado, aliando-se ao modelo calibrado e aos padrões de consumo do sistema, tendências diárias podem ser traçadas e, com isso, equipamentos podem ser acionados/desacionados ou então terem a rotação diminuída, para se adequarem com as necessidades momentâneas. Isso evitará gastos energéticos desnecessários, que ocorrem em função de um mau gerenciamento da capacidade de reservação da ETA.

Apenas como exemplo, se for diminuído em 10 % o consumo energético do sistema nos meses de maio a outubro (meses mais frios do ano), através de uma operação mais

eficiente, com um maior controle sobre o acionamento e o desacionamento dos conjuntos motobombas e uma melhor utilização da capacidade de reservação da ETA, grandes quantias monetárias podem ser poupadas. Isso é algo perfeitamente possível de ser realizado em função dos dados históricos do sistema em análise.

Ao se avaliar os padrões de consumo médios das estações do ano – Apêndices (05) ao (08) – têm-se: primavera com 0,84; verão, 0,88; outono 0,85 e inverno com um padrão de consumo de 0,82. Isso indica que entre a estação do ano mais quente e a mais fria, ocorre uma diminuição média na produção de água de apenas 6,82 %. Utilizando as informações da Tabela (5.7) e da Figura (5.6), valores próximos aos 272.817,52 R\$ ano⁻¹ – redução de 10 % no consumo energético nos meses de maio a outubro – (sem considerar a incidência de impostos e de aumentos da fatura de energia elétrica em função das bandeiras tarifárias) podem ser economizados sem nenhum tipo de investimento.

5.7.2.1.2 *Resultados das Correções Básicas e do Sequenciamento Eficiente dos Grupos*

Outras maneiras de se reduzir o gasto energético do sistema sem nenhum investimento ou, então, com um mínimo investimento, são o uso dos sequenciamentos de grupos otimizados e a usinagem dos rotores para que seja atingido o BEP da instalação. Essas análises se baseiam no que dizem os seguintes autores: (a) Cabrera et al. (2016), afirma que até 10 % de economia pode ser alcançada com ações, sem investimentos, de operação da instalação no melhor BEP possível; e (b) Vilanova e Balestieri (2014) – a partir de dados obtidos em estudos de Gomes (2009), Savar, Kozmar e Sutlovic (2009) e Kaya et al. (2008) – afirmam que os principais causadores da perda da eficiência energética dos conjuntos motobombas usados nos CWSS's, são entre outros muitos fatores, a operação fora do ponto de máxima eficiência (BEP).

Após a realização do conserto da válvula de sucção do GMB 01 e a usinagem do rotor da bomba 03, novos ensaios em sequenciamentos de grupos foram efetuados e, conforme Tabela (5.5), comparativos foram realizados para definição das combinações mais e menos eficientes. Utilizando os valores definidos na Tabela (5.6), onde 9,83 % e 38,09 % são, respectivamente, os períodos operacionais de dois e três grupos operando em paralelo; associando aos dados relativos ao consumo de energia elétrica, Tabela (5.7); e, utilizando os valores relativos à tarifa de energia elétrica, Figura (5.6), por exemplo, quando do uso dos grupos motobombas 01 e 04 ao invés dos grupos 02 e 04 – sequenciamento mais e menos

eficiente, respectivamente – em média até 53.355,55 R\$ ano⁻¹ podem ser economizados pela simples escolha otimizada dos equipamentos.

Já na condição de três grupos em paralelo, o sequenciamento dos grupos motobombas 01, 03 e 04 – combinação mais eficiente – ao invés do uso da combinação dos grupos 01, 02 e 03 – menos eficiente – pode trazer economia de até 103.372,98 R\$ ano⁻¹. Dessa maneira, o simples controle sobre o uso otimizado dos grupos acionados na EBAB-01 pode resultar em economia de 156.728,52 R\$ ano⁻¹, sem qualquer espécie de investimento.

Como no momento das medições o grupo motobomba número 05 estava em manutenção, não foi possível realizar as comparações relativas aos sequenciamentos otimizados de quatro equipamentos em paralelo (50,80 % do tempo operacional, conforme Tabela (5.6)). No entanto, é possível avaliar que: como após a realização do conserto da válvula de sucção do GMB 01 e a usinagem do rotor da bomba número 03, o valor da $Pot_{absmotor}$, medida no campo, para o somatório das potências do sequenciamento dos grupos motobombas 01, 02, 03 e 04 (54 Hz), passou de 2.085,4 kW para 1.954,4 kW, frente uma vazão inicial de 1.515,00 L/s que se consolidou em 1.500,00 L/s, houve uma significativa melhoria no BEP da instalação, principalmente, pela redução do diâmetro do rotor da bomba 03.

Com essa redução de 131,0 kW no sequenciamento avaliado, foi estimado um montante referente à redução do consumo energético, sendo que, agora, apenas a condição de menor custo da energia elétrica para o sistema (fora do horário de ponta) foi levada em consideração. Isso ocorreu, pois o custo da energia no horário de ponta é superior ao horário fora de ponta, devendo-se evitar, ao máximo, o acionamento do quarto grupo motobomba nesse período, sendo essa estratégia operacional já utilizada na instalação sempre que a operação é corretamente realizada.

Utilizando as informações da Tabela (5.6) – 50,80 % do tempo operacional da instalação com quatro equipamentos acionados – e Figura (5.6) – custo da energia elétrica – os valores de economia monetária estimados são de 184.827,17 R\$ ano⁻¹, novamente, sem nenhum investimento, além do custo da usinagem e do balanceamento do rotor da bomba 03, que giram em torno de R\$: 2.000,00, já descontados.

Dessa maneira, portanto, ao ser realizado o conserto da válvula de sucção do conjunto motobomba número 01, a usinagem do rotor da bomba número 03 e o controle operacional para que os melhores sequenciamentos sejam aplicados nas configurações de dois e três equipamentos em paralelo, valores consideráveis de economia energética podem ser alcançados. Ao se realizar o somatório dos valores monetários das ações operacionais

descritas neste item, pode-se afirmar que montantes da ordem de 341.555,70 R\$ ano⁻¹ podem ser economizados (sem a consideração dos impostos e incidências de aumento da fatura pelas diferentes bandeiras tarifárias aplicáveis).

5.7.2.2 Definição e Calibração do Modelo gerado e Simulação de Cenários para Melhorias Estruturais

5.7.2.2.1 Definição e Calibração do Modelo Gerado

O modelo utilizado anteriormente para as simulações com relação apenas à análise do enquadramento tarifário foi alterado, em função de não se estar agora interessado, somente, em vazão volumétrica bombeada para a ETA, mas sim, também, em valores de perda de carga e possíveis alterações operacionais/estruturais. Sendo assim, as informações apresentadas na Tabela (5.3) foram mantidas, mas, de acordo com os argumentos descritos no item 5.2 (“*Ensaios de Desempenho*”), que resultou no Apêndice (04), as curvas características das bombas de fornecimento do fabricante foram as utilizadas, em vez das obtidas nos ensaios de desempenho.

Os resultados apresentados para esse modelo teórico foram bem representativos da realidade obtida em ensaios de campo onde, por exemplo, nos valores médios do sequenciamento de três grupos em paralelo a vazão bombeada teve uma alteração de 1.317,00 L/s para 1.378,62 L/s (+ 4,72 %), vazão real medida no campo e simulada, respectivamente. Já a AMT média do sequenciamento passou de 93,21 m para 93,29 m (+ 0,08 %), novamente, valores real e simulado, respectivamente. Com relação ao sequenciamento de quatro grupos em paralelo, a vazão bombeada passou de 1.500,00 L/s (medida no campo) para 1.555,77 L/s (simulada no EPANET), ou seja, houve um aumento de + 3,72 %; e, com relação à AMT média do sequenciamento, que era de 100,26 m, foi obtido um valor em simulação de 100,75 m, ou seja, + 0,48 % de variação entre os valores real e simulado.

De maneira a se ter um modelo mais representativo da realidade do sistema, foram instalados nas três adutoras de 600 mm, 50 m antes da chegada à ETA, conexões “TAP’s” – *test access point* – que permitiram acoplar no mesmo instante analisado três maletas para medição de parâmetros hidráulicos, que trabalham em conjunto com tubos de *Pitot*. Isso proporcionou com que as vazões instantâneas das três adutoras fossem medidas e comparadas com a simulação e, ainda, que o somatório desses valores fosse comparado à medição da água bruta que chega à ETA, que é medida via calha Parshall com sensor de vazão do tipo

ultrassônico. A Figura (4.9) apresenta as características da(s) maleta(s) para medição de parâmetros hidráulicos utilizada(s) para medição da vazão.

Após a realização das medições de vazão das três adutoras de água bruta, foi efetuada uma correção nos respectivos coeficientes de rugosidade de *Hazen-Williams*. Isso foi necessário, pois com o uso das maletas para medição de parâmetros hidráulicos, a diferença média medida em campo entre a vazão das três adutoras foi de apenas 20,00 L/s, ou seja, na adutora número 03 passava 20,00 L/s a mais que na adutora de número 02 e 40,00 L/s a mais do que na adutora número 01. Já no modelo gerado no EPANET, havia uma diferença de até 84,04 L/s entre a vazão da adutora de 25 anos (Adutora 03) e a de 40 anos (Adutora 02).

Dessa maneira, os valores dos coeficientes de rugosidade de *Hazen-Williams* apresentados na Tabela (5.3) foram corrigidos, respectivamente, para 81, 84, 87 e 88, adutoras números 01, 02, 03 e “*Barrilete (adutoras 40 e 25 anos)*”. Após essa alteração, os valores simulados de vazão e AMT média das combinações ficaram praticamente inalterados: no sequenciamento de três grupos em paralelo, a vazão e a AMT média foram para 1.378,52 L/s e 93,29 m, respectivamente, frente aos valores anteriormente simulados de 1.378,62 L/s e 93,29 m; e, na combinação de quatro grupos em paralelo, os valores obtidos via simulação foram, agora, de 1.555,62 L/s e 100,75 m, sendo que, anteriormente à calibração do sistema, esses eram de 1.555,77 L/s e 100,75 m.

5.7.2.2.2 Avaliação Quanto às Ações Estruturais

O diagnóstico hidroenergético realizado permitiu que fosse observado no sistema uma característica peculiar: apesar da idade das adutoras impor baixos coeficientes de rugosidade de *Hazen-Williams*, o que impacta no aumento da perda de carga, essa condição para os tipos de bombas instaladas, com os seus respectivos tamanhos de rotores atuais, mostra-se eficiente. Isso está ocorrendo porque, quanto maior for a AMT média do sistema para os diâmetros de rotores e tipos de bombas utilizadas na instalação, de acordo com a curva característica do fabricante, Figura (3.3), mais centralizado às curvas de isorendimentos máximas estará o ponto de trabalho atingido por cada uma das bombas em cada sequenciamento operacional aplicado. Conseqüentemente, maior será o rendimento de cada um desses equipamentos.

Esse fenômeno pode ser observado, por exemplo, na bomba 01 (rotor de 19.3/16”), ao qual o rendimento obtido da curva característica do fabricante, para o sequenciamento de dois grupos em paralelo é de 82 % (AMT média medida em campo de 81,51 m). Já ao se impor a condição operacional de quatro equipamentos em paralelo (AMT média medida em campo de

100,26 m), o rendimento atinge um valor de 86 %, muito próximo ao máximo permitido para esse tipo de bomba, que é 87 %.

De acordo com Gomes (2012), a limpeza das adutoras, se os conjuntos motobombas não forem trocados, proporciona um aumento de vazão pela redução da perda de carga e o rebaixamento da curva do sistema, sendo que o novo ponto de funcionamento pode não ser o melhor em termos de rendimento(s) da(s) bomba(s). Esse mesmo autor destaca que o coeficiente “C” que justifica uma limpeza da tubulação é uma característica que varia de um local para outro e dependerá de uma avaliação, sendo até mesmo adequado um baixo valor de coeficiente de rugosidade de *Hazen-Williams* para uma tubulação consideravelmente superdimensionada.

Os valores médios de AMT medidos em campo para os sequenciamentos de grupos, após o conserto da válvula de sucção do grupo motobomba 01 e a usinagem do rotor da bomba 03 ficaram respectivamente, para dois, três e quatro equipamentos em paralelo: 81,51 m, 93,21 m e 100,26 m. Já os valores de altura manométrica média encontrados na simulação foram, para os sequenciamentos de três e quatro grupos em paralelo, após calibração, respectivamente, 93,29 m e 100,75 m. Vale lembrar aqui que, como o sequenciamento de dois equipamentos em paralelo representa apenas 9,83 % do período operacional da instalação – Tabela (5.6) – e essa condição operacional é a mais ineficiente e totalmente dependente das outras duas condições operacionais de paralelismo, em função dos tamanhos de rotores aplicados, serão analisadas, apenas, a partir deste momento, os parâmetros relativos ao sequenciamento de três e quatro equipamentos trabalhando em paralelo.

Com o intuito de demonstrar a diminuição da eficiência das bombas com o aumento do coeficiente de rugosidade de *Hazen-Williams*, foi simulado no *software* EPANET, anteriormente a qualquer outro tipo de alteração, uma atividade de limpeza das tubulações. Os valores dos coeficientes de rugosidade “C” foram alterados dos teóricos da literatura, calibrados em campo: 81, 84 e 87, adutoras de números 01, 02, 03, respectivamente, para: 99, 105 e 112 (assumido “C” referente a 20 anos de recuperação e levado em consideração que apenas é possível realizar essa atividade de limpeza com “pigs” nas adutoras e não no barrilete, por exemplo, que permaneceu com o mesmo valor de rugosidade determinado na literatura). Foi assumido também que, para determinação do rendimento médio das cinco bombas, o rotor a ser instalado na bomba número 05 será, quando não for explicitamente informado, o de 19.15/16”.

Os valores de AMT média *versus* vazão encontrados na simulação: 1.493,20 L/s, AMT média de 86,39 m para o sequenciamento de três grupos; 1.737,19 L/s, AMT média de

93,80 m para o paralelismo dos grupos 01, 02, 03 e 04 (54 Hz) mostraram excelentes resultados quanto à necessidade de vazão. Para três equipamentos em paralelo, a vazão teve um aumento de 114,68 L/s (+8,32 %) e, para o sequenciamento de quatro equipamentos em paralelo, o acréscimo de vazão foi de 181,57 L/s (+11,67 %). No entanto, no momento em que esses novos pontos operacionais são plotados na curva característica do fabricante, surge a questão de que cada uma das bombas teve o seu respectivo ponto operacional deslocado para a direita, resultando curvas de isorendimentos menos eficientes, nas bombas.

Dessa maneira, as bombas de número 02, 03 e 05 ficaram 2 % menos eficientes na condição de três grupos em paralelo e 3 % mais ineficientes na condição de quatro equipamentos em paralelo. As bombas de número 01 e 04 atingiram curvas de isorendimentos em função da alteração do ponto operacional, que modificou a eficiência dos equipamentos em -2 % e -1 %, respectivamente, bomba número 01 e 04 na condição de AMT média para três grupos acionados em conjunto e, rendimento inalterado e -2 %, respectivamente, bombas 01 e 04 na condição de AMT média para quatro equipamentos em paralelo.

O rendimento médio das bombas que estava em valores de 83,4 % e 85,6 %, para as condições de três e quatro grupos acionados, respectivamente, passou para os valores de 81,6 % (-1,8 %) e 83,4 % (-2,2 %). Levando em consideração essa diminuição nos rendimentos das bombas em função da limpeza, apenas, das tubulações, que baixou a inclinação da curva do sistema pela diminuição da perda de carga, a opção de realizar somente a revitalização das adutoras, sem nenhuma alteração, além dessa, foi descartada.

Como, ao se realizar a simulação do aumento dos valores dos coeficientes de rugosidade de *Hazen-Williams*, não foram obtidos resultados satisfatórios com relação aos rendimentos das bombas presentes da EBAB-01, foi realizada outra simulação, atribuindo para cada uma das bombas um mesmo diâmetro de rotor mantendo-se os valores iniciais de “C” determinados nos testes de campo, após calibração. Dessa maneira, o funcionamento do sistema foi simulado com os dados de carga *versus* vazão obtidos da curva característica do fabricante, sendo o rotor escolhido para essa análise o de diâmetro 19.15/16”. Ou seja, a simulação foi efetuada com a hipótese de padronização das características das bombas, sem nenhuma outra alteração no sistema.

Na simulação com rotores iguais, a vazão para o sistema com três equipamentos em paralelo atingiu valores de 1.401,57 L/s e AMT média de 94,24 m. Já para a condição de quatro grupos em paralelo a vazão atingida foi de 1.575,93 L/s e a AMT média de 101,73 m. Comparando com os dados de vazão e AMT média obtidos no modelo calibrado anterior: 1.378,52 L/s e 93,29 m; 1.555,62 L/s e 100,75 m, respectivamente, três e quatros

equipamentos em paralelo, não houve grandes alterações dos pontos operacionais com a atividade de se deixar todos os rotores com o mesmo diâmetro.

Ao se traçar os novos pontos operacionais obtidos com a padronização do tamanho dos rotores na curva característica do fabricante, a bomba 01 teve uma piora no rendimento de 3 % na condição de três equipamentos em paralelo e, na condição de quatro equipamentos acionados, o rendimento se manteve; as bombas 02, 03 e 05 mantiveram os rendimentos para as condições de sequenciamento de três e quatro equipamentos acionados; e, finalmente, a bomba 04 teve uma modificação no rendimento, sendo essa de +1 % e +2 %, respectivamente, sequenciamento de três e quatro equipamentos em paralelo.

Quando se realiza uma comparação entre os rendimentos médios antes de qualquer alteração – 83,4 % e 85,6 %, para as condições de três e quatro grupos acionados, respectivamente, e após a alteração dos rotores – 83 % (-0,4 %) e 86 % (+0,4 %) – não se identifica significativa melhoria do consumo energético. Isso ocorre, também, pois o sistema se comportou de maneira muito similar ao já existente, visto que, as vazões do sequenciamento de três e quatro equipamentos em conjunto, tiveram alterações mínimas: +1,67 % e +1,31 %, respectivamente.

Sendo assim, devido às simulações anteriores indicarem que não é vantajoso, energeticamente, apenas realizar a revitalização das adutoras, ou então, operacionalmente, apenas modificar o tamanho dos rotores, foi executada uma última simulação, aliando essas duas opções em um único modelo. Isso foi realizado, pois quando é efetuada apenas a limpeza das tubulações, mantendo-se os diâmetros de rotores atuais, o ponto operacional se desloca muito para a direita da curva característica das bombas, com um aumento da vazão produzida, mas que impacta, conseqüentemente, em queda do rendimento das bombas. Ao se efetuar a simulação da revitalização das adutoras, juntamente com uma diminuição do tamanho dos rotores utilizados, o ponto de trabalho não se deslocará tanto à direita da curva característica das bombas, podendo aliar, portanto, uma manutenção dos níveis atuais de vazão com aceitáveis rendimentos de bombas.

O modelo foi gerado, portanto, com os valores de “C” assumidos como sendo os pós-atividade de limpeza das adutoras; o tamanho dos rotores foi escolhido como sendo de 19.3/16”; e, ainda, foi acrescentada mais uma alteração, que é a substituição das tubulações de sucção dos cinco GMB’s, de 400 mm para 700 mm, de acordo com argumentos apresentados no item 5.6 (“*Avaliação da Cavitação e Velocidades Operacionais*”). O modelo utilizou, portanto, os mesmos dados apresentados na Tabela (5.3), no entanto, além das correções dos valores de “C”, já discutidas anteriormente, na sucção dos cinco conjuntos motobombas

foram efetuadas as seguintes alterações: diâmetro do tubo de 700 mm, rugosidade das tubulações de 130 e comprimento equivalente para cálculo das perdas de carga de 77,94 m.

A Tabela (5.13) mostra a comparação entre os resultados obtidos via simulação para o modelo calibrado em campo e após a substituição dos rotores das cinco bombas pelos de diâmetro de 19.3/16”, a limpeza das adutoras com o uso de *pigs* e a substituição das sucções.

Tabela (5.13) – Comparativo entre os resultados de simulação do modelo atual calibrado *versus* alterações de diâmetro dos rotores, limpeza das adutoras e substituição das sucções.

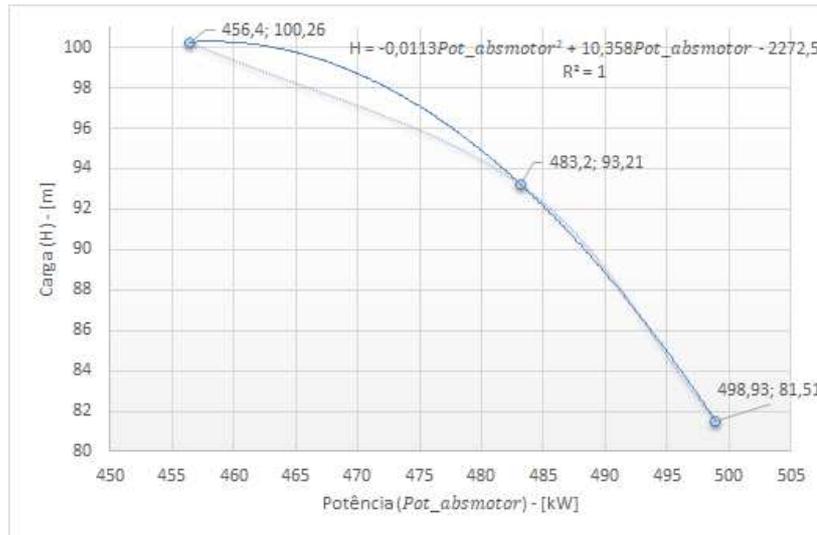
	Três grupos em Paralelo	Quatro grupos em Paralelo	Três grupos em Paralelo	Quatro grupos em Paralelo
	Modelo calibrado		Modelo calibrado, rotores 19.3/16”, limpeza das adutoras e substituição das sucções	
Q [L/s] – total	1.378,52	1.555,62	1.393,76 (+1,11 %)	1.614,05 (+3,76 %)
AMT [m] – média	93,29	100,75	83,35 (-10,65 %)	89,50 (-11,17 %)
RENDIMENTO BOMBAS				
η_{bomba1} [%]	86	86	83 (-3 %)	84 (-2 %)
η_{bomba2} [%]	83	86	83 (0 %)	84 (-2 %)
η_{bomba3} [%]	83	86	83 (0 %)	84 (-2 %)
η_{bomba4} [%]	82	84	83 (1 %)	84 (0 %)
η_{bomba5} [%]	83	86	83 (0 %)	84 (-2 %)
η_{bombed} [%]	83,4	85,6	83 (-0,4 %)	84 (-1,6 %)

Apesar do rendimento médio das bombas ter caído 0,4 % e 1,6 %, respectivamente, três e quatro equipamentos em paralelo, da condição simulada de limpeza das adutoras, rotores de 19.3/16” e substituição das sucções, frente à condição atual da EBAB-01, as alterações se mostraram muito eficientes. A vazão para a condição de três grupos em paralelo alterou +1,11 % e, na condição de operação de quatro GMB’s em paralelo, a vazão aumentou em 3,76 %. Além disso, ao se comparar os valores de perda de carga, houve uma redução média de 36,36 % e 29,58 %, em função do rebaixamento da AMT, referente aos sequenciamentos de três e quatro equipamentos em paralelo, (grupos 02, 03, 04 – 57 Hz e 01, 02, 03 e 04 – 54 Hz), respectivamente.

Um resultado bem representativo da análise dessas alterações executadas foram os novos valores estimados de $Pot_{absmotor}$ para os cinco GMB’s da EBAB-01. Como é muito difícil de se encontrar o valor da $Pot_{absbomba}$ utilizando as informações dadas pela Figura (3.3) – curva característica do fabricante – de maneira a ser possível estimar os novos valores de $Pot_{absmotor}$, foi considerada na análise, a potência medida em campo do GMB 01 (que possui um rotor de 19.3/16”). As medições nas condições operacionais reais médias de dois (81,51 m), três (93,21 m) e quatro (100,26 m) equipamentos em paralelo, apresentaram como

média, respectivamente, os seguintes resultados: 498,93 kW, 483,2 kW e 456,4 kW. A Figura (5.9) mostra a curva da $Pot_{absmotor}$ versus carga para os rotores de 19.3/16” em 60 Hz.

Figura (5.9) – Curva da $Pot_{absmotor}$ versus carga para os rotores de 19.3/16” em 60 Hz.



Ao se estimar o valor das $Pot_{absmotor}$ para cada bomba com rotor de 19.3/16” na condição de revitalização das tubulações e substituição das sucções, de acordo com a Figura (5.9), os seguintes valores são obtidos: na AMT média de 83,35 m, correspondente a três equipamentos em paralelo, o resultado encontrado foi de 496,2 kW; já na AMT média de 89,50 m, correspondente ao paralelismo dos grupos 01, 02, 03 e 04 (54 Hz), chegou-se ao valor de 489,0 kW para os GMB’s 01, 02 e 03.

Antes de continuar com a análise da $Pot_{absmotor}$ para os grupos com rotores de 19.3/16” é necessário considerar que, para o conjunto motobomba número 04, as simulações foram sempre executadas considerando os mesmos valores de rotação aplicados atualmente no campo. As condições operacionais do grupo 04 no campo são: 57 Hz quando da operação de dois ou três equipamentos em paralelo e 54 Hz quando se tiver quatro equipamentos em operação conjunta.

Para a definição dos valores de $Pot_{absmotor}$ do GMB 04 em 57 Hz (≈ 1.700 rpm) e 54 Hz (≈ 1.611 rpm), foi utilizada a Equação (3.27), e assumido que as potências em 60 Hz para o novo rotor de 19.3/16” a ser instalado seriam as mesmas encontradas nos GMB’s que não possuem conversor de frequência, ou seja, 496,2 kW (sequenciamento de três) e 489,0 kW

(sequenciamento com quatro equipamentos). Utilizando essa lógica, como resultado foram encontrados os seguintes valores: 425,05 kW no sequenciamento de três grupos e 361,74 kW no sequenciamento de quatro grupos em paralelo.

Os valores acima estabelecidos indicam que houve uma queda no somatório das $Pot_{absmotor}$ para a condição de três e de quatro equipamentos em paralelo. No sequenciamento de três equipamentos, o valor anterior medido de 1.612,0 kW (médio), frente à vazão medida no campo de 1.317,00 L/s e 1.378,52 L/s simulada no modelo calibrado, ficou estabelecido em 1.417,45 kW frente à vazão simulada de 1.393,76 L/s. Já com relação ao sequenciamento dos grupos 01, 02, 03 e 04 (54 Hz), o valor anterior medido em campo de 1.954,4 kW frente à vazão real de 1.500,00 L/s e simulada de 1.555,62 L/s se estabeleceu, na mesma condição operacional, em 1.614,05 L/s com o valor total de $Pot_{absmotor}$ de 1.828,74 kW.

Finalmente, de maneira a ser obtido um modelo de simulação o mais próximo possível aos valores de vazão reais bombeadas, a rotação do GMB 04 foi alterada para que fosse possível se atingir os valores de vazão anteriormente estabelecidos no modelo calibrado no campo. Nessa condição, a frequência do GMB número 04 permaneceu um 57 Hz respectivas aos sequenciamentos de dois/três grupos em paralelo, pois o valor de vazão até agora simulado é +1,11 % do calibrado em campo e passou de 54 Hz, para a condição de quatro grupos em paralelo, para 51,3 Hz (≈ 1.530 rpm).

A Tabela (5.14) mostra a comparação entre os resultados do modelo calibrado no campo obtido via simulação *versus* o que teve substituído os rotores das bombas pelos diâmetros de 19.3/16", cuja limpeza das adutoras foi efetuada, a substituição das sucções e, também, que teve modificada a rotação do GMB 04, de maneira a serem obtidos valores de vazões operacionais muito próximos ao modelo calibrado em campo da EBAB-01.

Tabela (5.14) – Comparativo entre os resultados de simulação do modelo calibrado *versus* alterações de diâmetro dos rotores, limpeza das adutoras, substituição das sucções e alterações da rotação do GMB 04.

	Três grupos em Paralelo	Quatro grupos em Paralelo	Três grupos em Paralelo	Quatro grupos em Paralelo
	Modelo calibrado		Modelo calibrado, rotores 19.3/16”, limpeza das adutoras, substituição das sucções e alterações da rotação do GMB 04	
Q [L/s] – total	1.378,52	1.555,62	1.393,76 (+1,11 %)	1.555,30 (-0,02 %)
AMT [m] – média	93,29	100,75	83,35 (-10,65 %)	87,61 (-13,04 %)
RENDIMENTO BOMBAS				
η_{bomba1} [%]	86	86	83 (-3 %)	84 (-2 %)
η_{bomba2} [%]	83	86	83 (0 %)	84 (-2 %)
η_{bomba3} [%]	83	86	83 (0 %)	84 (-2 %)
η_{bomba4} [%]	82	84	83 (1 %)	84 (0 %)
η_{bomba5} [%]	83	86	83 (0 %)	84 (-2 %)
$\eta_{bombaméd}$ [%]	83,4	85,6	83 (-0,4 %)	84 (-1,6 %)

Utilizando novamente as informações da Figura (5.9), o valor da $Pot_{absmotor}$ para as bombas com rotor de 19.3/16” na condição de limpeza das adutoras, substituição das sucções e alteração da rotação do GMB 04, ficou da seguinte maneira: na AMT média de 87,61 m correspondente aos grupos 01, 02, 03 e 04 (51,3 Hz), o resultado atingido foi de 491,7 kW para os GMB’s 01, 02 e 03. Já para a definição dos valores de $Pot_{absmotor}$ do GMB 04 em 51,3 Hz (≈ 1.530 rpm), foi utilizada a Equação (3.27) e foi assumido, novamente, que as potências em 60 Hz para os rotores de 19.3/16” a serem instalados seriam as mesmas encontradas nos GMB’s que não possuem conversor de frequência, ou seja, 489,0 kW (sequenciamento com quatro equipamentos). Como resultado, foi encontrado o seguinte valor: 309,87 kW no sequenciamento de quatro grupos em paralelo.

Sendo assim, utilizando as informações do sequenciamento triplo de grupos (com o GMB 04 a 57 Hz), o valor anterior medido em campo que é 1.612,0 kW (médio), permaneceu em 1.417,45 kW. Já com relação ao sequenciamento dos grupos 01, 02, 03 e 04 (51,3 Hz) o valor anterior medido de 1.954,4 kW se estabeleceu, na mesma condição operacional de vazão, em 1.784,97 kW.

Ao se considerar apenas a redução da quantidade de energia consumida em função dessas alterações estruturais realizadas, 194,56 kW, no sequenciamento de três equipamentos em paralelo e 169,43 kW referente ao uso de quatro equipamentos em paralelo – mantendo-se os valores de vazão – deixarão de serem utilizados. Se for levado em consideração os dados referentes ao preço da energia elétrica – Figura (5.6) – e as informações de sequenciamentos de grupos acionados na EBAB-01, Tabela (5.6), [o valor de](#) 449.685,45 R\$ ano⁻¹ podem ser economizados.

Essa estimativa de redução do consumo foi realizada apenas analisando a condição de menor custo da energia elétrica para o sistema (fora do horário de ponta) e, não leva em consideração a incidência de impostos e de aumento da fatura pelas bandeiras tarifárias. Nela ainda não estão descontados o custo de quatro usinagens e balanceamentos dos rotores (bombas 02, 03, 04 e 05), visto que a bomba 01 já possui o diâmetro correto e nem os custos relativos às alterações estruturais das sucções dos cinco GMB's e revitalizações das adutoras. O valor estimado para esses serviços entre peças/materiais e serviços é da ordem de R\$ 289.036,23.

É necessário levar em consideração que com a diminuição dos valores de $Pot_{absmotor}$ obtidos pelas tentativas de se atingir o BEP da instalação, será possível realizar a diminuição dos valores pagos referentes, também, à demanda contratada. Assumindo que os valores de demanda hoje estejam adequados para a EBAB-01; ao se realizar as alterações de diâmetro dos rotores, limpeza das adutoras, substituição das sucções, alterações da rotação do GMB 04, mantendo-se a modalidade tarifária azul e, utilizando os valores de 194,56 kW de redução de potência referente à operação com três; e 169,43 kW para quatro equipamentos em paralelo, utilizando as informações da Figura (5.6), 132.455,42 R\$ ano⁻¹ serão economizados (sem impostos e sem considerar ainda o desacionamento do quarto equipamento no horário de ponta).

5.7.3 Resultados Possíveis de Serem Obtidos Através das Alterações Estruturais

Ao se comparar os dados apresentados na Tabela (5.9), que indicam uma altura geométrica de 61,8 m, frente às informações de AMT média, simuladas, de três e quatro equipamentos em paralelo, obtidas após a execução das alterações do diâmetro dos rotores para 19.3/16", limpeza das adutoras, substituição das sucções e alterações da rotação do GMB 04, Tabela (5.14), surge a possibilidade de mais uma análise a ser realizada, que é a substituição das estruturas/equipamentos existentes. Com essa análise, é essencial que os investimentos iniciais sejam comparados ao retorno previsto para balizamento da tomada de decisão.

Quando se compara a AMT média simulada de três grupos, 83,35 m, frente à altura geométrica, 61,8 m, observa-se que 25,85 % de energia (21,55 m), em média, são desperdiçadas nas perdas de carga do acionamento de três equipamentos em paralelo e, no caso de quatro grupos acionados, 87,61 m comparados aos 61,8 m resultam em 29,46 % (25,81 m), em média, de perdas energéticas nas adutoras. Além disso, conforme Tabela (5.14)

o rendimento médio das bombas nas condições de três e quatro equipamentos nunca atingiria a condição de rendimento máximo, que seria 87 %, permanecendo sempre em 83 % e 84 %, respectivamente.

Como já foi descrito, no momento em que as adutoras são revitalizadas, atingindo maiores coeficientes “C”, a altura manométrica do sistema diminui, aumentando a vazão de cada equipamento, mas, conseqüentemente, diminuindo o rendimento das bombas em função do ponto operacional se deslocar à direita da curva característica das bombas, Figura (3.3). Já ao se analisar as condições de velocidades impostas às três adutoras, na condição de quatro equipamentos operando em paralelo, após a simulação de todas as alterações realizadas no EPANET, a velocidade da adutora número 03 giraria em torno dos $1,96 \text{ m s}^{-1}$, para o sequenciamento dos grupos 01, 02, 03 e 04 (51,3 Hz), valor esse que justifica os valores elevados de perda de carga encontrados.

Quando as perdas de carga são avaliadas em relação à situação atual da instalação, com AMT média medida de 93,21 m e de 100,26 m, respectivamente, três e quatro equipamentos em paralelo, os valores são ainda mais expressivos. Este quando comparado, igualmente, ao desnível geométrico de 61,8 m, resulta, por exemplo, em 38,46 m (38,36 %) de perdas de carga na condição de quatro equipamentos em paralelo.

No momento em que se avalia os valores de velocidades médias apresentados na Tabela (5.10) cabe ressaltar que esses são os calculados através da equação da continuidade de massa, frente às áreas transversais teóricas de cada adutora de 600 mm. No entanto, devido aos diferentes valores de rugosidade presentes nas três adutoras, diferenciados valores de vazão surgem e, conseqüentemente, isso impacta em diferentes valores de velocidades para a mesma condição operacional. Com as simulações executadas no EPANET e confirmadas através de medições em campo, os seguintes valores de velocidades médias foram encontrados: $1,74 \text{ m s}^{-1}$ (adutora 01); $1,81 \text{ m s}^{-1}$ (adutora 02) e $1,96 \text{ m s}^{-1}$ (adutora 03), para o sequenciamento dos grupos 01, 02, 03 e 04 (51,3 Hz).

Em função dos altos valores de velocidades médias e perdas de carga encontrados no sistema, torna-se interessante se avaliar, também, questões estruturais do bombeamento. Ao se analisar o valor de um possível $D_{econômico}$, que pode ser obtido através da Equação (3.12) – com o coeficiente de *Bresse* estabelecido em 1,1 e a vazão operacional utilizada sendo a mais usual, $1,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (50,80 % do tempo operacional), chega-se a um valor de $D_{econômico}$ de 1.350 mm. Já no momento em que é determinado o valor do diâmetro equivalente do sistema (três adutoras de 600 mm em paralelo), Equação (3.38), 931,2 mm é o valor encontrado. Sendo assim, a diferença entre os valores de $D_{econômico}$ e diâmetro equivalente do sistema e os

baixos valores de “C” das adutoras justificam, portanto, os altos valores de perdas de carga encontrados que, na condição anterior às modificações já realizadas da instalação (conserto da válvula de sucção do GMB 01 e a usinagem do rotor da bomba número 03), Tabela (5.9), aumentavam em 13,63 % quando se partia do sequenciamento de dois grupos em paralelo para três e em +8,72 % quando se acionava mais um equipamento a partir do sequenciamento triplo.

No entanto, anteriormente a qualquer análise referente à substituição das adutoras existentes por outra(s) de maior(es) diâmetro(s) é necessário levar em consideração que a instalação, conforme o indicador $Ph4$ é, operacionalmente, ineficiente. Se, por exemplo, a vazão mais usual fosse diminuída para valores da ordem dos 1.300,00 L/s, através de um melhor controle operacional, o $D_{econômico}$ passaria para o valor de 1.254 mm e os acréscimos de perdas de carga de +8,72 % anteriores seriam, basicamente, zerados.

É necessário que a análise se concentre, também, na avaliação de instalações futuras a serem construídas no sistema, visto que, com um alto valor a ser investido em tubulações e equipamentos será possível se obter uma instalação extremamente eficiente, mas que com a não observação de obras futuras a serem implementadas, tornará o retorno do investimento inviável economicamente. De certa maneira, a instalação em estudo se enquadra dentro dessa análise, pois está em fase de projeto e, em um horizonte de quatro anos estará construída uma nova ETA no município “B”. Essa obra irá reduzir os valores bombeados pela EBAB-01 de 1.500,00 L/s (máximos) para valores não superiores aos 800,00 L/s.

Sendo assim, embora se concordando com a necessidade atual de substituição das adutoras por outra(s) de maior(es) diâmetro(s) – $D_{econômico}$ – e/ou acréscimo de outra(s) adutora(s) em paralelo para aumento do valor do diâmetro equivalente do sistema para a consequente diminuição dos valores de perda de carga, o retorno do investimento não será, com certeza, menor do que os quatro anos previstos para a entrada em operação da segunda estação de tratamento de água. Além disso, mesmo que o retorno de investimento fosse condizente com o período de quatro anos, após esse, a instalação se enquadraria como uma estrutura superdimensionada para a nova condição operacional, que terá uma vazão reduzida de 1.500,00 L/s para 800,00 L/s. A não necessidade de avaliação da substituição das adutoras é finalizada pela seguinte situação: como o $D_{econômico}$ para a condição de 800,00 L/s (máximo) é de 983,9 mm, frente ao equivalente real de 931,2 mm, fica definida, portanto, a inviabilidade econômica da substituição das adutoras já existentes para a futura condição operacional.

Já com relação aos rendimentos das bombas, após a simulação da execução das alterações do diâmetro dos rotores para 19.3/16”, limpeza das adutoras, substituição das sucções e alterações da rotação do GMB 04 (51,3 Hz), a vazão e a AMT média da condição de dois equipamentos em paralelo – que possui valores reais, anteriores às alterações propostas, de 1.012,00 L/s e 81,51 m e simulados de 1.048,08 L/s (+3,57 %) e 81,33 m (-0,22 %) – passaria para 1.038,22 L/s (+2,59 %) e 74,85 m (-8,17 %). O rendimento das bombas no caso avaliado teria um aumento do valor médio, que se situa em, possivelmente, valor menor que os 80 %, pois a bomba número 04 apresenta um excessivo tamanho de rotor que o retira das curvas de isorendimentos do fabricante – situação atual da instalação – para 81 %, após a simulação de todas as alterações a serem realizadas.

Portanto, percebe-se que os valores encontrados de vazão para dois grupos em paralelo serão sempre – nas condições simuladas sem a realização das alterações e após a aplicação das alterações – superiores aos 800,00 L/s necessários à ETA e, mesmo realizando a usinagem de todos os rotores para o diâmetro de 18.1/2” (mínimo definido pelo fabricante), as vazões obtidas terão uma média simulada de 915,17 L/s. Já a AMT média se estabelecerá em 72,05 m e os rendimentos das bombas atingirão sempre valores de 82 %. Com relação à $Pot_{absmotor}$ que possui uma média para o sequenciamento duplo de GMB's, medida em campo, de 1.108,4 kW (miscelânea de rotores) passaria para a condição simulada de rotores de 18.1/2”, de acordo com a Figura (3.3), para valores próximos aos 960,0 kW (rendimento de bombas de 82 %, motor elétrico 96 %, cabos e acoplamento com perdas de 2 % e 1 %, respectivamente, conforme Kalaiselvan et al. (2016), Tabela (2.1)).

Sendo assim, a partir das informações até aqui descritas é possível afirmar que, com a operação de apenas dois grupos na EBAB-01, onde a AMT média vai girar em torno dos 72 m (rotor de 18.1/2”), os valores de vazão serão superiores aos 800,00 L/s necessários ao tratamento. E, os valores de rendimento das bombas serão de 82 %. Os resultados relativamente baixos de rendimentos das bombas possibilitam, portanto, avaliar uma possível substituição das bombas por outras mais adequadas à nova condição operacional.

No entanto, anteriormente ao prosseguimento das análises, com a finalidade de comparação futura para se estabelecer o tempo do retorno dos investimentos, deve-se determinar os valores de $Pot_{absmotor}$ – para a condição de redução da vazão condizente com a nova necessidade do tratamento (dois GMB's em paralelo, 800,00 L/s) – e, com isso, realizar a comparação com as futuras reduções de $Pot_{absmotor}$ produzidas pelas eventuais substituições dos equipamentos eletromecânicos. Dessa maneira foi simulada no EPANET a redução das rotações dos conjuntos motobombas (bombas atuais, todas as alterações

simuladas aplicadas e rotores de 18.1/2”), como se todos os conjuntos possuíssem conversores de frequência. Com a frequência simulada de 57 Hz nos conjuntos GMB’s 01, 02, 03 e 04, a vazão média e AMT média obtidas foram, respectivamente, 812,06 L/s e 69,93 m. Utilizando o valor médio de $Pot_{absmotor}$ para o sequenciamento duplo, em 60 Hz, na Equação (3.27) – 960,0 kW, 480,0 kW por GMB – ao se aplicar o valor de rotação de 57 Hz em ambos os grupos motobombas, o resultado do somatório das $Pot_{absmotor}$ nessa nova condição operacional será de 823,0 kW, 411,5 kW por GMB.

No Anexo (08) é apresentada a curva característica de outra bomba centrífuga que, nas condições de AMT média de 70 m e rotor de diâmetro de 23.1/2”, forneceria uma vazão média próxima aos 830,00 L/s no sequenciamento de dois equipamentos em paralelo, sendo que o rendimento das bombas ficaria em torno dos 85 %. A $Pot_{absmotor}$ (823,0 kW) para o sequenciamento duplo de GMB’s que possuía uma média estimada para os rotores de 18.1/2”, 57 Hz – bombas instaladas atualmente – passaria, de acordo com o Anexo (08), para valores próximos aos 790,0 kW (rendimento de bomba 85 %, motor elétrico 96 %, cabos e acoplamento com perdas de 2 % e 1 %, respectivamente, conforme Kalaiselvan et al. (2016), Tabela (2.1)).

Além disso, ao se analisar o rendimento das novas bombas propostas nas condições atuais da instalação, anteriormente mesmo às simulações de revitalização das adutoras e substituição das sucções, na condição de AMT média de três grupos (93,21 m), com os rotores de 26.3/4”, 87 % de rendimento individual seria alcançado por cada bomba com uma vazão total instantânea próxima aos 1.580,00 L/s. Ou seja, a vazão atingida seria em torno de 80,00 L/s maior do que a atual atingida com quatro equipamentos em paralelo e o rendimento médio das bombas passaria de 86 % (média atual para quatro equipamentos em paralelo) para 87 % (proposta com três equipamentos em paralelo). Já no momento em que ocorrerem as alterações estruturais da instalação (simulação das sucções e revitalização das adutoras), na AMT média de 83,35 m, o rendimento das três bombas passaria para 88 %, com a vazão chegando próxima aos 1.875,00 L/s, mantendo-se o mesmo rotor de 26.3/4”.

Dessa maneira, está claro que a substituição das bombas atuais instaladas na EBAB-01 por outras de acordo com a curva característica das do Anexo (08) faria com que o ponto operacional de cada bomba ficasse com rendimentos muito melhores em uma ampla faixa de AMT médias que vão desde os 70 m (rotor 23.1/2”, 85 %) até os 93,21 m (rotor 26.3/4”, 88 %). Os valores dos rendimentos seriam, portanto, sempre superiores aos apresentados pelos da curva característica das bombas instaladas atualmente, Figura (3.3), mesmo com o

envelhecimento das tubulações, em função dos anos de uso, que ocasionam o aumento da perda de carga e, conseqüentemente, da altura manométrica.

Estando a justificativa técnica definida de maneira plausível, é necessário realizar, agora, a avaliação econômica, pois ao se propor a substituição das bombas atuais, é necessário realizar, também, a troca dos motores existentes, visto que os atuais são de quatro polos (1790 rpm) e os necessários para as novas bombas serão de seis polos (1175 rpm). Além disso, faz-se indispensável a instalação de conversores de frequência nos acionamentos dos equipamentos, pois os existentes com *soft-starter* não permitirão a regulação da vazão para valores menores que os 830,00 L/s do sequenciamento duplo de equipamentos.

Os valores investidos devem ser comparados à redução de 33,0 kW no consumo e na demanda, que será o valor obtido em diminuição de potência dos equipamentos para a vazão de, aproximadamente, 830,00 L/s. Se forem levados em consideração os dados referentes ao preço da energia elétrica – Figura (5.6) – e as informações de sequenciamentos de grupos acionados na EBAB-01, Tabela (5.6) – avaliadas as informações de três e quatro grupos apenas, respectivamente, 38,09 % e 50,80 % do tempo operacional – o valor de 82.351,57 R\$ ano⁻¹ referente ao consumo e de 24.611,40 R\$ ano⁻¹ referente à demanda podem ser economizados. Ou seja, um montante de 106.962,97 R\$ ano⁻¹ pode ser economizado com a substituição das bombas e motores da EBAB-01 (os valores não consideram os impostos e incidências de bandeiras tarifárias, bem como levam em consideração no consumo, apenas, o valor do “kWh” no horário fora de ponta).

Ao se destacar que os custos das alterações das sucções dos grupos motobombas de 400 mm para 700 mm, da recuperação da rugosidade das tubulações e de aquisição de conversores de frequência (para permitir a regulação da vazão operacional) deverão ser comuns as duas análises: com as bombas atuais (rotor de 18.1/2”) e com as novas propostas – Anexo (08) – a análise econômica deverá ser realizada frente, apenas, à aquisição de três novos conjuntos motobombas. Dessa maneira, independente da substituição dos GMB’s, conforme o Apêndice (12) o custo definido da melhoria número “6” (R\$: 289.036,23) deverá ser gasto para a substituição das sucções e recuperação das adutoras. Já com relação aos conversores de frequência, aproximadamente R\$: 225.000,00 são previstos como custo para a aquisição/instalação em três conjuntos motobombas (dois operando e um reserva).

Conforme Apêndice (12), número da melhoria “6”, realizando essas alterações, o retorno do investimento está previsto para período inferior a um ano nas condições atuais da instalação sendo, portanto, desnecessária considerar essa análise para a nova condição operacional de dois GMB’s operando em paralelo. Ou seja, aplicam-se as alterações

estruturais propostas anteriormente à entrada em operação da nova ETA e o retorno fica garantido em prazo suficiente economicamente. Já para a condição de GMB's novos, a Tabela (5.15) detalha os custos de materiais relativos somente às substituições dos equipamentos eletromecânicos para a nova condição operacional.

Tabela (5.15) – Custos de materiais para substituição dos equipamentos eletromecânicos da EBAB-01 (830,00 L/s).

Descrição do item	Custo unitário [R\$]	Custo total [R\$]
Motor elétrico, 750 hp, 440 V, 6 polos (1175 rpm).	100.000,00	300.000,00
Bomba centrífuga horizontal bi-partida 1500 m ³ h ⁻¹ , AMT 70 m, rendimento 85 %, 500 hp.	150.000,00	450.000,00
		<u>750.000,00</u>

Ao se analisar o reajuste médio do custo da energia elétrica para o período de outubro de 2014 a novembro de 2018, a média encontrada é de 10,30 % ano⁻¹. Esses dados são os apresentados no próprio site da companhia de abastecimento de energia elétrica¹⁶ da região em que se encontra a EBAB-01. Comparando-se o custo total da Tabela (5.15) – R\$ 750.000,00 – com o valor previsto em economia energética – 106.962,97 R\$ ano⁻¹ – e, com a média de aumento anual da energia elétrica – 10,30 % ano⁻¹ – o retorno do investimento fica estimado em, aproximadamente, cinco anos e dois meses.

¹⁶ Os dados podem ser acessados através deste link: <http://www.cee.com.br/pportal/cee/Component/Controller.aspx?CC=97801>.

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a realização do diagnóstico hidroenergético do sistema em análise, foi possível, de maneira muito clara, evidenciar na prática o que os autores citados no item 2 (“*Revisão Bibliográfica*”), afirmam referente aos CWSS’s e WSS’s. Entre os vários assuntos tratados nesta dissertação, podem-se destacar:

(a) Coelho e Andrade-Campos (2014), afirmam que, quando os sistemas são concebidos sem o uso da otimização, baseados apenas no imediato aumento da demanda por água, em função do crescimento populacional, sistema ineficientes surgem. De certa maneira, essa afirmação se enquadra bem no sistema analisado, pois, por uma necessidade urgente de água disponibilizada para tratamento, um quarto conjunto motobomba foi acionado de maneira paralela, no qual a vazão volumétrica aumentou do valor máximo, no momento analisado, de 1.300,00 L/s para 1.515,00 L/s (+ 16,54 %), mas com um indicador *Ph4* atingindo um valor de 100 %, apesar de no momento avaliado, o nível de reservação da ETA não atingir valor menor que 52 %.

(b) Moreno et al. (2007), defendem a tese de que apenas a medição e o posterior gerenciamento das grandezas elétricas e hidráulicas da instalação, com avaliação entre a demanda necessária e o conhecimento da maneira otimizada de acionamento dos conjuntos motobombas, podem trazer grandes reduções no consumo energético. Com o estudo realizado foi possível através dos ensaios realizados e a posterior correção dos erros de manutenção básicos identificados (válvula de sucção da bomba 01 restringida e rotor da bomba 03 fora de curva, devido ao excessivo tamanho) que as seguintes economias fossem estimadas: 52.327,00 R\$ ano⁻¹ (-0,96 % do consumo energético total – ponta somado ao fora de ponta) – apenas realizando o desacionamento do quarto equipamento no horário de ponta; 201.312,00 R\$ ano⁻¹ (-18,60 % da demanda contratada para o horário de ponta) – ao se alterar a demanda contratada no horário de ponta de 2.150 kW para 1.750 kW; e, 156.728,52 R\$ ano⁻¹ (-2,89 % do consumo energético total – ponta somado ao fora de ponta) – ao se realizar a escolha otimizada dos GMB's para as combinações mais eficientes (dois e três equipamentos em paralelo).

(c) Cabrera et al. (2016), avaliam que até 10 % de economia podem ser alcançados através de ações voltadas à operação da instalação no BEP. Ao realizar a correção da sucção do GMB 01 e a usinagem do diâmetro do rotor da bomba número 03 de 20.3/16” para 19.15/16”, 131,0 kW (184.827,17 R\$ ano⁻¹ – 3,44 % do consumo total da instalação, apenas avaliado valor, R\$ kWh⁻¹, referente ao período fora de ponta) são estimados em redução de consumo, com

permanência da vazão produzida nos mesmo patamar anterior e com, apenas, investimentos da ordem de R\$ 2.000,00 para usinagem/balanceamento do referido rotor.

(d) Kalaiselvan et al. (2016), afirmam que a otimização do sistema pela avaliação do potencial energético de diminuição da energia consumida, através de avaliações e modelagens em diferentes condições operacionais permitem a redução do consumo energético e econômico; já Coelho e Andrade Campo (2014), avaliam que a otimização se baseia na tese de achar a melhor estratégia de projeto/operação, que minimiza os custos operacionais enquanto satisfaz os consumidores em relação à vazão e à pressão. Esses argumentos foram os utilizados na simulação hidráulica, onde com um investimento de R\$ 289.036,23 (substituição das sucções dos cinco GMB's, usinagem de quatro rotores de bombas e recuperação da rugosidade das adutoras, com o uso de *pigs*), 449.685,45 R\$ ano⁻¹ – 8,28 % do consumo total da instalação (ponta mais fora de ponta) são estimados como sendo possíveis de serem economizados na mesma condição operacional atual da instalação (avaliado valor, R\$ kWh⁻¹, referente apenas ao período fora de ponta). Com essas reduções de consumo obtidas via simulação, após as alterações propostas, economias podem ser obtidas, também, através de alterações da demanda contratada. Levando em consideração que atualmente a demanda contratada para o horário de ponta e fora de ponta esteja adequada, ao se realizar as alterações simuladas, 132.455,42 R\$ ano⁻¹ (8,27 % da demanda contratada total, período de ponta e fora de ponta) podem ser economizados realizando, apenas, alterações contratuais.

Talvez o resultado mais notório desta dissertação foi, especificamente, à compilação dos dados operacionais, conforme Apêndices (05) ao (08) – padrões de consumo e Tabela (5.7) – consumo de energia elétrica, que indicaram que, mesmo a instalação em estudo estando em área de grande sazonalidade climática, independentemente dessa, a operação é, basicamente, a mesma no inverno e no verão. Ao se comparar o volume bombeado no verão frente ao do inverno, ocorreu no período analisado uma diminuição na produção de água de, apenas, 6,82 %. Com relação ao consumo de energia elétrica, em junho de 2017 esse foi, em média, de 44.069,37 kWh dia⁻¹ e em janeiro de 2018, 42.219,18 kWh dia⁻¹.

Ou seja, no período mais frio, consome-se mais energia do que no período mais quente, estando as reservas médias diárias do R-01, respectivamente, nos patamares de 77 % e 79 %. Esse comportamento foi possível de ser observado em função do diagnóstico realizado e é resultante, basicamente, de uma característica do sistema avaliado: durante o inverno, o nível do manancial é sempre superior ao do período do verão. Dessa maneira, o valor da P_{fs} no inverno será sempre maior e, conseqüentemente, a AMT do sistema – parte estática da Equação (3.31) – irá diminuir, o que ocasionará a diminuição da carga da bomba e,

consequentemente, de acordo com a Figura (3.3), o aumento da $Pot_{absbomba}$ e a diminuição do η_{bomba} .

Conforme já mencionado, o sistema possui *software* supervisor, mas os resultados operacionais aqui compilados demonstram que a operação não é satisfatória energeticamente. De acordo com os históricos operacionais, apenas em período menor que 5 % a instalação operou com o reservatório R-01 abaixo dos 50 %. Em função disso, se for diminuído, por exemplo, em 10 % o consumo energético do sistema nos meses de maio a outubro (meses mais frios do ano), através de uma operação mais eficiente, com um maior controle sobre o acionamento e o desacionamento dos conjuntos motobombas e uma melhor utilização da capacidade de reserva da ETA, grandes quantias monetárias podem ser poupadas. Isso é algo perfeitamente possível de ser realizado em função dos dados históricos do sistema em análise. Os valores estimados para essa melhoria são de 272.817,52 R\$ ano⁻¹ (5,03 % do consumo total da instalação).

Além disso, ao se analisar as questões estruturais da estação elevatória de água, ficou diagnosticado que essa possui uma considerável parcela de energia desperdiçada em perdas de carga nas tubulações. Como por exemplo, quando essas são avaliadas em relação à situação atual da instalação, com AMT média calculada de 100,26 m, quatro equipamentos em paralelo, comparando-se ao desnível geométrico da instalação – 61,8 m – resultam em 38,46 m (38,36 %) de perdas de carga observadas. Isso é explicado, pois o diâmetro equivalente das três adutoras em paralelo possui um valor de 931,2 mm frente a um econômico, estabelecido pela equação de *Bresse*, de 1.350 mm (que resulta em elevados valores de velocidade média nas tubulações) e, também, aos baixos coeficientes de rugosidade “C” da instalação em função dos anos de uso.

Com relação aos equipamentos eletromecânicos, esses possuem os rendimentos dentro do esperado ou até mesmo melhores que os definidos pelas suas respectivas curvas características. No entanto, os tipos de bombas instaladas atualmente nunca atingem a condição de rendimento máximo – 87 % – em nenhum dos pontos operacionais possíveis (dois, três e quatro equipamentos em paralelo). Ao se propor a substituição desses GMB’s por outros modelos, os rendimentos nas AMT médias que vão desde os 70 m (rotor 23.1/2”) até os 93,21 m (rotor 26.3/4”) estariam nas faixas de 85 % a 88 %, respectivamente. Já o retorno do investimento foi estimado em, aproximadamente, cinco anos e dois meses considerando a substituição de três bombas e de três motores elétricos, sendo isso, viável economicamente.

Como está em fase de implantação uma nova ETA no município “B”, onde a EBAB-01 irá reduzir a vazão bombeada de 1.500,00 L/s para 800,00 L/s não se faz viável

economicamente a análise para a substituição das três adutoras existentes e/ou acréscimo de adutora(s) em paralelo para aumentar o valor do diâmetro equivalente do sistema, pois a associação das três adutoras atualmente ficará na faixa de 95 % do $D_{econômico}$ na condição de vazão máxima. No entanto, caso a condição operacional da instalação mude para valores superiores aos máximos previstos de 800,00 L/s, será necessário estender a análise econômica para uma eventual substituição das adutoras existentes.

Por fim, como de acordo com Gomes (2012), um diagnóstico hidroenergético de um sistema de abastecimento de água consiste na determinação dos possíveis ganhos em eficiência, através de estudos multidisciplinares, cujo resultado é uma lista de possíveis intervenções com suas respectivas estimativas de redução no consumo de energia elétrica e, conseqüentemente, dos gastos associados, esta listagem é apresentada no Apêndice (12). Vale ressaltar que todos os valores monetários estimados não levaram em conta a incidência de impostos e das bandeiras tarifárias e os valores tiveram como base os preços apresentados na Figura (5.6).

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12213. **Projeto de captação de água de superfície para abastecimento público**. Abr. 1992.

_____. NBR 12214. **Projeto de sistema de bombeamento de água para abastecimento público**. Abr. 1992.

_____. NBR 12216. **Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público**. Abr. 1992.

_____. NBR 12217. **Projeto de reservatório de distribuição de água para abastecimento público**. Jul. 1994.

_____. NBR 12218. **Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público**. Jul. 1994.

ALEGRE, Helena et al. **Indicadores de Desempenho para Serviços de Abastecimento de Água**. Tradução e adaptação: Patrícia Duarte, Helena Alegre e Jaime Melo Baptista. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Instituto Regulador de Águas e Resíduos, IWA – International Water Association, set. 2004.

ALLIANCE to Save Energy. **Water and energy: harnessing the opportunities for unexplored water and energy efficiency in municipal water systems**. Washington: Alliance, 2002.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Nota Técnica nº 271/2009-SRE-SRD/ANEEL**, de 4 ago. 2009. Processo nº 48500.004247/2009-37. Assunto: proposta de Alteração Metodológica da Estrutura Tarifária Aplicada ao Setor de Distribuição de Energia Elétrica no Brasil – 1o Parte. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/Nota%20Técnica_271_2009-Estrutura%20Tarifária-1RA%20\(2\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/Nota%20Técnica_271_2009-Estrutura%20Tarifária-1RA%20(2).pdf)>. Acesso em: 15 jul. 2018.

_____. **Resolução Normativa nº 414**, de 9 de set. de 2010. Assunto: estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14486448/bren2010414.pdf/3bd33297-26f9-4ddf-94c3-f01d76d6f14a?Version=1.0>>. Acesso em: 15 jul. 2018.

_____. **Bandeiras tarifárias**. Publicado em 24 nov. 2015 às 09:10 [última modificação: 03 nov. 11 2017, às 11:02]. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/bandeiras-tarifarias>>. Acesso em: 12 jan. 2018.

CABRERA, Enrique et al. Strategies to improve the energy efficiency of pressurized water systems. **Elsevier – Procedia Engineering**, XVIII International Conference on Water Distribution Systems Analysis, vol. 186, p. 294-302, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817314017>>. Acesso em 15 jul. 2018.

CARRIJO, Ivaltemir B. et al. Optimal operational strategies of water distribution systems using multi-objective genetic algorithms and machine learning – implementing the system of macro-water distribution of Goiânia. **Rev. Bras. Recur. Hidr.**, vol. 11, n. 2, p. 161-72, 2006.

CARVALHO, José Francisco de. **Eficiência Energética e Hidráulica no Saneamento**. São Paulo: All Print Editora, 2017.

CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica. **Evolução das Revisões ou Reajustes Realizados nos Últimos Cinco Anos**. Disponível em: <<http://www.cee.com.br/pportal/cee/Component/Controller.aspx?CC=97801>>. Acessado em 07 mai. 2019.

COELHO, Bernardete; ANDRADE-CAMPOS, A. Efficiency achievement in water supply systems – A review. **Elsevier – Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 30, p. 59-84, fev. 2014.

ELETOBRÁS/PROCEL SANEAR. **Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento – Manual Prático; Ministério de Minas e Energia**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, s./ data.

EPRI – Electric Power Research Institute. GELLINGS, C.W. **Program on technology innovation: electric efficiency through water supply technologies – a roadmap, technical report**. Palo Alto: California: Electric Power Research Institute (EPRI), 2009.

EPANET –Software, **Application for Modeling Drinking Water Distribution Systems**. Version 2.0. EPA - United States Environmental Protection Agency, 2011.

FILHO, Dely Oliveira et al. Metodologia de diagnóstico energético em estação de captação de água. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol. 15, n. 10, Campina Grande, out. 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662011001000015>. Acesso em 15 jul. 2018.

FLUKE Corporation. **Fluke 434/435**. Three Phase Power Quality Analyzer. Guia do usuário. Holanda: Fluke Corporation, abril 2006. Disponível em: <http://assets.fluke.com/manuals/434_435_umpor0100.pdf>. Acesso em 31 jul. 2018, às 11:32.

GOMES, Heber Pimentel. **Eficiência Hidráulica e Energética no Saneamento – Análise Econômica de Projetos**. 1ª Ed. Rio de Janeiro: ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.

_____. **Sistemas de Saneamento – Eficiência Energética**. 1º Edição. João Pessoa: Editora Universitária – UFPB, 2009.

_____. **Sistemas de Bombeamento – Eficiência Energética**. 2º Edição. João Pessoa: Editora Universitária – UFPB, 2012.

_____; CARVALHO, Paulo Sérgio O. de. **Manual de Sistemas de Bombeamento – Eficiência Energética**. 2º Edição. João Pessoa: Editora Universitária – UFPB, 2012.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **ONU e IBGE divulgam relatórios de população.** IBGE, s/ data. Disponível em: <<https://ww2.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/11122001onu.shtm>>. Acesso em: 14 jul. 2018, às 17:58.

_____. **Censo demográfico 1940-2010.** IBGE, Séries históricas e estatísticas, s/ data. Disponível em: <<https://seriesestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?vcodigo=POP122>>. Acesso em: 15 jul. 2018.

_____. **Município “A”.** IBGE, 2017. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil>>. Acesso em: 12 jul. 2018.

_____. **Município “B”.** IBGE, 2017. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil>>. Acesso em: 12 jul. 2018.

KALAISELVAN, Arun Shankar Vishnu et al. A comprehensive review on energy efficiency enhancement initiatives in centrifugal pumping system. **Elsevier – Applied Energy**, vol. 181, issue C, p. 495-513, 2016.

KAYA, D. et al. Energy efficiency in pumps. **Energy Convers Manag**, vol. 49, n. 6, p. 1662-73, 2008.

LAMON. **Catálogo do fabricante.** Maleta para medição de parâmetros hidráulicos. Disponível em: <<http://www.lamon.com.br/produtos/pitometria/diferencial-de-pessao/mdh-600-300c-maleta-p-medicao-de-parametros-hidraulicos-pitometria-diferencial-de-pessao>>. Acesso em 17 abr. 2019, às 16:01.

LEWIS A. Rossman. **EPANET 2.0 Manual do Usuário.** Disponível em: <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/epanet/manual_do_epanet_brasil.pdf>. Acesso em 20 jul. 2018.

MATTOS, Edson Ezequiel de; FALCO, Reinaldo de. **Bombas Industriais.** 2º Edição. Rio de Janeiro: Editora Interciência Ltda, 1998.

MINIPA Indústria e Comércio Ltda. **Proposta técnica.** Tacômetro foto/contato. Modelo: MDT-2238A. São Paulo: Minipa, s/ data. Disponível em: <https://www.eletopecas.com/_uploads/ProdutoDownload/produto_458.pdf>. Acesso em 31 jul. 2018.

MORENO, Miguel A. et al. Measurement and improvement of the energy efficiency at pumping stations. **Elsevier – Biosystems Engineering**, vol. 98, n. 4, 2007.

NIVETEC. **Transmissor de nível tipo hidrostático.** Série 780. [Catálogo do fabricante.] São Paulo: Nivetec, 2017. Disponível em: <https://nivetec.com.br/wp-content/uploads/2018/07/NT_CT_Nivetec_S780.pdf>. Acesso em 31 jul. 2018.

SALCAS - Indústrias e Comércio Ltda. **Catálogo técnico de produto.** Manômetro linha standard. São Paulo: Salcas, s/ data. Disponível em: <<http://www.salcas.com.br/pdf/manometro-standard-FSI-FSIG-41-52-62-salcas.pdf>>. Acesso em 31 jul. 2018.

SALVI CASAGRANDE. **Catálogo pressão**. São Paulo, SP: Salvi Casagrande e Salvi Sul, janeiro 2012. Disponível em: <<http://catalogo.salvicasagrande.com.br/down/catalogo-salvicasagrande-pressao.pdf>>. Acesso em 31 jul. 2018.

SANTOS, Sérgio Lopes dos. **Bombas & Instalações Hidráulicas**. São Paulo: LCTE Editora; 2007.

SAVAR, M; KOZMAR, H.; SUTLOVIC, I. Improving centrifugal pump efficiency by impeller trimming. **Desalination**, vol. 249, n. 2, p. 654-9, 2009.

SIEMENS AG. **Level Measurement**. Continuous level measurement Ultrasonic controllers. HydroRanger 200. [Catálogo do fabricante.] S./ local: Siemens, s./ data. Disponível em: <https://w3app.siemens.com/mcms/infocenter/dokumentcenter/sc/pi/InfocenterLanguagePacks/Catalog%20sheet%20HydroRanger%20200/sitransl_hydro200_fi01_en.pdf>. Acesso em 31 jul. 2018.

TELLES, Pedro Carlos da Silva; BARROS, Darcy G. de Paula. **Tabelas e Gráficos para Projetos de Tubulações**. 6º Edição. Rio de Janeiro: Editora Interciência Ltda., 1998.

TSUTIYA, Milton Tomoyuki. **Abastecimento de Água**. 4º Edição. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2014.

_____. Reducing the cost of electricity in pumping stations of water and sewage. In: **Proceedings of XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Foz do Iguaçu: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, 1997.

VALENTE, Manoel Adam Lacayo. **Marco Legal das Licitações e Compras Sustentáveis na Administração Pública**. Consultoria Legislativa (Câmara dos Deputados), Brasília/DF, mar. 2011. Disponível em: <http://www2.camara.leg.br/a-camara/documentos-e-pesquisa/estudos-e-notas-tecnicas/areas-da-conle/tema1/2011_1723.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2018.

VILANOVA, Mateus Ricardo Nogueira; BALESTIERI, José Antônio Perrella. Energy and hydraulic efficiency in conventional water supply systems. **Elsevier – Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford: Pergamon-elsevier Science Ltd, v. 30, p. 701-714, 2014.

_____. Modeling of hydraulic and energy efficiency indicators for water supply systems. **Elsevier – Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 48(C), p. 540-557, 2015a.

_____. Exploring the water-energy nexus in Brazil: The electricity use for water supply. **Energy**. Oxford: Pergamon-elsevier Science Ltd, v. 85, p. 415-432, 2015b.

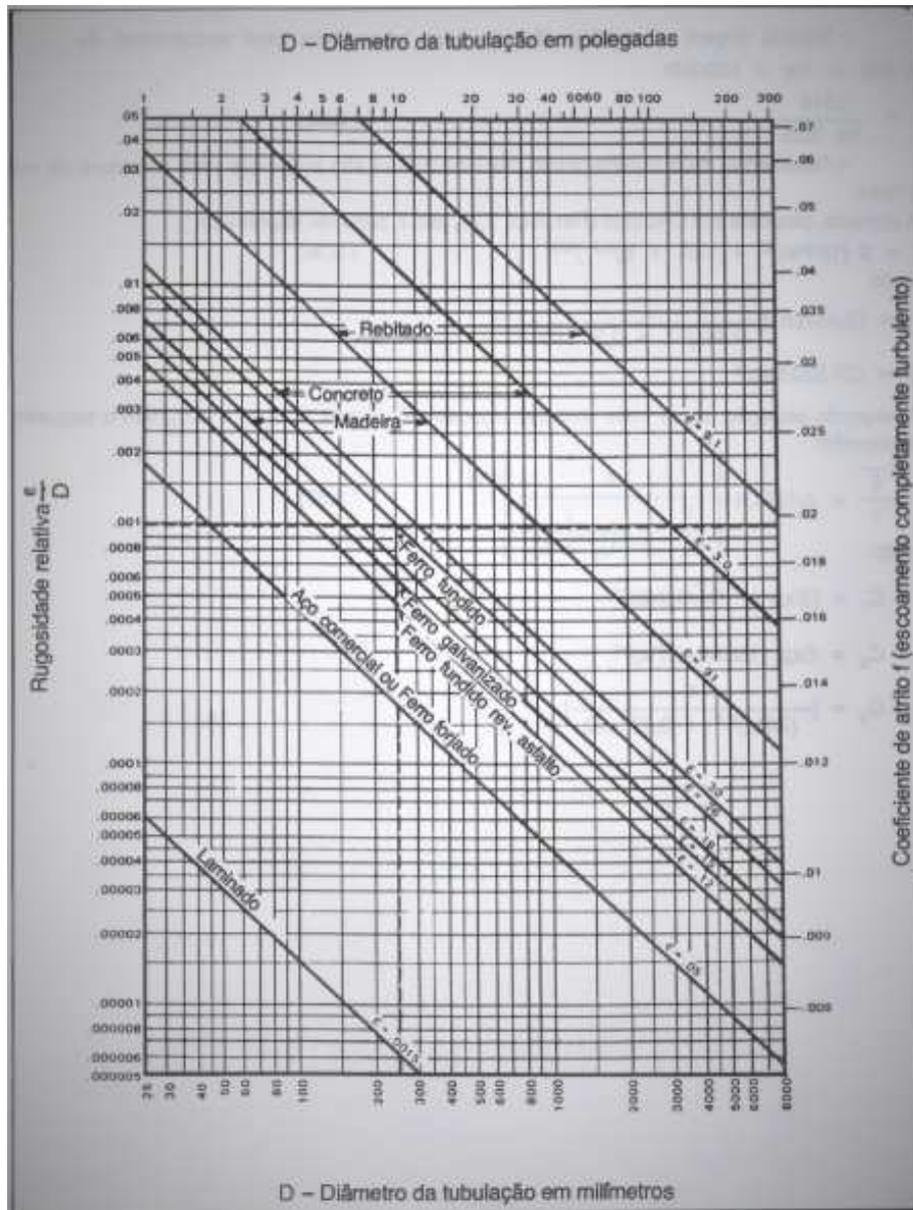
WEG S.A. **Motores Elétricos – Guia de Especificação**. 20ª ed. revisada. Cód: 50032749. Nov. 2016.

ANEXO (01) – RUGOSIDADE ABSOLUTA DAS TUBULAÇÕES

MATERIAL	RUGOSIDADE (K) (mm)
TUBO DE AÇO: JUNTAS SOLDADAS E INTERIOR CONTÍNUO	
• Grandes incrustações ou tuberculizações	2,4 a 12,0
• Tuberculização geral de 1 a 3 mm	0,9 a 2,4
• Pintura à brocha, com asfalto, esmalte ou betume em camada espessa	0,6
• Leve enferrujamento	0,25
• Revestimento obtido por imersão em asfalto quente	0,1
• Revestimento com argamassa de cimento obtida por centrifugação	0,1
• Tubo novo previamente alisado internamente e posterior revestimento de esmalte, vinyl ou epóxi obtido por centrifugação	0,06
TUBO DE CONCRETO	
• Acabamento bastante rugoso: executado com formas de madeira muito rugosas; concreto pobre com desgastes por erosão; juntas mal alinhadas	2,0
• Acabamento rugoso: marcas visíveis de formas	0,5
• Superfície interna alisada a desempenadeira; juntas bem feitas	0,3
• Superfície obtida por centrifugação	0,33
• Tubo de superfície lisa, executado com formas metálicas, acabamento médio com juntas bem cuidadas	0,12
• Tubo de superfície interna bastante lisa, executado com formas metálicas, acabamento esmerado, e juntas cuidadas	0,06
TUBO DE CIMENTO AMIANTO	0,1
TUBO DE FERRO FUNDIDO (NOVO)	
• Revestimento interno com argamassa de cimento e areia obtida por centrifugação com ou sem proteção de tinta a base de betume	0,1
• Não revestido	0,15 a 0,6
• Leve enferrujamento	0,30
TUBO DE PLÁSTICO	0,06
TUBOS USADOS	
• Com camada de lodo inferior a 5,0 mm	0,6 a 3,0
• Com incrustações de lodo ou de gorduras inferiores a 25 mm	6,0 a 30,0
• Com material sólido arenoso depositado de forma irregular	60,0 a 300
Nota:	
• Para adutoras medindo mais de 1.000 m de comprimento: 2,0 vezes o valor encontrado na tabela acima para o tubo e acabamento escolhidos.	
• Para adutoras medindo menos de 1.000 m de comprimento: 1,4 vezes o valor encontrado na tabela para o tubo e acabamento escolhidos.	

Fonte: Tsutiya (2014, p. 162).

**ANEXO (02) – RUGOSIDADE RELATIVA E COEFICIENTE DE ATRITO DO TUBO
EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO E MATERIAL DAS TUBULAÇÕES**



onde ϵ é a rugosidade absoluta.

Fonte: Mattos e Falco (1998, p. 66).

ANEXO (03-A) – VALOR DO COEFICIENTE “C” SUGERIDO PARA A FÓRMULA DE HAZEN-WILLIAMS

Tubos	Novos	Usados ± 10 anos	Usados ± 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 interno epóxico	140	130	120
Ferro fundido, revestimento de argamassa	130	120	105
Grés cerâmico, vidrado (manilhas)	110	110	110
Latão	130	130	130
Tijolos, condutos bem executados	100	95	90
Plástico (PVC)	140	135	130

Fonte: Gomes (2012, p. 31).

ANEXO (03-B) – VALOR DO COEFICIENTE “C” SUGERIDO PARA TUBOS DE FERRO FUNDIDO CENTRIFUGADOS – FÓRMULA DE HAZEN-WILLIAMS

Idade canalização	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
	4 in.	6 in.	8 in.	10 in.	12 in.	14 in.	16 in.	18 in.	20 in.	24 in.	30 in.	36 in.	42 in.	60 in.
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	98	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: Mattos e Falco (1998, p. 89).

ANEXO (04) – TABELAS – MÉTODO DIRETO – ACESSÓRIOS DE TUBULAÇÕES

Tipo de Acessório	k
Curva de 90° raio longo	0,25-0,40
Curva de 90° raio curto (cotovelo)	0,90-1,50
Curva de 45°	0,20
Crivo	0,75
Redução gradual	0,15
Registro de gaveta aberto	0,20
Registro globo aberto	10,00
Tê de passagem direta	0,60
Tê de saída lateral	1,30
Válvula de retenção	2,50
Válvula de pé	1,75
Entrada de reservatório (borda viva)	0,50
Saída de reservatório (borda viva)	1,00

Fonte: Gomes (2012, p. 35).

ANEXO (05) – TABELAS – MÉTODO COMPRIMENTO EQUIVALENTE – ACESSÓRIOS DE TUBULAÇÕES

Peça Especial	Le
Cotovelo de 90°	45 D
Cotovelo de 45°	20 D
Curva de 90°	30 D
Curva de 45°	15 D
Entrada de borda	35 D
Registro tipo globo aberto	350 D
Saída de canalização	35 D
Tê, passagem direta	20 D
Tê, saída lateral	65 D
Válvula de pé com crivo	250 D
Válvula de retenção	100 D

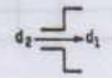
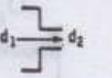
Fonte: Gomes (2012, p. 35).

**ANEXO (06) – TABELAS – MÉTODO COMPRIMENTO EQUIVALENTE –
VÁLVULAS**

Diâmetro Nominal (Polegada)	Válvulas gaveta (abertura total)	Válvulas globo (2) (abertura total)			Válvula de retenção		Válvulas de esfera ou macho (abertura total)	Válvula de três vias (Área de abertura 80% da área tubo)		Válvula borboleta (abertura total)	Diâmetro Nominal (Polegada)
		 90°	 60°	 45°	Portinhola	Levanta- mento		Fluxo direto	Fluxo pelo ramal		
1 1/2"	1.75 (0,53)	46 (14,02)	23 (7,01)	18 (5,49)	17 (5,18)	20 (6,10)	2.5 (0,76)	6 (1,83)	20 (6,10)	6 (1,83)	1 1/2"
2"	2.25 (0,69)	60 (18,29)	30 (9,15)	24 (6,52)	22 (6,71)	25 (7,62)	3.5 (1,07)	7.5 (2,29)	24 (7,32)	8 (2,36)	2"
2 1/2"	2.75 (0,84)	70 (21,34)	38 (11,59)	30 (9,15)	27 (8,23)	30 (9,15)	4 (1,22)	9 (2,74)	30 (9,15)	10 (3,05)	2 1/2"
3"	3.5 (1,07)	90 (27,44)	45 (13,72)	38 (11,59)	35 (10,67)	38 (11,59)	5 (1,52)	12 (3,66)	36 (10,98)	12 (3,66)	3"
4"	4.5 (1,37)	120 (36,59)	60 (18,29)	48 (14,63)	45 (13,72)	50 (15,24)	6.5 (1,98)	15 (4,57)	48 (14,63)	15 (4,57)	4"
6"	6.5 (1,98)	175 (53,35)	88 (26,83)	72 (21,95)	65 (19,82)	75 (22,87)	10 (3,05)	22 (6,71)	70 (21,34)	23 (7,01)	6"
8"	9 (2,74)	230 (70,12)	120 (36,59)	95 (28,96)	90 (27,44)	100 (30,49)	13 (3,96)	30 (9,15)	95 (28,96)	27 (8,23)	8"
10"	12 (3,66)	280 (85,37)	150 (45,73)	130 (39,63)	120 (36,59)	130 (39,63)	16 (4,88)	38 (11,59)	120 (36,59)	35 (10,67)	10"
12"	14 (4,27)	320 (97,56)	170 (51,83)	145 (44,21)	140 (42,68)	150 (45,73)	19 (5,79)			40 (12,20)	12"
14"	15 (4,57)	380 (115,85)	190 (57,93)	160 (48,78)	150 (45,73)	170 (51,83)	20 (6,10)			45 (13,72)	14"
16"	17 (5,18)	420 (128,05)	220 (67,07)	180 (54,88)	170 (51,83)	190 (57,93)	22 (6,71)			50 (15,24)	16"
18"	18 (5,49)	480 (146,34)	250 (76,22)	205 (62,50)	180 (54,88)	210 (64,02)	24 (7,32)			58 (17,68)	18"
20"	20 (6,10)	530 (161,59)	290 (88,41)	240 (73,17)	200 (60,98)	240 (73,17)	27 (8,23)			64 (19,51)	20"
22"	25 (7,62)	580 (176,83)	300 (91,46)	255 (77,74)	240 (73,17)	260 (79,27)	30 (9,15)			70 (21,34)	22"
24"	32 (9,76)	630 (192,07)	330 (100,61)	270 (82,32)	250 (76,22)	290 (88,41)	33 (10,06)			78 (23,78)	24"
										100 (30,49)	30"
										125 (38,11)	36"
										145 (44,21)	42"
										165 (50,30)	48"
										175 (53,35)	52"

Fonte: Mattos e Falco (1998, p. 77).

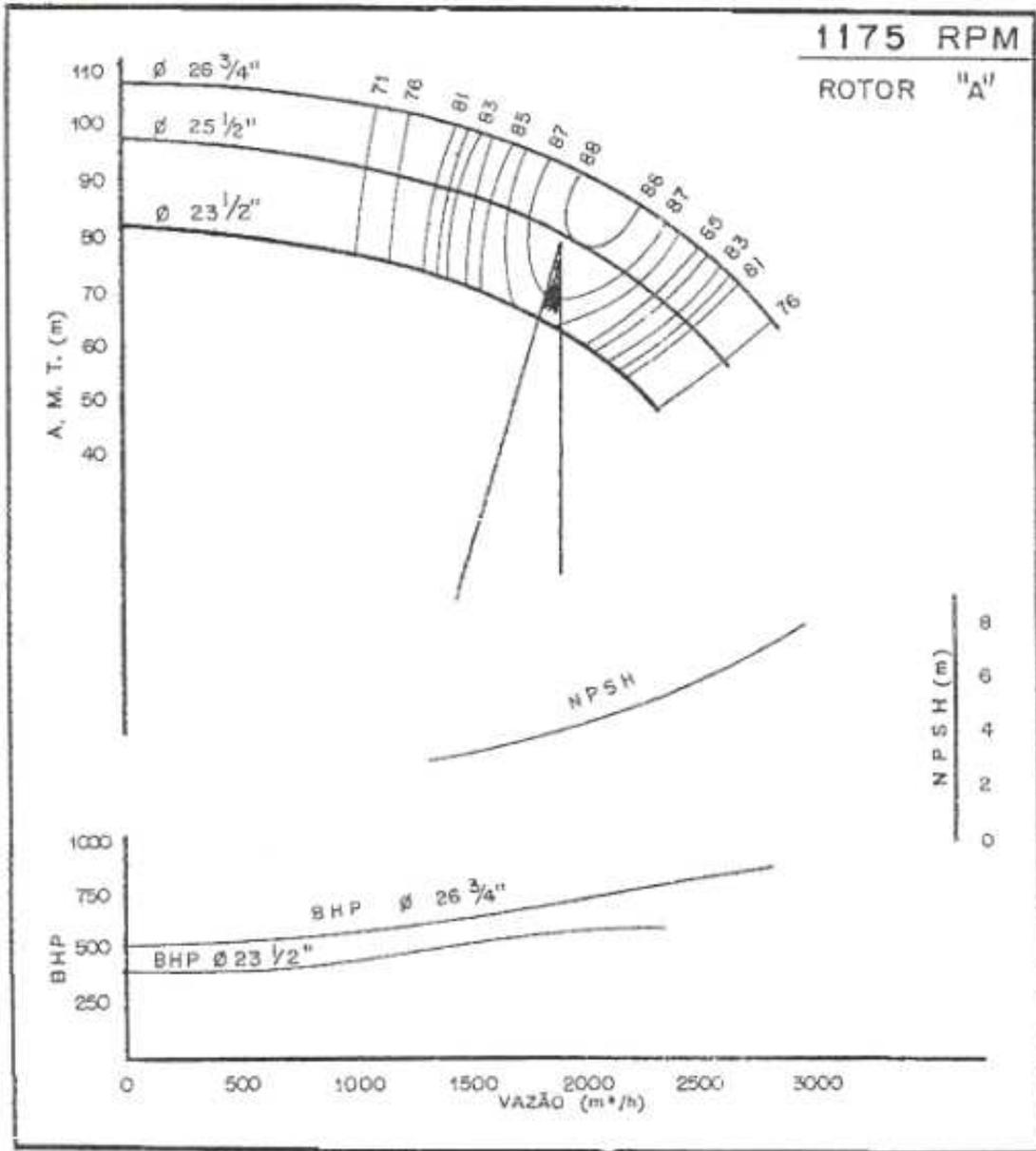
**ANEXO (07) – TABELAS – MÉTODO COMPRIMENTO EQUIVALENTE –
REDUÇÕES/AMPLIAÇÕES DE DIÂMETRO**

Diâmetros Nominiais (Polegada)		 	
d_1	d_2	d_2	d_1
3/4	1/2	,6 (0,18)	,5 (0,15)
1	1/2	1,2 (0,37)	,7 (0,21)
	3/4	,6 (0,18)	,6 (0,18)
1 1/2	3/4	1,6 (0,49)	1,0 (0,30)
	1	1,2 (0,37)	,9 (0,27)
2	1	2,2 (0,67)	1,3 (0,40)
	1 1/2	1,3 (0,40)	1,3 (0,40)
3	1 1/2	3,8 (1,16)	2,4 (0,73)
	2	2,7 (0,82)	2,3 (0,70)
4	2	5 (1,52)	3,2 (0,98)
	3	3 (0,91)	3 (0,91)
6	3	8 (2,44)	5 (1,52)
	4	4 (1,22)	4 (1,22)
8	4	12 (3,66)	7 (2,13)
	6	7 (2,13)	7 (2,13)
10	4	15 (4,57)	8 (2,44)
	6	14 (4,27)	9,5 (2,90)
	8	6 (1,83)	6 (1,83)
12	6	19 (5,79)	12 (3,66)
	8	14 (4,27)	12 (3,66)
	10	6,5 (1,98)	6,5 (1,98)

Diâmetros Nominiais (Polegada)		 	
d_1	d_2	d_2	d_1
14	6	22 (6,71)	14 (4,27)
	8	22 (6,71)	14 (4,27)
	10	15 (4,57)	13 (3,96)
	12	6 (1,83)	6 (1,83)
16	8	27 (8,23)	17 (5,18)
	10	23 (7,01)	17 (5,18)
	12	15 (4,57)	15 (4,57)
	14	7 (2,13)	7 (2,13)
18	10	30 (9,15)	19 (5,79)
	12	23 (7,01)	19 (5,79)
	14	15 (4,57)	15 (4,57)
	16	4 (1,22)	4 (1,22)
20	12	30 (9,15)	23 (7,01)
	14	21 (6,40)	19 (5,79)
	16	13 (3,96)	13 (3,96)
	18	5 (1,52)	5 (1,52)
24	16	30 (9,15)	25 (7,62)
	18	25 (7,62)	25 (7,62)
	20	12 (3,66)	12 (3,66)

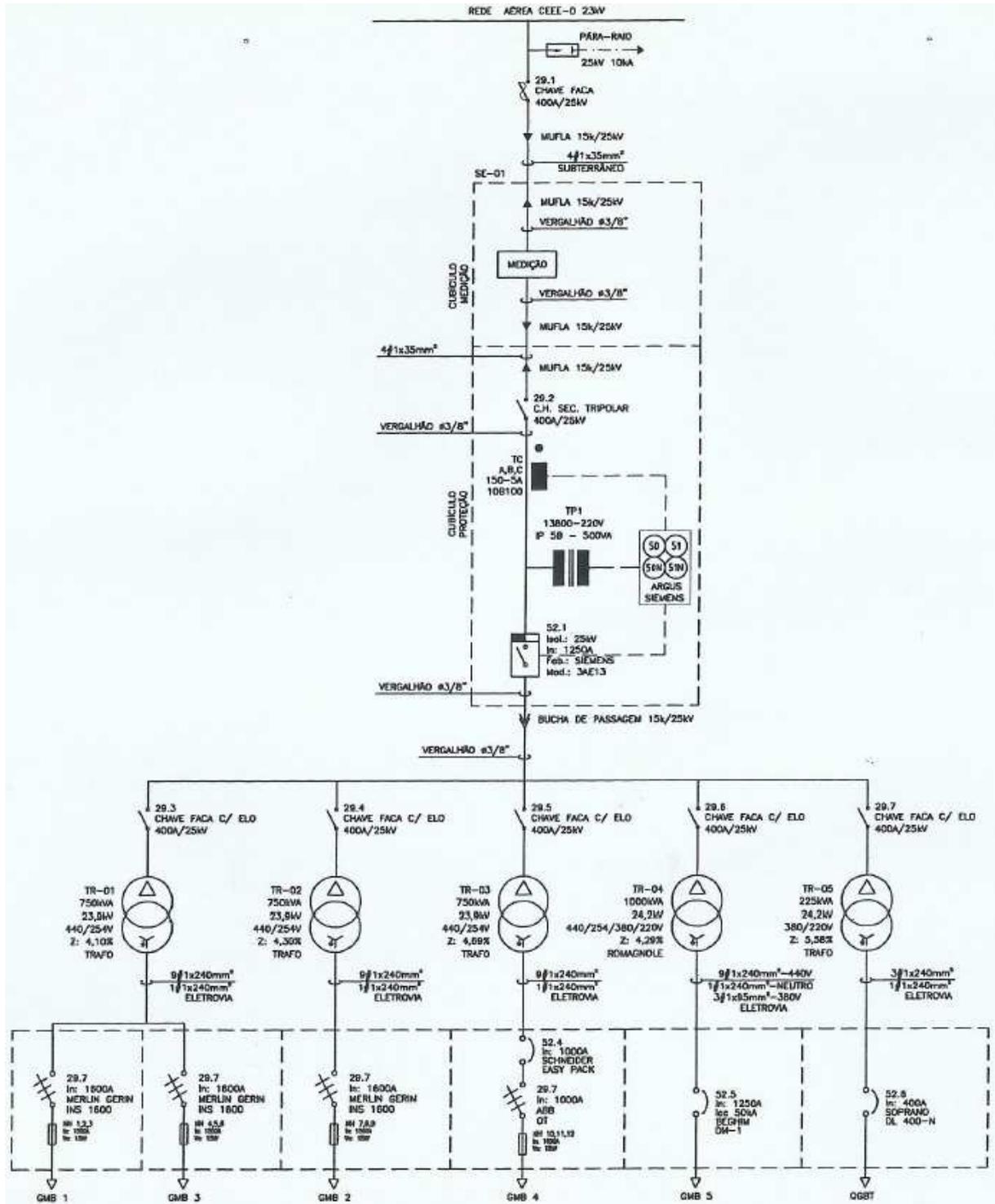
Fonte: Mattos e Falco (1998, p. 76).

ANEXO (08) – CURVA CARACTERÍSTICA BOMBA DINÂMICA OU TURBOBOMBA (PROPOSTA PARA A EBAB-01)



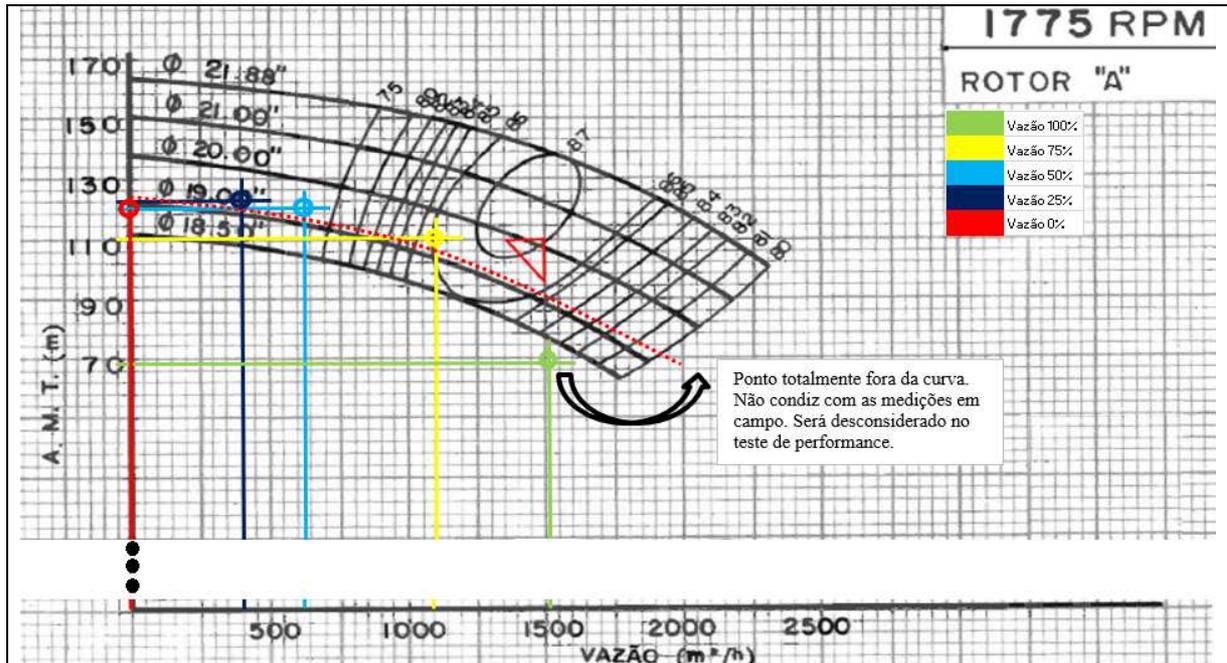
Fonte: curva característica da bomba fornecida pelo fabricante (Worthington/Dresser, 1988) durante processo de aquisição.

ANEXO (09) – DIAGRAMA UNIFILAR ELÉTRICO



Fonte: Projeto da Companhia de Distribuição de Água.

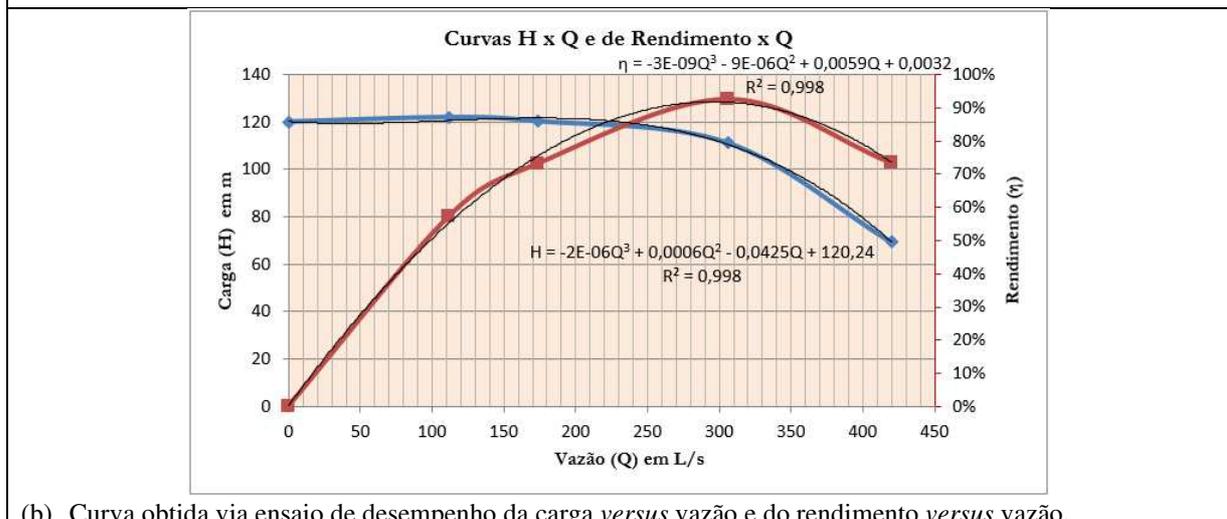
APÊNDICE (01) – ENSAIO DE DESEMPENHO BOMBA 01



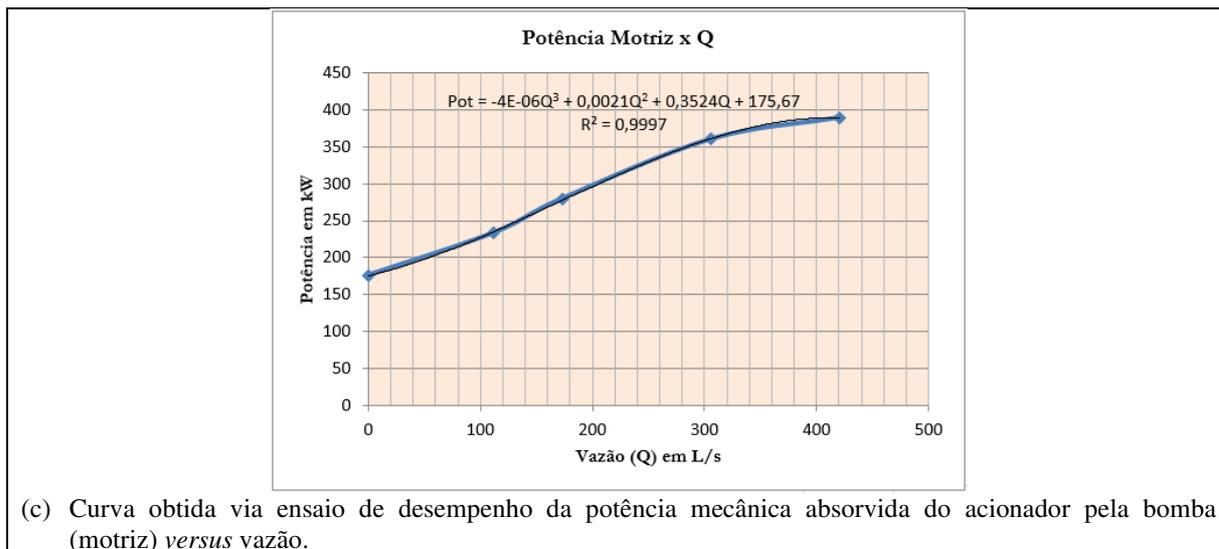
Observação: rotor GMB 01 é 19.3/16”.

(a) Curva característica do fabricante *versus* pontos do ensaio de desempenho para o rotor aplicado.

* Na condição de teste de desempenho em vazão plena do GMB-01, a AMT foi estimada em 70 m. No entanto, nesse ponto operacional, a pressão obtida no manovacômetro instalado no flange de sucção da bomba atingiu o fundo de escala (válvula de sucção danificada), o que é um indicativo que, na verdade, o valor dessa é ainda menor que os -5,0 m e que, portanto, a AMT do ponto é menor que 70 m. Nessa condição operacional aplicada o par carga e vazão ficou deslocado completamente para baixo da curva do fabricante, em um ponto menor que o do menor rotor aceitável da bomba em teste, que é 18.1/2”. Ao manobrar a válvula de recalque da bomba 01, na AMT próxima aos 80 m, o manovacômetro já apresentava medição dentro da escala, o que impactou em se obter a curva de desempenho de maneira satisfatória, pois essa condição de AMT é a mínima operacional (dois grupos em paralelo).

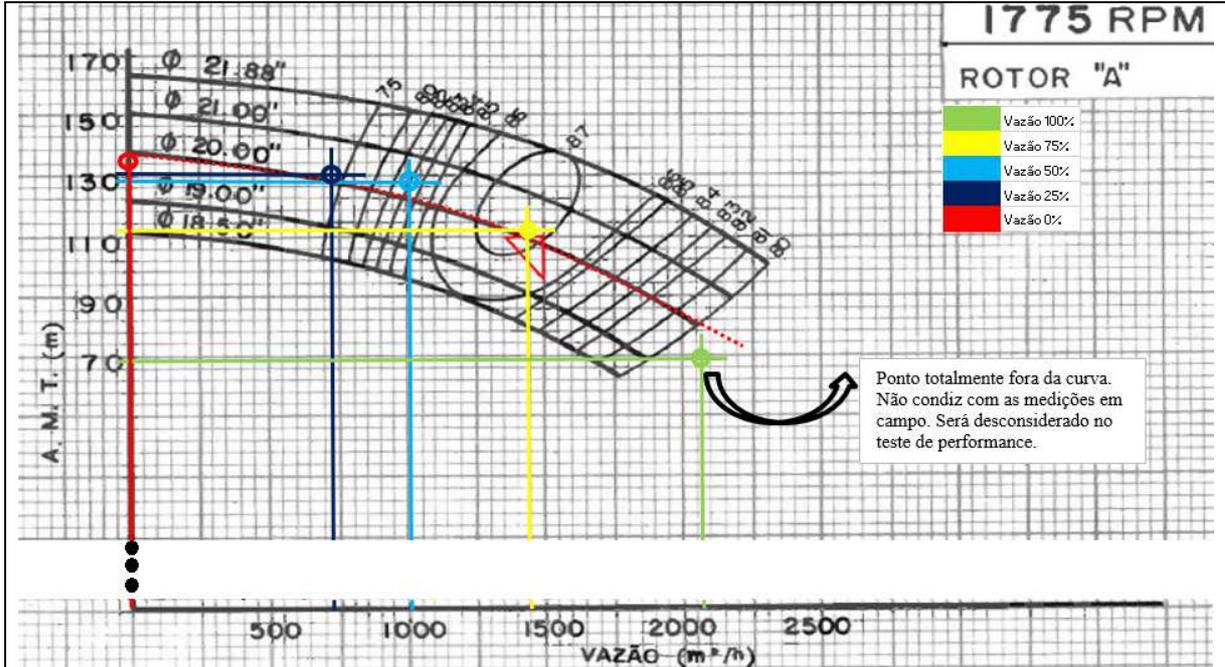


(b) Curva obtida via ensaio de desempenho da carga *versus* vazão e do rendimento *versus* vazão.



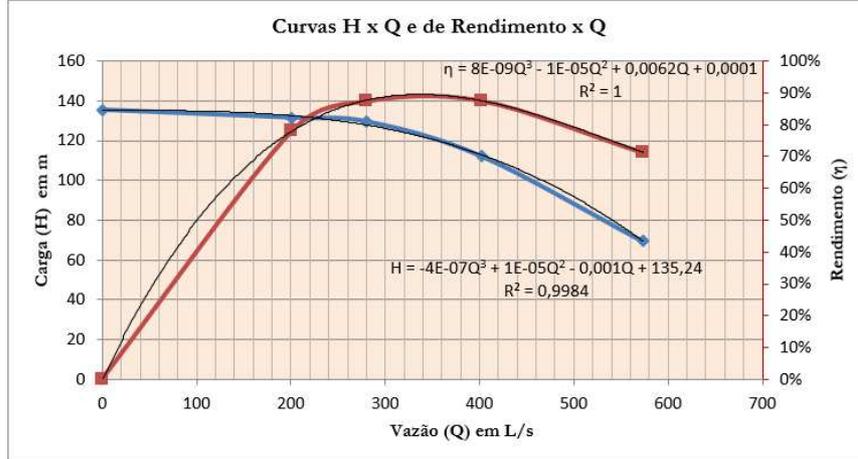
(c) Curva obtida via ensaio de desempenho da potência mecânica absorvida do acionador pela bomba (motriz) *versus* vazão.

APÊNDICE (02) – ENSAIO DE DESEMPENHO BOMBA 02

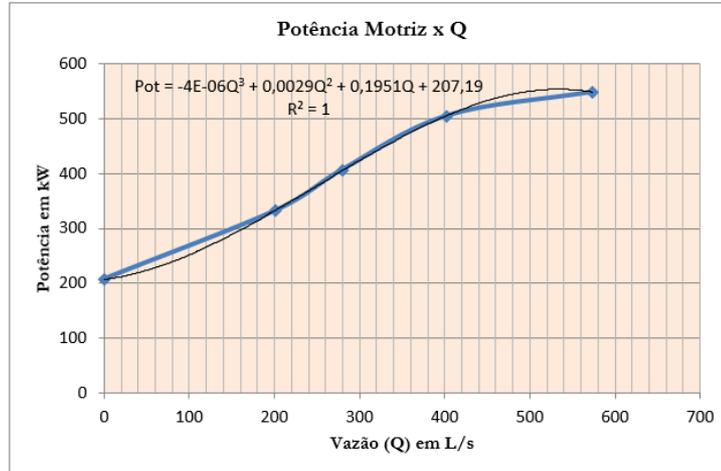


Observação: rotor GMB 02 é 20”.

(a) Curva característica do fabricante *versus* pontos do ensaio de desempenho para o rotor aplicado.

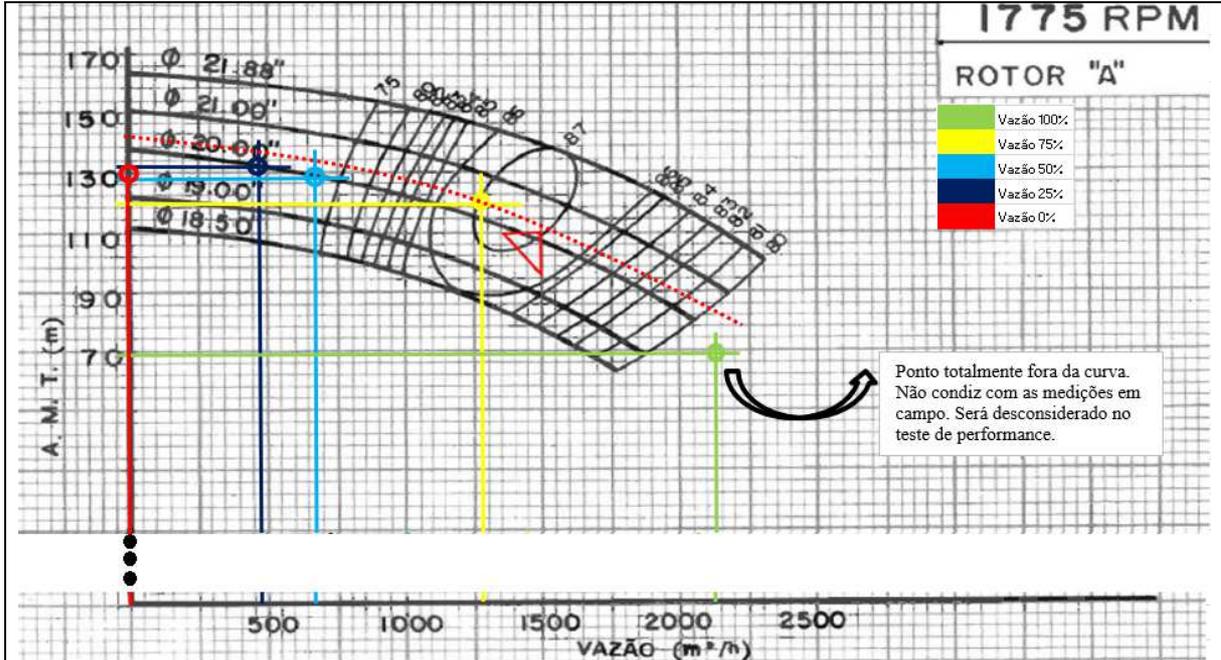


(b) Curva obtida via ensaio de desempenho da carga *versus* vazão e do rendimento *versus* vazão.



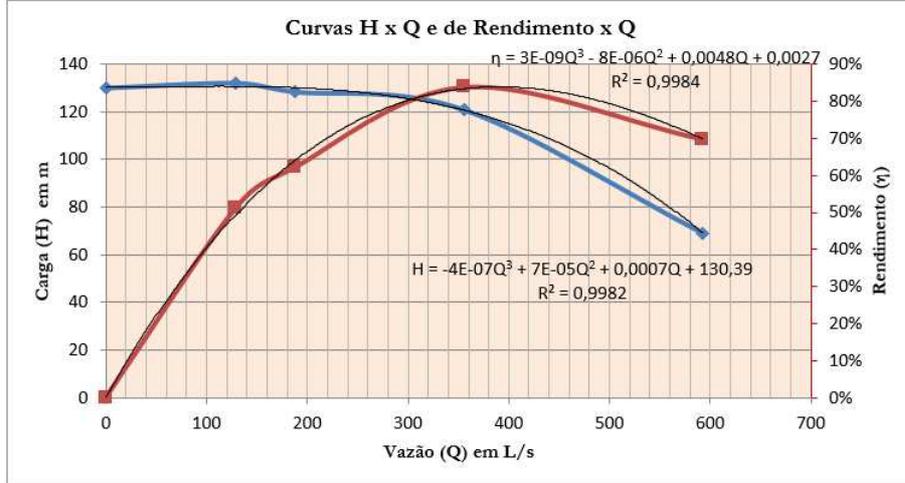
(c) Curva obtida via ensaio de desempenho da potência mecânica absorvida do acionador pela bomba (motriz) *versus* vazão.

APÊNDICE (03) – ENSAIO DE DESEMPENHO BOMBA 03

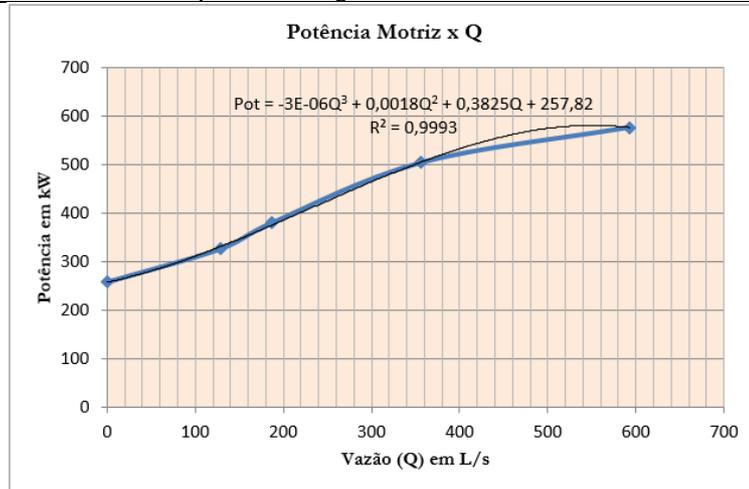


Observação: rotor GMB 03 é 20.3/8”.

(a) Curva característica do fabricante *versus* pontos do ensaio de desempenho para o rotor aplicado.



(b) Curva obtida via ensaio de desempenho da carga *versus* vazão e do rendimento *versus* vazão.



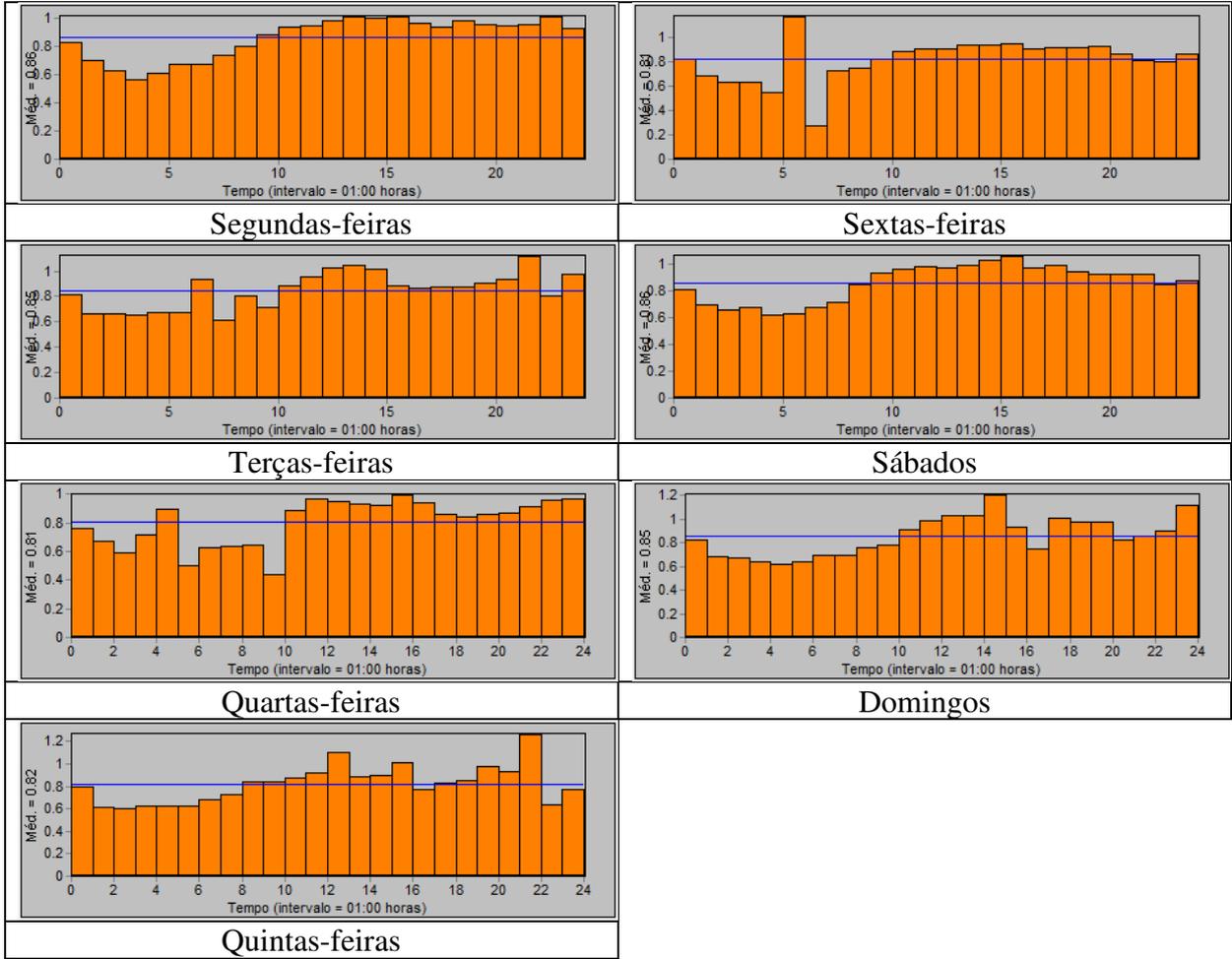
(c) Curva obtida via ensaio de desempenho da potência mecânica absorvida do acionador pela bomba (motriz) *versus* vazão.

**APÊNDICE (04) – COMPARATIVO CURVA CARACTERÍSTICA FABRICANTE
VERSUS ENSAIO DE DESEMPENHO DOS CONJUNTOS MOTOBOMBAS DA
EBAB-01**

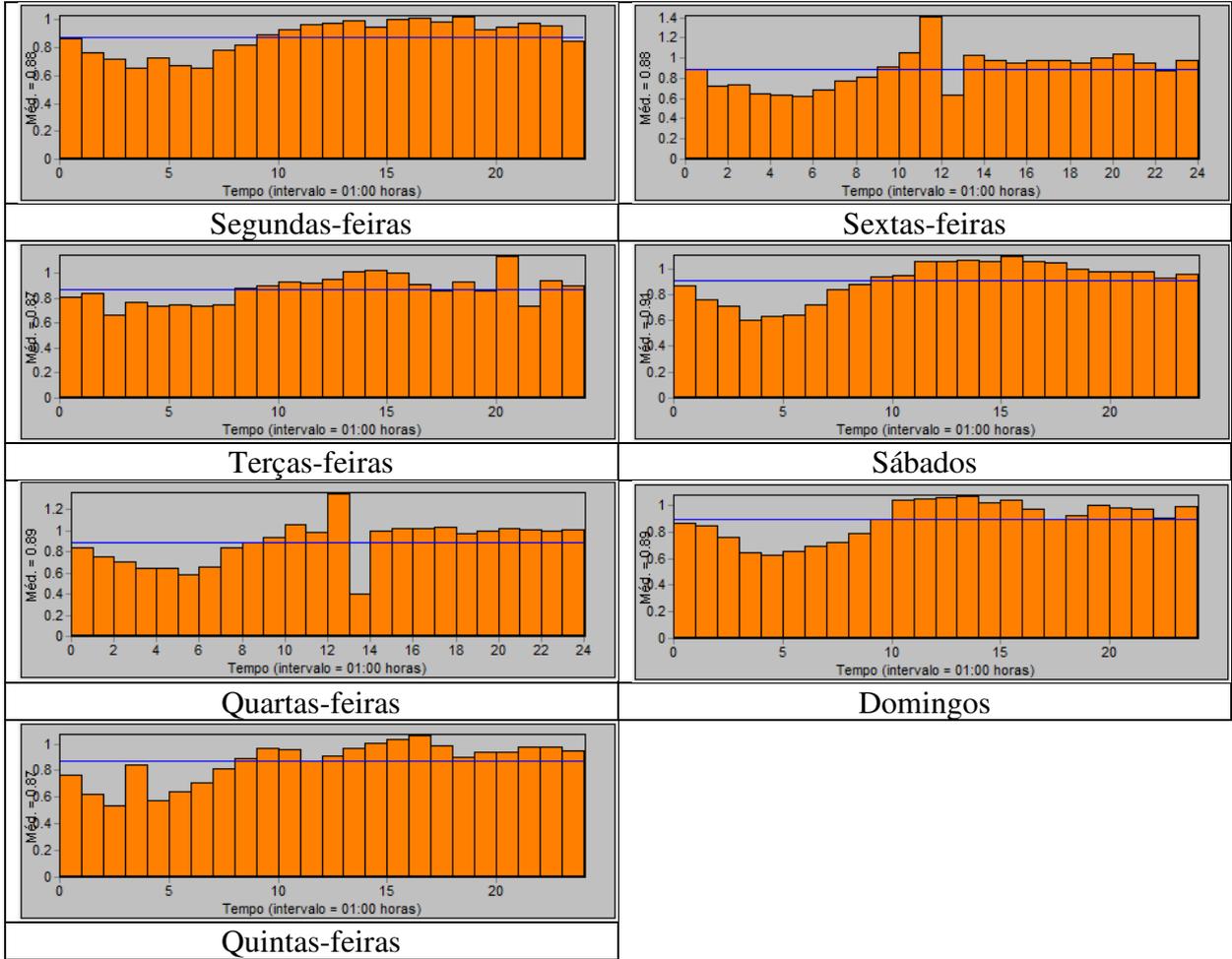
	COMPARATIVO FABRICANTE VERSUS ENSAIOS DE CAMPO					
	BOMBA 01		BOMBA 02		BOMBA 03	
	Curva do Fabricante	Ensaio Corrigido - 1.775 rpm	Curva do Fabricante	Ensaio Corrigido - 1.775 rpm	Curva do Fabricante	Ensaio Corrigido - 1.775 rpm
H [m]	82,0 (muito próximo ao valor médio de dois grupos operando em paralelo)					
Q [m³ h⁻¹]	1.675 (465,3 L/s)	1.360 (377,7 L/s)	2.025 (562,5 L/s)	1.863 (517,4 L/s)	2.120 (588,9 L/s)	2.022 (561,6 L/s)
$\frac{Q_{ensaio}}{Q_{fabricante}}$ [-]	0,81		0,92		0,95	
η_{bomba} [%]	83	81,6*	80	80,1*	< 80,0	73,7*
$\frac{\eta_{ensaio}}{\eta_{fabricante}}$ [-]	0,98		1,00		---	
H [m]	94,0 (muito próximo ao valor médio de três grupos operando em paralelo)					
Q [m³ h⁻¹]	1.420 (394,4 L/s)	1.251 (347,5 L/s)	1.780 (494,4 L/s)	1.712 (475,6 L/s)	1.800 (500,0 L/s)	1.864 (517,8 L/s)
$\frac{Q_{ensaio}}{Q_{fabricante}}$ [-]	0,88		0,96		1,04	
η_{bomba} [%]	86	87,1*	83	84,8*	82	79,0*
$\frac{\eta_{bomba}}{\eta_{fabricante}}$ [-]	1,01		1,02		0,96	
H [m]	104,0 (muito próximo ao valor médio de quatro grupos operando em paralelo)					
Q [m³ h⁻¹]	1.170 (325,0 L/s)	1.132 (314,5 L/s)	1.575 (437,5 L/s)	1.562 (434,0 L/s)	1.700 (472,2 L/s)	1.704 (473,3 L/s)
$\frac{Q_{ensaio}}{Q_{fabricante}}$ [-]	0,97		0,99		1	
η_{bomba} [%]	86	90,5*	86	87,1*	85	83,0*
$\frac{\eta_{bomba}}{\eta_{fabricante}}$ [-]	1,05		1,01		0,98	
Diâmetro Rotor ["]	19.3/16		20		20.3/8	
Tipo Rotor	A					
N [rpm]	1775					

* De acordo com Kalaiselvan et al. (2016), Tabela (2.1), as perdas nos cabeamentos e acoplamentos possuem valores de 2 % e 1 %, respectivamente. Como o medidor de grandezas elétricas foi instalado nas saídas dos quadros de comando, ou seja, entre o(s) quadro(s) de comando(s) e o(s) motor(es) elétrico(s), as perdas nos cabeamentos e acoplamentos devem ser consideradas para que o rendimento de cada bomba seja determinada de maneira mais real. Dessa maneira, foram consideradas além das perdas do motor elétrico para a determinação do valor do η_{bomba} , 3 % de perdas referentes ao cabeamento e ao acoplamento.

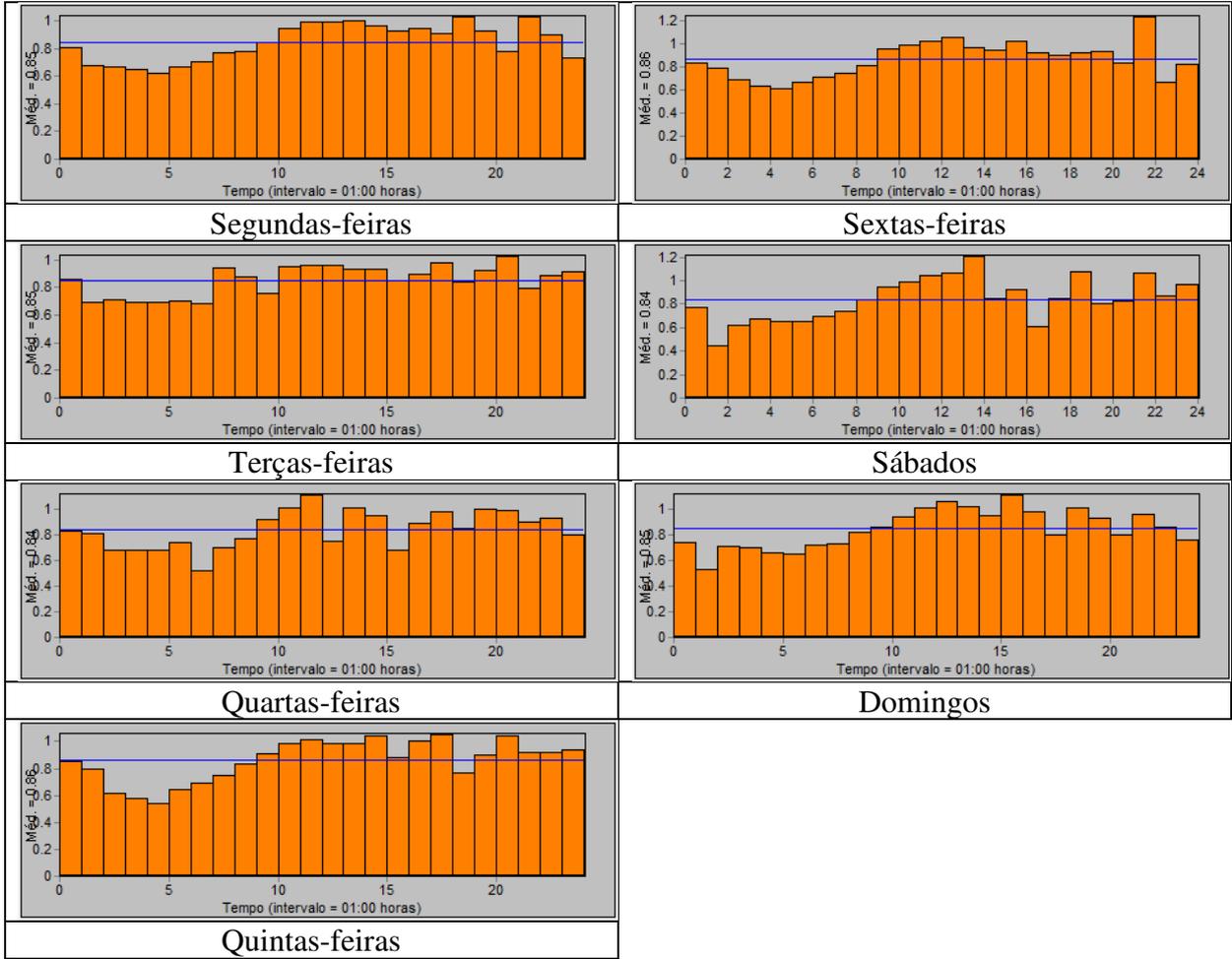
APÊNDICE (05) – PADRÃO DE CONSUMO - PRIMAVERA



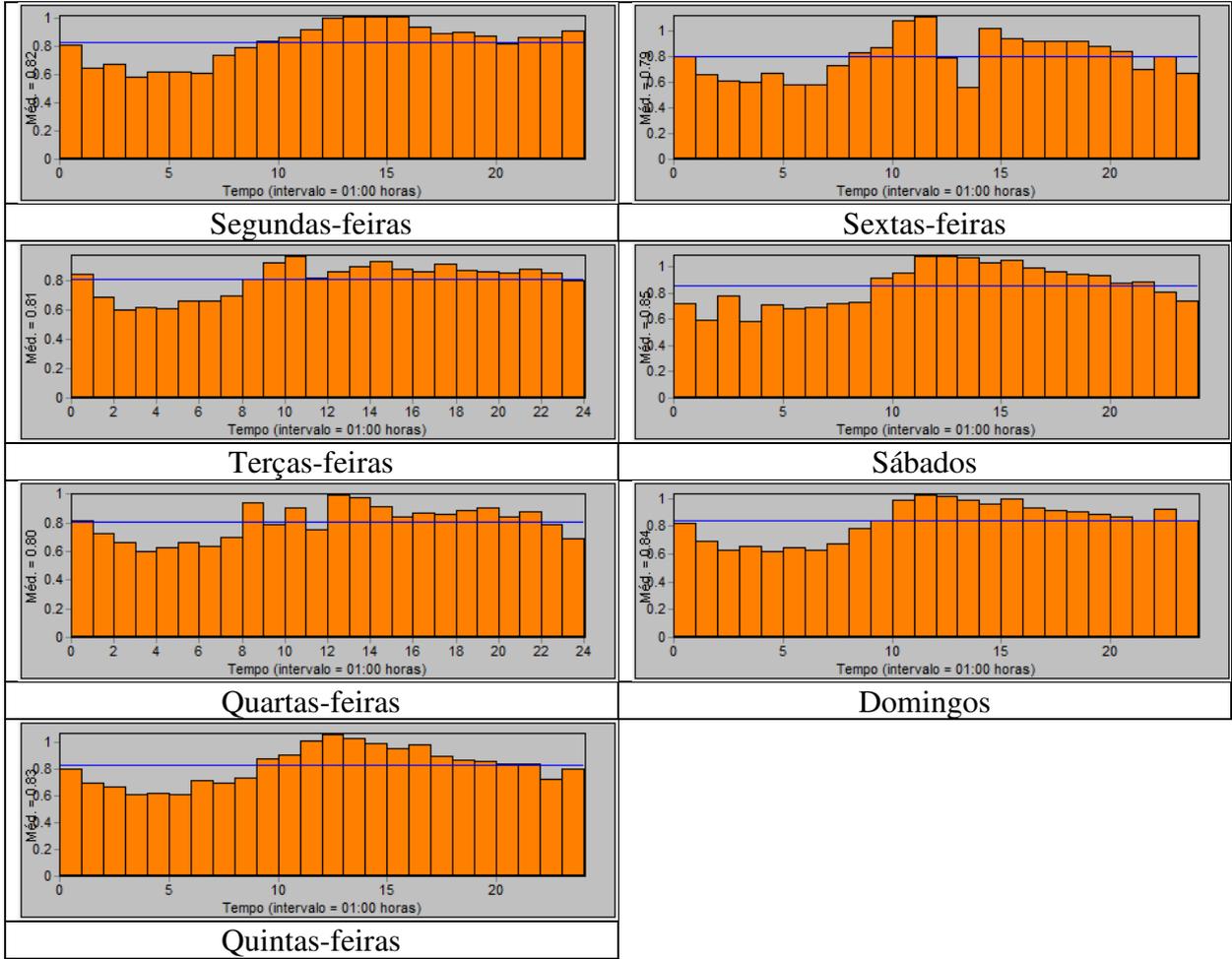
APÊNDICE (06) – PADRÃO DE CONSUMO - VERÃO



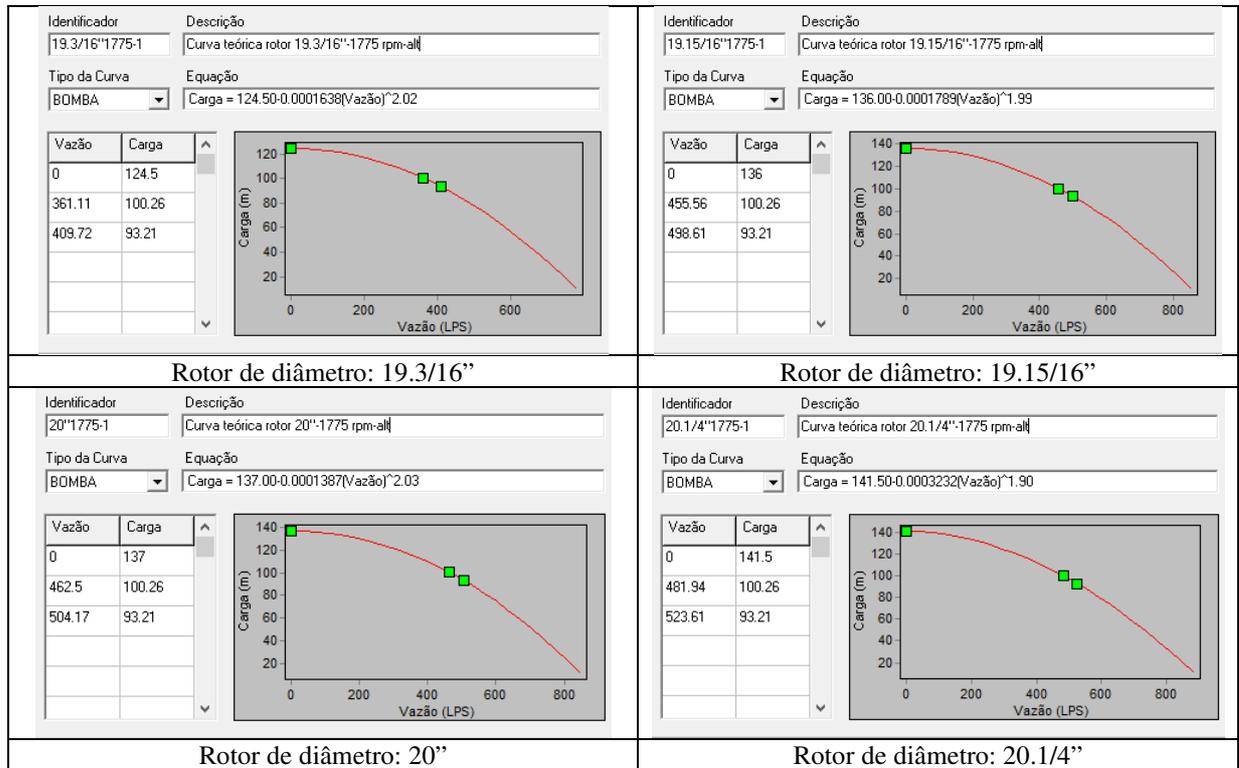
APÊNDICE (07) – PADRÃO DE CONSUMO - OUTONO



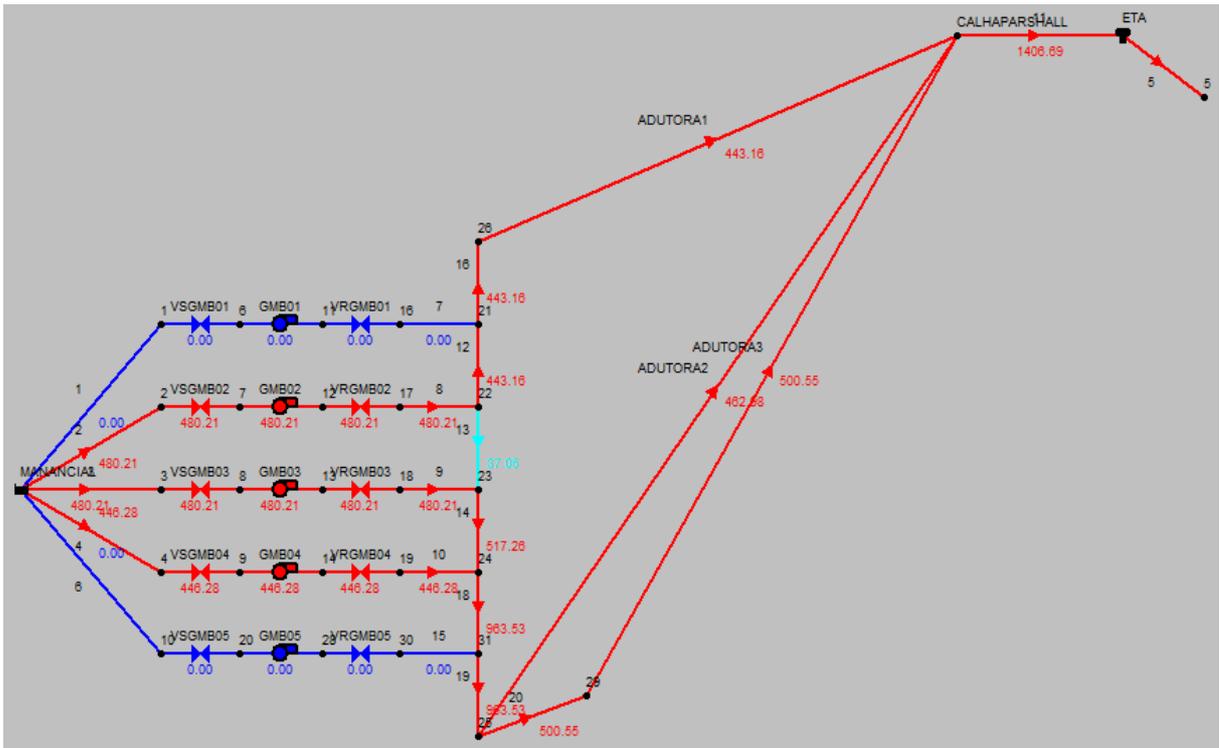
APÊNDICE (08) – PADRÃO DE CONSUMO - INVERNO



APÊNDICE (09) – CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS CONJUNTOS MOTOBOMBAS (FABRICANTE)



APÊNDICE (10) – MODELO GERADO PARA A SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS



APÊNDICE (12) – LISTA DE INTERVENÇÕES

Número da Melhoria	Categoria da Melhoria [Operacional/Estrutural]	Item na Dissertação	Descrição da Atividade	Investimento [RS]	Retorno Estimado [RS ano ⁻¹]	Retorno Estimado - Investimento [RS]	Retorno Estimado / Valor Pago de Energia ou Demanda [%]	Retorno Estimado [Categoria]	Já Implementada? [SIM/NÃO]
1	Operacional	5.7.1.2	Desacionamento do quarto equipamento no horário de ponta - [redução frente ao consumo total].	---	52.327,00	52.327,00	0,96	Consumo	Sim
2	Operacional	5.7.1.2	Alteração da demanda contratada no horário de ponta de 2.150 kW para 1.750 kW - [redução frente apenas à demanda contratada no horário de ponta].	---	201.312,00	201.312,00	18,60	Demanda	Não
3	Operacional	5.7.2.1.1	Sistema supervisorio: operação utilizando o modelo do software EPANET e tendências históricas - Apêndices (05) ao (08) - [redução frente ao consumo total].	---	272.817,52	272.817,52	5,03	Consumo	Não
4	Operacional	5.7.2.1.2	Sequenciamento de grupos: escolha otimizada dos GMB's para as combinações mais eficientes (dois e três equipamentos em paralelo) - [redução frente ao consumo total].	---	156.728,52	156.728,52	2,89	Consumo	Sim
5	Operacional	5.7.2.1.2	BEP, medido em campo: conserto da válvula de sucção do GMB 01 e a usinagem do rotor da bomba número 03, diminuiu em 131 kW para a condição de quatro equipamentos acionados em paralelo (50,50 %) - [redução frente ao consumo total].	2.000,00	186.827,17	184.827,17	3,44	Consumo	Sim
6	Estrutural	5.7.2.2.2	BEP, simulado EPANET: alterações do diâmetro dos rotores (todos 19.3/16"), limpeza das adutoras, substituição das succões (de 400 mm para 700 mm) e alterações da rotação do GMB 04, impactam em redução de 194,56 kW (sequenciamento de três grupos em paralelo) e 169,43 kW (sequenciamento de quatro grupos em paralelo) - [redução frente ao consumo total].	289.036,23	449.685,45	160.649,22	8,28	Consumo	Não
7	Estrutural	5.7.2.2.2	Alteração da demanda contratada no horário de ponta e fora de ponta de 2.150 kW para 1.955,44 kW (fora ponta) e 1.980,57 (ponta), em função das ações estruturais - [redução frente à demanda contratada no horário de ponta e no fora de ponta - demanda total].	---	132.455,42	132.455,42	8,26	Demanda	Não
Total:				291.036,23	1.452.153,08	1.161.116,85			